

117

2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

CALCULO DE LA ALTURA
DE LA OLA Y
PROFUNDIDAD ROMPIENTES

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS PROFESIONAL

INGENIERIA CIVIL

JAVIER OSNAYA ROMERO



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 está 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.

INDICE

1. INTRODUCCION

2. OLEAJE ROMPIENTE

2.1 Antecedentes	3
2.1.1 Clasificación de las olas	5
2.2 Teoría lineal del oleaje	7
2.3 Modificaciones del oleaje	8
2.3.1 Refracción del oleaje	11
2.3.2 Difracción del oleaje	11
2.3.3 Reflexión del oleaje	12
2.4 Rompiente de la ola	13
2.4.1 Ruptura de la ola	14
2.4.2 Celeridad y altura límite de la ola rompiente	21
2.5 Clasificación del oleaje rompiente	23
2.6 Efectos de la rompiente del oleaje	25
2.6.1 Presiones de ola rota	25
2.6.2 Corrientes producidas por el oleaje	27
2.6.3 Transporte de sedimentos bajo la acción del oleaje rompiente	31
2.6.4 Oleaje rompiente sobre el fondo	32

3 CRITERIOS PARA OBTENER LA ALTURA Y PROFUNDIDAD ROMPIENTE

3.1 Introducción	36
3.2 Altura rompiente en aguas profundas	38
3.2.1 Criterio de Michell	38
3.3 Altura y profundidad de rompiente en aguas bajas	38
3.3.1 Método de la teoría de la onda solitaria	38

3.3.2	Método de Iversen	40
3.3.3	Método de Goda	41
3.3.4	Determinación de la rompiente sobre fondo con pendiente uniforme	44
3.4	Oleaje residual	46
3.5	Criterio de Galvin para obtener la condición de oleaje incidente sobre una estructura	47
3.6	Criterio para determinar la altura rompiente cuando es afectada por la presencia de estructuras	49
4.	COMPROBACION EXPERIMENTAL	
4.1	Introducción	54
4.2	Descripción de las instalaciones	56
4.3	Descripción del equipo de medición	56
4.4	Descripción de los ensayos	56
4.5	Análisis de los ensayos	57
4.5.1	Análisis de los resultados método de Goda	61
4.5.2	Análisis de los valores experimentales por el método de Iversen	63
4.5.3	Análisis de los datos con las fórmulas basadas en la teoría de la onda solitaria	64
4.5.4	Análisis de las mediciones con pendientes $m = 75$ y $m = 100$	65
4.5.5	Estimación de la altura y profundidad rompientes	66
4.6	Mediciones en modelo con batimetría no uniforme	69
4.6.1	Análisis de los datos para cada uno de los métodos vistos	70
5.	APLICACIONES	
6.	CONCLUSIONES	

1 INTRODUCCION

En ingeniería se consideran los efectos sobre las obras civiles de los fenómenos naturales.

En el diseño y operación de algunas estructuras marítimas es necesario conocer las condiciones a las que estarán sujetas por la acción de las olas.

Tal es el caso de las escolleras que sirven para la protección de un recinto portuario contra la acción directa del oleaje o bien, que se usan para evitar la entrada de sedimentos a ciertas áreas, dada su importancia.

Sobre el oleaje se han realizado diversos estudios con el fin de entender su hidrodinámica así como para disponer de modelos matemáticos que lo representen.

En este trabajo se estudia la rompiente del oleaje, se presentan algunos métodos para obtener la altura de la ola al romper. Se realizan varias aplicaciones y se incluye un análisis

experimental.

En el capítulo 2 se hace una descripción de los diferentes parámetros y conceptos más utilizados en el análisis del oleaje al romper, así como un resumen de los tipos de olas, su rompiente, y efectos provocados por la misma en la playa.

En el capítulo 3 se trata el comportamiento del oleaje rompiente y métodos para su cálculo.

En el capítulo 4 se plantea la forma y condiciones en las cuales se realizó una serie de experimentos, la descripción del equipo usado y se incluye la comparación de los resultados con valores obtenidos en laboratorio.

En el capítulo 5 se presenta una aplicación de los métodos de este trabajo.

En el capítulo 6 se hacen las conclusiones de los resultados de los métodos y de su comparación con los valores experimentales.

2. OLAJE ROMPIENTE

2.1 Antecedentes

Se denomina oleaje a la variación en espacio y tiempo de la superficie libre del agua perdiendo su la apariencia horizontal para dar lugar a un perfil con elevaciones diferentes. El oleaje puede ser provocado por viento, choque de corrientes, erupciones volcánicas, etc.

Una manera simplificada de representar al oleaje es mediante una función senoidal y de ella se distinguen las siguientes características.

- Cresta, Valle .- En el perfil de un oleaje se observan elevaciones máxima y mínima; a la primera se le denomina cresta y la segunda valle.

- Longitud (L) .- La distancia horizontal que existe entre dos crestas o dos valles consecutivos. Se mide en sentido horizontal perpendicularmente a la línea de la cresta.
- Altura (H) .- La distancia vertical entre un valle y una cresta.
- Período (T) .- Es el intervalo de tiempo entre dos crestas ó dos valles pasando por un punto fijo.
- Celeridad (C) .- La velocidad de desplazamiento de la ola.
- Amplitud (a) .- La distancia vertical entre la cresta y el nivel medio de reposo.
- Profundidad .- (d) La distancia vertical entre el fondo y el nivel medio de reposo.
- k .- Se le denomina número de la onda y es igual a $2\pi/L$.
- σ .- Se denomina frecuencia angular de la onda y es igual a $2\pi/T$

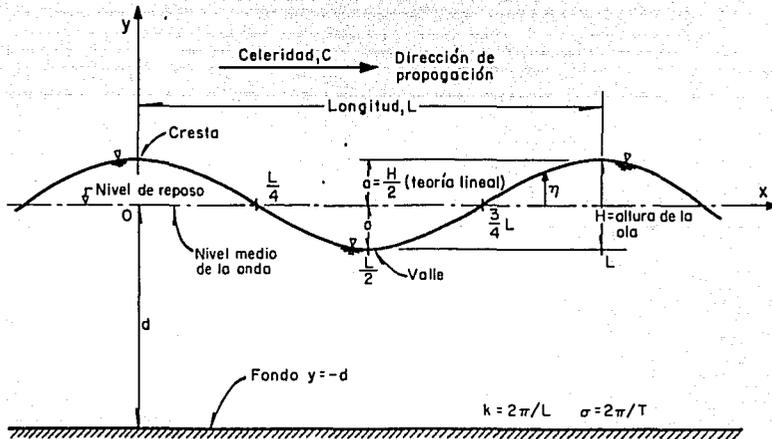


Fig 2.1 Definición de variables que intervienen en una onda

2.1.1 Clasificación de las olas.

Si un observador se coloca en la orilla de la playa apreciará que arriban ondas de diferentes tamaños y períodos; si permanece un lapso grande notará que el nivel medio de reposo del mar varía en forma periódica teniéndose lo que se conoce como onda de marea. Esta onda es generada por fuerzas de atracción gravitacional, en tanto que las ondas de períodos cortos tienen su origen en fuerzas eólicas.

Para su estudio las ondas se han clasificado desde varios puntos de vista, entre los que están:

a) Fuerzas generadoras del oleaje

- Libres.- Son aquellas en las cuales no se requiere la acción de la fuerza generadora para su propagación.

- Forzadas.- Son aquellas que requieren de la acción de la fuerza generadora para su propagación.

b) Movimiento

- Progresivas.- Las crestas o valles presentan desplazamiento horizontal.
- Estacionarias.- Las crestas o valles tienen sólo un desplazamiento vertical

c) Período (según Munk, ref 1) según el período se tiene el cuadro siguiente

Nombre de la ola	Período (s)	fuerza generadora	fuerza amortiguadora.
Capilares	0.0-0.1	viento	tensión superficial
Ultragravedad	0.1-1.0	viento	tensión superficial y gravedad
Gravedad	1.0-30.0	viento	gravedad
Infragravedad	30.0-300.0	viento	gravedad y fuerza de Coriolis
Largo período	300.0-86400.0	sismos, derrumbes, atracción sol y luna	fuerza de Coriolis

d) Profundidad relativa

Considera la relación de longitud de la onda entre las profundidades de la onda, con lo cual las ondas pueden ser :

- De aguas profundas.- cuando $L/d > 0.5$.
- Ondas de aguas bajas.- cuando $L/d < 1/20$.
- Onda en aguas intermedias.- cuando se encuentra entre los límites de aguas bajas y profundas.

2.2 Teoría lineal del oleaje

La teoría lineal o de Airy es una de las varias teorías para estudiar el oleaje. Esta teoría tiene una gran aplicación en los casos prácticos. Sus hipótesis de partida son las siguientes

- a) El fluido es homogéneo e incompresible por lo tanto la densidad (ρ) es constante.
- b) Se desprecia la tensión superficial.
- c) Se desprecia el efecto de Coriolis.
- d) La presión en la superficie libre es uniforme y constante.
- e) Se desprecia la viscosidad del agua.
- f) La onda no está relacionada con ningún otro movimiento del agua.
- g) El fondo es horizontal, constante e impermeable. Esto implica que la velocidad vertical en el fondo es cero.
- h) La amplitud de la onda es pequeña con respecto a la profundidad y es invariable en el tiempo y el espacio ($H \ll d$; H es constante.).
- i) Las ondas son bidimensionales en un plano vertical (x, z).

En las figs. 2.2, 2.3, 2.4, se presentan algunas variables

utilizadas para describir las características de una onda y en la tabla 2.1 algunas de las fórmulas de la teoría lineal. En la ref 4 se puede consultar su fundamento teórico y su deducción.

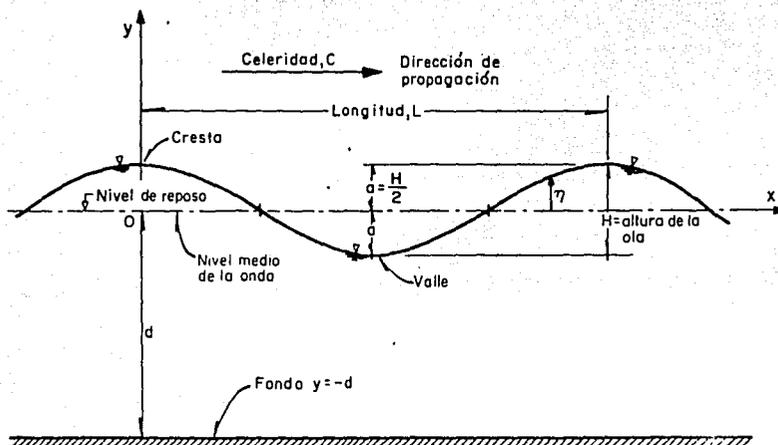


Fig 2.2 Onda senoidal progresiva

Cuando la amplitud del oleaje ya no es tan pequeña respecto a la longitud, para representar adecuadamente al oleaje es necesario incluir correcciones en las ecuaciones fundamentales de la teoría lineal o bien plantear otro enfoque. Esto último, da lugar a teorías de oleaje de amplitud finita como las de Stokes, Cnoidal y Trocoidal, (Ref 1).

2.3 Modificaciones del oleaje

La formación de las olas generalmente sucede en aguas profundas. Las olas se desplazan hacia la zona de aguas bajas y en cierta profundidad cambian bruscamente de forma. Durante éste recorrido se pueden encontrar con obstáculos naturales (islas) o

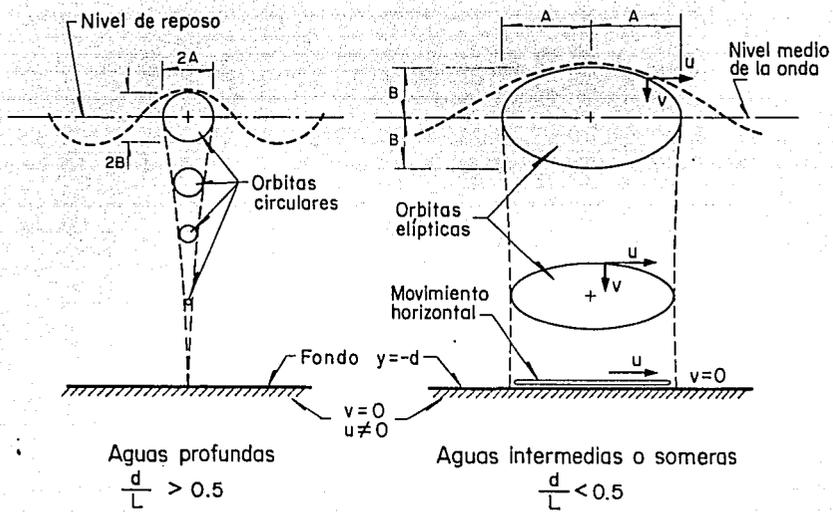


Fig. 2.3 Desplazamiento de las partículas de agua en las zonas de aguas profundas, medias y bajas (Ref. 2)

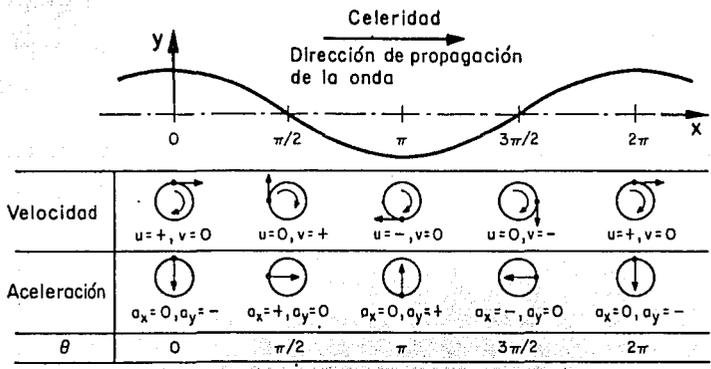


Fig. 2.4 Esquema de aceleraciones y velocidades.

Profundidad relativa	Agua somera*	Agua intermedia	Agua profunda**
	$\frac{d}{L} < \frac{1}{20}$	$\frac{1}{20} < \frac{d}{L} < \frac{1}{2}$	$\frac{d}{L} > \frac{1}{2}$
Periodo de la onda	T	T	T
Longitud de la onda	$L_b = T\sqrt{gd}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$L_s = \frac{gT^2}{2\pi}$
Celeridad de la onda	$C_b = \sqrt{gd}$	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$	$C_s = \frac{gT}{2\pi}$
Perfil de la superficie libre de la onda	$\eta_b = \frac{H_b}{2} \cos(k_b x - \omega_b t)$	$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$	$\eta_s = \frac{H_s}{2} \cos(k_s x - \omega_s t)$
Velocidades orbitales de las partículas			
a) horizontal	$u_b = \frac{C_b}{L_b} \eta_b$	$u = \frac{H}{2} \frac{\cosh k(d-y)}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t)$	$u_s = \frac{H_s}{2} \frac{e^{k(d-y)}}{e^{kd}} \cos(k_s x - \omega_s t)$
b) vertical	$v_b = \frac{H_b}{T} \left(\frac{d-y}{d}\right) \sin(k_b x - \omega_b t)$	$v = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(d-y)}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t)$	$v_s = \frac{H_s}{2} \frac{e^{k(d-y)}}{e^{kd}} \sin(k_s x - \omega_s t)$
Desplazamientos orbitales de las partículas			
a) horizontal	$\xi_b = \frac{H_b L_b}{4\pi d} \sin(k_b x - \omega_b t)$	$\xi = -\frac{H}{2} \frac{\cosh k(d-y)}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t)$	$\xi_s = -\frac{H_s}{2} \frac{e^{k(d-y)}}{e^{kd}} \sin(k_s x - \omega_s t)$
b) vertical	$\zeta_b = \frac{H_b}{2} \left(\frac{d-y}{d}\right) \cos(k_b x - \omega_b t)$	$\zeta = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(d-y)}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t)$	$\zeta_s = \frac{H_s}{2} \frac{e^{k(d-y)}}{e^{kd}} \cos(k_s x - \omega_s t)$
Movimiento orbital de las partículas			
a) Lagrange	$\left[\frac{-(\xi)^2}{\left(\frac{H_b}{2}\right)^2} + \left[\frac{(\zeta)^2}{\left(\frac{H_b}{2}\right)^2} \right] \right]^{1/2} = 1$	$\left[\frac{(\xi)^2}{\left[\frac{H}{2} \frac{\cosh k(d-y)}{\sinh(kd)} \right]^2} + \left[\frac{(\zeta)^2}{\left[\frac{H}{2} \frac{\sinh k(d-y)}{\sinh(kd)} \right]^2} \right] \right]^{1/2} = 1$	$(\xi)^2 + (\zeta)^2 = \frac{H_s}{2} e^{2k(d-y)}$
Distribución de presiones	$p_b = -\gamma y + \frac{\gamma H_b}{2} \cos(k_b x - \omega_b t)$	$p = -\gamma y + \frac{\gamma H}{2} \frac{\cosh k(d-y)}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t)$	$p_s = -\gamma y + \frac{\gamma H_s}{2} e^{k(d-y)} \cos(k_s x - \omega_s t)$
Energía de la onda	$C_b = \frac{\gamma H_b}{8} L_b$	$C = \frac{\gamma H^2}{8} L$	$C_s = \frac{\gamma H_s^2}{8} L_s$
Potencia de la onda	$P_b = \frac{\gamma H_b^2}{8} C_b$	$P = \frac{\gamma H^2}{8} C \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$	$P_s = \frac{\gamma H_s^2}{16} C_s$
Celeridad de grupo	$C_{gb} = C_b$	$C_g = \frac{1}{2} C \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right]$	$C_{gs} = \frac{1}{2} C_s$

Tabla 2.1 Resumen de las fórmulas de la teoría lineal o Airy (Ref. 2).

artificiales (escolleras), además de que la disminución de la profundidad provoca modificaciones en sus características.

Las principales modificaciones que sufre la ola son conocidas como refracción, difracción, y reflexión. La refracción es producida por la disminución de la profundidad; la difracción se presenta cuando el oleaje encuentra un obstáculo que lo hace cambiar de dirección y disminuir su altura ; la reflexión se presenta cuando el oleaje al enfrentar un obstáculo (acantilado, muros de muelles, etc.) cambia su dirección y sentido del avance.

2.3.1 Refracción del oleaje

El oleaje en su recorrido hacia la costa se encuentra con profundidades menores. Una de las alteraciones más importantes que sufre es la disminución de la celeridad. Esto origina que se modifique la dirección en la línea de crestas del oleaje tendiendo a ser paralela a las curvas batimétricas. El cambio en la distancia entre las ortogonales origina que la energía del oleaje se altere y consecuentemente también la altura del oleaje.

2.3.2 Difracción del oleaje

La difracción del oleaje es una transferencia de energía de una zona a otra; se presenta cuando el avance del oleaje es interrumpido por un obstáculo. El obstáculo puede ser natural (islas) o artificial (rompeolas); las ondas se curvan hacia su alrededor y penetran atrás del obtáculo donde existe una zona protegida contra el oleaje presentándose una expansión lateral en ésta, (fig 2.5).

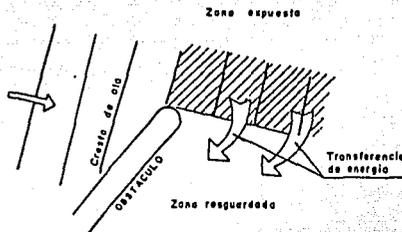


Fig 2.5 Difracción del oleaje

2.3.3 Reflexión del oleaje

Cuando el oleaje incide sobre una estructura o acantilado, se produce otro oleaje desde estos produciéndose el fenómeno de reflexión del oleaje.

Cuando el frente de ola incidente es paralelo al parámetro del obstáculo, y además, éste es vertical, plano y con rugosidad prácticamente despreciable, se produce una reflexión perfecta, la cual se manifiesta por la presencia de ondas estacionarias llamadas "clapotis".

El clapotis se forma por la sobreposición de dos ondas progresivas de igual altura y período que avanzan en sentido contrario. Esta onda estacionaria tiene la característica que duplica la altura de la ola incidente (fig 2.6).

Cuanto más inclinado sea el obstáculo, menor será la reflexión, lo mismo sucede cuando existe una pared menos rugosa o permeable.

El fenómeno de reflexión del oleaje es importante en el

diseño de un puerto, ya que las olas pueden ser reflejadas por muros y muelles y provocar un fenómeno de "resonancia" que es peligroso a las embarcaciones. Es recomendable, por lo tanto, que en un proyecto portuario, tratar de disminuirla hasta donde sea posible.

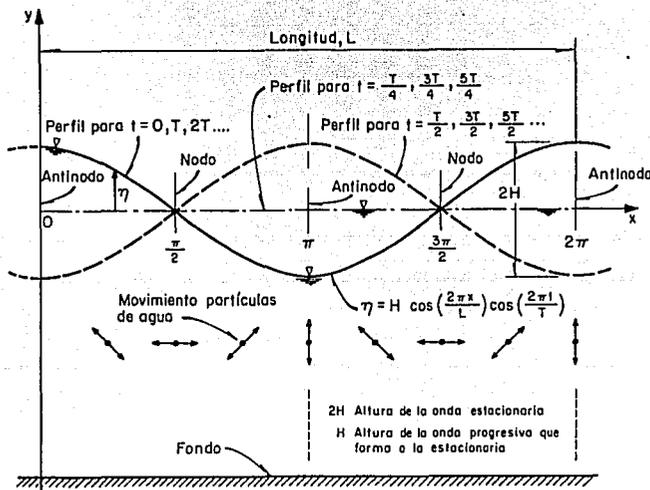


Fig 2.6 Onda estacionaria "clapotis"

2.4 Rompiente de la ola

En la zona de aguas profundas el oleaje se propaga casi sin sufrir modificaciones en sus características, al seguir avanzando hacia la costa e ir disminuyendo la profundidad; la ola se modifica. En la zona de aguas bajas, al reducirse la profundidad la ola sufrirá una alteración que le provocará un cambio brusco de su perfil y características, que se conoce como rompiente de la ola. En este proceso la ola disipa gran parte de su energía como resultado del desequilibrio en el movimiento de las partículas por lo que la ola pierde su configuración

ondulatoria transformándose en un movimiento caótico y espumante; otra parte de su energía es disipada por efecto de la fricción al deslizarse sobre la playa. Por ello se afirma que la rompiente se caracteriza por la presencia de turbulencia e inclusión de aire asociado a una gran disipación de energía.

2.4.1 Ruptura de la ola

Se refiere a una teoría de oleaje de amplitud finita llamada Trocoidal donde se considera al oleaje como un movimiento cilíndrico de generatrices horizontales, con trayectorias de las partículas de agua en un plano vertical (fig 2.7).

Cada partícula describe una órbita cerrada, para mayor generalidad, se supone elíptica alrededor de su centro de oscilación (x_0, z_0). Este es un movimiento de período $2T$ y longitud de onda $2L$.

De la construcción geométrica de la elipse se deduce que el movimiento que se atribuye a las partículas (fig 2.7) está definido por las ecuaciones

$$x = x_0 + O'N$$

$$z = z_0 - MO' \quad \text{referidas a la fig 2.7}$$

ó sea

$$x = x_0 + r \operatorname{sen} \varphi$$

$$z = z_0 - r' \operatorname{cos} \varphi$$

Si se adopta la fase φ cuyo origen es la vertical, la expresión

$\varphi = \pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_0}{L} \right)$ cumple las condiciones antes dichas de

período $2T$ y longitud de onda $2L$ el signo negativo del término $\pi \frac{x_0}{L}$ es necesario para que el movimiento sea positivo cuando la onda avanza hacia adelante.

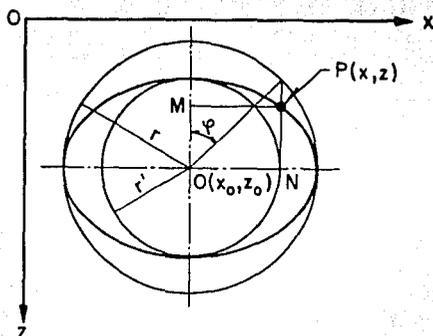


Fig 2.7

El fenómeno de la rotura de la ola se puede explicar con base en la teoría Trocoidal ya que interpreta el fenómeno con bastante aproximación.

Sea un perfil de ola instantáneo en el cual las trayectorias de las partículas de agua son elípticas o circulares (fig 2.9) Al analizar una partícula que se encuentra en la cresta del perfil (punto M), un instante de tiempo t después la cresta habrá recorrido una distancia igual a $C \times t$ (C es la celeridad de la onda), la partícula llega a la intersección del perfil original con el generado (punto 2) además irá descendiendo por la rama posterior del nuevo trocoide.

Este comportamiento se puede explicar pues en la mayoría de los casos la celeridad C es mayor que la velocidad orbital, por

lo que las partículas que se encuentran en la superficie se adelantan a las que están en la parte inferior.

Al ir acercándose a la playa la profundidad del fondo disminuye, y en consecuencia la celeridad es menor mientras que por otra parte la velocidad orbital aumenta.

Para determinar a la velocidad orbital V_s se emplea

$$V_s = \frac{\pi H k_1}{T}$$

donde

H - altura de la ola

T - período de la ola

k_1 - $\coth \pi d/L$

Por lo anterior se dice que en aguas profundas y en condiciones normales de propagación de olas se cumple que la celeridad es mayor que la velocidad orbital $C > V_s$, pero al ir avanzando y acercándose a la playa la profundidad disminuye, en tanto que la velocidad orbital prácticamente es la misma por lo que llegará un momento en que se igualen ambas. Cuando esto sucede las partículas que se encuentran en la cresta se mantienen en este sitio sin posibilidad de retorno, por lo que el perfil de la ola se alarga y se provoca la rotura de la ola .

Cuando la velocidad orbital es mayor que la celeridad en la cresta, las partículas de agua serán lanzadas hacia adelante sobre la rama anterior de la ola . De esta manera se inicia la rotura de la ola, siendo la cresta donde comienza el fenómeno ya que ahí

se tienen las velocidades orbitales más grandes. Esto se propaga hacia el fondo conforme se va cumpliendo la condición de rotura (fig 2.8)

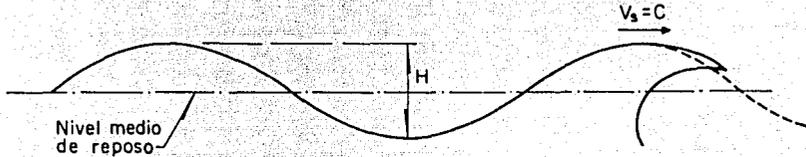


Fig 2.8 Condición rompiente

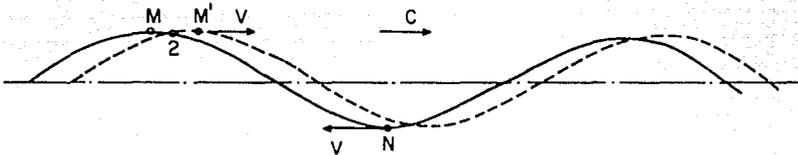


Fig 2.9 Perfil instantaneo

En el instante de inicio de rotura ($V_s = C$), se considera r_s como el semieje horizontal de la órbita superficial. La igualdad se expresa de la siguiente manera

$$V_s = \frac{\pi r_s}{T} = \frac{\pi H k_1}{T} = C$$

siendo

$$\pi r_s = \pi H k_1 = C \times T = L$$

de donde se deduce la condición de rotura como $\frac{\pi H k_1}{L} = 1$

Esto último supone que el perfil superficial trocoidal pasa a

ser cicloidal (fig 2.10) puesto que el radio de la órbita es $R = \frac{L}{\pi}$ y $\pi r_0 = L$ por lo que se tiene que $r_0 = R$ y la trocoide pasa a ser una cicloide.

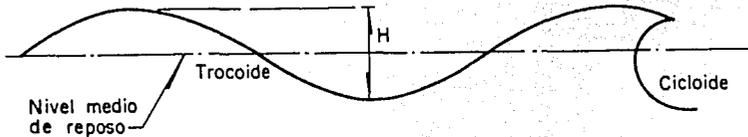


Fig 2.10 Paso de trocoide a cicloide

La máxima velocidad orbital se produce en la cresta de la ola al romper y esta dada por

$$V_s = C = \sqrt{\frac{g L}{\pi k_1}}$$

se sabe que en la rotura $L = \pi H k_1$

sustituyendo el valor de L en la ecuación de V_s se tiene que la velocidad V_s es:

$$V_s = \sqrt{\frac{g H \pi k_1}{\pi k_1}} = \sqrt{g H}$$

por lo tanto $V_s = \sqrt{g H}$

de lo anterior se observa que el valor de V_s es independiente de k_1 .

