



84  
2 Gen.

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO OPTIMO DE ESCOLLERAS Y SU APLICACION  
AL PUERTO DE ALTAMIRA, TAMAULIPAS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

AMADO ABEL JIMENEZ CASTANEDA

MÉXICO, D.F., MARZO 1985



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.

1.	INTRODUCCION	1
2.	OLEAJE	3
2.1	Origen de los ciclones	4
2.2	Formación del oleaje extraordinario y etapas de su recorrido	5
2.3	Modificación del oleaje	6
2.3.1	Oleaje en aguas profundas	6
2.3.2	Oleaje en aguas poco profundas	8
2.4	Refracción del oleaje	10
2.4.1	Método de los frentes de onda	11
2.4.2	Aplicación del método de los frentes de onda	13
2.4.3	Coefficiente de refracción	16
2.4.4	Coefficiente de fondo	17
2.4.5	Cálculo de la altura significativa en el sitio de interés	17
3.	PROBABILIDAD DE EXCEDER UNA ALTURA DE OLEAJE	18
3.1	Oleaje significativo extraordinario obtenido de mediciones	20
3.1.1	Suficiente número de años de medición	20
3.1.2	Escaso número de años de medición	21
3.2	Distribuciones de probabilidad más comúnmente usadas para predecir oleaje extraordinario	22
3.2.1	Ejemplos de aplicación de las distribuciones de probabilidad	24
3.3	Método de predicción de alturas significantes de oleaje extraordinario	28
3.3.1	Fundamentos del método de predicción	28
3.3.2	Secuela de cálculo	31
3.4	Dirección y decaimiento del oleaje	34

4.	ESCOLLERAS	40
4.1	Elementos de las escolleras (tipo gravedad)	42
4.2	Diseño de escolleras	43
4.2.1	Peso de los elementos de la coraza	44
4.2.2	Elevación de la corona	46
4.2.3	Ancho de corona	51
5.	ESTIMACION DE COSTOS DE CONSTRUCCION Y REPARACION DE UNA ESCOLLERA	53
5.1	Costo de construcción de la escollera	53
5.2	Daños en la escollera	54
5.3	Costos por daño	55
5.4	Costo esperado de daño	55
6.	SELECCION DE LA ALTURA SIGNIFICANTE DE DISEÑO	58
6.1	Costo total anual	58
6.2	Costo total anual mínimo	61
7.	APLICACION AL PUERTO DE ALTAMIRA, TAMPS.	63
7.1	Predicción del oleaje extraordinario	63
7.2	Refracción del oleaje	66
7.3	Costo de construcción de una escollera	69
7.4	Costo esperado de daño	73
7.5	Selección de la altura significativa de diseño óptimo de la escollera	76
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
APENDICE		
A.	METODO DE AJUSTE DE MOMENTOS	83
A.1	Parámetros de los datos	83
A.2	Momentos de las funciones de densidad y de probabilidad	84

A.3	Secuela de cálculo	85
A.4	Niveles de significancia	85
A.4.1	Bondad del ajuste con $\chi^2$	87
A.4.2	Bondad del ajuste con Kolmogorov-Smirnov	87
	AGRADECIMIENTOS	89
	REFERENCIAS	90

## 1. INTRODUCCION

El objetivo de este trabajo es plantear un criterio que permita seleccionar la altura de ola para diseñar una escollera de tal manera, que su costo total anual sea mínimo.

El criterio tiene como principio utilizar un método de predicción del oleaje, para estimar alturas de ola extraordinarias asociadas a probabilidades de excedencia y con ello, hacer un análisis económico del comportamiento de los costos de construcción y reparación de la escollera.

Este trabajo se ha dividido en los siguientes ocho capítulos. El primero corresponde a la introducción y se da una breve descripción de lo que trata cada capítulo. En el segundo se describe la formación del oleaje extraordinario y se da un método para analizar el fenómeno de refracción del oleaje. En el tercero se explica la manera de asociar alturas de ola con probabilidades de excedencia y se da un método de predicción de

oleaje extraordinario. En el cuarto se citan las recomendaciones necesarias para diseñar escolleras. En el quinto se establece la forma de calcular los costos de construcción y reparación de una escollera. En el sexto se explica la manera de escoger la altura de ola que hace óptimo el diseño de la escollera. En el séptimo se calcula la altura significativa de oleaje de diseño de las escolleras del puerto Altamira, Tamps. Para ello se utilizan varios ejemplos cuyo objetivo es calcular el costo total anual mínimo de la escollera. En el octavo capítulo se dan algunas recomendaciones y consideraciones que se hicieron para realizar ciertos cálculos y estimaciones en la aplicación de los ejemplos. Finalmente, en el apéndice se explica el método de Ajuste de Momentos y además, dos criterios para conocer la bondad del ajuste al utilizar alguna función de probabilidad propuesta.

## 2. EL OLAJE

Se entiende por oleaje al movimiento ondulatorio de la superficie libre del mar. De acuerdo a las causas que lo generan se le agrupa en las siguientes tres categorías (ref 1).

La primera se refiere al oleaje generado por el sol y la luna, la segunda corresponde al originado por el movimiento de la corteza terrestre en el fondo del mar, y la tercera es el oleaje formado por el viento, siendo éste último tipo de oleaje el más importante en el diseño de diversas obras marítimas como se verá posteriormente. A su vez, el oleaje generado por el viento se subdivide en oleaje normal, que es el más comúnmente observado, mostrando poca variación en las alturas de las olas aunque en mayor grado su dirección de propagación y, el oleaje extraordinario, producido por condiciones meteorológicas adversas (ciclones), las cuales generan olas de altura mayor en comparación con las alturas del oleaje normal.

Para los problemas de diseño de obras marítimas es de gran importancia to mar en cuenta el oleaje extraordinario, de aquí la conveniencia de hacer una breve descripción de las condiciones meteorológicas que originan este oleaje y las diferentes etapas por las que pasa durante su recorrido hacia la costa.

## 2.1 Origen de los ciclones

En ciertas épocas del año se forman en algunos lugares del mar zonas de baja presión. Hacia ellos fluye el viento con gran intensidad, llegando con un cierto ángulo de deflexión por el efecto de rotación de la tierra (fenómeno de Coriolis), generando gigantescos remolinos (fig 2.1)\*.

A este fenómeno meteorológico se le llama ciclón, y a grandes razgos se puede decir que el lugar donde se presenta, las isobaras (curvas que unen puntos de igual presión, vistas en planta), tienen aproximadamente forma circular, con diámetros que varían desde unos centenares a varios miles de kilómetros. La presión atmosférica presenta siempre un valor mínimo en el centro de dicha región y va aumentando radialmente hacia afuera de la misma (ref 2).

Es importante señalar que los ciclones se desplazan generalmente en forma casual y originan olas de gran altura, dando lugar al oleaje extraordinario.

---

\*Figura obtenida de una carta meteorológica del ciclón Carla (9 de Sept. de 1961 a las 6:00 h)