Al producirse la rompiente se presenta una sobre elevación del nivel medio dada por

$$\Delta H = \frac{\pi H^2 k_1}{2L}$$

Si se sustituye la condición de rotura $L = \pi H k_1$ en S_H se tiene que la sobre elevación es

$$S_H = \frac{\pi^2 H^2 k_1}{2 \pi H k_1} = \frac{H}{2}$$

como se puede observar también es independiente del valor de k_1 .

Al dibujar los valores de k_1 contra d/H se puede estudiar la profundidad a la que rompen las olas. La grafica se refiere a sus asintotas para mayor claridad (fig 2.11).

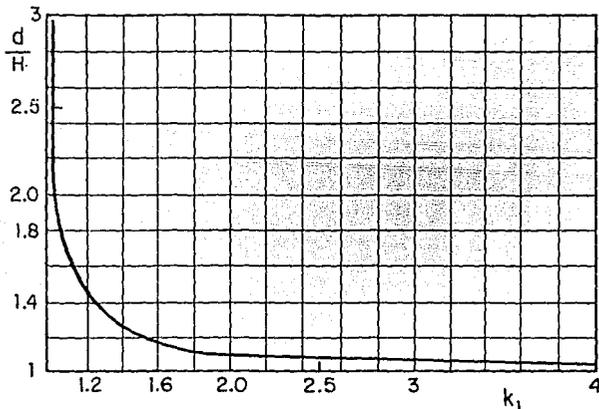


Fig 2.11 Curva de rotura de las olas

Si consideramos el valor de $k_1 = 1$ se tiene $\text{Coth } d/H = 1$, o sea $d/H = \alpha$, que indica aguas profundas, las partículas presentan un movimiento de órbitas circulares. Lo que indica que la ola puede romper para valores muy grandes de d/H incluso en altamar provocandose lo que se conoce como "mar aborregado" debido a la acción del viento que actúa sobre las pequeñas olas que hace que la altura de la ola aumente y el perfil sea cicloidal llegandose

a producir la rotura.

Si se consideran las olas extraordinarias (producidas durante una tormenta). Se tiene que el valor de k_1 aumenta al disminuir la profundidad, (ver fig 2.11 para $d/H = 1$) con lo cual se produce la rotura. Este tipo de rotura hace que el fondo quede totalmente descubierto cuando llega el valle de la ola, cayendo la cresta de la ola directamente sobre el fondo; esto es característico en fondos con pendiente muy pronunciada como los taludes de las escolleras (fig 2.12)

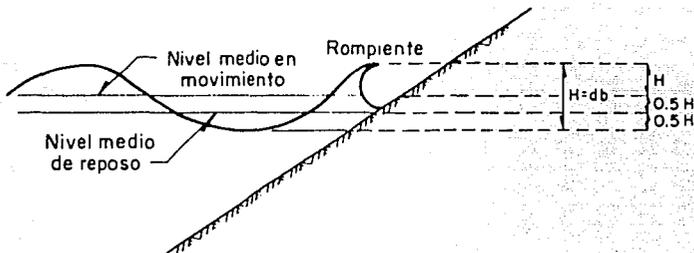


Fig 2.12 Rompiente en pendiente pronunciada

En el caso de un fondo con pendiente suave se produce la rompiente a una profundidad $d_r = 2H$ en condiciones de calma y $d_r = 2.5H$ de tormenta, ver fig 2.13.

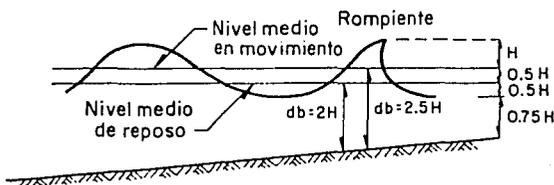


Fig 2.13 pendiente en fondo suave

2.4.2 Celeridad y altura límite de la ola rompiente

Una clase de onda de la teoría de amplitud finita, Cnoidal (ref 1) es la Onda Solitaria. Esta es una onda progresiva, que se desplaza prácticamente sobre la superficie del agua en reposo (fig 2.14). Al pasar la onda, las partículas se mueven en todo momento en la dirección del avance de ésta.

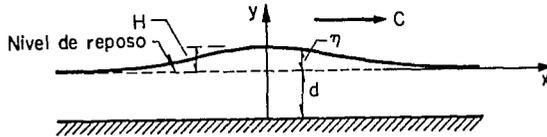


Fig 2.14 Perfil de la onda solitaria

De esta teoría se obtienen las siguientes expresiones que coinciden con los resultados experimentalmente obtenidos por Boussinesq (1872) y se completan con los de Mc Cowan (1892) y Laitone (1959) (ref 1).

a) Celeridad, se calcula con la expresión empírica de Russel en (1844) y comprobada analíticamente por Boussinesq (1872).

$$C = \sqrt{g (d+H)}$$

donde d - profundidad entre el nivel de reposo y el fondo

H - altura máxima de la cresta sobre el nivel de reposo

b) Altura límite

La onda solitaria puede alcanzar una altura máxima después de la cual rompe, o bien el fondo puede disminuir hasta que la onda, por su altura relativa se hace inestable.

$$H_{\max} = 0.78d$$

Según la pendiente del fondo se tienen estos valores de H_{\max} .

Pendiente	0	0.05	0.10	0.20
H_{\max}	0.83d	1.05d	1.19d	1.32d

La ola rompe cuando se dan las siguientes condiciones:

a) Por la relación de esbeltez $e = H/L$, (para aguas bajas $e = 0.10$ mientras que para aguas profundas es de $e = 0.142$); cuando se alcanza este valor la ola empezará su proceso de rompimiento; al incrementarse la relación de esbeltez, la velocidad de las partículas es mayor que la celeridad provocandose su rotura.

b) Por efecto del fondo :debido a la disminución del fondo, la ola disminuye su longitud y aumenta su altura originando la rotura. Con la expresión propuesta por Munk (1893) se puede determinar la altura y profundidad rompiente (ref 3) con

$$\frac{H_b}{H'_0} = \frac{1}{3.3(H'_0/L_0)^{1/3}}$$

donde $\frac{H_b}{H'_0} =$ índice de altura rompiente

$$\frac{d_b}{H_b} = 1.28$$

d_b profundidad rompiente

De lo anterior se concluye que una onda rompe cuando la profundidad del fondo donde se desplaza es del orden de 1.28 veces su altura.

2.5 Clasificación del oleaje rompiente

Se acepta que existen tres formas de rompiente del oleaje aunque algunos autores consideran una cuarta. Las cuales consisten en lo siguiente.

a) Spilling ó Continua. Se desarrolla gradualmente y presenta una superficie espumosa en una amplia longitud, no hay una línea de rompiente; generalmente se presenta en pendientes del orden de 1:50 (fig 2.15).

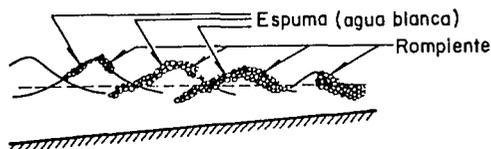


Fig 2.15 Rompiente continua

b) Plunging ó Rodante . Se presenta en forma drástica, curvandose la cresta hacia adelante. Se define claramente una zona de rompiente, observandose mucha espuma, turbulencia, y disipando gran cantidad de energía en distancias cortas. Además se llegan a formar olas más pequeñas que rompen cerca de la costa. Este tipo de rompiente generalmente se presenta en pendientes de 1:20 a 1:50 (fig 2.16).

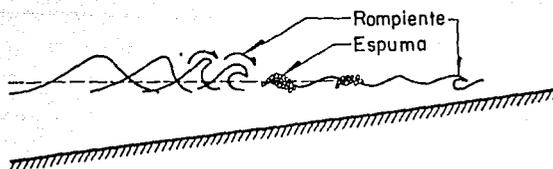


Fig 2.16 Rompiente rodante

c) Surging ó Súbita u Ondulante. Se caracteriza por desarrollarse en la parte superior de la cresta en forma semejante al tipo "plunging" con la particularidad que la base de ella llega a la playa antes de que se registre el rompimiento drástico, la disipación de la energía se presenta en forma de un frente de espuma, se define una zona de rompimiento casi en la línea de la costa; generalmente se presenta en fondos con pendientes mayores a 1:10 (fig 2.17).

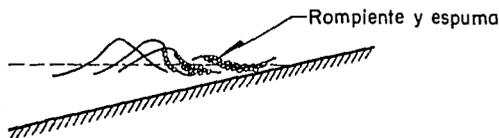


Fig 2.17 Rompiente ondulante

d) Collaping o colapso es una combinación ó transición entre las formas "plunging" y "surging" (fig 2.18).

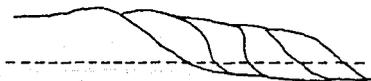


Fig 2.18 Rompiente colapso

De estudios realizados por Wiegel se obtuvieron los siguientes resultados:

Pendiente (m)	Súbita	Rodante	Continua
1:50	$e \leq 0.0039$	$0.0039 \leq e \leq 0.020$	$e \geq 0.020$
1:20	$e \leq 0.0079$	$0.0079 \leq e \leq 0.035$	$e \geq 0.035$
1:10	$e \leq 0.010$	$0.010 \leq e \leq 0.06$	$e \geq 0.060$

e - esbeltez

2.6 Efectos de la rompiente del oleaje

2.6.1 Presiones de la ola rota

a) Pendiente suave y pared vertical.

Se considera la rotura de la ola sobre una pared vertical en un fondo de pendiente suave. La rotura se produce por la franca asimetría de la ola que en parte avanza con mayor celeridad. Para pendientes suaves la profundidad de rotura es aproximadamente 2H.

La ola al romper ejerce una presión igual a

$$P_a = \frac{P}{\rho g} = \beta \frac{v^2}{2g}$$

donde

v - velocidad de las partículas

g - constante de la gravedad

β - coeficiente determinado experimentalmente entre 1.25 - 1.96, considerando como valor máximo 2

Si se toma a $\beta = 2$ se tendrá que el límite superior de

presión estará dado por

$$P_a = \frac{P}{\rho g} = \frac{2v^2}{2g} = \frac{v^2}{g}$$

Si la ola es una onda de traslación en su límite, en la rotura se tiene

$$C = v_h = \sqrt{gd}$$

$$P_a = \frac{P}{\rho g} = \frac{v^2}{2g} = \frac{gd}{g} = d$$

Por lo que la profundidad para la cresta es

$$d = 2.5H$$

con este valor la presión es

$$P_a = \frac{P}{\rho g} = 2.5H$$

que está representada en el punto A (fig 2.19).

Para determinar la máxima velocidad de caída de las partículas líquidas sobre el valle de la ola es necesario considerar tanto la velocidad horizontal v_h así como la vertical v_v con una altura $2H$ de la cresta que vierte adelante sobre el valle, es decir

$$v = \sqrt{v_h^2 + v_v^2} = \sqrt{g \cdot 2.5H + 2g \cdot 2H} = \sqrt{g \cdot 6.5H}$$

por lo que la expresión es

$$P_a = \frac{P}{\rho g} = \frac{v^2}{g} = 6.5H$$

Las presiones se representan en el punto B (fig 2.19), en el ángulo formado por la pared y el valle. Si se añade la ola tangente a la pared se puede llegar a la cota de reposo $3H$ localizada en el punto C (fig 2.19), es decir, a una altura igual a una vez y media la ola incidente ($1.5H$).

Con lo anterior se obtiene el diagrama envolvente de presiones dinámicas con un margen de seguridad. Además de las presiones dinámicas, habrá que considerar las correspondientes al paso de las olas, que son iguales a las hidrostáticas. El diagrama total es el presentado en la figura 2.19.

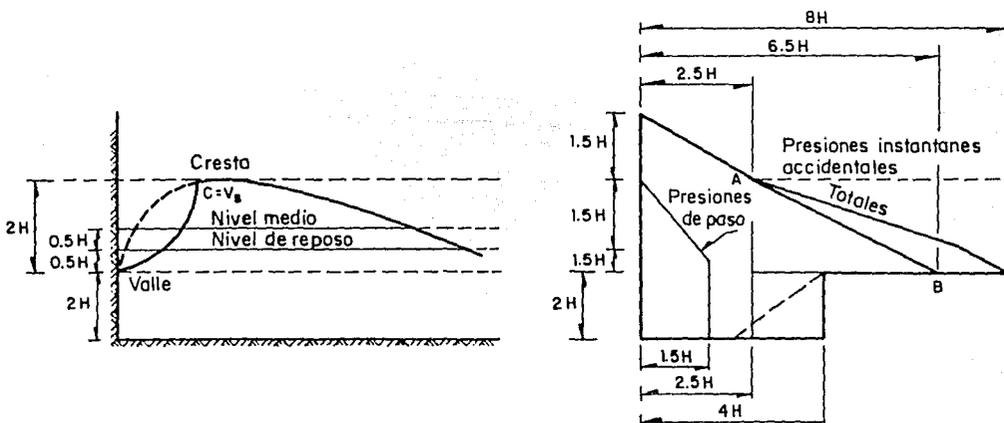


Fig 2.19 Diagrama de presiones de ola rota

2.6.2 Corrientes producidas por el oleaje

El oleaje en su recorrido hacia la costa provoca un movimiento del agua paralelo a éste. Al presentarse el rompimiento de la ola se provocan corrientes que contribuyen al movimiento del sedimento costero. Este tipo de corrientes pueden ser normales o paralelas a la costa.

- Las corrientes normales son generadas por la necesidad de desalojar el volumen de agua acumulado por la acción del oleaje sobre la playa.

Estas corrientes pueden tener dos formas; una es la de un flujo difuso que arranca desde el estrán (distancia horizontal comprendida entre el nivel de marea alta y el nivel de marea baja) desplazándose cerca del fondo hacia mar adentro a lo largo de toda la playa, ellas desaparecen aproximadamente en la línea de rompiente; este movimiento del agua es conocido como resaca.

Otra manifestación es en forma de chorro condensado que atraviesa la línea de rompiente para extenderse lateralmente como se puede observar en la fig 2.20.

Estas corrientes producen una clasificación de los sedimentos de las playas además de intervenir en el balance de las mismas.

-Corrientes paralelas. Generalmente el oleaje incide sobre la playa con una dirección no normal por lo que se forma una corriente paralela a la costa .

Esta corriente es la principal responsable del transporte del sedimento por la acción de la rotura de la ola.

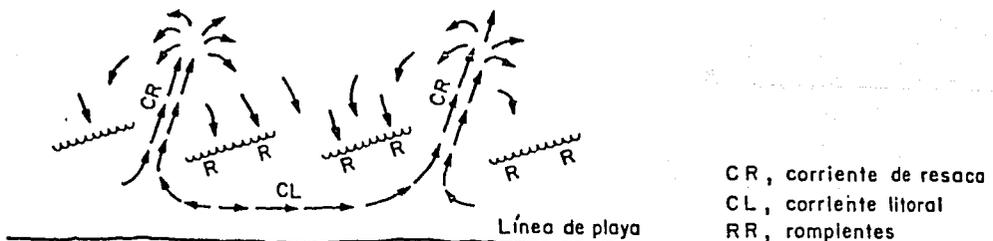


Fig 2.20 Corrientes de retorno

Escolleras

Son estructuras marítimas, con la finalidad de proteger del azolve las canales de navegación, para evitar la entrada de material a las obras de toma de centrales termoeléctricas ó nucleoeleótricas, de proteger de la acción del oleaje a las plantas de bombeo, etc.

Estas estructuras generalmente se construyen con base en elementos sueltos como rocas o elementos prefabricados de concreto, . En una escollera se pueden distinguir dos partes, el cuerpo ó tronco y el morro; el primero se considera desde la parte que se encuentra en la playa hasta aproximadamente 20m del extremo final, a está última parte es lo que se conoce como morro.

En un corte transversal de una escollera se tienen las siguientes partes :

coraza (capa primaria)

capa secundaria

núcleo

delantales

filtro y apoyo

los cuales se observan en la fig 2.21

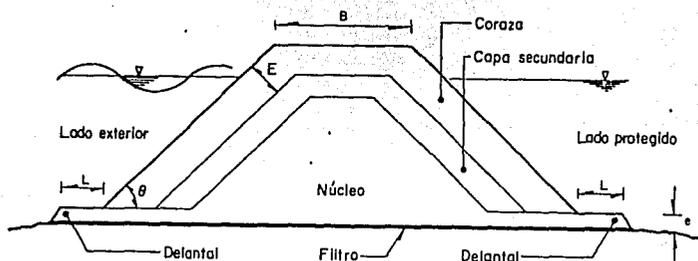


Fig 2.21 Sección transversal de una escollera

En la fig 2.21 se muestra una sección transversal de una escollera hecha con piedra y elementos artificiales. Como ahí puede verse, la escollera está constituida por una coraza de elementos de gran peso, W (en ton), para resistir el embate de las olas; estos elementos se apoyan en otros de transición con un peso igual o menor que $0.1 W$ que forman la capa secundaria y , finalmente, ellos se asientan en el núcleo de la estructura, contituido por elementos cuyo peso es inferior a $0.005 W$.

En la fig 2.21 se muestra cómo el material del núcleo se prolonga más allá de la base de la escollera; junto con el material de transición, para prevenir el efecto de la tubificación que se produce al retirarse la ola, después de haber golpeado sobre la estructura. Existen normas constructivas para fijar el espesor de las capas, pero en general, la coraza deberá contener, por lo menos, dos capas de elementos resistentes de peso W . También existen recomendaciones sobre la extensión de cada capa, y sobre el ancho de la corona B_c .

Sin embargo, en el diseño de una escollera es importante la determinación adecuada del peso, W , de los elementos de la coraza, en función del cual se definen los elementos de las otras partes de la estructura. Este peso depende de la altura H y tipo de la ola incidente, rompiente, o no rompiente. También el peso está condicionado por el talud, definido por el ángulo θ_m mostrado en la fig 2.21 así como por la ubicación de los elementos de la escollera, ya sea en el morro, o en el cuerpo. Intervienen también la densidad del material, piedra o concreto,

de los elementos y la densidad del agua del mar. En los últimos años se ha señalado que no obstante la naturaleza aleatoria del oleaje, durante los ciclones se producen trenes de olas altas que pueden dañar considerablemente a las escolleras, por lo cual se han propuesto criterios de cálculo que, pretenden tener en cuenta esta circunstancia. Es posible que así ocurran las cosas, aunque también debe tenerse en cuenta el hecho de que, durante los grandes oleajes, puede producirse la profundización del fondo, con lo cual el riesgo de deslizamiento de los elementos de la coraza es muy grande, de manera que aún con elementos adecuados para resistir el oleaje, los rompeolas podrían resultar severamente dañados. Tal vez este efecto nocivo puede amortiguarse con lo delantales.

2.6.3 Transporte de sedimentos bajo la acción del oleaje rompiente

El movimiento de sedimentos que se produce en la costa se presenta generalmente en dos zonas, antes y después de la rompiente. La primera se divide en zona de rompiente y zona de estrán (fig 2.22).

Bajo la acción del oleaje se tiene que los sedimentos presentan dos tipos de movimiento uno transversal y otro longitudinal.

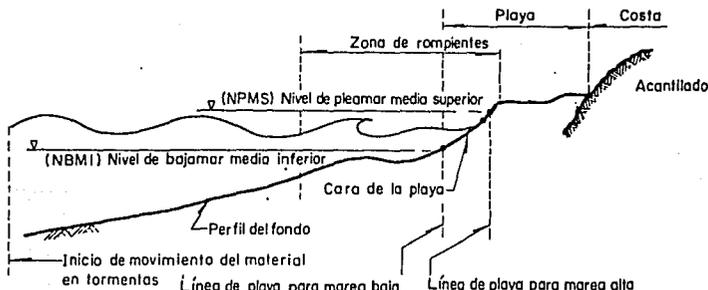


Fig 2.22 Zona de rompientes y estrán

Básicamente el transporte litoral se efectúa por estos efectos.

- La ola al ascender sobre la playa; transporta sedimentos y al descender por la línea de mayor pendiente provoca otro movimiento con lo cual se origina el transporte en diente de sierra.

Cuando las olas tienen una rompiente progresiva o de colapso, su energía se disipa en gran parte por la turbulencia, levantando arena del fondo poniendola en suspensión temporalmente. Una porción de masa líquida de la cresta de la ola se derrama enfrente de la costa, por lo que las capas superiores de la zona de rompiente transportan arena ; esta agua disipa su energía restante por efecto de escurrir sobre la playa. Debido a que el regreso del agua es menos turbulento, una menor cantidad de arena se regresa hacia el exterior de la playa en comparación de la que fue transportada hacia el interior creciendo literalmente la anteplaya. El flujo de regreso de agua y arena continua a lo largo del fondo hacia la barra en la zona exterior de la zona de rompientes completando de esta manera el circuito.

2.6.4 Oleaje rompiente sobre el fondo

La importancia de la pendiente de fondo radica en que con la disminución de la profundidad de la onda durante su propagación aumenta su altura. Para conocer la altura y profundidad rompiente se pueden utilizar las gráficas de las fig 2.24 y 2.25 para las cuales se utilizan las siguientes variables.

$$H'o = k_r H_o$$

k_r = coeficiente de refracción

H_o = altura de la ola en aguas profundas

$L_o = gT^2 / 2\pi$

T = período de la ola

m = pendiente del fondo, igual a $\tan \beta$ (fig 2.23)

Si se cuenta con H_o , k_r , T , β , m se puede calcular la profundidad de la rompiente d_b , y la altura de la rompiente H_b así como el tipo de rompiente esperada.

Wiegel (ref 2) realizó una formulación para definir la distancia de traslado de la rompiente para conocer la máxima altura a que puede romper frente a un rompeolas de profundidad d_o . La gráfica de la (fig 2.26) debe usarse tomando como una primera aproximación los resultados de la (fig 2.24) (obtención de $H'o$). La obtención de la máxima altura rompiente no toma en cuenta las características del sitio por lo que se debe involucrar la marea y de régimen de oleaje del lugar de proyecto.

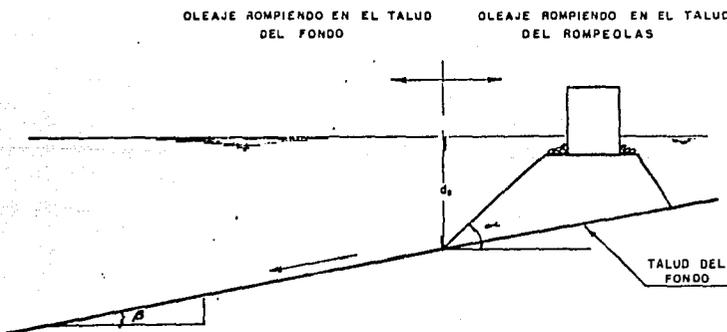


Fig. 2.23 Definición del talud de fondo y el talud del rompe olas (Ref 2).

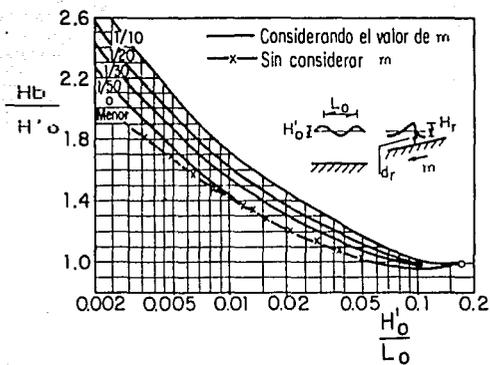


Fig. 2.24 Coeficiente de oleaje rompiente en db/Hb.

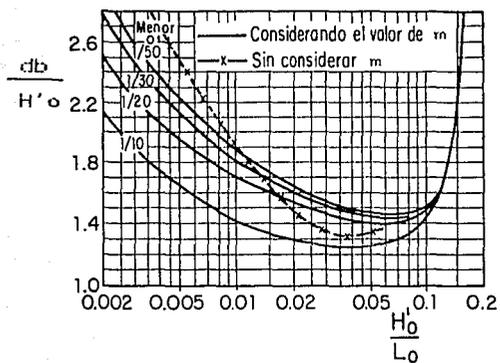


Fig 2.25 Coeficiente de oleaje rompiente db/H'o

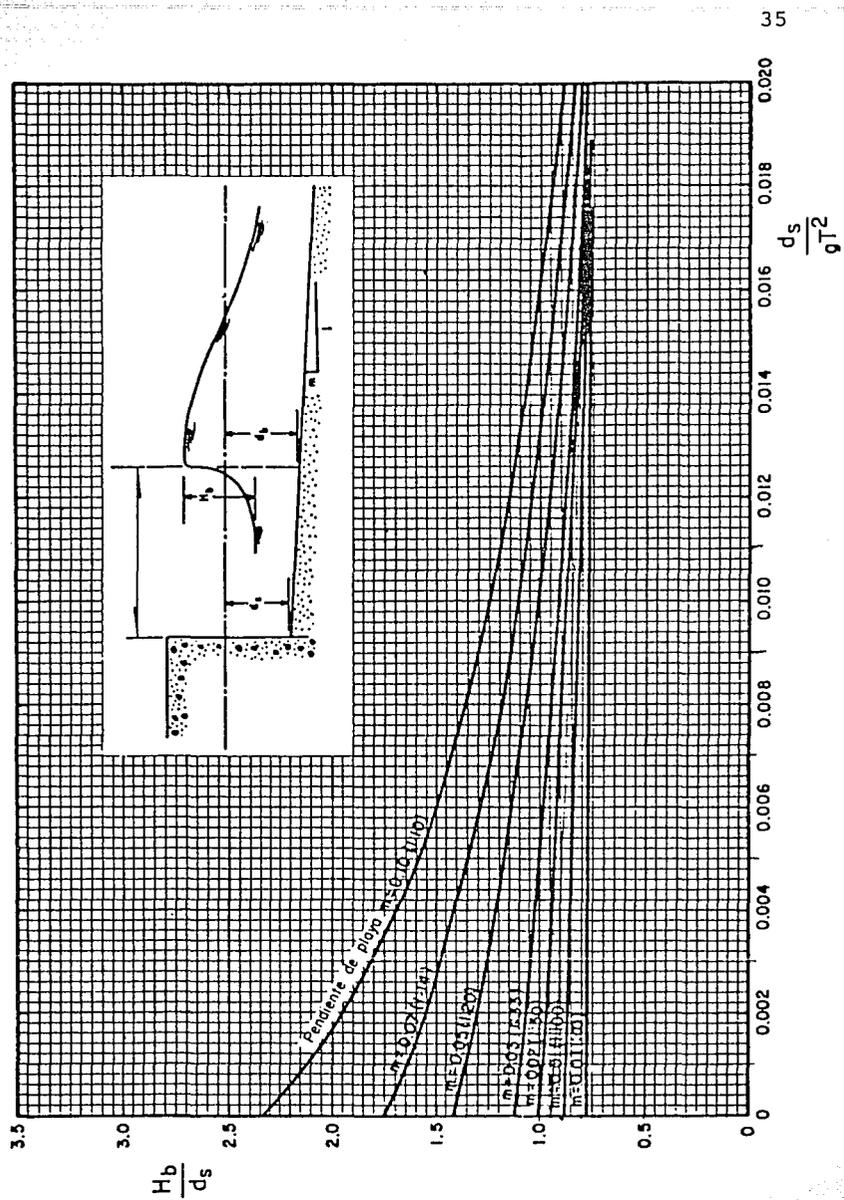


Fig. 2.26 Altura de ola rompiente sobre una estructura

3 CRITERIOS PARA OBTENER LA ALTURA Y PROFUNDIDAD ROMPIENTE

3.1 Introduccion.

Para conocer el oleaje que se presenta en los lugares de interés se han realizado diversos estudios encaminados a determinar de una manera análitica o experimental sus características.

Debido a que el oleaje es un fenómeno aleatorio y que depende generalmente de las condiciones metereológicas, el análisis matemático es muy complejo y por ello se han hecho aproximaciones experimentales.

se describen a continuación tres métodos para obtener la altura y profundidad rompiente de los cuales dos consideran la influencia de la pendiente de la playa.

En la fig 3.1 se observan las principales características de la ola en el instante en que rompe, como son la altura rompiente (H_b) y la profundidad rompiente (d_b)

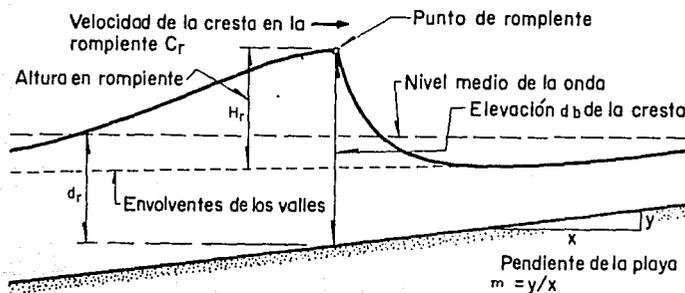


Fig 3.1 Términos utilizados para definir a la ola rompiente

La distancia vertical entre la altura de la cresta de la ola en la rompiente y el valle inmediato delante de ella se conoce como altura en rompiente (H_b). La distancia vertical bajo el punto rompiente, comprendida entre el fondo y el nivel medio de la onda se denomina profundidad rompiente (d_b).

En el fenómeno del oleaje tienen importancia la profundidad y distancia a la cual se presenta el rompimiento.

3.2 Altura rompiente en aguas profundas

3.2.1 Criterio de Michell (1893)

Para el caso de aguas profundas se ha determinado que la rotura está dada por la relación de esbeltez de la ola $e = H/L$.

Michell mediante investigaciones teóricas encontró que para cuando la relación de esbeltez rebasa el valor 0.142 la ola rompe, por lo tanto

$$\left[\frac{H}{L} \right]_{\max} = \frac{H_b}{L_o} = 0.142$$

donde la altura rompiente es H_b , y L_o es la longitud en aguas profundas que se calcula a partir de

$$L_o = \frac{T^2 g}{2\pi},$$

donde T es el período en s

g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 .

El rompimiento en aguas profundas esta generado principalmente por la acción del viento que es el que aumenta la altura de la ola con lo cual provoca la rotura.

3.3 Altura y profundidad de rompiente en aguas bajas

3.3.1 Método de la teoría de la onda Solitaria

De los primeros resultados que se obtuvieron para el cálculo

de la altura y profundidad rompiente esta la ecuación derivada de la Teoría de la Onda Solitaria, esta expresión fue obtenida por Munk (1893), en la cual relaciona la altura rompiente H_b , profundidad rompiente d_b , altura de la ola no reflejada $H'o$, y la longitud de la ola no reflejada en aguas profundas L_0 ; de la siguiente manera

$$\frac{H_b}{H'b} = \frac{1}{3.3 (H'o/L_0)^{1/3}}$$

obteniéndose $H'o$ como

$$H'o = \sqrt{b_0/b} H_0$$

donde

$$\sqrt{b_0/b} = k_r \text{ coeficiente de refracción}$$

b_0 separación entre ortogonales en aguas profundas (fig 3.2)

b separación entre ortogonales en la rompiente (fig 3.2)

H_0 altura de la ola en aguas profundas

Por lo anterior se puede decir que cuando la profundidad del fondo donde se desplaza la ola sea del orden de 1.28 veces su altura ocurrirá el rompimiento.

También Mc Cowan en sus estudios determinó que para cuando

$$H_b/d_b = 0.78 \text{ la ola rompe}$$

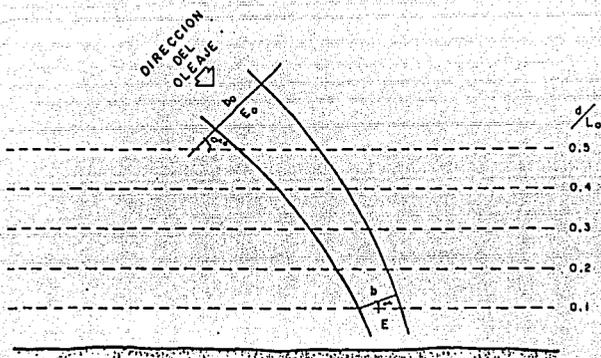


Fig 3.2 Líneas ortogonales

3.3.2 Método de Iversen

Posteriormente a los estudios realizados por Munk, Iversen, Galvin y Goda, entre otros, han determinado que la rotura de la ola no sólo depende de las relaciones H_b/H_0 y d_b/H_b , sino que también depende de la pendiente del fondo (m) y de la relación de esbeltez (e) de la ola incidente.

De los estudios realizados en laboratorio por Iversen (1953) demostraron que la pendiente del fondo interviene de manera determinante en el proceso de rompimiento de la ola, los resultados obtenidos fueron presentados en forma de gráficas (fig 3.3) a partir de las cuales se puede determinar tanto los valores de H_b y d_b por medio del siguiente procedimiento a partir de H_0 , T , L_0 , m , ∞ .

Para obtener H_b y d_b por este método, el cual es iterativo, se tiene la siguiente secuencia

- 1.- Con la altura H_0 y período T de la ola en aguas profundas se

obtiene H_b/T^2 en ft/s^2

2.- Con el valor calculado en el inciso anterior y la pendiente del fondo, m , se entra a la gráfica (fig 3.3) para obtener los valores de las relaciones $H_b/H_o = C_1$ y $db/H_b = C_2$

3.- Por otra parte se sabe que $H'_o = k_r H_o$, por lo que con las relaciones del paso anterior podemos formar el siguiente sistemas de ecuaciones el que se resolverá por iteraciones

$$H'_o = k_r H_o$$

$$H_b = C_1 H'_o$$

$$db = C_2 H_b$$

4.- Se supone un valor de k_r , y como H_o es conocida, con el sistema de ecuaciones del paso anterior es posible calcular los valores de H_b y db .

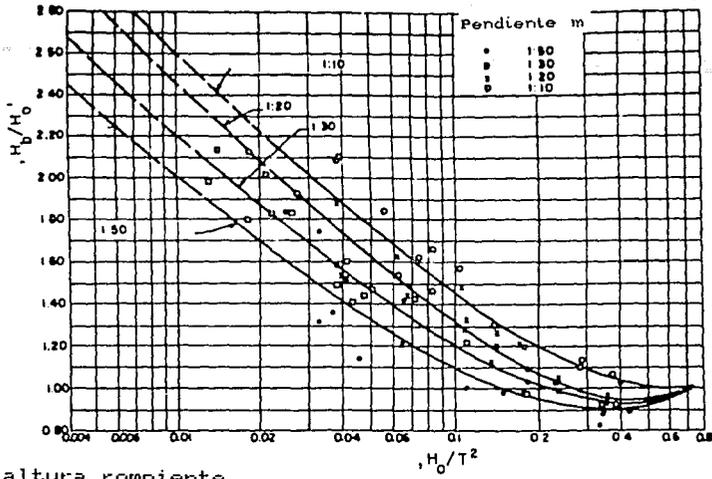
5.- Con la relación de db/L_o y el ángulo de incidencia del oleaje en aguas profundas respecto a la línea de playa y con ayuda de la (fig 3.4) se obtiene el valor de k_r .

Se comparan los valores de k_r , (el calculado en el paso anterior y el supuesto), si son iguales el proceso termina y los valores buscados son los calculados en el paso 3, en caso contrario se regresa al paso 3, utilizando el valor de k_r obtenido en el paso

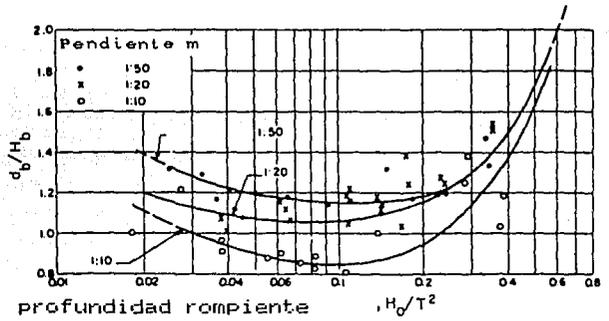
5

3.3.3 Método de Goda (1970)

Este método está basado en los experimentos realizados por Goda en 1970 de los cuales obtuvo relaciones empíricas de H_b/H'_o y H'_o/L_o para diversas pendientes de playa, con apoyo en estos resultados elaboró las curvas que se muestran en la fig 2.24 así como también se cuenta con relaciones del mismo tipo de las



a) altura rompiente



b) profundidad rompiente

Fig 3.3

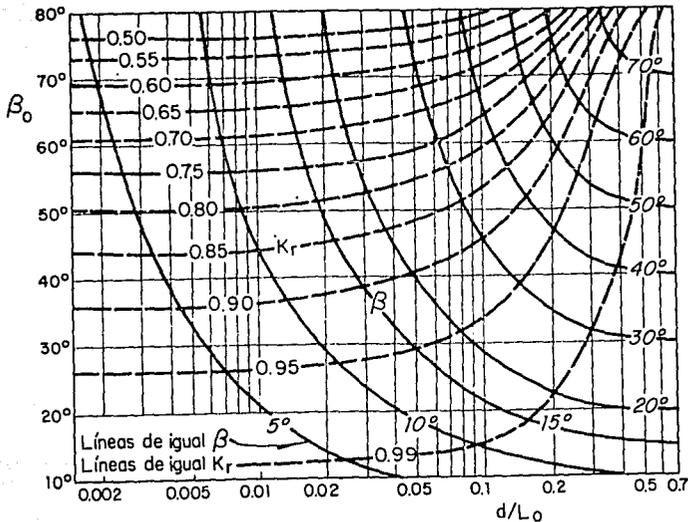


Fig. 3.4 Cambio en la dirección de la ola por refracción (K_r).

anteriores para db/H_b y H_b/gT^2 , las curvas que se muestran en la fig 2.25

Para las relaciones anteriores las variable tienen el siguiente significado

H_b - altura rompiente

$H'o$ - altura de la ola no reflejada en aguas profundas

Lo - longitud de la ola en aguas profundas

db - profundidad rompiente

T - período de la ola

g - aceleración debida a la gravedad

Con este método es posible calcular un valor máximo de la profundidad rompiente rango en el cual con seguridad romperá la ola, estos valores se calculan a partir de la fig 3.5 en la cual se encuentran dos tipos de curvas, una con los valores del parámetro α , y otra para β , con estos valores y multiplicando H_b por α se obtiene db_{max} y para β db_{min} .

De acuerdo a las curvas de las fig 2.24 y 2.25 se puede obtener la altura y la profundidad rompiente con el siguiente procedimiento, que es de tipo iterativo. Contando con datos Lo , Ho , T , m .

1.- Se supone el valor de k_r y se calcula $H'o = k_r Ho$ (se recomienda el valor entre 0.5-0.9)

2.- Con $H'o/Lo$, calculando $Lo = gT^2/2\pi$ y la pendiente del fondo m de la fig 2.24 se estima $H_b/H'o$, de esta última se obtiene H_b .

3.- Se calcula H_b/gT^2 con este valor y la pendiente del fondo m , de la fig 2.25 se estima db/H_b . De esta ecuación se obtiene db

4.- Considerando $d = db$ se estima el coeficiente de refracción

k_r , a partir de db/L_0 y el ángulo de incidencia del oleaje en aguas profundas (α_0) respecto a la línea de playa y con fig 3.4

5.- Se compara el valor de k_r del paso anterior, con el propuesto, si son diferentes se vuelve al paso 1 usando el valor de k_r obtenido en el paso anterior. De lo contrario los valores de H_b y db calculados en los pasos 2 y 3 respectivamente son los buscados

6.- Si es necesario conocer db_{max} y db_{min} será necesario la utilización de la fig 3.5 de la cual se obtendrán los valores de α y β en función de H_0/gT^2

3.3.4 Determinación de la rompiente sobre fondo con pendiente uniforme

Generalmente el fondo del mar no presenta una pendiente uniforme, por lo que para el cálculo de la altura H_b y la rompiente db de una ola se calcula con los métodos antes mencionados, pero cuando la pendiente del fondo es uniforme; para esta condición se utiliza el siguiente procedimiento.

- 1.- Se propone una altura rompiente H_b
- 2.- Se calcula H_b/T^2g , con este valor y la pendiente de fondo, m , y la fig 3.5 se obtiene db/H_b . De donde se despeja db .
- 3.- Con $d=db$ se estima el coeficiente de refracción y con la siguiente expresión

$$H'o = H_0 k_r$$

se obtiene $H'o$.

- 4.- Se calcula H_0/T^2g , con este valor y la pendiente de fondo, m , y con la fig 3.8 se obtiene $H_b/H'o$ de donde se despeja H_b .

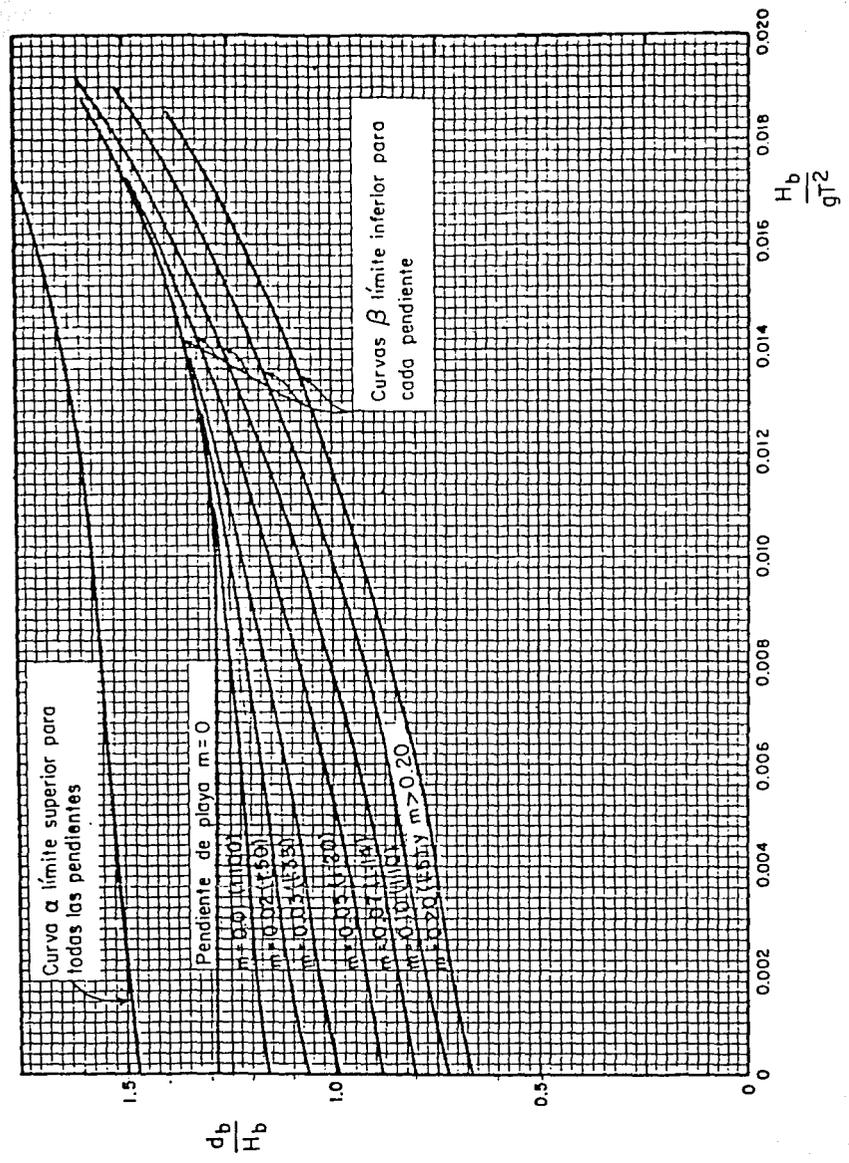


Fig 3.5 Profundidad en la rompiente, valor máximo y mínimo

5.- Se compara H_b con la propuesta en el paso 1 si son muy semejantes, entonces H_b es la altura rompiente, y el valor de db es el obtenido en el paso 2. En caso contrario se regresa al paso 1 con la H_b obtenida en el paso 4, repitiéndose el procedimiento.

3.4 Oleaje residual (surf zone)

La línea de rompiente divide a la zona de aguas bajas en dos una de ellas es la comprendida entre la batimétrica cero y la profundidad rompiente conocida como zona de oleaje residual.

En dicha zona el oleaje que ha perdido energía debido a la rompiente, disminuye su altura durante su recorrido hacia la línea de playa, esta disminución de la altura de la ola es principalmente producida por la pendiente del fondo. Entre las investigaciones que se han realizado a este respecto se encuentran las de Horikawa y Kuo quienes presentan sus resultados en forma de gráfica en la cual se pone de manifiesto la influencia de la pendiente del fondo en la variación de la altura de la ola. La gráfica puede observarse en la fig 3.6

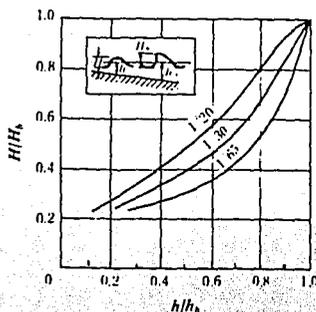


Fig 3.6 Cambio de la altura de la ola después de la pendiente

Otras investigaciones han demostrado que la relación de esbeltez de las olas influye también en la altura de la misma; sin embargo, el fenómeno no es tan sencillo como el que se observa en canales de laboratorio ya que en la realidad se ha notado que la ola rompe de acuerdo a la pendiente de fondo y forma olas de menor tamaño, las que rompen en puntos más cercanos a la costa, además el oleaje no es homogéneo por lo que la ola no romperá siempre en el mismo sitio, Por ello se dice que una ola rompe varias veces antes de que se disipe totalmente.

3.5 Criterio de Galvin para obtener la condición de oleaje incidente sobre una estructura

Los estudios realizados por Galvin determinaron una relación entre la distancia de recorrido de la rompiente y la altura de la ola rompiente (H_b). De los primeros resultados se deduce que una rompiente violenta se efectúa en una distancia cuya longitud es igual a 6 a 7 veces la altura de la ola en el punto que rompió.

Todas las estructuras cuya profundidad al pie de la misma se encuentre dentro de la distancias de recorrido de la rompiente estará sujeta precisamente a un oleaje rompiente o proceso de olas rompientes.

Estudios posteriores hechos por Galvin (1968-1969) demostrarón que existe una relación entre la distancias de recorrido de la rompiente X_p y la altura de la ola rompiente H_b dependiendo de la pendiente de la playa; dicha relación es la siguiente

$$X_p = \tau_p H_b = (4.00-9.25m)H_b$$

donde m - pendiente de la playa

$\tau_p = (4.00-9.25m)$ distancia de
caída adimensional (fig 3.7)

La relación adimensional d_b/H_b , varía con la pendiente de la playa m y a su vez la relación H_b/gT^2 esta variación es de acuerdo a la (fig 3.5). De los valores medidos experimentalmente de d_b/H_b se obtienen dos grupos de curvas, una es la de α contra d_b/H_b siendo esta la que representa el límite de los valores más altos observados; de donde se obtiene la relación de que $\alpha = (d_b/H_b)_{\max}$. El otro grupo de curvas es el formado por β contra d_b/H_b que nos representa el límite más bajo; por lo que tenemos la relación de $\beta = (d_b/H_b)_{\min}$. Estas relaciones son utilizadas en la secuencia de cálculo del método de Goda para la determinación de $d_{b_{\max}}$ y $d_{b_{\min}}$

Para determinar la altura y profundidad rompiente de una ola incidente conociendo T y H_o en aguas profundas el procedimiento será el siguiente.

1.- Se estima la altura rompiente H_b a partir de la (fig 3.8) y la relación H_o/L_o y la pendiente de fondo m

2.- Con H_b/gT^2 y la pendiente del fondo m de la (fig 2.25) se obtiene α y β , con estos dos parámetros es posible determinar $d_{b_{\max}}$ y $d_{b_{\min}}$ de acuerdo a las expresiones vistas anteriormente

3.- Si la profundidad d_s al pie de la estructura se encuentra dentro del rango de $d_{b_{\max}}$ y $d_{b_{\min}}$ la ola incidirá sobre la estructura en condición rompiente, en caso de no encontrarse dentro de dicho rango la ola incidirá en condición no rompiente o rota

4.- Si la ola incide en condición rompiente será necesario corregir la altura rompiente de la siguiente manera:

4.1 Se estima $H'o$ en la cercanía de la estructura y se hace

$$H'o = A$$

4.2 Se calcula d_b/gT . Con este valor y la pendiente de fondo m y con la (fig 2.26) se estima H_b/d_b de donde se puede obtener H_b .

Las características de la ola no son modificadas significativamente por la presencia de una estructura, generalmente la ola incidente romperá, cuando la profundidad sea ligeramente más grande que db_{min} . Por lo tanto una estructura podrá estar sujeta a las olas rompiendo directamente sobre ella, si la profundidad al pie de la estructura estuviera dentro del rango de db_{max} y db_{min}

3.6 Criterio para determinar la altura rompiente cuando es afectada por la presencia de estructuras

Cuando alguna playa se ve modificada por la presencia de alguna obra marítima, ésta modificará las condiciones de rompiente por lo que para obtener la altura y profundidad rompiente se utiliza el siguiente procedimiento

Si d_b es la profundidad al pie de la estructura

1.- Se estima $H'o$ en la cercanía de la estructura y se hace

$$H'o = A$$

2.- Se calcula d_b/gT^2 . Con este valor y la pendiente del fondo m de la (fig 2.26) se estima H_b/d_b , obteniéndose H_b

3.- Con h_b/gT^2 y la pendiente del fondo m de la (fig 3.9) se estima $H_b/H'o$

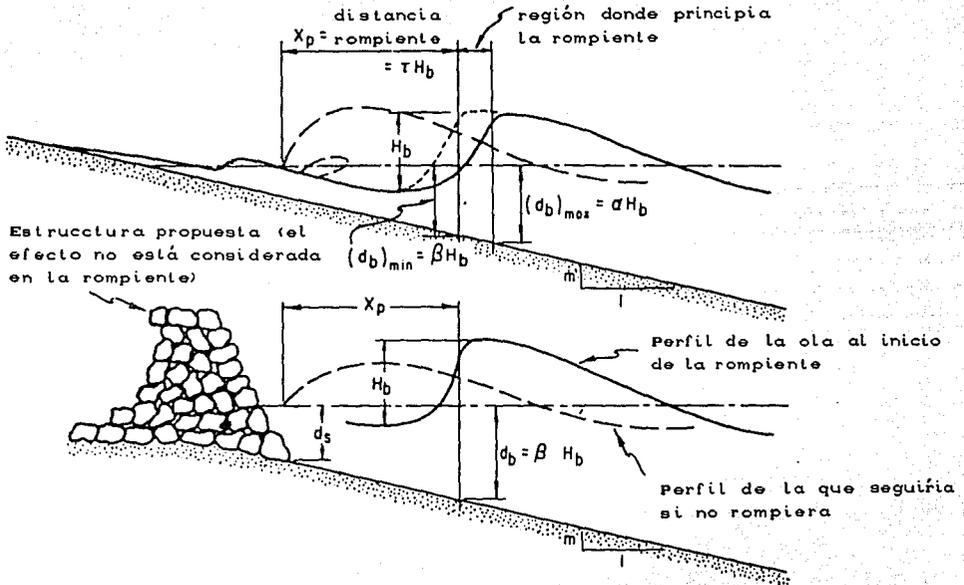


Fig 3.7 Definición de $d_{b \text{ máx}}$ y $d_{b \text{ mín}}$

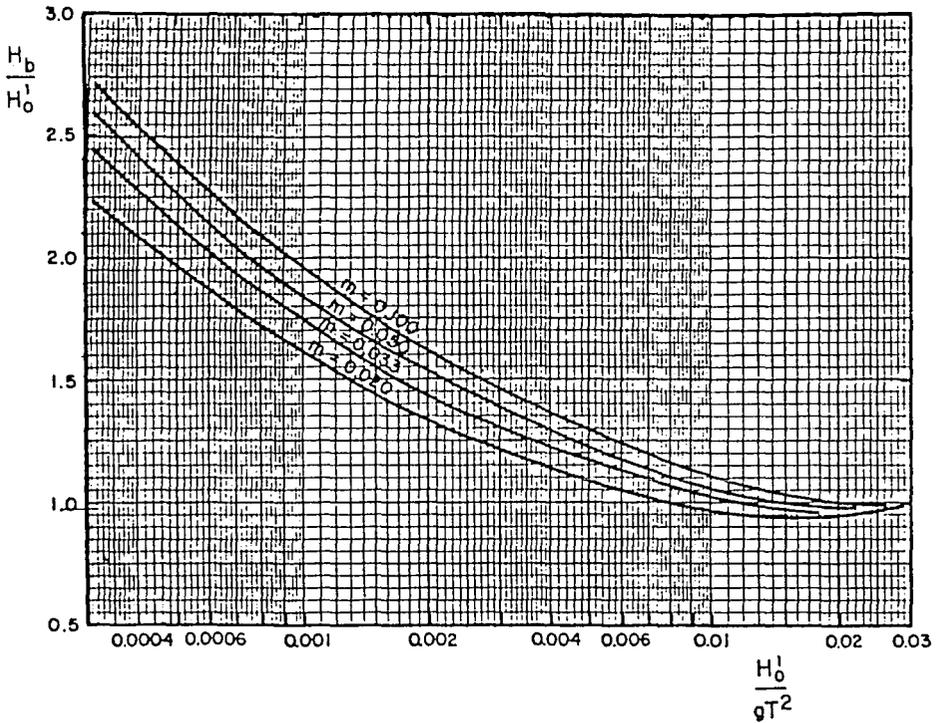


Fig 3.8 Altura de la ola rompiente en función de la pendiente de la playa y esbeltez de la ola

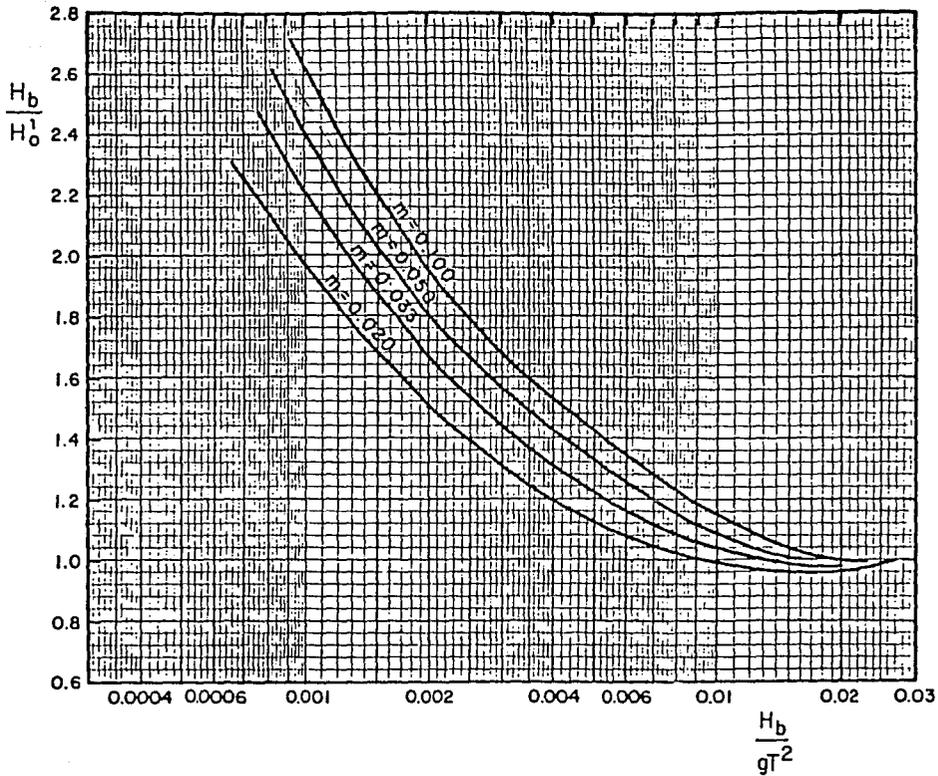


Fig 3.9 Relación entre el índice de ola rompiente, H_b/H'_0 y la esbeltez de la ola rompiente

4.- Se calcula $H'o$ del cociente $H_b/H'o$ obtenido en el paso 2 comparandola con la propuesta en el paso 1, si $A > H'o$ el oleaje rompe antes de llegar a la estructura, es decir no se entera de su presencia por lo que la altura y profundidad rompiente se puede determinar de acuerdo al criterio de Goda explicado anteriormente. Si $A < H'o$ ó $A \cong H'o$, la altura de la rompiente es la que se estima en el paso 2 y con la relación H_b/gT^2 y la pendiente del fondo m en la (fig 2.26) se obtiene la relación db/H_b de donde se encuentra db .

4. COMPROBACION EXPERIMENTAL

4.1 Introducción

La experimentación juega un papel muy importante en la ingeniería ya que a partir de ésta se han encontrado soluciones a diversos problemas. Dentro de la experimentación se encuentra la modelación matemática y física. La modelación es la reproducción de un determinado fenómeno que se desea conocer su comportamiento, esta reproducción se realiza por medio de ecuaciones en el caso de la modelación matemática; la modelación física reproduce las características del prototipo a escala. Ambas modelaciones tienen la finalidad de proporcionar la información necesaria para la solución del problema que originó dicha modelación.

Otro aspecto importante de la experimentación es el estudio de fenómenos en instalaciones de laboratorio con el objeto de encontrar alguna forma (ecuaciones, gráficas) con la que se pueda determinar el comportamiento del fenómeno a partir de parámetros

conocidos. Dentro de ese campo se han realizado diversos estudios encaminados a diferentes áreas de la ingeniería.

A continuación se trata un fenómeno el cual ha sido estudiado también por la experimentación. Este es el conocido como oleaje rompiente, la importancia de éste para la ingeniería radica principalmente en que en función del comportamiento del mismo y la forma de arribar a la costa se diseñan las obras apropiadas para protección de erosión de playas, así como la protección de puertos en los cuales se debe contar prácticamente con una calma total para que las embarcaciones puedan maniobrar con comodidad, estructuras de protección de este tipo reciben el nombre de rompeolas o escolleras y espigones; las primeras son estructuras que se encuentran paralelas o con alguna inclinación con respecto a la costa, las segundas son perpendiculares a las mismas.

El diseño de una estructura de este tipo está en función de la altura y profundidad a la cual rompe una ola, de ahí la importancia de conocer la evolución del oleaje desde que se localiza en aguas profundas hasta su arribo a la costa.

Los principales parámetros de interés son la altura con la cual rompe la ola y la profundidad a la cual ocurre.

Dentro de los estudios que se han realizado para conocer este fenómeno se encuentran los realizados por Goda, Iversen y el método derivado de la teoría de la onda solitaria. Con la finalidad de comprobar los métodos anteriores se realiza el presente trabajo.

A continuación se describirá la forma y las condiciones en las cuales se llevó a cabo la experimentación, así como la descripción de las instalaciones y el equipo utilizado.

4.2 Descripción de las instalaciones

Los ensayos se realizaron en un canal rectangular de pendiente variable, con generador de oleaje monocromático, brazo excéntrico para variación de la altura de la ola y un dispositivo que permite variar el periodo; Las características del canal son:

longitud	$l = 12\text{m}$
ancho	$b = 0.3\text{m}$
altura	$h = 0.5\text{m}$

para la medición de los niveles cuenta con un limnímetro de punta colocado sobre el canal, la alimentación del canal se realiza por un sistema de bombeo, el cual se muestra en la fig. 4.1 .

4.3 Descripción del equipo de medición

Para la medición de la altura de la ola no rompiente se utilizó un limnímetro de punta colocado en la parte lo más alejada posible del punto donde se ubicaba la rompiente. La medición de la ola rompiente se realizó filmando la ola con una cámara de cine. El marco de referencia para determinar la altura cuando fue proyectada la película consistió en una malla de 2cm de espaciamiento sobre mica transparente.

4.4 Descripción de los ensayos

Primeramente se determinaba una posición del excéntrico y una pendiente así como un período, con esto se ponía a funcionar el batidor (generador de olas). Para localizar el punto en el cual se presentaba la rompiente, se colocaba la malla sobre la pared del canal a fin de que al realizar la filmación y posteriormente

proyectarla fuera posible determinar la elevación de la cresta y del valle de la ola, y valuar la altura y profundidad rompiente; concluido lo anterior, se procedía a cambiar el período, conservando la posición del excéntrico y pendiente; este procedimiento se realizaba hasta completar cinco períodos diferentes, luego se modificaba la posición del excéntrico para repetir el mismo procedimiento citado anteriormente. Para lograr siete u ocho posiciones distintas, la rutina anterior se efectuó para tres pendientes (1:50, 1:75, 1:100).

4.5 Análisis de los ensayos

Como resultado de los ensayos se obtuvieron 116 mediciones, después de determinar la relación d/L se ubicaron en la zona de aguas intermedias, por lo que para realizar cálculos fue necesario la altura de la ola en aguas profundas para lo cual se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\frac{H}{H_o} = \left[\frac{L_o}{2nL} \left(\frac{b_o}{b} \right) \right]^{1/2} \quad \text{o} \quad \frac{H}{H_o} = k_s k_r \quad (4.1)$$

donde

k_s coeficiente de propagación en aguas someras

k_r coeficiente de refracción

H_o altura de la ola en aguas profundas

H altura de la ola en el sitio de interés

$$k_s = \left[\frac{L_o}{2nL} \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(4\pi d/L)}{\sinh(4\pi d/L)} \right] \quad (4.3)$$

$$k_r = \left(\frac{b_o}{b} \right)^{1/2} \quad (4.4)$$

de la ec. 4.1 despejando H_o tenemos lo siguiente:

$$H_o = \frac{H}{k_s k_r} \quad (4.5)$$

Para poder aplicar la ec 4.5 se necesita conocer la longitud de onda (L) correspondiente a H que como se mencionó anteriormente está en aguas intermedias por lo que L está dada por la siguiente ecuación:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi}{L} \right) \quad (4.6)$$

como se podrá observar la ecuación anterior tiene implícita la longitud L por lo que es necesario calcularla a partir de las tablas de Wiegel (ref 1) o mediante un método iterativo; en la realización de los cálculos se optó por el segundo utilizando para tal efecto una calculadora programable. Una vez calculada L es posible determinar k_s con la ec 4.2. Otra forma de determinar k_s es a partir del uso de las tablas antes mencionadas, mediante la utilización de la relación d/L_o

donde

d profundidad en donde se mide la altura de la ola

L_o longitud de la ola en aguas profundas

para el cálculo de k_s se prefirió obtenerlo a partir de las tablas de Wiegel. La determinación de k_r para el presente trabajo

es sencilla dado que la pendiente del canal es uniforme por lo que $b_o = b$ separación de ortogonales en aguas profundas y aguas bajas respectivamente son iguales con lo que al sustituir $b_o = b$ en la ec 4.4 tenemos $k_r = 1$.

De lo anterior

$$H_o = \frac{H}{k_s k_r}$$

$$\text{si } k_r = 1$$

$$H_o = \frac{H}{k_s}$$

por lo tanto H_o queda sólo en función de k_s

La utilización de las curvas teóricas para el cálculo de la altura y profundidad rompiente requieren H'_o , que está dada por la siguiente ecuación:

$$H'_o = \left(\frac{b_o}{b} \right)^{1/2} H_o \quad (4.7)$$

como ya se mencionó

$$\left(\frac{b_o}{b} \right)^{1/2} = k_r$$

como $k_r = 1$; $H_o = H'_o$ para este caso en particular.

Los datos obtenidos de las mediciones así como los parámetros de interés se muestran en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

La estimación de la profundidad rompiente db se realizó de la siguiente manera:

$$db = \frac{H_o}{2} + y$$

donde

y altura entre el fondo del canal y el valle correspondiente a la fig. 4.2 .

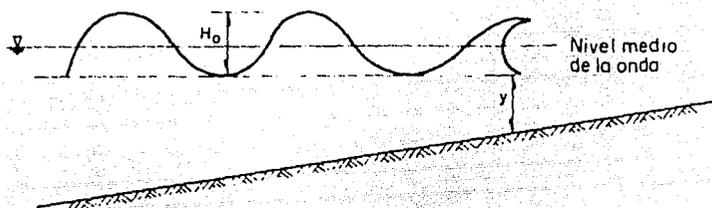


fig. 4.2

La altura rompiente H_b se estimó como

$$H_b = x - y$$

donde x y y corresponden a la fig. 4.3 .

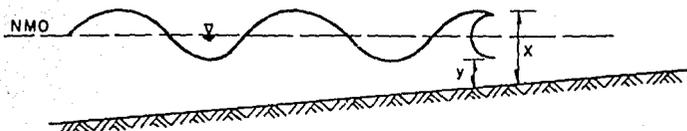


Fig. 4.3

Una vez realizada la experimentación se procedió a valuar la altura (H_b) y profundidad rompiente (db), en primera instancia se pensó valuar los tres métodos teóricos: Goda, Iversen y el de la onda solitaria.

De la gráfica de Goda (ref 1) se tiene que la relación

$$\frac{H_r}{H_o} = \frac{H'_o}{L_o}$$

considerando las condiciones antes mencionadas tenemos:

$$\frac{H_r}{H_o} = \frac{H_o}{L_o}$$

4.5.1 Análisis de los resultados método de Goda

Si se considera la curva de Goda (la cual no toma en cuenta la pendiente) y se le ajusta a una ecuación de la forma $y = ax^b$ para el caso de interés, siendo

$$y = \frac{H_r}{H_o}$$

y

$$x = \frac{H_o}{L_o}$$

El ajuste de la curva para la altura rompiente hasta un valor de $H_o/L_o = 0.07$ se tuvo un coeficiente de correlación de $r = 0.995$, y los valores de a y b fueron

$$a = 0.534$$

$$b = 0.212$$

Para el caso de la profundidad rompiente db se tomó hasta un valor de $H_0'/L_0 = 0.04$, obteniéndose los siguientes valores para los coeficientes C , a y b

$$C = 0.988$$

$$a = 0.430$$

$$b = -0.328$$

Con las líneas ajustadas se procedió a obtener los valores teóricos de la altura H_b y la profundidad db rompiente éstos se presentan en las tablas 4.4 y 4.5. Luego se dibujaron los valores teóricos con las experimentales obteniéndose las figs. 4.2 y 4.3.

En estas gráficas se pueden apreciar una recta a 45° y dos más que representan más-menos 2cm de error (los puntos medidos están representados por triángulos).

Para el caso de la altura rompiente fig. 4.2 (H_b) se tiene que la mayoría de los puntos medidos se encuentran en la parte superior de la recta a 45° lo que indica que éstos son mayores a los calculados teóricamente. El que la mayoría de los puntos medidos sean mayores a los teóricos se debe principalmente en que al realizar la estimación de los mismos a través del cristal se tienen efectos de distorsión los cuales no se pueden apreciar en la película además de los efectos causados por la iluminación.

En el caso de la fig. 4.3 en la cual se grafica la profundidad rompiente (db), las líneas continuas tienen el mismo significado que la fig. 2. Los puntos medidos se distribuyen tanto arriba como abajo de la recta a 45° , lo anterior permite demostrar que la diferencia que existe entre los valores teóricos y los medidos se puede atribuir al error que existe en la experimentación, por lo que la curva propuesta por Goda en la cual no considera la

pendiente es una aproximación bastante buena para estas condiciones.

Con base en los resultados obtenidos la curva que presenta Goda es factible. Siendo posible su utilización en aquellos litorales cuyas pendientes de fondo sean mayores a $m = 50$.

Al comparar los datos con la curva propuesta por Goda para una pendiente $m = 50$ de las figs. 2.24 y 2.25 para la altura rompiente H_b se obtuvieron los valores teóricos de la tabla 4.6, posteriormente se dibujaron con los medidos, para construir la fig.4.4 . Se observa que los experimentales, representados por triángulos, se localizan sobre la recta a 45° , lo que indica que los valores medidos se acercan a los obtenidos teóricamente.

En el caso de la profundidad rompiente (db) el análisis es similar y se representa en la fig. 4.5, en la cual se nota que en los datos experimentales se agrupa sobre la recta a 45° .

4.5.2 Análisis de los valores experimentales por el método de Iversen

El análisis se realiza de la misma manera que el caso anterior. Las curvas presentadas por Iversen se muestran en la fig 3.3. Al tomar la correspondiente a $m = 50$ y ajustarla a una ecuación para facilitar la estimación de los valores teóricos, se obtuvo la tabla 4.7; éstos se manejaron de manera similar al caso de Goda.

La altura rompiente H_b se presenta en la fig 4.6 en la que se aprecia que los valores experimentales se agrupan entre las dos líneas que corresponden a un error de más-menos 2 cm, teniendo la

mayoría de ellos a ser mayor a los teóricos. Para la profundidad rompiente db tenemos la fig 4.7 en la cual se tiene que la agrupación de los valores experimentales presentan la misma tendencia que Hb por lo que los valores medidos son mayores a los teóricos.

4.5.3 Análisis de los datos con las fórmulas basadas en la teoría de la onda solitaria.

Este análisis se realizó de la misma manera que para el método de Goda e Iversen. Las fórmulas utilizadas son las siguientes

$$H_b = \frac{H_o}{3.3 \left[\frac{H'_o}{L_o} \right]^{1/3}}$$

$$db = 1.28 H_b$$

En la tabla 4.8 se muestran los valores teóricos para $m = 50$

Los valores correspondientes a Hb se presentan en la fig 4.8. En este caso se presentan los resultados con una distribución más uniforme que en los casos anteriores, aunque siguen siendo mayores los valores experimentales, para el caso de la profundidad rompiente db se presenta la fig 4.9 observandose el mismo comportamiento que para Hb.

De los tres métodos analizados se puede determinar que se comportan de manera similar, siendo para el caso de db el método basado en la teoría de la onda solitaria el que mejores resultados presenta.

4.5.4 Análisis de las mediciones con pendientes $m = 75$ y $m = 100$

Dado que las curvas que presenta Goda e Iversen sólo consideran hasta una pendiente igual a 50, por lo que no es posible realizar la comparación con estos métodos, por lo que ésta se realizará con la utilización de la curva presentada por Goda en la que no se considera la pendiente.

Para los valores correspondientes a la pendiente $m = 75$, el análisis se hará de manera similar a los anteriores, los valores teóricos se observan en la tabla 4.9 y 4.10, teniendo los valores correspondientes a la altura rompiente en la fig 4.10 en la cual se puede observar que los valores se distribuyen tanto arriba como abajo de la recta a 45° , por lo que se puede considerar que los resultados experimentales se ajustan a la curva que presenta Goda en la cual no considera la pendiente.

En la fig 4.11 se presentan los valores correspondientes a la profundidad rompiente (db), se observa que éstos se agrupan de una manera más uniforme concluyéndose lo mismo que en el caso anterior.

Considerando la pendiente $m = 100$, los valores teóricos se presentan en las tablas 4.11 y 4.12, se realizaron las fig 4.12 y 4.13 las que corresponden a la altura y profundidad rompiente respectivamente, en ambas se aprecia que la distribución de los puntos es tanto arriba como abajo de la recta a 45° por lo que se puede pensar que el utilizar la curva presentada por Goda en la cual no considera la pendiente, para pendientes mayores a $m=75$ es una muy buena aproximación.

4.5.5 Estimación de la altura y profundidad rompientes

Dado que los métodos propuestos por Goda, Iversen y el basado en la teoría de la onda solitaria proporciona resultados dudosos, se tiene una marcada tendencia de los teóricos a ser menores que los estimados, se buscó la forma de valuar la altura (H_b) y profundidad (db) rompiente, encontrandose un método que considera un fondo con pendiente uniforme (ref 4), dicho método está basado en gráficas obtenidas por Goda en las cuales se usan relaciones como

$$\frac{H_b}{gT^2} \quad ; \quad H_b$$

$$\frac{H'_o}{gT^2} \quad ; \quad H'_o$$

las cuales se relacionan entre sí para formar las figs. 3.8 y 3.5 en las que además se cuenta con la influencia de la pendiente, con curvas para diferentes valores de la misma como son

$$m = 0.020$$

$$m = 0.033$$

$$m = 0.050$$

$$m = 0.100$$

El cálculo de la altura H_b y la profundidad db para cada grupo de datos se realizó con un programa de computadora ajustando las curvas de interés a ecuaciones de la forma

$$y = a + bx$$

$$y = a x^b$$

Los coeficientes de correlación C_r , a , b para cada ajuste son los siguientes

Fig 2.25 ajustada a ecuaciones del tipo $y = a + bx$

m	C_r	a	b
50	0.9910	1.0736	17.5210
75	0.9946	1.1136	14.3881
100	0.6318	1.1550	11.2098

Fig 3.8 ajustada a una ecuación del tipo $y = a x^b$

m	C_r	a	b
50	0.9976	0.3878	-0.2413

Con las curvas de ajuste se obtuvieron tanto los valores de ajuste de la curva (H_b) y profundidad (db) rompiente así como el correspondiente error para cada uno de ellos, tablas 4.13 observándose que los valores estimados experimentalmente son mayores, lo que implica que el método es similar a los presentados anteriormente. Por lo que respecta a la profundidad rompiente (db) al igual que en el caso de la altura se encuentra por arriba de los resultados teóricos.

Del análisis y comparación de cada uno de los métodos presentados, se observa que todos se comportan de manera semejante aunque sí se considera la $db_{máx}$ y la $db_{mín}$ (como se vera más adelante) los resultados están dentro de este intervalo de seguridad o pr debajo del mismo. Por lo que respecta a la magnitud del error éste se puede deber a diversas razones dentro de las que se encuentran efectos de iluminación, error de lectura debido a la separación de la malla (2cm), además del error que existe en toda experimentación.

Los valores que arrojan estos métodos se encuentran por debajo de los experimentales, pero esto no implica que los métodos no sean adecuados.

Como se advirtió anteriormente, existen varias teorías que permiten determinar la profundidad a la cual rompe una ola, sin embargo, estas teorías proporcionan un valor poco confiable, por esta razón se prefiere manejar un rango en el cual se presentara la rompiente, este rango ya fue propuesto por Galvin. El rango está determinado con base a gráficas en las cuales se encuentran relacionadas las variables H_b , db , T , m fig 3.5, para la utilización de estas curvas es necesario conocer variables como H_b , db las cuales pueden ser obtenida a partir de las figs 3.8 y 3.5 con el procedimiento del inciso 3.6.

Una vez que se tiene H_b y db ; para estimar el rango de la rompiente se sigue la siguiente secuencia.

Con H_b/gT^2 y la pendiente del fondo, m , de la fig 3.5 se estima α y β , con los parámetros anteriores el rango se obtiene de la siguiente manera

$$db_{\text{máx}} = \alpha H_b$$

$$db_{\text{mín}} = \beta H_b$$

los resultados se presentan en las tablas 4.14 correspondiente a una pendiente $m = 50$, así como las figs 4.14 donde se puede apreciar la distribución de los puntos experimentales (triángulos), las líneas punteadas representan a $db_{\text{máx}}$ la superior y $db_{\text{mín}}$ la inferior.

Siguiendo el procedimiento anterior a diferencia que la H_b utilizada en el cálculo fue la experimental, un 90% de los valores medidos se presenta dentro del rango o por debajo del

mismo con lo que podemos decir que la altura y profundidad rompiente no se debe manejar como un valor único, sino un rango dado el fenómeno aleatorio de generación que tiene el oleaje y otros factores de tipo metereológico que influyen en su formación.

De acuerdo con las mediciones hechas y los resultados obtenidos sería más conveniente encontrar un rango en el cual se pueda afirmar que la ola romperá, si se considera un sólo valor, éste se presentará en algunas ocasiones y en diferentes puntos, sin embargo si se toma un rango se estará cubriendo la mayoría de las olas y el diseño tendrá una mayor seguridad

4.6 Mediciones en modelo con batimetría no uniforme.

Otra parte de este trabajo comprende la medición tanto de H_b y d_b de un modelo que contemple un batimetría no uniforme y comparar los valores medidos con los obtenidos a partir de las teorías anteriormente mencionadas.

Para la obtención de los datos experimentales se tomaron en cuenta dos condiciones, una en la cual el nivel medio estático en lo que podría denominarse el cero y otra en la que este nivel se encuentra a $-0.028m$ del anterior; para ambos casos se procuró mantener las mismas condiciones de generación del oleaje. La medición de la ola se realizó en una zona lo más alejada posible de la orilla con el propósito de que se localizara en aguas profundas, después se midió la altura y profundidad a la cual rompe la ola así como la pendiente de diha zona.

Las mediciones se realizaron por medio de una regla graduada con una aproximación de $1mm$ realizandose la lectura en forma

visual.

Para la primera condición se realizaron siete mediciones en las que básicamente se varió el período y se mantuvo la posición de brazo excéntrico del generador de olas.

Una vez obtenidos los datos se verificó si en realidad estaba medida la ola en la zona de aguas profundas lo cual resultó negativo, por lo cual fue necesario el cálculo de la ola en aguas profundas siguiéndose el procedimiento usado en el inciso 4.5 con la diferencia que la batimetría no era paralela con lo que el coeficiente de refracción puede ser diferente de 1, para encontrar este valor se construyó un diagrama de refracción (ref 1), obteniéndose un coeficiente $k_r = 0.95$. Los resultados para esta condición se presentan en la tabla 4.15 además de los valores teóricos obtenidos con el método que considera pendiente uniforme, así como el error correspondiente.

La segunda condición presenta un análisis semejante presentándose los resultados en la tabla 4.16.

4.6.1 Análisis de los datos para cada uno de los métodos vistos

Primera condición $n_{mo} = 0.00$

a,1) Método de Goda

Para realizar el análisis de los valores se procederá a calcular cada uno de los valores teóricos en función de los datos obtenidos experimentalmente, a partir de éstos se obtendrá el error correspondiente de la siguiente manera

$$e = \frac{V_t - V_o}{V_t} * 100$$

donde

e - error en %

V_t - valor teórico

V_e - valor medido

el error se obtendrá para cada valor observándose que para el caso de la altura rompiente el mayor fue de 28% siendo mayor el teórico. los demás valores se compensan unos con otros, estos calculos se presentan en la tabla 4.17. En el caso de la profundidad rompiente la mayoría de los valores medidos son inferiores a los teóricos por lo que en la fig 4.15 se podrán observar por debajo de la recta a 45° que representa los valores exactos, para los valores de Hb se observan en la fig 4.16.

b.1) Método de Iversen

El análisis de los valores experimentales por este método se realizó de manera similar, los resultados se tiene en la tabla 4.18 donde se pueden apreciar los errores correspondientes a cada dato, éstos si bien pudieran parecer grandes los hay negativos y positivos con lo cual se compensan en el caso de Hb, por lo que respecta a db se aprecia en la fig 4.17 que se distribuyen por debajo de la recta lo que implica que Ivesen proporciona valores mayores quedando del lado de la seguridad. En la fig 4.18 se puede observar el error gráficamente para Hb.

c.1) Método basado en la teoría de la onda solitaria

Los valores obtenidos por este procedimiento son muy semejantes a los obtenidos con los métodos anteriores, aunque se tiene que el orden del error para el caso de Hb es de 15%, sin embargo el de db llega a ser del 36% sin embargo se compensan con los demás valores, los resultados pueden observarse en la tabla

4.19 y en las figs 4.19 y 4.20.

Segunda condición $n_{mo} = -0.028$

a.2) Método de Goda

Se observa que el error que existe entre los valores teóricos y experimentales son del orden de 30% tabla 4.20, aunque éste implica que el valor teórico es mayor al medido por lo que el método es conservador, estos resultados se presentan en las figs. 4.21 y 4.2 en éstas se aprecia la recta a 45° la cual indica una H_b teórica igual H_b medida, los valores experimentales están representados por triángulos como se podrá observar para el caso de H_b la mayoría de los valores se encuentran por debajo de la recta lo que implica que los experimentales son menores a los teóricos, para db los puntos se agrupan de ambos lados de la recta e incluso sobre la misma.

b.2) Método de Ivesen

La forma de análisis por este método es similar al de Goda, los resultados se observan en las figs. 4.23 y 4.24 que corresponden a H_b y db respectivamente, en la primera los puntos se agrupan en su mayoría por debajo de la recta, en la segunda presentan una distribución más o menos uniforme a ambos lados.

c.2) Método de la onda solitaria

Como se sabe este método no considera la pendiente, sin embargo, el comportamiento con relación a los demás es muy semejante; para este caso se presentan las gráficas correspondientes figs 4.25 y 4.26 aunque ésta última se aprecia que en su totalidad son mayores los teóricos que los medidos, siendo el error un valor no muy grande.

N	H [m]	T [s]	L [m]	d [m]
1	.085	1.3	1.679163	.201
2	.074	1.42	1.887487	.208
3	.071	1.57	2.10622	.206
4	.067	1.75	2.380282	.207
5	.062	1.96	2.673627	.204
6	.054	1.96	2.649293	.2
7	.058	1.75	2.364611	.204
8	.061	1.57	2.097188	.204
9	.064	1.42	1.473286	.119
10	7.900001E-02	1.3	1.679232	.201
11	.063	1.3	1.665251	.197
12	.056	1.42	1.848108	.198
13	6.800001E-02	1.57	2.055753	.195
14	.049	1.75	2.343468	.2
15	.055	1.96	2.605745	.193
16	.038	1.96	2.715731	.211
17	.042	1.75	2.411192	.213
18	.046	1.57	2.150485	.216
19	.049	1.42	1.91791	.216
20	.055	1.3	1.719575	.213
21	.043	1.3	1.716352	.212
22	.04	1.42	1.906537	.213
23	.037	1.57	2.141826	.214
24	.034	1.75	2.40616	.212
25	.03	1.96	2.709695	.21
26	.025	1.96	2.709695	.21
27	.028	1.75	2.40095	.211
28	.031	1.57	2.132951	.212
29	.035	1.42	1.906608	.213
30	.038	1.3	1.712971	.211
31	.022	1.3	1.703035	.208
32	.024	1.42	1.895102	.21
33	.023	1.57	2.12862	.211
34	.02	1.75	2.395894	.21
35	.018	1.96	2.703812	.209
36	.032	1.75	2.380286	.207
37	.017	1.57	2.119734	.209
38	.019	1.42	1.89511	.21
39	.021	1.3	1.70965	.21
40	.016	1.3	.5117142	.016

Tabla 4.1a pendiente m = 50

N	LO [m]	KS	d/L	HO [m]
1	2.638608	.9616	.1197025	.088
2	3.148218	.9772	.1101994	.076
3	3.848464	1.01	9.780554E-02	.07
4	4.781501	1.048	8.696449E-02	.064
5	5.997916	1.098	7.630085E-02	.056
6	5.997916	1.098	7.549185E-02	.049
7	4.781501	1.054	8.627214E-02	.055
8	3.848464	1.014	9.727309E-02	.06
9	3.148218	.986	8.077185E-02	.065
10	2.638608	.9616	.1196976	.082
11	2.638608	.9641	.1183005	.065
12	3.148218	.986	.1071366	.057
13	3.848464	1.019	9.485576E-02	.067
14	4.781501	1.057	.0853436	.046
15	5.997916	1.019	7.406711E-02	.05
16	5.997916	1.086	7.769548E-02	.035
17	4.781501	1.042	8.833806E-02	.04
18	3.848464	1.004	.1004425	.046
19	3.148218	.9732	.1126226	.05
20	2.638608	.9534	.1238678	.058
21	2.638608	.9534	.1235178	.045
22	3.148218	.9752	.1117209	.041
23	3.848464	1.004	9.991478E-02	.037
24	4.781501	1.042	8.810718E-02	.033
25	5.997916	1.086	7.749951E-02	.028
26	5.997916	1.086	7.749951E-02	.023
27	4.781501	1.042	8.788188E-02	.027
28	3.848464	1.007	9.939281E-02	.031
29	3.148218	.9752	.1117167	.036
30	2.638608	.9548	.1231778	.04
31	2.638608	.9562	.1221349	.023
32	3.148218	.9772	.110812	.025
33	3.848464	1.007	9.912526E-02	.023
34	4.781501	1.042	8.764994E-02	.019
35	5.997916	1.092	7.729828E-02	.016
36	4.781501	1.046	8.696433E-02	.031
37	3.848464	1.007	9.859729E-02	.017
38	3.148218	.9772	.1108115	.019
39	2.638608	.9548	.1228321	.022
40	2.638608	.9985	3.126745E-02	.016

Tabla 4.1b pendiente m = 50

N	H [m]	T [s]	L [m]	d [m]
41	.021	1.3	1.48705	.151
42	.02	1.25	1.418232	.15
43	.018	1.42	1.636308	.15
44	.016	1.57	1.82655	.15
45	.015	1.75	2.046565	.149
46	.023	1.96	2.2708	.144
47	.015	1.96	2.300558	.148
48	.016	1.75	2.046475	.149
49	.018	1.57	1.826545	.15
50	.019	1.42	1.636308	.15
51	.021	1.3	1.482746	.15
52	.028	1.3	1.491327	.152
53	.03	1.25	1.41823	.15
54	.029	1.42	1.636308	.15
55	.026	1.57	1.82655	.15
56	.023	1.75	2.040151	.148
57	.021	1.96	2.293097	.147
58	.019	1.96	2.278351	.145
59	.029	1.75	2.046479	.149
60	.027	1.57	1.815284	.148
61	.033	1.42	1.645945	.152
62	.037	1.3	1.565095	.17
63	.043	1.3	1.495517	.153
64	.041	1.42	1.655566	.154
65	.039	1.57	1.832015	.151
66	.036	1.75	2.052951	.15
67	.031	1.96	2.307902	.149
68	.035	1.96	2.307902	.149
69	.039	1.75	2.052866	.15
70	.036	1.57	1.809652	.147
71	.037	1.42	1.636228	.15
72	.051	1.3	1.499756	.154
73	.044	1.75	2.052867	.15
74	.039	1.96	2.307902	.149
75	.052	1.6	1.875685	.152
76	.054	1.42	1.669928	.157
77	.056	1.3	1.503972	.155
78	.065	1.3	1.516604	.158
79	.064	1.36	1.604638	.16
80	.078	1.53	1.748754	.145
81	.051	1.75	2.059316	.151
82	.044	1.96	2.315126	.15

Tabla 4.2a pendiente m = 75

N	LO [m]	KS	d/L	H0 [m]
41	2.638608	.9985	.1015433	.021
42	2.439541	.9883	.1057655	.02
43	3.148218	1.03	9.166979E-02	.017
44	3.848464	1.069	8.212205E-02	.015
45	4.781501	1.117	7.280491E-02	.013
46	5.997916	1.18	6.341378E-02	.019
47	5.997916	1.18	6.433222E-02	.013
48	4.781501	1.117	7.280813E-02	.014
49	3.848464	1.07	8.212228E-02	.017
50	3.148218	1.03	9.166981E-02	.018
51	2.638608	1.001	.1011637	.021
52	2.638608	.9985	.1019226	.028
53	2.439541	.9883	.1057656	.03
54	3.148218	1.03	9.166979E-02	.028
55	3.848464	1.07	8.212205E-02	.024
56	4.781501	1.117	7.254365E-02	.021
57	5.997916	1.18	6.410546E-02	.018
58	5.997916	1.18	6.364251E-02	.016
59	4.781501	1.117	7.280798E-02	.026
60	3.848464	1.069	8.152993E-02	.025
61	3.148218	1.03	9.234818E-02	.032
62	2.638608	.9815	.1086196	.038
63	2.638608	.9985	.1023058	.043
64	3.148218	1.026	9.301954E-02	.04
65	3.848464	1.07	8.242289E-02	.036
66	4.781501	1.117	7.306555E-02	.032
67	5.997916	1.166	.0645608	.027
68	5.997916	1.166	.0645608	.03
69	4.781501	1.117	7.306858E-02	.035
70	3.848464	1.075	8.123108E-02	.033
71	3.148218	1.03	9.167428E-02	.036
72	2.638608	.9958	.1026834	.051
73	4.781501	1.117	7.306853E-02	.039
74	5.997916	1.116	.0645608	.035
75	3.996945	1.075	8.103705E-02	.048
76	3.148218	1.024	9.401601E-02	.053
77	2.638608	.9958	.1030604	.056
78	2.638608	.9932	.1041801	.065
79	2.887793	1.004	9.971099E-02	.064
80	3.654862	1.065	8.291616E-02	.073
81	4.781501	1.117	7.332531E-02	.046
82	5.997916	1.116	.0647913	.039

Tabla 4.2b pendiente m = 75

N	H [m]	T [s]	L [m]	d [m]
83	.037	2.12	2.231471	.117
84	.053	1.57	1.647613	.12
85	.045	1.75	1.834021	.118
86	.052	1.42	1.490265	.122
87	.055	1.315	1.385361	.125
88	.049	1.315	1.370235	.122
89	.045	1.42	1.473368	.119
90	.046	1.53	1.583999	.117
91	.038	1.75	1.811873	.115
92	.034	1.96	2.031443	.114
93	.038	1.42	1.456195	.116
94	.043	1.315	1.365173	.121
95	.039	1.57	1.608705	.114
96	.033	1.75	1.796771	.113
97	.03	1.96	2.005611	.111
98	.025	1.96	1.996824	.11
99	.029	1.66	1.685358	.111
100	.031	1.57	1.595429	.112
101	.032	1.42	1.438744	.113
102	.035	1.3	1.327881	.117
103	.027	1.3	1.312311	.114
104	.028	1.42	1.438745	.113
105	.026	1.53	1.545697	.111
106	.022	1.75	1.774047	.11
107	.02	1.96	1.988171	.109
108	.015	1.96	1.988171	.109
109	.017	1.75	1.766364	.109
110	.02	1.57	1.575247	.109
111	.02	1.44	1.442528	.11
112	.022	1.3	1.301836	.112
113	.017	1.28	1.274822	.111
114	.016	1.42	1.421001	.11
115	.015	1.57	1.568448	.108
116	.011	1.96	1.970459	.107

Tabla 4.3a pendiente $m = 100$

N	LO [m]	KS	d/L	HO [m]
83	7.017135	1.285	5.243179E-02	.029
84	3.848464	1.117	7.283265E-02	.047
85	4.781501	1.173	6.433951E-02	.038
86	3.148218	1.069	8.186462E-02	.049
87	2.69985	1.036	.0902292	.053
88	2.69985	1.041	8.903584E-02	.047
89	3.148218	1.075	8.076733E-02	.042
90	3.654862	1.109	7.386369E-02	.041
91	4.781501	1.173	6.347024E-02	.032
92	5.997916	1.24	5.611776E-02	.027
93	3.148218	1.078	7.965965E-02	.035
94	2.69985	1.041	8.863348E-02	.041
95	3.848464	1.127	7.086447E-02	.035
96	4.781501	1.18	6.289061E-02	.028
97	5.997916	1.25	5.534475E-02	.024
98	5.997916	1.25	5.508749E-02	.02
99	4.302336	1.159	.0658614	.025
100	3.848464	1.133	7.020055E-02	.027
101	3.148218	1.084	7.854075E-02	.03
102	2.638608	1.042	8.811029E-02	.034
103	2.638608	1.046	8.686964E-02	.026
104	3.148218	1.084	.0785407	.026
105	3.654862	1.12	7.181226E-02	.023
106	4.781501	1.189	6.200513E-02	.019
107	5.997916	1.254	5.482425E-02	.016
108	5.997916	1.254	5.482425E-02	.012
109	4.781501	1.189	.0617087	.014
110	3.848464	1.139	6.919551E-02	.018
111	3.237525	1.098	7.625501E-02	.018
112	2.638608	1.054	8.603236E-02	.021
113	2.558045	1.046	8.707102E-02	.016
114	3.148218	1.094	7.741024E-02	.015
115	3.848464	1.139	.0688579	.013
116	5.997916	1.25	5.430206E-02	8.999999E-03

Tabla 4.3b pendiente m = 100

N	ERROR %	Hb EX	Hb TEO
1	-55.22663	.15	9.663291E-02
2	-45.45587	.13	8.937419E-02
3	-.6753708	8.799999E-02	8.740965E-02
4	17.92339	.07	8.528617E-02
5	.6791241	.08	8.054701E-02
6	17.24402	.06	7.250231E-02
7	-10.9851	.084	7.568584E-02
8	-29.17982	.1	7.741148E-02
9	-39.21499	.11	7.901448E-02
10	-9.406217	.1	9.140249E-02
11	-18.2481	9.000001E-02	7.611116E-02
12	1.748847	.07	7.124598E-02
13	5.262738	.08	8.444407E-02
14	-21.68244	.08	.0657449
15	18.55103	.06	7.366575E-02
16	-7.881843	.06	.0556164
17	-25.66073	.074	5.888872E-02
18	-29.00594	.081	6.278781E-02
19	-24.50038	.08	6.425683E-02
20	-9.234464	7.600001E-02	6.957512E-02
21	-5.328793	.06	5.696448E-02
22	-9.180891	.06	5.495467E-02
23	-24.78972	6.600001E-02	5.288898E-02
24	-8.683826	.055	5.060551E-02
25	-15.7593	.054	4.664852E-02
26	-25.15586	.05	3.995019E-02
27	-38.87616	.06	4.320396E-02
28	-8.681298	.05	4.600608E-02
29	-.8028086	.05	.0496018
30	-15.57272	.06	5.191537E-02
31	-31.0806	.044	3.356713E-02
32	-12.86039	.042	3.721412E-02
33	-10.00093	.04	3.636333E-02
34	-22.12182	.04	3.275418E-02
35	-13.28046	.034	.030014
36	.3587037	.048	.0481728
37	16.24798	.024	2.865603E-02
38	-6.748369	.032	2.997704E-02
39	7.440808	.03	3.241169E-02
40	-18.96029	.03	.0252185

Tabla 4.4 Error existente entre la altura de la ola experimental y la obtenida con el metodo de Goda sin considerar la pendiente. Pendiente experimental $m = 50$.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

N	ERROR %	Hb EX	Hb TEO
1	18.57531	9.399999E-02	.1154441
2	20.61431	.088	.1108512
3	-20.49948	.135	.1120337
4	1.122018	.112	.1132709
5	21.10531	.088	.1115411
6	17.13095	.0845	.1019681
7	-5.079797	.1075	.1023032
8	-8.901086	.11	.1010091
9	-12.73039	.1125	9.979562E-02
10	-9.906448	.121	.1100936
11	-19.45251	.1125	9.417968E-02
12	-18.75397	.1085	9.136537E-02
13	-4.335198	.1135	.108784
14	8.517221	8.300001E-02	9.072746E-02
15	17.76464	.085	.1033619
16	4.712606	.0775	.0813329
17	3.140946	.08	8.259424E-02
18	-2.968237	.087	8.449208E-02
19	-1.596168	.085	8.366458E-02
20	-15.77596	.101	8.723745E-02
21	-12.15427	8.250001E-02	.0735594
22	-9.94397	.0805	7.321911E-02
23	6.153888	.0685	7.299183E-02
24	1.485716	7.150001E-02	7.257831E-02
25	22.86507	.054	.0700072
26	16.03978	.0515	6.133858E-02
27	15.64481	.0535	.0634223
28	14.36425	.0555	6.480938E-02
29	-1.353774	6.800001E-02	6.709173E-02
30	11.71488	.06	6.796162E-02
31	-9.912412	.0515	4.685549E-02
32	2.077216E-02	.0525	5.251091E-02
33	2.885642	.0515	5.303027E-02
34	1.163525	.0495	5.008273E-02
35	12.61678	4.200001E-02	4.806415E-02
36	48.98854	.0355	.0695922
37	-12.05657	.0485	4.328171E-02
38	-8.777099	.0475	4.366728E-02
39	9.84361	.041	4.547653E-02
40	-3.498876	.038	3.671537E-02

Tabla 4.5 Error existente entre la profundidad rompiente experimental y la obtenida con el metodo de Goda sin considerar la pendiente. Pendiente experimental $m = 50$.

CALCULO DE LA ALTURA Y PROFUNDIDAD ROMPIENTE METODO DE GODA				
HO [m]	T [s]	LO [m]	Hb [m]	db [m]
.088	1.3	2.638608	9.785616E-02	.1158782
.076	1.42	3.148218	9.126927E-02	.1057837
.07	1.57	3.848464	8.992249E-02	.102652
.064	1.75	4.781501	8.844038E-02	9.962269E-02
.056	1.96	5.997916	8.431184E-02	9.380978E-02
.049	1.96	5.997916	7.615505E-02	8.441249E-02
.055	1.75	4.781501	7.879485E-02	8.826399E-02
.06	1.57	3.848464	.0799567	9.063244E-02
.065	1.42	3.148218	8.101858E-02	9.308364E-02
.082	1.3	2.638608	9.272962E-02	.109248
.065	1.3	2.638608	7.768415E-02	9.014684E-02
.057	1.42	3.148218	7.330291E-02	8.366109E-02
.067	1.57	3.848464	8.697064E-02	9.907511E-02
.046	1.75	4.781501	6.876428E-02	7.658004E-02
.05	1.96	5.997916	7.733649E-02	8.576933E-02
.035	1.96	5.997916	5.893172E-02	6.479613E-02
.04	1.75	4.781501	6.181747E-02	6.856475E-02
.046	1.57	3.848464	6.530178E-02	.0732486
.05	1.42	3.148218	6.633761E-02	7.525577E-02
.058	1.3	2.638608	7.122371E-02	8.210843E-02
.045	1.3	2.638608	.0587003	6.680595E-02
.041	1.42	3.148218	5.702771E-02	6.417058E-02
.037	1.57	3.848464	5.531888E-02	6.160521E-02
.033	1.75	4.781501	5.338867E-02	.0589237
.028	1.96	5.997916	4.971686E-02	5.442708E-02
.023	1.96	5.997916	4.279627E-02	4.669748E-02
.027	1.75	4.781501	4.581849E-02	5.034341E-02
.031	1.57	3.848464	4.834163E-02	5.356292E-02
.036	1.42	3.148218	5.164725E-02	5.784209E-02
.04	1.3	2.638608	5.366142E-02	6.075304E-02
.023	1.3	2.638608	3.519889E-02	3.908577E-02
.025	1.42	3.148218	3.911785E-02	4.332639E-02
.023	1.57	3.848464	3.850705E-02	4.236054E-02
.019	1.75	4.781501	3.505514E-02	3.827205E-02
.016	1.96	5.997916	3.245703E-02	3.524199E-02
.031	1.75	4.781501	5.090485E-02	5.610025E-02
.017	1.57	3.848464	.0305848	3.344998E-02
.019	1.42	3.148218	3.173619E-02	3.491949E-02
.02	1.3	2.638608	3.164297E-02	3.500475E-02
.016	1.3	2.638608	2.669512E-02	2.937579E-02

Tabla 4.6a Pendiente del canal $m = 50$.

N	ERROR %	Hb EX	Hb TEO
1	-53.28622	.15	9.785616E-02
2	-42.43567	.13	9.126927E-02
3	2.137948	8.799999E-02	8.992249E-02
4	20.85063	.07	8.844038E-02
5	5.114154	.08	8.431184E-02
6	21.21337	.06	7.615505E-02
7	-6.605948	.084	7.879485E-02
8	-25.0677	.1	.0799567
9	-35.77134	.11	8.101858E-02
10	-7.8404	.1	9.272962E-02
11	-15.85377	9.000001E-02	7.768415E-02
12	4.505837	.07	7.330291E-02
13	8.014932	.08	8.697064E-02
14	-16.33946	.08	6.876428E-02
15	22.41696	.06	7.733649E-02
16	-1.812747	.06	5.893172E-02
17	-19.70726	.074	6.181747E-02
18	-24.03949	.081	6.530178E-02
19	-20.59524	.08	6.633761E-02
20	-6.706053	7.600001E-02	7.122371E-02
21	-2.214131	.06	.0587003
22	-5.212003	.06	5.702771E-02
23	-19.3083	6.600001E-02	5.531888E-02
24	-3.018112	.055	5.338867E-02
25	-8.615076	.054	4.971686E-02
26	-16.83263	.05	4.279627E-02
27	-30.95151	.06	4.581849E-02
28	-3.430527	.05	4.834163E-02
29	3.189415	.05	5.164725E-02
30	-11.81218	.06	5.366142E-02
31	-25.00393	.044	3.519889E-02
32	-7.367862	.042	3.911785E-02
33	-3.877085	.04	3.850705E-02
34	-14.10595	.04	3.505514E-02
35	-4.753911	.034	3.245703E-02
36	5.706426	.048	5.090485E-02
37	21.52966	.024	.0305848
38	-.8312597	.032	3.173619E-02
39	11.83367	.03	3.402659E-02
40	-12.3801	.03	2.669512E-02

Tabla 4.6b Error existente entre la altura rompiente experimental y la obtenida por el metodo de Goda considerando una pendiente $m = 50$. Pendiente experimental $m = 50$.

N	ERROR %	db EX	db TEO
1	22.8772	9.399999E-02	.1218835
2	19.46596	.088	.1092706
3	-31.69129	.135	.1025125
4	-13.63233	.112	9.856349E-02
5	6.004543	.088	9.362154E-02
6	-.8648046	.0845	8.377551E-02
7	-21.42727	.1075	8.853036E-02
8	-19.66197	.11	9.192561E-02
9	-17.92482	.1125	9.539976E-02
10	-9.958538	.121	.1100415
11	-23.2568	.1125	9.127286E-02
12	-30.0612	.1085	8.342227E-02
13	-15.12802	.1135	9.858591E-02
14	-7.677793	8.300001E-02	7.708182E-02
15	8.834712E-02	.085	8.507516E-02
16	-19.54579	.0775	6.482872E-02
17	-15.85161	.08	6.905385E-02
18	-17.44727	.087	.0740758
19	-11.62214	.085	7.614977E-02
20	-22.41119	.101	.0825088
21	-23.32625	8.250001E-02	6.689574E-02
22	-25.12089	.0805	6.433778E-02
23	-10.33794	.0685	.062082
24	-21.22844	7.150001E-02	5.897957E-02
25	.9852421	.054	5.453733E-02
26	-9.908647	.0515	.0468571
27	-5.386712	.0535	5.076542E-02
28	-3.491482	.0555	5.362761E-02
29	-17.73227	6.800001E-02	5.775817E-02
30	1.886008	.06	6.115336E-02
31	-30.54378	.0515	3.945037E-02
32	-20.86304	.0525	.0434376
33	-21.44243	.0515	4.240693E-02
34	-28.95788	.0495	3.838463E-02
35	-19.08842	4.200001E-02	3.526792E-02
36	36.61191	.0355	5.600421E-02
37	-45.70048	.0485	3.328747E-02
38	-35.99504	.0475	3.492775E-02
39	-9.112708	.041	3.757582E-02
40	-28.90261	.038	2.947962E-02

Tabla 4.6c Error existente entre la profundidad rompiente experimental y la obtenida con el metodo de Goda para una pendiente $m = 50$. Pendiente experimental $m = 50$.

CALCULO DE LA ALTURA Y PROFUNDIDAD ROMPIENTE METODO DE IVERSEN				
HO [m]	T [s]	LO [m]	Hb [m]	db [m]
.088	1.3	2.638608	8.671316E-02	9.788415E-02
.076	1.42	3.148218	8.140215E-02	9.240243E-02
.07	1.57	3.848464	8.065751E-02	9.362992E-02
.064	1.75	4.781501	7.981748E-02	9.540143E-02
.056	1.96	5.997916	7.664301E-02	9.460684E-02
.049	1.96	5.997916	6.941375E-02	8.659118E-02
.055	1.75	4.781501	7.132881E-02	8.646866E-02
.06	1.57	3.848464	7.194056E-02	8.473652E-02
.065	1.42	3.148218	7.248656E-02	8.321663E-02
.082	1.3	2.638608	8.228685E-02	9.272561E-02
.065	1.3	2.638608	6.925761E-02	7.852431E-02
.057	1.42	3.148218	6.575638E-02	.0763645
.067	1.57	3.848464	7.807834E-02	9.100506E-02
.046	1.75	4.781501	6.247211E-02	7.692349E-02
.05	1.96	5.997916	7.046206E-02	8.776369E-02
.035	1.96	5.997916	5.407869E-02	6.901081E-02
.04	1.75	4.781501	5.631856E-02	.0701284
.046	1.57	3.848464	5.906877E-02	7.135511E-02
.05	1.42	3.148218	.0596647	7.015229E-02
.058	1.3	2.638608	6.364319E-02	7.270475E-02
.045	1.3	2.638608	5.272029E-02	6.156794E-02
.041	1.42	3.148218	.0514958	6.171029E-02
.037	1.57	3.848464	5.025764E-02	6.188684E-02
.033	1.75	4.781501	4.882752E-02	6.165027E-02
.028	1.96	5.997916	4.582727E-02	5.919576E-02
.023	1.96	5.997916	3.960401E-02	5.161917E-02
.027	1.75	4.781501	4.207304E-02	5.379378E-02
.031	1.57	3.848464	4.407485E-02	5.504025E-02
.036	1.42	3.148218	4.675904E-02	5.671421E-02
.04	1.3	2.638608	4.830869E-02	5.705505E-02
.023	1.3	2.638608	3.204139E-02	3.977069E-02
.025	1.42	3.148218	.0356754	.0445986
.023	1.57	3.848464	3.531907E-02	4.500679E-02
.019	1.75	4.781501	3.241716E-02	.0421879
.016	1.96	5.997916	3.025537E-02	3.995112E-02
.031	1.75	4.781501	.0466143	5.909887E-02
.017	1.57	3.848464	2.822326E-02	3.655421E-02
.019	1.42	3.148218	2.910306E-02	3.706373E-02
.02	1.3	2.638608	2.888528E-02	3.623336E-02
.016	1.3	2.638608	2.447792E-02	3.116444E-02

Tabla 4.7a pendiente $m = 50$

N	ERROR %	Hb EX	Hb TEO
1	-72.98413	.15	8.671316E-02
2	-59.70093	.13	8.140215E-02
3	-9.103281	8.799999E-02	8.065751E-02
4	12.29991	.07	7.981748E-02
5	-4.380028	.08	7.664301E-02
6	13.5618	.06	6.941375E-02
7	-17.76449	.084	7.132881E-02
8	-39.00365	.1	7.194056E-02
9	-51.75228	.11	7.248656E-02
10	-21.52611	.1	8.228685E-02
11	-29.94962	9.000001E-02	6.925761E-02
12	-6.453561	.07	6.575638E-02
13	-2.461196	.08	7.807834E-02
14	-28.05714	.08	6.247211E-02
15	14.84779	.06	7.046206E-02
16	-10.94943	.06	5.407869E-02
17	-31.39539	.074	5.631856E-02
18	-37.12831	.081	5.906877E-02
19	-34.08264	.08	.0596647
20	-19.41578	7.600001E-02	6.364319E-02
21	-13.80817	.06	5.272029E-02
22	-16.51436	.06	.0514958
23	-31.32333	6.600001E-02	5.025764E-02
24	-12.64139	.055	4.882752E-02
25	-17.83378	.054	4.582727E-02
26	-26.24984	.05	3.960401E-02
27	-42.60916	.06	4.207304E-02
28	-13.44339	.05	4.407485E-02
29	-6.931198	.05	4.675904E-02
30	-24.20127	.06	4.830869E-02
31	-37.32239	.044	3.204139E-02
32	-17.72818	.042	.0356754
33	-13.25326	.04	3.531907E-02
34	-23.39142	.04	3.241716E-02
35	-12.37676	.034	3.025537E-02
36	-2.972701	.048	.0466143
37	14.96375	.024	2.822326E-02
38	-9.954081	.032	2.910306E-02
39	3.231645	.03	3.100187E-02
40	-22.55944	.03	2.447792E-02

Tabla 4.7b Error existente entre la altura rompiente experimental y la obtenida con el metodo de Iversen para una pendiente $m = 50$. Pendiente experimental $m = 50$.

N	ERROR %	Hb EX	Hb TEO
1	3.968111	9.399999E-02	9.788415E-02
2	4.764408	.088	9.240243E-02
3	-44.18468	.135	9.362992E-02
4	-17.39866	.112	9.540143E-02
5	6.983477	.088	9.460684E-02
6	2.415008	.0845	8.659118E-02
7	-24.32251	.1075	8.646866E-02
8	-29.81415	.11	8.473652E-02
9	-35.18932	.1125	8.321663E-02
10	-30.49255	.121	9.272561E-02
11	-43.26773	.1125	7.852431E-02
12	-42.08173	.1085	.0763645
13	-24.71835	.1135	9.100506E-02
14	-7.899427	8.300001E-02	7.692349E-02
15	3.149011	.085	8.776369E-02
16	-12.30125	.0775	6.901081E-02
17	-14.07647	.08	.0701284
18	-21.92539	.087	7.135511E-02
19	-21.16497	.085	7.015229E-02
20	-38.91802	.101	7.270475E-02
21	-33.99832	8.250001E-02	6.156794E-02
22	-30.44827	.0805	6.171029E-02
23	-10.68589	.0685	6.188684E-02
24	-15.9768	7.150001E-02	6.165027E-02
25	8.777242	.054	5.919576E-02
26	.2308606	.0515	5.161917E-02
27	.5461091	.0535	5.379378E-02
28	-.8353032	.0555	5.504025E-02
29	-19.89942	6.800001E-02	5.671421E-02
30	-5.161601	.06	5.705505E-02
31	-29.49234	.0515	3.977069E-02
32	-17.71669	.0525	.0445986
33	-14.42719	.0515	4.500679E-02
34	-17.33222	.0495	.0421879
35	-5.128476	4.200001E-02	3.995112E-02
36	39.93117	.0355	5.909887E-02
37	-32.67964	.0485	3.655421E-02
38	-28.15764	.0475	3.706373E-02
39	-6.179916	.041	.0386137
40	-21.93386	.038	3.116444E-02

Tabla 4.7c Error existente entre la profundidad rompiente experimental y la obtenida con el metodo de Iversen para una pendiente $m = 50$. Pendiente experimental $m = 50$.

CALCULO DE LA ALTURA Y PROFUNDIDAD ROMPIENTE METODO DE T.O.S				
H0 [m]	T [s]	L0 [m]	Hb [m]	db [m]
.088	1.3	2.638608	8.284496E-02	.1060416
.076	1.42	3.148218	7.968625E-02	.1019984
.07	1.57	3.848464	8.065797E-02	.1032422
.064	1.75	4.781501	8.168221E-02	.1045532
.056	1.96	5.997916	8.058946E-02	.1031545
.049	1.96	5.997916	7.372538E-02	9.436848E-02
.055	1.75	4.781501	7.383279E-02	9.450597E-02
.06	1.57	3.848464	7.278068E-02	9.315928E-02
.065	1.42	3.148218	.0717987	9.190233E-02
.082	1.3	2.638608	7.903515E-02	.1011165
.065	1.3	2.638608	6.769448E-02	8.664892E-02
.057	1.42	3.148218	6.577954E-02	8.419781E-02
.067	1.57	3.848464	7.833667E-02	.1002709
.046	1.75	4.781501	6.554095E-02	8.389241E-02
.05	1.96	5.997916	7.472505E-02	9.564806E-02
.035	1.96	5.997916	5.891125E-02	.0754064
.04	1.75	4.781501	5.971005E-02	7.642886E-02
.046	1.57	3.848464	6.096591E-02	7.803636E-02
.05	1.42	3.148218	6.027738E-02	7.715505E-02
.058	1.3	2.638608	6.274266E-02	8.031061E-02
.045	1.3	2.638608	5.297683E-02	6.781035E-02
.041	1.42	3.148218	5.280766E-02	.0675938
.037	1.57	3.848464	5.272902E-02	6.749315E-02
.033	1.75	4.781501	5.252308E-02	6.722953E-02
.028	1.96	5.997916	5.076817E-02	6.498325E-02
.023	1.96	5.997916	.0445285	5.699648E-02
.027	1.75	4.781501	4.594625E-02	.0588112
.031	1.57	3.848464	4.686224E-02	5.998367E-02
.036	1.42	3.148218	.048422	6.198015E-02
.04	1.3	2.638608	4.897611E-02	6.268942E-02
.023	1.3	2.638608	3.386592E-02	4.334837E-02
.025	1.42	3.148218	3.797238E-02	4.860464E-02
.023	1.57	3.848464	3.840612E-02	4.915983E-02
.019	1.75	4.781501	3.635046E-02	4.652859E-02
.016	1.96	5.997916	3.495958E-02	4.474826E-02
.031	1.75	4.781501	.0503789	6.448498E-02
.017	1.57	3.848464	3.139649E-02	4.018751E-02
.019	1.42	3.148218	3.162351E-02	4.047809E-02
.02	1.3	2.638608	3.085302E-02	3.949186E-02
.016	1.3	2.638608	2.658832E-02	3.403305E-02

Tabla 4.8a pendiente m = 50

N	ERROR %	Hb EX	Hb TEO
1	-81.06111	.15	8.284496E-02
2	-63.13981	.13	7.968625E-02
3	-9.102667	8.799999E-02	8.065797E-02
4	14.30202	.07	8.168221E-02
5	.7314358	.08	8.058946E-02
6	18.61689	.06	7.372538E-02
7	-13.77059	.084	7.383279E-02
8	-37.39909	.1	7.278068E-02
9	-53.20613	.11	.0717987
10	-26.52599	.1	7.903515E-02
11	-22.95029	9.000001E-02	6.769448E-02
12	-6.416074	.07	6.577954E-02
13	-2.123306	.08	7.833667E-02
14	-22.0611	.08	6.554095E-02
15	19.70564	.06	7.472505E-02
16	-1.848125	.06	5.891125E-02
17	-23.93222	.074	5.971005E-02
18	-32.86113	.081	6.096591E-02
19	-32.71977	.08	6.027738E-02
20	-21.1297	7.600001E-02	6.274266E-02
21	-13.25705	.06	5.297683E-02
22	-13.61989	.06	5.280766E-02
23	-25.16828	6.600001E-02	5.272902E-02
24	-4.715884	.055	5.252308E-02
25	-6.365861	.054	5.076817E-02
26	-12.28764	.05	.0445285
27	-30.58738	.06	4.594625E-02
28	-6.69571	.05	4.686224E-02
29	-3.258864	.05	.048422
30	-22.50871	.06	4.897611E-02
31	-29.92412	.044	3.386592E-02
32	-10.60672	.042	3.797238E-02
33	-4.150079	.04	3.840612E-02
34	-10.03987	.04	3.635046E-02
35	2.744824	.034	3.495958E-02
36	4.722009	.048	.0503789
37	23.55834	.024	3.139649E-02
38	-1.190559	.032	3.162351E-02
39	8.75093	.03	3.287705E-02
40	-12.83149	.03	2.658832E-02

Tabla 4.8b Error existente entre la altura rompiente experimental y la obtenida con el metodo derivado de la onda solitaria. Pendiente experimental $m = 50$.

N	ERROR %	db EX	db TEO
1	11.35551	9.399999E-02	.1060416
2	13.72414	.088	.1019984
3	-30.7605	.135	.1032422
4	-7.122472	.112	.1045532
5	14.69107	.088	.1031545
6	10.45738	.0845	9.436848E-02
7	-13.74943	.1075	9.450597E-02
8	-18.07735	.11	9.315928E-02
9	-22.41256	.1125	9.190233E-02
10	-19.6066	.121	.101165
11	-29.83427	.1125	8.664892E-02
12	-28.86322	.1085	8.419781E-02
13	-13.19333	.1135	.1002709
14	1.063753	8.300001E-02	8.389241E-02
15	11.13254	.085	9.564806E-02
16	-2.77643	.0775	.0754064
17	-4.672499	.08	7.642886E-02
18	-11.48649	.087	7.803636E-02
19	-10.16778	.085	7.715505E-02
20	-25.76171	.101	8.031061E-02
21	-21.66286	8.250001E-02	6.781035E-02
22	-19.09377	.0805	.0675938
23	-1.49178	.0685	6.749315E-02
24	-6.352077	7.150001E-02	6.722953E-02
25	16.90166	.054	6.498325E-02
26	9.643536	.0515	5.699648E-02
27	9.030925	.0535	.0588112
28	7.474812	.0555	5.998367E-02
29	-9.71255	6.800001E-02	6.198015E-02
30	4.290066	.06	6.268942E-02
31	-18.80492	.0515	4.334837E-02
32	-8.014373	.0525	4.860464E-02
33	-4.760341	.0515	4.915983E-02
34	-6.386213	.0495	4.652859E-02
35	6.141598	4.200001E-02	4.474826E-02
36	44.94842	.0355	6.448498E-02
37	-20.68425	.0485	4.018751E-02
38	-17.34745	.0475	4.047809E-02
39	2.57261	.041	4.208262E-02
40	-11.65616	.038	3.403305E-02

Tabla 4.8c Error existente entre la profundidad rompiente y el obtenido con el metodo derivado de la teoria de la onda solitaria. Pendiente experimental $m = 50$.

N	ERROR %	Hb EX	Hb TEO
1	3.984859	.03	3.124507E-02
2	-1.45163	.03	2.957074E-02
3	-9.243726	.03	2.746153E-02
4	7.566558	.024	2.596463E-02
5	-23.51651	.03	2.428825E-02
6	24.34489	.026	3.436648E-02
7	-17.72171	.03	2.548383E-02
8	-16.51009	.03	2.574884E-02
9	16.24798	.024	2.865603E-02
10	9.49185	.026	2.872669E-02
11	23.18789	.024	3.124507E-02
12	-2.053227	.04	3.919523E-02
13	-13.01492	4.600001E-02	4.070259E-02
14	1.696608	.04	4.069036E-02
15	-6.372998	.04	3.760353E-02
16	-12.86059	.04	3.544195E-02
17	-33.60438	.044	3.293305E-02
18	-33.27113	.04	.030014
19	-19.22358	.05	4.193802E-02
20	-18.4565	.046	3.883282E-02
21	-10.60653	.05	4.520529E-02
22	11.75086	.044	4.985884E-02
23	-16.44857	.064	5.495989E-02
24	-.1934886	.054	5.389572E-02
25	-15.92116	.06	5.175932E-02
26	-1.228543	.05	4.939319E-02
27	-32.36081	6.000001E-02	4.533065E-02
28	-5.573396	.052	4.925483E-02
29	-13.19228	6.000001E-02	5.300716E-02
30	-32.42463	.064	4.832938E-02
31	-33.05971	.066	.0496018
32	-8.161066	6.800001E-02	6.286921E-02
33	-3.940183	.06	5.772551E-02
34	-7.881843	.06	.0556164
35	-37.50448	9.000001E-02	6.545242E-02
36	-12.96743	7.600001E-02	6.727603E-02
37	5.433988	.064	6.767759E-02
38	10.65699	6.800001E-02	7.611116E-02
39	23.01591	.059	7.663921E-02
40	26.14574	.066	8.936518E-02
41	8.738176	.06	.0657449
42	.9361844	.06	6.056702E-02

Tabla 4.9 Error existente entre la altura rompiente experimental y la obtenida con el metodo de Goda sin considerar la pendiente. Pendiente experimental $m = 75$.

N	ERROR %	db EX	db TEO
1	-.9599812	.0445	4.407687E-02
2	3.78068	.04	4.157169E-02
3	4.990874	.0385	4.052242E-02
4	-19.37613	.0475	.0397902
5	5.950315	.0365	3.880927E-02
6	26.78128	.0395	5.394795E-02
7	12.68875	.0365	4.180446E-02
8	9.293545	.037	4.079092E-02
9	-2.81479	.0445	4.328171E-02
10	-2.115495	.043	4.210919E-02
11	-5.49751	.0465	4.407687E-02
12	-19.67692	.064	5.347732E-02
13	-.7468833	.055	5.459226E-02
14	4.705069	.054	5.666619E-02
15	4.707505	.052	5.456883E-02
16	5.725458	.0505	5.356696E-02
17	44.25546	.029	5.202304E-02
18	20.939	.038	4.806415E-02
19	14.2867	5.300001E-02	6.183405E-02
20	-18.56682	.0665	5.608652E-02
21	9.657211	.056	6.198613E-02
22	-20.3187	7.900001E-02	6.565896E-02
23	-8.625414	.0775	7.134611E-02
24	-11.08923	.08	7.201418E-02
25	-8.847024	.078	7.166021E-02
26	7.163721	.066	.0710929
27	27.54369	.0495	6.831703E-02
28	27.72337	5.300001E-02	7.332938E-02
29	2.656255	.0735	7.550562E-02
30	-13.18199	.0765	6.759026E-02
31	-37.12569	.092	6.709173E-02
32	-6.856157	.0855	8.001411E-02
33	4.557731	.0775	8.120092E-02
34	29.3029	.0575	.0813329
35	27.29729	.064	8.802974E-02
36	-10.91242	9.649999E-02	8.700558E-02
37	-33.79599	.114	8.520436E-02
38	-32.19412	.1245	9.417968E-02
39	-32.28684	.127	.0960035
40	2.474268	.1105	.1133034
41	4.108421	.087	9.072746E-02
42	-13.7562	.0995	8.746776E-02

Tabla 4.10 Error existente entre la profundidad rompiente experimental y la obtenida con el metodo de Goda sin considerar la pendiente. Pendiente experimental $m = 75$.

N	ERROR %	Hb EX	Hb TEO
1	-8.917351	.054	4.957888E-02
2	18.57307	.052	6.386094E-02
3	18.66461	.046	5.655595E-02
4	5.126313	.06	6.324198E-02
5	4.7912	6.200001E-02	6.512003E-02
6	5.465652	.056	5.923773E-02
7	10.72731	.05	5.600817E-02
8	4.797091	.054	5.672096E-02
9	6.869743	.046	4.939319E-02
10	7.347445	.042	4.533065E-02
11	5.179741	.046	4.851283E-02
12	-1.516076	.054	5.319355E-02
13	-2.720118	.052	5.062299E-02
14	10.03149	.04	.04446
15	-6.504745	.044	4.131271E-02
16	-11.7818	.04	.035784
17	-.5997148	.04	3.976154E-02
18	-18.75703	.049	4.126072E-02
19	-2.411826	.044	4.296379E-02
20	16.80341	.038	4.567496E-02
21	-8.190303	.04	3.697189E-02
22	16.62805	.032	3.838221E-02
23	-11.21122	.04	3.596759E-02
24	2.302539	.032	3.275418E-02
25	-6.616908	.032	.030014
26	-8.667875	.026	2.392612E-02
27	14.55928	.022	2.574884E-02
28	19.93654	.024	2.997622E-02
29	30.79001	.02	2.889756E-02
30	35.98991	.02	3.124507E-02
31	-11.76189	.028	2.505326E-02
32	-4.491858	.026	2.488232E-02
33	-3.466969	.024	2.319581E-02
34	-4.859953	.02	1.907306E-02

Tabla 4.11 Error existente entre la altura rompiente experimental y la obtenida con el metodo de Goda sin considerar la pendiente. Pendiente experimental $m = 100$.

N	ERROR %	db EX	db TEO
1	1.277548	.0745	7.546409E-02
2	9.591523	.0775	8.572205E-02
3	8.516507	.073	7.979581E-02
4	-2.379082	.0845	.0825364
5	-11.80996	.0925	8.272966E-02
6	-14.65959	.0875	7.631285E-02
7	-6.162197	7.900001E-02	7.441444E-02
8	8.312908	.0705	7.689196E-02
9	15.60338	.06	.0710929
10	-4.659117	7.150001E-02	6.831703E-02
11	-14.68313	7.550001E-02	6.583358E-02
12	-24.2446	8.649999E-02	6.962073E-02
13	6.84959	.0655	7.031638E-02
14	16.91206	.054	6.499139E-02
15	-7.734414	6.800001E-02	6.311818E-02
16	31.94832	.038	5.583991E-02
17	9.755632	.0525	5.817538E-02
18	-.7390219	.0595	5.906351E-02
19	-19.61871	.071	5.935527E-02
20	3.168053	.059	.0609303
21	-4.168015	5.300001E-02	5.087935E-02
22	20.2423	.043	5.391329E-02
23	1.227516	.0515	5.214003E-02
24	5.156918	.0475	5.008273E-02
25	29.26121	.034	4.806415E-02
26	29.32015	.028	3.961525E-02
27	9.293545	.037	4.079092E-02
28	-8.945719	.049	4.497653E-02
29	-15.3014	.049	4.249732E-02
30	-14.57258	.0505	4.407687E-02
31	-10.05989	.04	3.634385E-02
32	26.18143	.0275	.0372535
33	15.61073	.0305	3.614204E-02
34	24.96522	.0245	3.265153E-02

Tabla 4.12 Error existente entre la profundidad rompiente experimental y la obtenida con el metodo de Goda sin considerar la pendiente. Pendiente experimental $m = 100$.

N	TEORICOS		MEDIDOS	
	Hb	db	Hb	db
1	9.594194E-02	.1127312	.15	9.399999E-02
2	8.957937E-02	.1032801	.13	.088
3	8.834002E-02	.1004965	8.799999E-02	.135
4	8.697199E-02	9.778449E-02	.07	.112
5	8.301058E-02	9.232381E-02	.08	.088
6	7.501273E-02	8.314973E-02	.06	.0845
7	7.752536E-02	8.673633E-02	.084	.1075
8	7.858958E-02	8.884905E-02	.1	.11
9	7.955951E-02	9.102168E-02	.11	.1125
10	9.093688E-02	.1063693	.1	.121
11	.0762407	8.799496E-02	9.000001E-02	.1125
12	7.201401E-02	8.190779E-02	.07	.1085
13	8.545248E-02	9.703281E-02	.08	.1135
14	6.769632E-02	7.535143E-02	.08	8.300001E-02
15	7.617137E-02	8.447508E-02	.06	.085
16	5.811225E-02	6.395936E-02	.06	.0775
17	6.088544E-02	6.752853E-02	.074	.08
18	6.424155E-02	7.196008E-02	.081	.087
19	6.519936E-02	7.376335E-02	.08	.085
20	6.992658E-02	8.024077E-02	7.600001E-02	.101
21	5.767956E-02	6.544076E-02	.06	8.250001E-02
22	5.608594E-02	6.300012E-02	.06	.0805
23	5.445983E-02	6.061711E-02	6.600001E-02	.0685
24	5.261713E-02	5.810436E-02	.055	7.150001E-02
25	4.906164E-02	5.379166E-02	.054	.054
26	4.225968E-02	4.620028E-02	.05	.0515
27	4.518625E-02	4.970273E-02	.06	.0535
28	4.761873E-02	.0527665	.05	.0555
29	5.081612E-02	5.684345E-02	.05	6.800001E-02
30	5.274877E-02	5.957163E-02	.06	.06
31	.0346635	3.848457E-02	.044	.0515
32	3.853469E-02	4.268612E-02	.042	.0525
33	.0379686	4.180767E-02	.04	.0515
34	3.461154E-02	.0378576	.04	.0495
35	3.208848E-02	.0349289	.034	4.200001E-02
36	5.017955E-02	5.534124E-02	.048	.0355
37	3.018723E-02	.0330693	.024	.0485
38	3.129141E-02	3.446175E-02	.032	.0475
39	3.351394E-02	3.716758E-02	.03	.041
40	2.632057E-02	2.898991E-02	.03	.038
41	3.235171E-02	3.583891E-02	.03	.0445

Tabla 4.13a Valores de Hb y db experimentales y los obtenidos mediante el metodo para pendiente uniforme basado en las graficas de Goda

N	Error % Hb	Error % db
1	-56.34457	16.6158
2	-45.1227	14.79482
3	.3849101	-34.33304
4	19.51432	-14.53758
5	3.626749	4.68331
6	20.01358	-1.6239
7	-8.351648	-23.93884
8	-27.24334	-23.80549
9	-38.26128	-23.59694
10	-9.966381	-13.75466
11	-18.0472	-27.84822
12	2.796694	-32.46604
13	6.380712	-16.97075
14	-18.17482	-10.15054
15	21.23025	-.6213942
16	-3.248454	-21.1707
17	-21.53972	-18.46844
18	-26.08662	-20.90036
19	-22.70059	-15.2334
20	-8.685428	-25.87117
21	-4.022989	-26.06823
22	-6.978687	-27.77753
23	-21.19026	-13.0044
24	-4.528698	-23.05445
25	-10.06563	-.3873102
26	-18.31611	-11.47119
27	-32.78375	-7.639972
28	-5.000715	-5.180375
29	1.606022	-19.62681
30	-13.74673	-.7190921
31	-26.93466	-33.81986
32	-8.992701	-22.9908
33	-5.350213	-23.18315
34	-15.56838	-30.75315
35	-5.957044	-20.24427
36	4.343492	35.85254
37	20.49617	-46.6617
38	-2.264491	-37.83399
39	10.48501	-10.31119
40	-13.97929	-31.0801

Tabla 4.13b Error existente entre la altura Hb rompiente teorica y media asi como la existente entre la profundidad rompiente db teorica y medida

N	db max [m]	db teo [m]	db min [m]
1	.1470853	.1127312	.1127312
2	.1362253	.1032801	.1032801
3	.1335821	.1004965	.1004965
4	.1308664	9.778449E-02	9.778449E-02
5	.1243421	9.232381E-02	9.232381E-02
6	.1122059	8.314973E-02	8.314973E-02
7	.116413	8.673633E-02	8.673633E-02
8	.1185273	8.884905E-02	8.884905E-02
9	.1205925	9.102168E-02	9.102168E-02
10	.1391429	.1063693	.1063693
11	.1159933	8.799496E-02	8.799496E-02
12	.108886	8.190779E-02	8.190779E-02
13	.1291157	9.703281E-02	9.703281E-02
14	.1014364	7.535143E-02	7.535143E-02
15	.113962	8.447508E-02	8.447508E-02
16	.0866701	6.395936E-02	6.395936E-02
17	9.109552E-02	6.752853E-02	6.752853E-02
18	9.651394E-02	7.196008E-02	7.196008E-02
19	9.836181E-02	7.376335E-02	7.376335E-02
20	.1061257	8.024077E-02	8.024077E-02
21	8.712074E-02	6.544076E-02	6.544076E-02
22	8.435955E-02	6.300012E-02	6.300012E-02
23	8.160218E-02	6.061711E-02	6.061711E-02
24	.0785826	5.810436E-02	5.810436E-02
25	7.305621E-02	5.379166E-02	5.379166E-02
26	.0628528	4.620028E-02	4.620028E-02
27	6.737511E-02	4.970273E-02	4.970273E-02
28	7.121937E-02	.0527665	.0527665
29	7.630035E-02	5.684345E-02	5.684345E-02
30	7.951927E-02	5.957163E-02	5.957163E-02
31	5.188465E-02	3.848457E-02	3.848457E-02
32	5.762512E-02	4.268612E-02	4.268612E-02
33	5.663785E-02	4.180767E-02	4.180767E-02
34	5.148816E-02	.0378576	.0378576
35	4.764023E-02	.0349289	.0349289
36	7.490218E-02	5.534124E-02	5.534124E-02
37	4.493507E-02	.0330693	.0330693
38	4.668106E-02	3.446175E-02	3.446175E-02
39	5.014118E-02	3.716758E-02	3.716758E-02
40	3.926695E-02	2.898991E-02	2.898991E-02

Tabla 4.14a Pendiente del canal m = 50.

N	db max [m]	db exp [m]	db min [m]
1	.1470853	9.399999E-02	.1127312
2	.1362253	.088	.1032801
3	.1335821	.135	.1004965
4	.1308664	.112	9.778449E-02
5	.1243421	.088	9.232381E-02
6	.1122059	.0845	8.314973E-02
7	.116413	.1075	8.673633E-02
8	.1185273	.11	8.884905E-02
9	.1205925	.1125	9.102168E-02
10	.1391429	.121	.1063693
11	.1159933	.1125	8.799496E-02
12	.108886	.1085	8.190779E-02
13	.1291157	.1135	9.703281E-02
14	.1014364	8.300001E-02	7.535143E-02
15	.113962	.085	8.447508E-02
16	.0866701	.0775	6.395936E-02
17	9.109552E-02	.08	6.752853E-02
18	9.651394E-02	.087	7.196008E-02
19	9.836181E-02	.085	7.376335E-02
20	.1061257	.101	8.024077E-02
21	8.712074E-02	8.250001E-02	6.544076E-02
22	8.435955E-02	.0805	6.300012E-02
23	8.160218E-02	.0685	6.061711E-02
24	.0785826	7.150001E-02	5.810436E-02
25	7.305621E-02	.054	5.379166E-02
26	.0628528	.0515	4.620028E-02
27	6.737511E-02	.0535	4.970273E-02
28	7.121937E-02	.0555	.0527665
29	7.630035E-02	6.800001E-02	5.684345E-02
30	7.951927E-02	.06	5.957163E-02
31	5.188465E-02	.0515	3.848457E-02
32	5.762512E-02	.0525	4.268612E-02
33	5.663785E-02	.0515	4.180767E-02
34	5.148816E-02	.0495	.0378576
35	4.764023E-02	4.200001E-02	.0349289
36	7.490218E-02	.0355	5.534124E-02
37	4.493507E-02	.0485	.0330693
38	4.668106E-02	.0475	3.446175E-02
39	5.014118E-02	.041	3.716758E-02
40	3.926695E-02	.038	2.898991E-02

Tabla 4.14b pendiente m = 50

H [m]	d [m]	T [s]	d/Lo	d/L	ks	kr	H ₀ [m]
0.034	0.185	1.67	0.0425	0.0860	1.0525	0.95	0.0323
0.028	0.181	1.81	0.0354	0.0708	1.0896	0.95	0.0257
0.027	0.1815	1.963	0.0302	0.07135	1.1250	0.95	0.0240
0.018	0.180	1.970	0.0297	0.0710	1.1274	0.95	0.0160
0.018	0.181	1.817	0.0351	0.07748	1.0920	0.95	0.0165
0.025	0.1815	1.650	0.0427	0.0863	1.0515	0.95	0.0238
0.029	0.1825	1.488	0.0528	0.0971	1.0136	0.95	0.0286

m	MED			TEO		Error Hb %	Error db %
	Ho [m]	Hb [m]	db [m]	Hb [m]	db [m]		
25	0.0340	0.0460	0.0410	0.0525	0.0525	12.38	12.9
25	0.0710	0.0440	0.0360	0.0500	0.0488	12.00	26.23
25	0.0253	0.0440	0.0500	0.0500	0.0488	12.00	-02.46
40	0.0168	0.0400	0.0440	0.0352	0.0352	-13.64	-18.28
20	0.0174	0.0380	0.0490	0.0380	0.0380	0.000	-43.27
25	0.0250	0.0390	0.0585	0.0448	0.0448	12.95	-33.26
20	0.0301	0.0400	0.0540	0.4890	0.0489	18.20	-19.47

Tabla 4.15 NMO = 0.000

H [m]	d [m]	T [s]	d/Lo	d/L	ks	kr	H _b [m]
.024	0.156	1.488	0.0452	0.0890	1.0525	0.95	0.0228
.022	0.155	1.648	0.0366	0.07937	1.0854	0.95	0.0241
.020	0.154	1.815	0.0300	0.07135	1.125	0.95	0.0187
.014	0.151	1.958	0.0252	0.06505	1.1662	0.95	0.0126
.031	0.154	1.648	0.0363	0.07902	1.0842	0.95	0.0301
.027	0.1545	1.480	0.0452	0.08905	1.0412	0.95	0.0273
.024	0.154	1.816	0.0299	0.07122	1.1258	0.95	0.0224
.021	0.1525	1.960	0.0254	0.06532	0.9808	0.95	0.0214

		MED		TEO			
m	H _o [m]	H _b [m]	db [m]	H _b [m]	db [m]	Error H _b %	Error db%
16.6	0.024	0.036	0.039	0.0433	0.0381	16.86	-2.86
16.6	0.0241	0.032	0.040	0.0410	0.0359	21.95	-11.42
16.6	0.0187	0.0255	0.0327	0.0410	0.0359	20.12	8.77
25	0.0216	0.036	0.0350	0.036	0.0351	0.0	2.8
25	0.0301	0.042	0.064	0.0500	0.0500	16.0	-28.0
16.6	0.0273	0.042	0.046	0.045	0.0396	6.67	16.1
25	0.0224	0.0485	0.0485	0.044	0.0425	11.36	-14.12
25	0.0225	0.0425	0.0425	0.0455	0.0432	9.89	5.09

Tabla 4.16 NMO = -0.028

m	MED		METODO 1		METODO 1	
	Hb [m]	db [m]	Hb [m]	db [m]	Error Hb %	Error db %
25	0.0460	0.0410	0.0572	0.0572	19.58	28.32
25	0.0440	0.0360	0.0501	0.0496	12.18	27.42
25	0.0440	0.0500	0.0499	0.0489	11.82	-2.250
40	0.0400	0.0440	0.0336	0.0356	-19.05	-23.60
20	0.0380	0.0490	0.0363	0.0334	-4.680	-46.71
25	0.0390	0.0585	0.0443	0.0434	11.96	-34.79
20	0.0400	0.0540	0.0561	0.0527	28.70	-2.470

Tabla 4.17 NMO = 0.00

m	MED		METODO 2		METODO 2	
	Hb [m]	db [m]	Hb [m]	db [m]	Error Hb %	Error db %
25	0.0460	0.0410	0.0526	0.0579	12.63	29.20
25	0.0440	0.0360	0.0360	0.0385	-22.29	-6.490
25	0.0440	0.0500	0.0470	0.0582	6.940	14.02
40	0.0400	0.0440	0.0309	0.0490	-29.53	10.95
20	0.0380	0.0490	0.0322	0.0447	-18.10	9.560
25	0.0390	0.0585	0.0428	0.0493	8.960	-18.74
20	0.0400	0.0540	0.0478	0.0573	16.25	5.780

Tabla 4.18 NMO = 0.00

m	MED		METODO 3		METODO 3	
	Hb [m]	db [m]	Hb [m]	db [m]	Error Hb %	Error db %
25	0.0460	0.0410	0.0502	0.0642	8.340	36.18
25	0.0440	0.0360	0.0455	0.0582	3.230	38.14
25	0.0440	0.0500	0.0459	0.0587	4.050	14.82
40	0.0400	0.0440	0.0351	0.0449	-14.03	2.000
20	0.0380	0.0490	0.0339	0.0434	-12.00	-12.84
25	0.0390	0.0585	0.0406	0.0519	3.980	-12.53
20	0.0400	0.0540	0.0429	0.0548	6.650	1.550

Tabla 4.19 NMO = 0.00

m	MED		METODO 1		METODO 1	
	Hb [m]	db [m]	Hb [m]	db [m]	Error Hb %	Error db %
16.6	0.0360	0.0390	0.0442	0.0393	18.55	0.760
16.6	0.0320	0.0400	0.0463	0.0407	30.89	1.820
16.6	0.0255	0.0327	0.0408	0.0357	37.50	8.400
25	0.0360	0.0350	0.0277	0.0266	-29.96	-31.58
25	0.0420	0.0640	0.0533	0.0528	21.20	-21.21
16.6	0.0420	0.0460	0.0491	0.0442	14.46	-4.070
25	0.0485	0.0485	0.0435	0.0392	-11.49	-23.72
25	0.0425	0.0425	0.0437	0.0424	2.750	-0.240

Tabla 4.20 NMO = -0.028

m	MED		METODO 2		METODO 2	
	Hb [m]	db [m]	Hb [m]	db [m]	Error Hb %	Error db %
16.6	0.0360	0.0390	0.0413	0.0433	12.83	9.93
16.6	0.0320	0.0400	0.0470	0.0508	31.91	21.26
16.6	0.0255	0.0327	0.0402	0.0470	44.03	30.43
25	0.0360	0.0350	0.0255	0.0318	-41.18	-10.06
25	0.0420	0.0640	0.0506	0.0576	17.00	-11.11
16.6	0.0420	0.0460	0.0491	0.0501	14.46	8.180
25	0.0485	0.0485	0.0444	0.0554	-9.230	12.45
25	0.0425	0.0425	0.0428	0.0539	0.070	21.15

Tabla 4.21 NMO = -0.028

m	MED		METODO 3		METODO 3	
	Hb [m]	db [m]	Hb [m]	db [m]	Error Hb %	Error db %
16.6	0.0360	0.0390	0.0368	0.0472	2.170	17.37
16.6	0.0320	0.0400	0.0409	0.0524	21.76	23.66
16.6	0.0255	0.0327	0.0369	0.0472	30.89	30.72
25	0.0360	0.0350	0.0298	0.0381	-20.81	8.140
25	0.0420	0.0640	0.0475	0.0607	11.58	5.160
16.6	0.0420	0.0460	0.0414	0.0529	-1.450	13.04
25	0.0485	0.0485	0.0416	0.0532	-16.49	8.830
25	0.0425	0.0425	0.0424	0.0543	-0.240	21.73

Tabla 4.22 NMO = -0.028

m	MED		METODO 4		METODO 4	
	Hb [m]	db [m]	Hb [m]	db [m]	Error Hb %	Error db %
16.6	0.0360	0.0390	0.0433	0.0381	16.86	-2.86
16.6	0.0320	0.0400	0.0410	0.0359	21.95	-11.42
16.6	0.0255	0.0327	0.0410	0.0359	20.12	8.77
25	0.0360	0.0350	0.036	0.0351	0.0	2.8
25	0.0420	0.0640	0.0500	0.0500	16.0	-28.0
16.6	0.0420	0.0460	0.045	0.0396	6.67	16.1
25	0.0485	0.0485	0.044	0.0425	11.36	-14.12
25	0.0425	0.0425	0.0455	0.0432	9.89	5.09

Tabla 4.23 NMO = -0.028

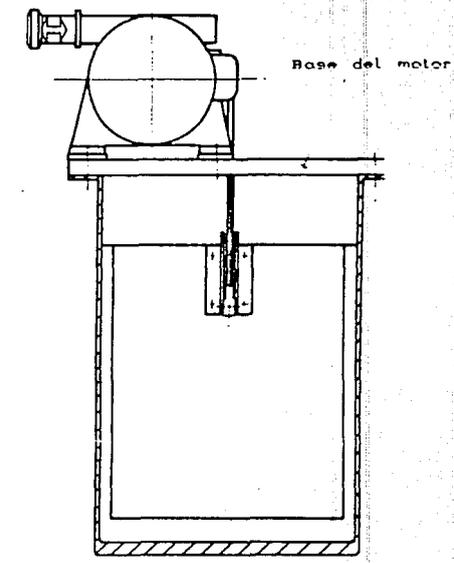
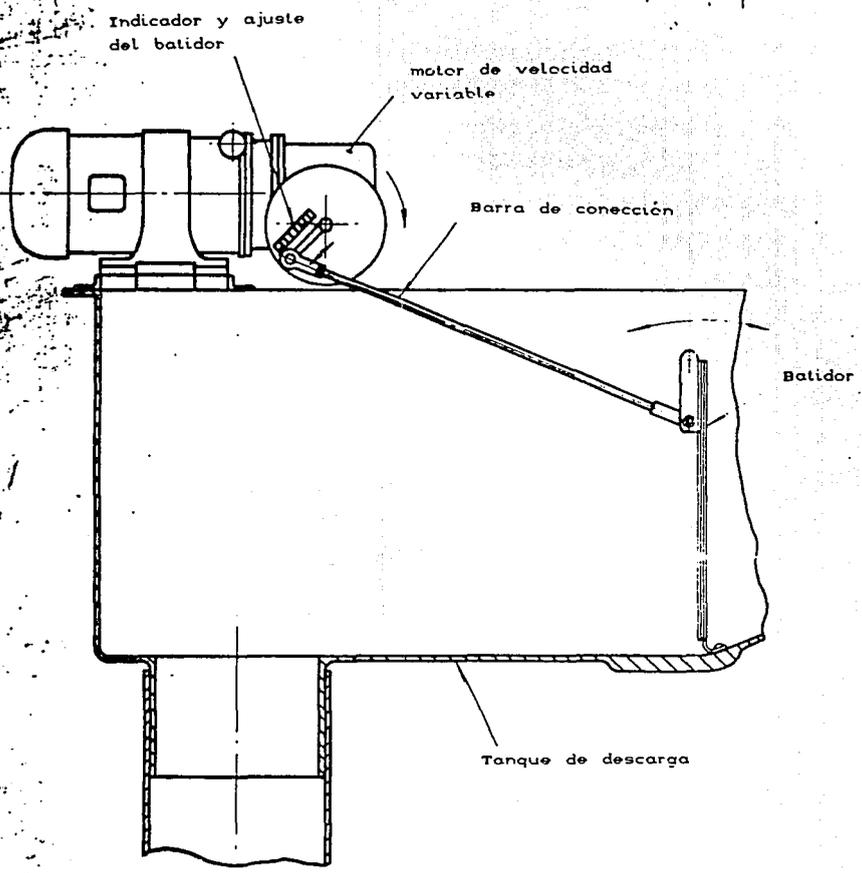
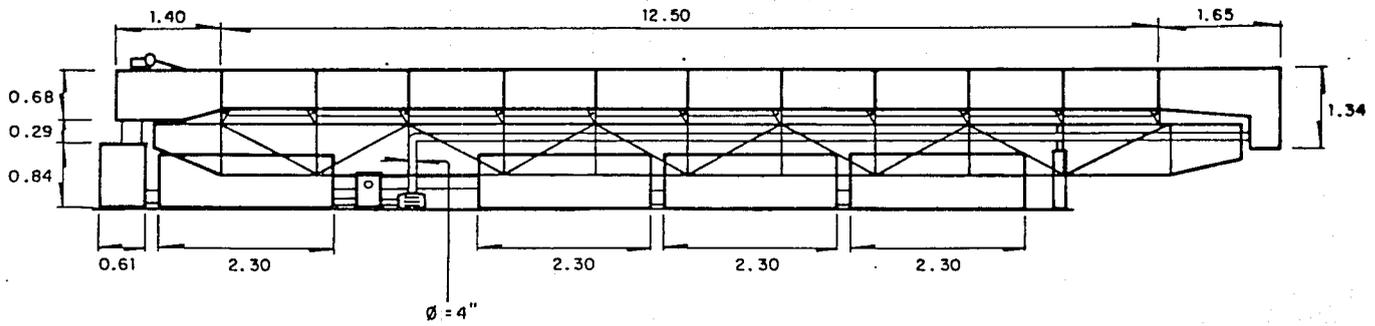


Fig 4.1a Sistema generador de oleaje monocromático



Acotaciones en m

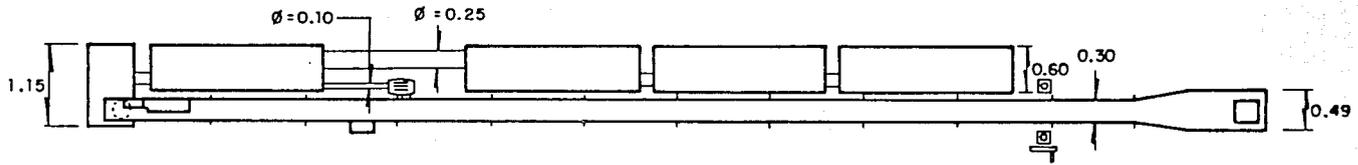
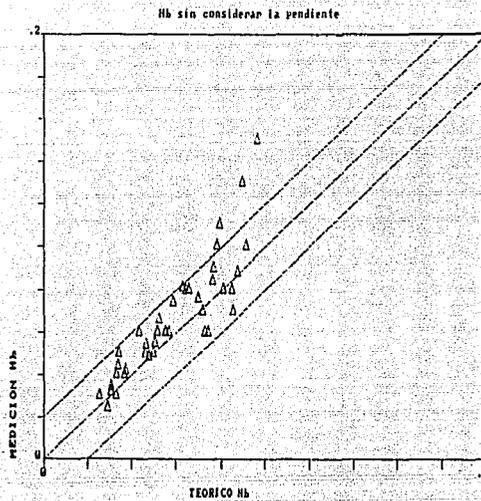
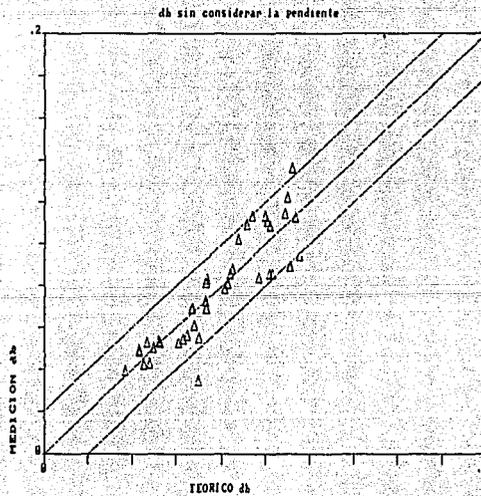
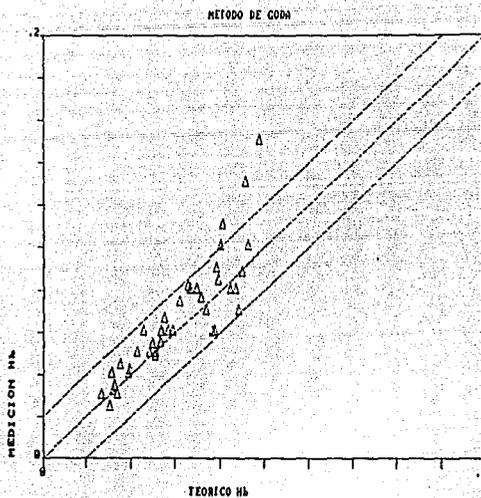
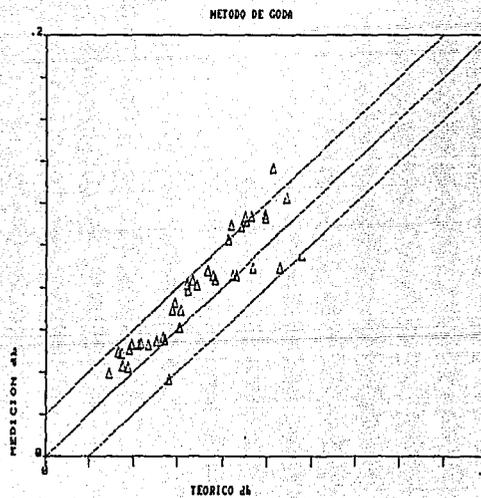
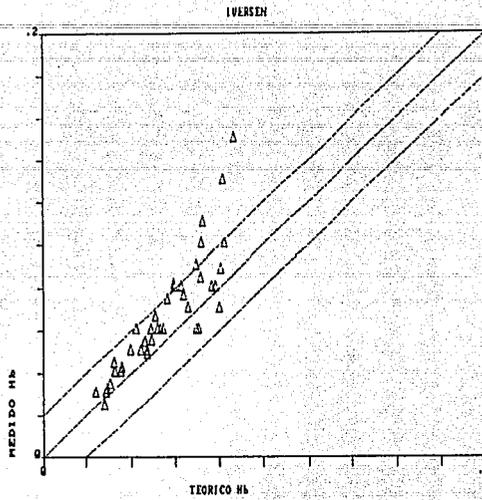
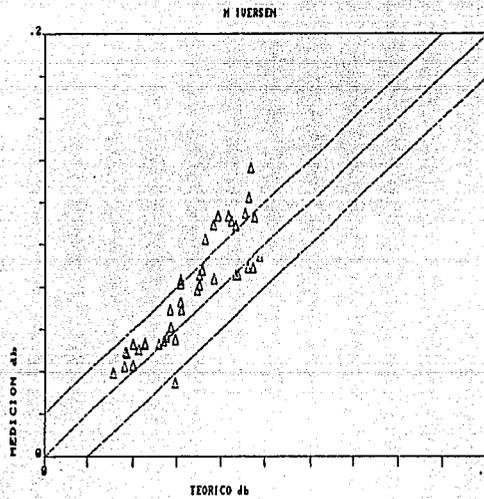
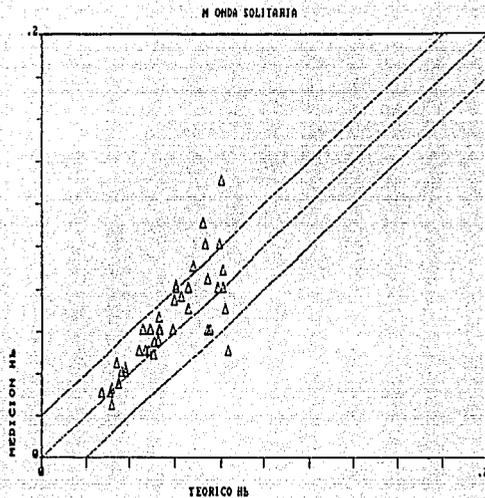
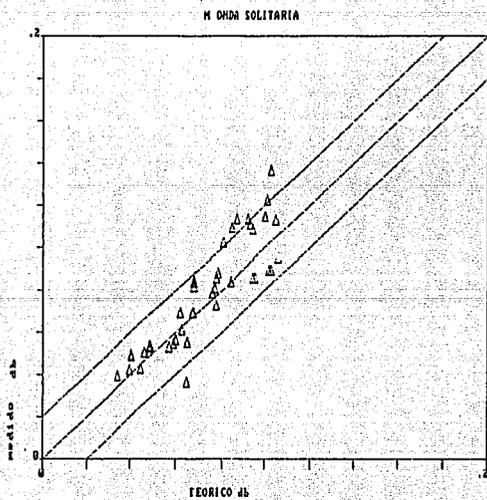


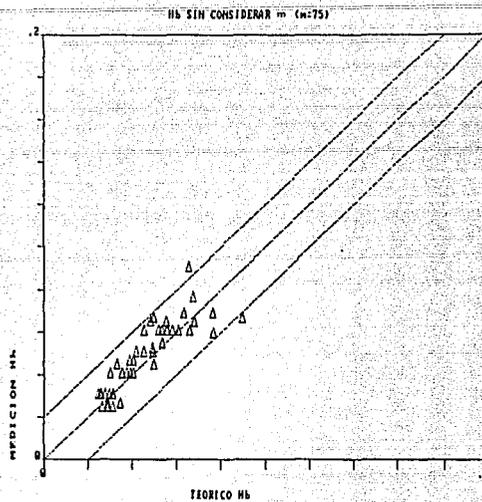
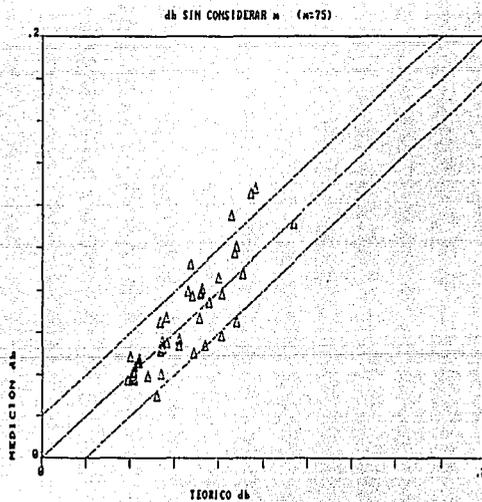
Fig 4.1b. Canal de pendiente variable

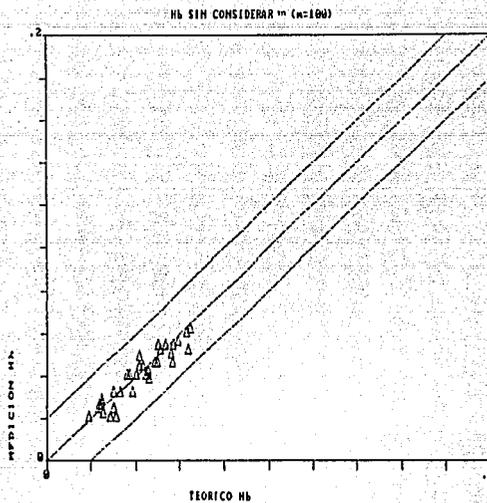
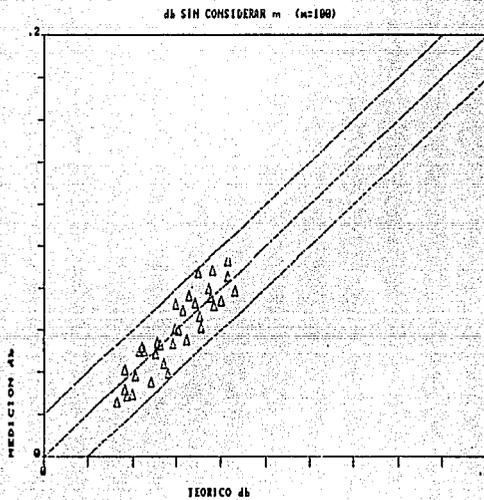
Fig.4.2 Pendiente del canal $m = 50$ Fig.4.3 Pendiente del canal $m = 50$

Fig. 4.4 Pendiente del canal $m = 50$ Fig. 4.5 Pendiente del canal $m = 50$

Fig.4.6 Pendiente del canal $m = 50$ Fig.4.7 Pendiente del canal $m = 50$

Fig.4.8 Pendiente del canal $m = 50$ Fig.4.9 Pendiente del canal $a = 50$

Fig.4.10 Pendiente del canal $m = 75$ Fig.4.11 Pendiente del canal $m = 75$

Fig.4.12 Pendiente del canal $m = 100$ Fig.4.13 Pendiente del canal $m = 100$

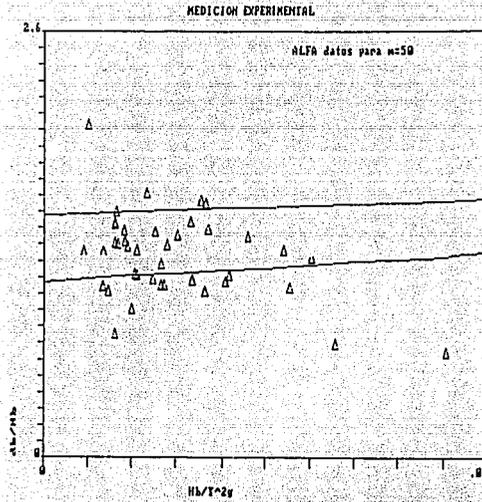


Fig.4.14 Rango db_{min} y db_{max} para $M = 50$

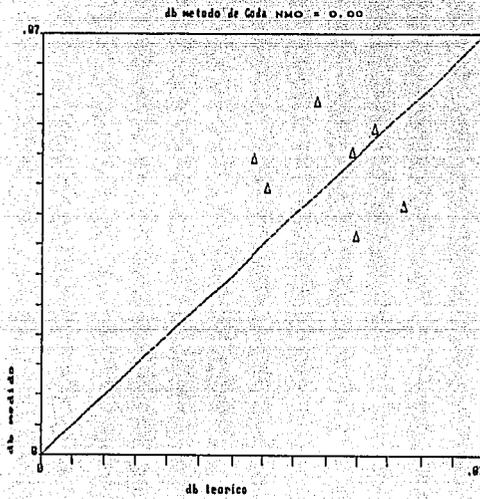


Fig.15 $NMO = 0.00$

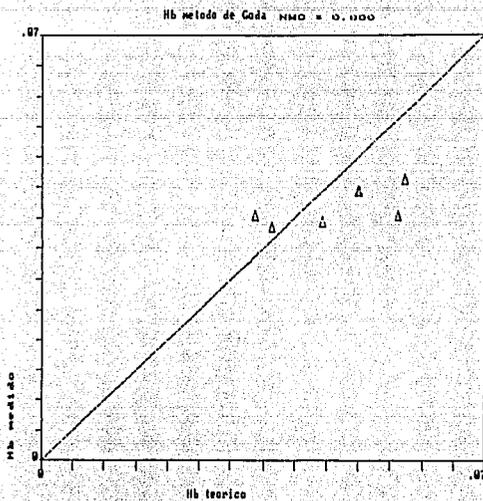


Fig. 4.16 NMO = 0.00

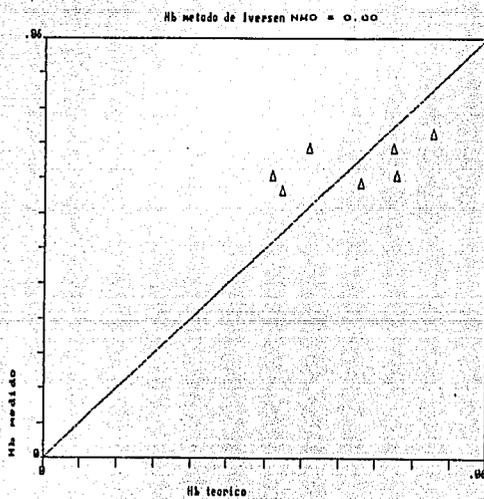


FIG. 4.17 NMO = 0.00

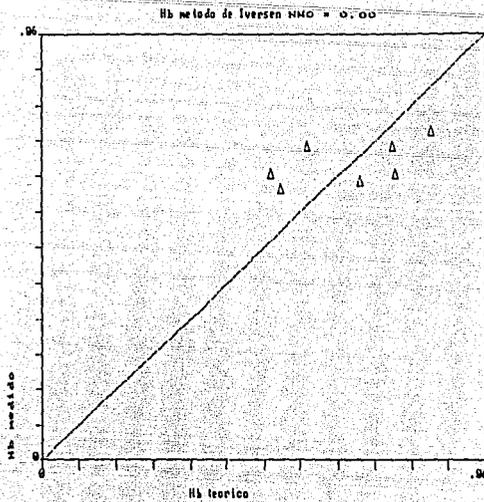


Fig. 4.18 NMO = 0.00

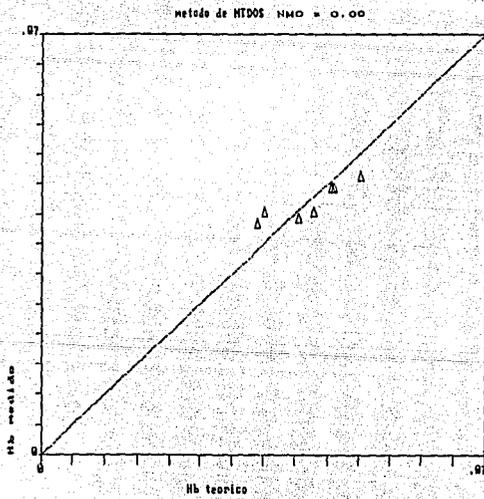


Fig. 4.19 NMO = 0.00

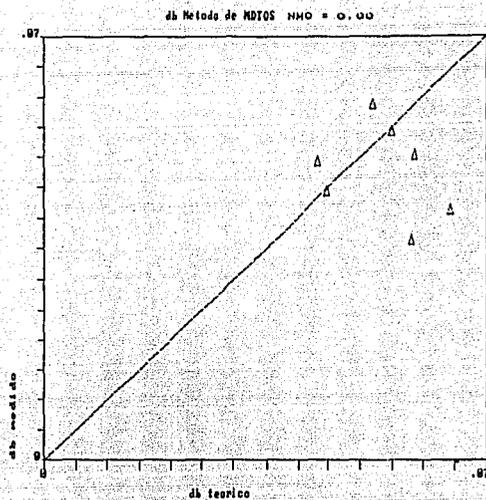


Fig. 4.20 NMO = 0.00

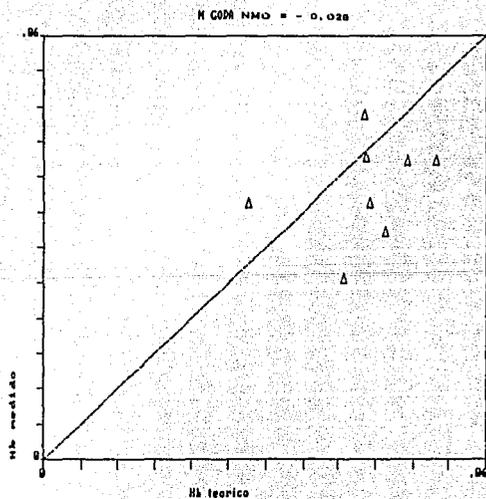


Fig. 4.21 NMO = -0.028

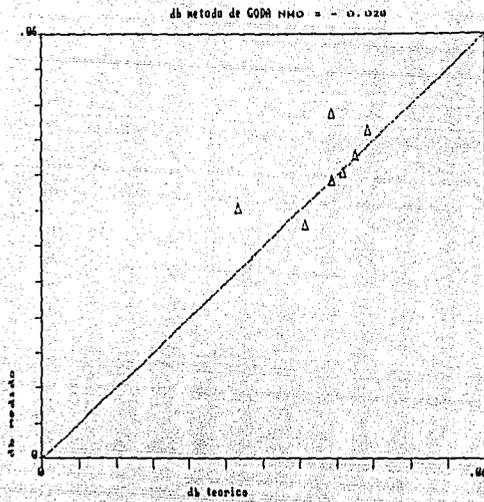


Fig.4.22 NMO = - 0.020

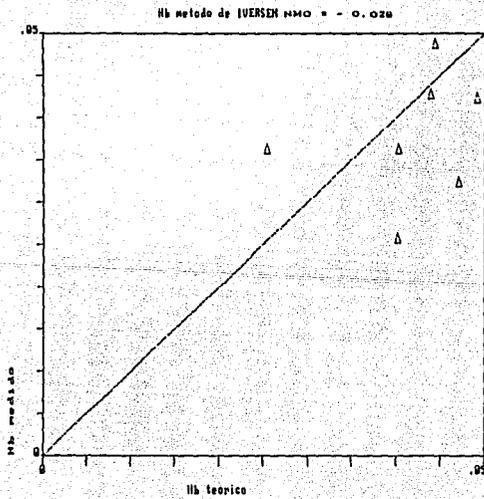


Fig.4.23 NMO = - 0.020

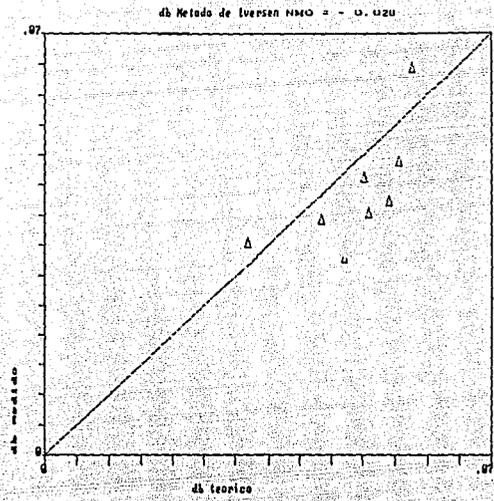


Fig.4.24 NMO = - 0.020

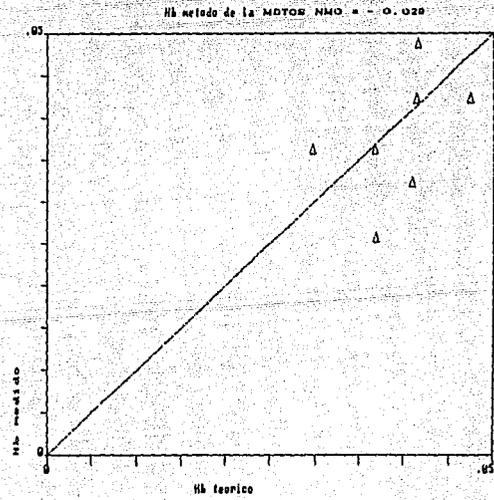


Fig.4.25 NMO = - 0.020

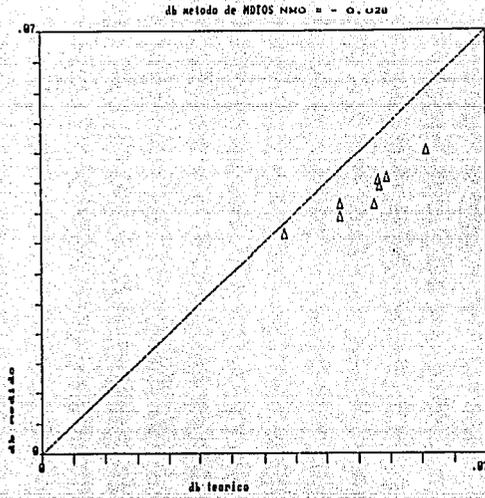
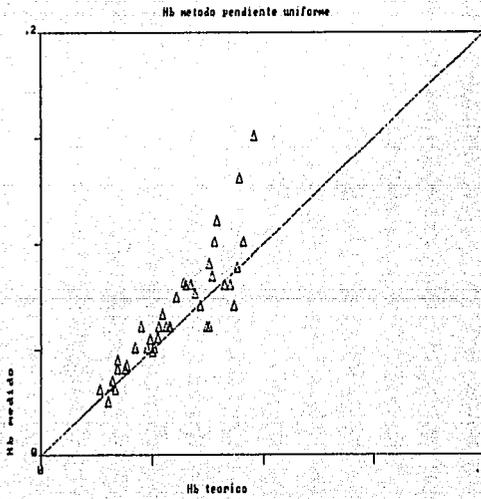


Fig. 4.26 NMO = - 0.020

Fig.4.27 Pendiente del canal $n = 50$

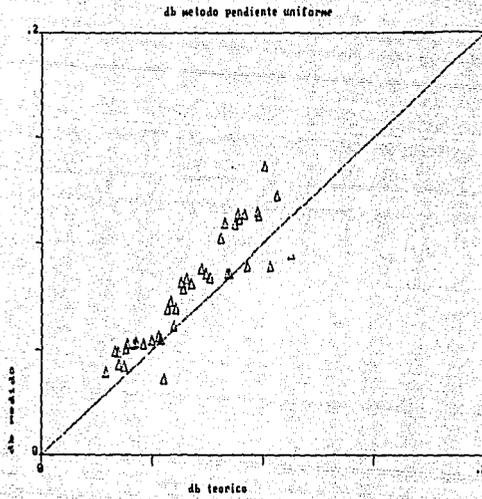


Fig.4.20. Pendiente del canal $n = 50$

5 APLICACIONES

El conocimiento de las características del oleaje en la zona de aguas bajas es primordial para las obras marítimas. Como en todo proyecto de ingeniería civil, es necesario el conocimiento de las solicitaciones para que, con base en ellas, se diseñe la estructura más adecuada.

Una estructura marítima debe tener ciertas características para cumplir con el propósito para la cual fue diseñada, estas características estarán sujetas entre otros factores al oleaje incidente.

Para conocer las características del oleaje existen diferentes estudios, que van desde la posible predicción del oleaje a partir de condiciones meteorológicas existentes, hasta estudios enfocados a determinar la altura y profundidad a la cual rompe la ola, dentro de estas teorías tenemos las que se aplican en el presente trabajo.

- Método de Goda
- Método de Iversen
- Método derivado de la teoría de la onda solitaria

los métodos anteriores están basados en gráficas obtenidas experimentalmente a excepción del método de la onda solitaria.

Con base en las teorías anteriores se pueden determinar las características antes mencionadas, previo conocimiento de las características de la ola en aguas profundas.

El conocimiento de la altura y profundidad rompiente es de gran utilidad ya que permite estimar diversos fenómenos que ocurren en la costa tal es el caso de la distribución de velocidades de las corrientes litorales, que son provocadas por las olas al romper y la resaca, además del arrastre de sedimento conociendo este es posible estimar el volumen y con base en esto diseñar la longitud de los espigones que detengan el arrastre para un determinado período de diseño.

El fenómeno del oleaje rompiente está íntimamente ligado con estructuras, generalmente de protección como es el caso de rompeolas y espigones. El diseño de estas obras se basa en las características de incidencia del oleaje sobre las mismas; es decir, rompiente o no rompiente. En función de esta condición se diseñara el tamaño de los elementos que formarán la estructura, conociendo las magnitudes de la ola rompiente se estima el coeficientes de estabilidad (k_D) (ref 1). Cuando se da el caso de que la ola rompiente incide sobre muros verticales se generan presiones dinámicas.

En el presente trabajo se trata de comparar los resultados

teóricos con los obtenidos experimentalmente; observándose que dadas las condiciones del modelo. El método que se comportó mejor fue el basado en las curvas de Goda (ref 4), el cual aunque conservador, puede ser utilizado en la predicción de la altura y profundidad rompiente en instalaciones experimentales que presenten pendiente uniforme.

Ejemplo 5.1

Calcular H_b y db si se conoce que la altura de la ola en aguas profundas $H_o=2.5m$, tiene un período $T=12$ s además la playa presenta a una pendiente 1:20, de un diagrama de refracción se ha determinado el coeficiente de refracción $k_r=0.92$.

Solución:

a) Método de Goda.

Para obtener H_b se utiliza la gráfica 2.24 a partir del siguiente parámetro $\frac{H'_o}{L_o}$ y la pendiente de fondo se obtendrá la relación $\frac{H_b}{H'_o}$

$$\frac{H'_o}{L_o} = \frac{2.3}{224.83} = 0.0102 \quad \xrightarrow{G} \quad \frac{H_b}{H'_o} = 1.64$$

por lo que $H_b = 1.64 H'_o$

$$H_b = 3.77m$$

Para el cálculo de db se utilizará la fig.2.25 con la relación

$$\frac{H_b}{gT^2} \text{ y la pendiente } \frac{H_b}{gT^2} = 0.0027 \xrightarrow{G} \frac{db}{H_b} = 0.95$$

por lo que $db = 0.95 H_b$

$$db = 0.95 (3.77) = 3.58m$$

Resultados

$$H_b = 3.77m$$

$$db = 3.58m$$

b) Método de Iversen.

Para la utilización de este método es necesario el parámetro $\frac{H_o}{T^2}$ así como la pendiente y utilizando la fig. 3.3 para utilizar estas gráficas es necesario que H_o esté en pies.

$$H_o = 2.5 m.$$

$$H_o = 8.2 \text{ fts.}$$

$$\text{por lo que la relación } \frac{H_o}{T^2} = \frac{8.2}{(12)^2} = 0.057 \frac{\text{fts}}{\text{s}^2}$$

$$\text{de la gráfica a) } \frac{H_b}{H'_o} = 1.42 \quad H_b = 1.42 (2.3) = 3.27 m$$

$$\text{de la gráfica b) } \frac{db}{H_b} = 1.07 \quad db = 1.07 (3.27) = 3.49 m$$

Resultados

$$H_b = 3.27 m$$

$$db = 3.49 m$$

c) Método de la onda Solitaria.

Esta teoría es la única de las manejadas en este trabajo que no utiliza gráficas, pues tanto la altura H_b como la profundidad db están dadas por las siguientes relaciones:

de la gráfica 3.5 $\frac{db}{Hb} = 0.93$

por lo que $db = 0.93 Hb$

$$db = 0.93(3.8) = 3.53 \text{ m}$$

Resultados

$$Hb = 3.8 \text{ m}$$

$$db = 3.53 \text{ m}$$

Ejemplo 5.2

Con los mismos datos del ejemplo 5.1 considerando ahora un $kr=1$:

a) Método de Goda.

del ejemplo 1 $Lo = 224.83 \text{ m}$

i $kr = 1$ $H'_o = Ho$ por lo tanto $H'_o = 2.5$

los parámetros para entrar a la fig. 2 24 son:

$$\frac{H'_o}{Lo} = \frac{2.5}{2245.83} = 0.0111 \quad \xrightarrow{G} \quad \frac{Hb}{H'_o} = 1.61$$

por lo que $Hb = 1.61 H'_o$ $Hb = 1.61(2.5) = 4.03 \text{ m}$

para la gráfica 2.25 $\frac{Hb}{g1^2} = \frac{4.03}{9.81(12)^2} = 0.0028$

por lo tanto $\frac{db}{Hb} = 0.95$

$$db = 0.95 (Hb)$$

Resultados:

$$Hb = 4.03 \text{ m}$$

$$db = 3.82 \text{ m}$$

b) Método de Iversen

$$Ho = 2.5 \text{ m}$$

$$Ho = 8.2 \text{ fts}$$

$$H_b = \frac{H'_o}{3.3 \left(\frac{H'_o}{L_o} \right)^{1/3}}$$

del inciso a) se conoce H'_o y L_o por lo que:

$$H_b = \frac{2.3}{3.3 \left(\frac{2.3}{224.83} \right)^{1/3}} = 3.21 \text{ m}$$

para db tenemos

$$db = 1.28 H_b$$

$$db = 1.28(3.21) = 4.11 \text{ m}$$

Resultados:

$$H_b = 3.21 \text{ m}$$

$$db = 4.11 \text{ m}$$

d) Método que considera pendiente uniforme.

La utilización de este método está basado en las curvas obtenidas experimentalmente por Goda 3.5 y 3.8 a partir de los parámetros $\frac{H'_o}{gT^2}$ así como la pendiente de fondo para el problema tenemos.

$$\frac{H'_o}{gT^2} = 0.0016 \text{ de gráfica 3.2} \quad \frac{H_b}{H'_o} = 1.65$$

por lo que $H_b = H'_o (1.65)$ $H_b = 1.65(2.3) = 3.8 \text{ m}$

$$\text{con } \frac{H_b}{gT^2} = \frac{3.8}{9.81(12)^2} = 0.0027$$

$$\frac{H_o}{T^2} = 0.057 \quad \text{de gráfica (a)} \quad \frac{H_b}{H'_o} = 1.42 \quad H_b = 1.42(2.5) = 3.55 \text{ m}$$

$$\frac{H_o}{T^2} = 0.057 \quad \text{de gráfica (b)} \quad \frac{db}{H_b} = 1.07 \quad db = 1.07(3.55) = 3.8 \text{ m}$$

Resultados

$$H_b = 3.55 \text{ m}$$

$$db = 4.34 \text{ m}$$

c) Método de la onda solitaria

Aplicando las fórmulas del ejemplo anterior con las consideraciones hechas

$$H_b = \frac{2.5}{3.3 \left(\frac{2.5}{224.83} \right)^{1/3}} = 3.39 \text{ m}$$

$$db = 1.28 (3.39) = 4.34 \text{ m}$$

Resultados

$$H_b = 3.39 \text{ m}$$

$$db = 3.80 \text{ m}$$

d) Método que considera pendiente uniforme

de igual manera que en inciso anterior

$$\text{con } \frac{H'_o}{g T^2} = \frac{2.5}{9.81(12^2)} = 0.0018 \quad \therefore \frac{H_b}{H'_o} = 1.575$$

$$H_b = 1.575 (2.5) = 3.94 \text{ m}$$

$$\frac{H_b}{g T^2} = \frac{3.94}{9.81 (12^2)} = 0.0028 \quad \therefore \frac{db}{H_b} = 0.935$$

$$db = 1.935 (3.94) = 3.68 \text{ m}$$

Resultados

$$H_b = 3.94 \text{ m}$$

$$db = 3.68 \text{ m}$$

H _o	T	L _o	k _r	H' _o	H _b	db	método
[m]	[s]	[m]		[m]	[m]	[m]	
2.5	12	224.83	0.92	2.3	3.77	3.58	Goda
2.5	12	224.83	0.92	2.3	3.27	3.44	Iversen
2.5	12	224.83	0.92	2.3	3.21	4.11	MDTOS
2.5	12	224.83	0.92	2.3	3.80	3.53	MPU
2.5	12	224.83	1.00	2.5	4.03	3.82	Goda
2.5	12	224.83	1.00	2.5	3.55	3.80	Iversen
2.5	12	224.83	1.00	2.5	3.39	4.34	MDTOS
2.5	12	224.83	1.00	2.5	3.94	3.68	MPU

De los dos ejemplos anteriores se puede observar en la tabla anterior que cuando el coeficiente de refracción disminuye y se conserva la misma altura de ola en aguas profundas. La altura rompiente y la profundidad rompiente aumentan proporcionalmente tanto H_b como db, para estos ejemplos se varió k_r en 0.1 y en las alturas la variación fue del orden de 10% como se puede observar en la siguiente tabla.

H _b	H _b	db	db	método	error %	error %
k _r =0.95	k _r =1.0	k _r =0.95	k _r =1.0		H _b	db
3.77	4.03	3.58	3.82	Goda	-6.90	-6.70
3.27	3.55	3.49	3.80	Iverse	-8.56	-8.88
3.21	3.39	4.11	4.34	MDTOS	-5.61	-5.64
3.8	3.94	3.53	3.68	MPU	-3.68	-4.25

6. CONCLUSIONES

Algunos de los métodos para el cálculo de la altura y profundidad rompiente son los de Iversen, Goda y el derivado de la teoría de la onda solitaria, además del propuesto para pendiente uniforme y batimetría paralela (ref 4) basado en las curvas propuestas por Goda. Al ser analizados y comparados cada uno de ellos con los datos experimentales se observó lo siguiente para cada uno de ellos.

- Método de Goda

El método utiliza curvas obtenidas experimentalmente en las que se relacionan diferentes parámetros de la ola como H_o , L_o , T y la pendiente de la playa, fig 2.24 y 2.25, en la primera figura se observa que sólo aparecen curvas para pendientes menores a 1:50 por lo que no es posible la utilización de este método para

pendientes mayores. Los valores experimentales que se compararon con este método resultaron, en su mayoría, por arriba de los teóricos. Si se toma en cuenta la curva propuesta por Goda, que no considera la influencia de la pendiente, los resultados son semejantes a los obtenidos con las curvas en las que sí se considera la pendiente.

- Método de Iversen

Este método, al igual que el de Goda, está basado en la utilización de curvas obtenidas experimentalmente, como en el caso anterior sólo existen curvas para pendientes menores o iguales 1:50.

Al igual que en el método de Goda, los valores obtenidos por medio de estas curvas son menores en relación con los experimentales, por tal motivo no es posible la utilización de este método cuando la pendiente de fondo no presenta una batimetría paralela.

- Método basado en la teoría de la onda solitaria

En este método no se considera la influencia de la pendiente del fondo en la rompiente, por lo que su aplicación es posible en cualquier tipo de fondo. El comportamiento de este método es más aceptable sobre todo en pendientes $m = 75$ y $m = 100$; sin embargo, su a aplicación se debe tomar con reserva o utilizarse como una

primera aproximación y después afinar los resultados con otros métodos.

- Método basado en las curvas de Goda para pendiente uniforme

El comportamiento de este método es muy similar a los anteriores, es decir, la mayoría de los valores se encuentran por debajo de los teóricos aunque en algunos casos el error es muy pequeño (menor a 1%) se encuentran otros en que el error es de hasta 56% para el caso de Hb y de 46% para db.

Lo anterior es en cuanto a las mediciones realizadas en el canal de pendiente variable. El otro aspecto del análisis experimental fue el que se llevo a cabo en un modelo con batimetría no paralela para estas condiciones se analizaron los datos en el inciso 4.6.1 en el cual se observa que para cada una de las condiciones modeladas los valores medidos en comparación con los obtenidos en forma teórica difieren muy poco, en este inciso se presentan tablas y gráficas en las cuales se pueden observar los resultados.

Del análisis 4.6.1 se puede concluir que en general las teorías existentes pronostican valores mayores a los que se presentan en la realidad con lo cual se está del lado de la seguridad. En cuanto a los errores de observación en el laboratorio que para algunos casos son del orden de 30%, pueden deberse principalmente a la influencia de la capilaridad, ya que cuando la altura de la ola es cercana a 0.02m el problema se acentúa de tal manera la variación es significativa. Si se toman estos valores para

realizar el cálculo teórico se irá acumulando un error que repercutirá en el valor teórico calculado otro error que se puede cometer es en la lectura de las gráficas a partir de las cuales se obtienen la altura y profundidad rompiente (Hb y db), además de considerar que éstas fueron obtenidas en forma experimental.

El general los métodos presentados tienen una muy buena aproximación ya que permiten diseñar estructuras seguras aunque tal vez no tan óptimas como se desearía, pero se debe considerar que el fenómeno del oleaje es aleatorio y no se puede conocer con precisión su comportamiento.

Para el caso en que se tiene una batimetría no paralela el método que mejor se comportó fue el de Iversen esto no implica que los demás procedimientos no sirvan, mas bien los valores experimentales se ajustaron mejor a los resultados de Iversen.

REFERENCIAS

- 1.- Maza A., "Manual de Diseño de Obras Civiles", CFE, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México 1969.
- 2.- Frias V. A., Moreno C. G. "Ingeniería de Costas", México 1986
- 3.- Tostado B. M. "Trabajo de Investigación: Cálculo de la Altura de la Ola y Profundidad Rompiente", DEPMI, México, 1987.
- 4.- Fuentes M. O., Sánchez B. J.L, "Compendio de Hidráulica Marítima", Instituto de Ingeniería, UNAM, México 1986.
- 5.- Horikawa K., "Coastal Engineering", Ed. A Halsted Press Book, John Wiley, Sons, New York, Toronto, 1978.
- 6.- E. U. Army Coastal Engineering Research Center". Shore Protection Manual".
- 7.- Wiegel R. L., " Oceanographical Engineering", Ed. Prentice Hall, Inc/Englewood Cliff, N. S., 1965.

AGRADECIMIENTOS

Al M.I Oscar A. Fuentes Mariles por el apoyo y el interés puesto para el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. José A. Raynal Villaseñor por las facilidades prestadas para la realización de los ensayos en el canal de pendiente variable del laboratorio de hidráulica de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, DEPTI.

Al Instituto de Ingeniería por permitir el uso de sus instalaciones.

A la srta. Fabiola Lovera López que realizó la revisión mecanográfica.

Variable	autor	n	tipo de ecuación
Hb	Goda	-	$\frac{Hb}{H'_{o}} = 0.534 \left(\frac{H'_{o}}{L_{o}} \right)^{-0.212}$ si $0 < \frac{H'_{o}}{L_{o}} < 0.07$
db	Goda	-	$\frac{db}{H'_{o}} = 0.43 \left(\frac{H'_{o}}{L_{o}} \right)^{-0.328}$ si $0 < \frac{H'_{o}}{L_{o}} < 0.04$
Hb	Iversen	50	$\frac{Hb}{H'_{o}} = 0.625 \left(\frac{H'_{o}}{T^2} \right)^{-0.250}$ si $0.004 < \frac{H'_{o}}{T^2} < 0.02$
db	Iversen	50	$\frac{db}{Hb} = 1.36 - 3.27 \left(\frac{H_{o}}{T^2} \right) +$ $12.73 \left(\frac{H_{o}}{T^2} \right)^2 - 9.27 \left(\frac{H_{o}}{T^2} \right)^3$ si $0.02 < \frac{H_{o}}{T^2} < 0.6$
Hb	Goda *	50	$\frac{db}{Hb} = 1.074 + 17.521 \left(\frac{Hb}{gT^2} \right)$ si $0 < \frac{Hb}{gT^2} < 0.010$
db	Goda *	50	$\frac{Hb}{H'_{o}} = 0.308 \left(\frac{H'_{o}}{gT^2} \right)^{-0.2413}$ si $0.0004 < \frac{H'_{o}}{gT^2} < 0.02$
Hb	Goda	50	$\frac{Hb}{H'_{o}} = 0.495 \left(\frac{H'_{o}}{L_{o}} \right)^{-0.238}$
db	Goda	50	$\frac{db}{Hb} = 1.069 + 19.512 \left(\frac{Hb}{gT^2} \right)$ si $0 < \frac{H'_{o}}{gT^2} < 0.010$

*Determinación de la pendiente con fondo uniforme

Ecuaciones de ajuste de las curvas de Iversen y Goda

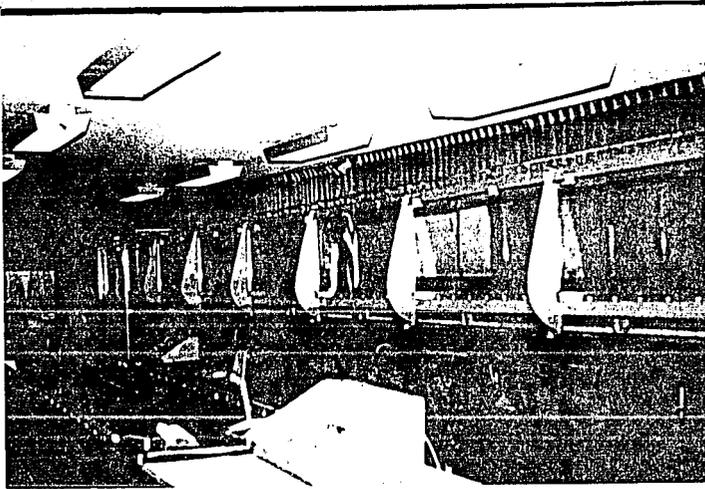


Foto 1. Canal de pendiente variable

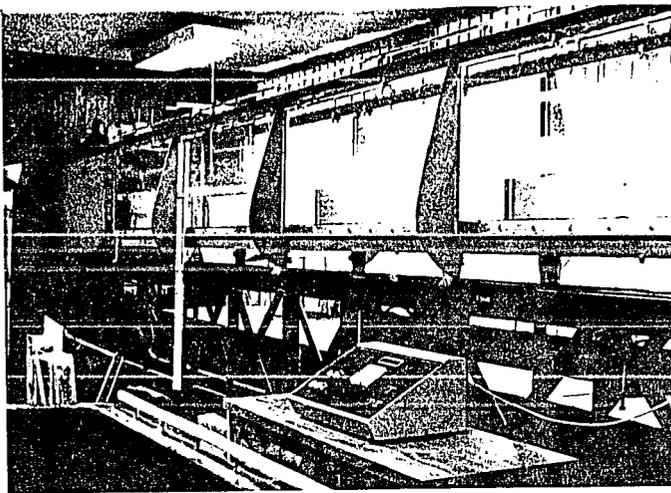


Foto 2. Controles del canal de pendiente variable

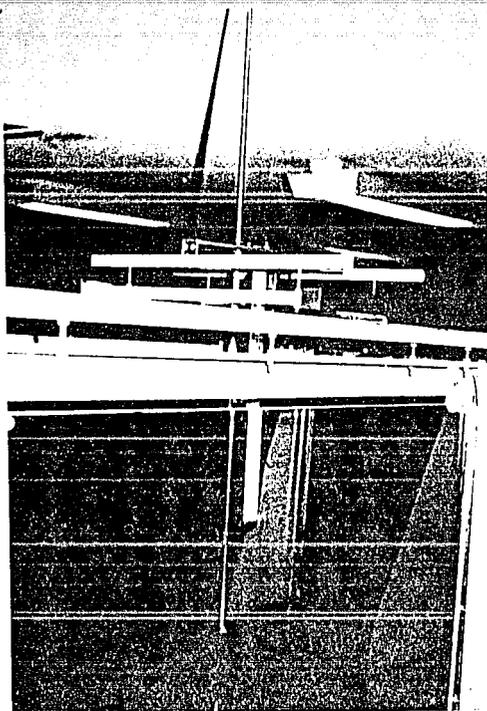


Foto 3. Limnómetro de punta

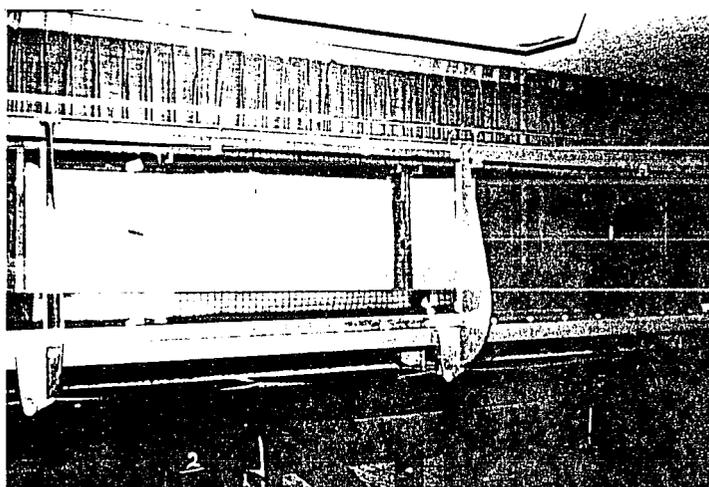


Foto 4. Malla para realizar mediciones

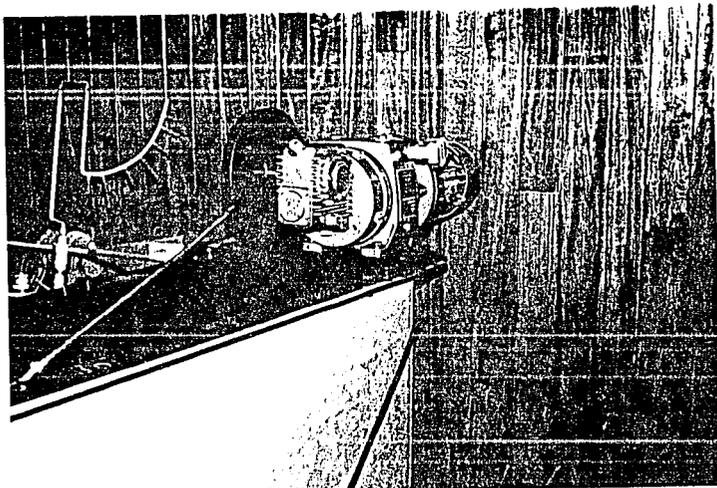


Foto 5 Motor de velocidad variable

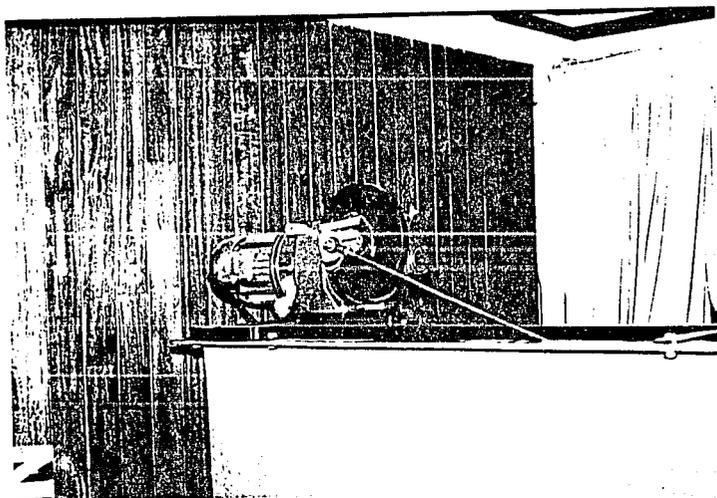


Foto 6. Motor de velocidad variable

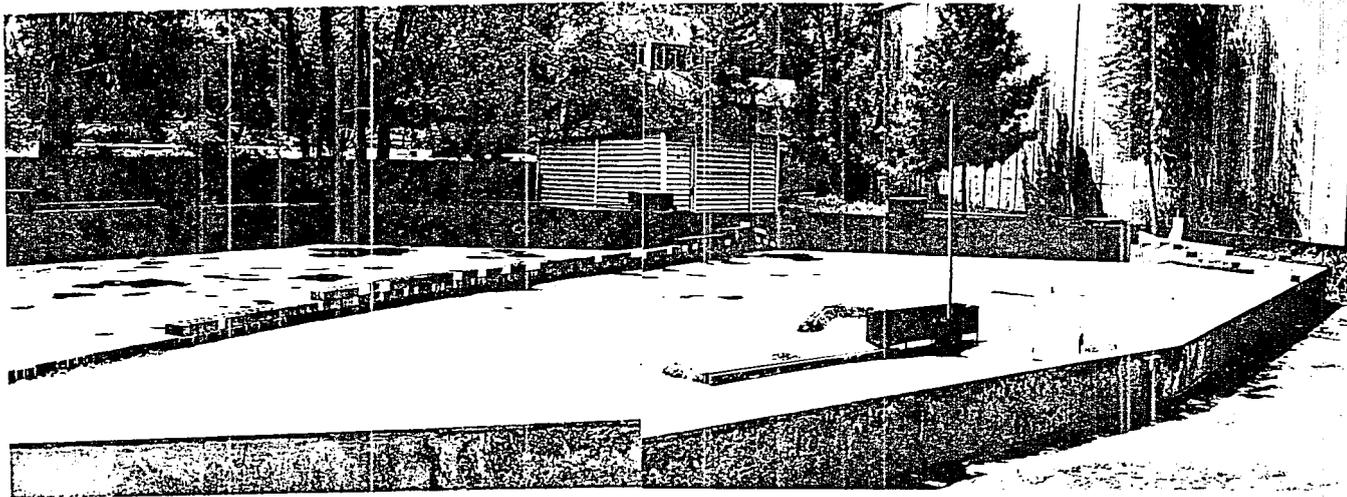


Foto 7. Modelo de batimetria no uniforme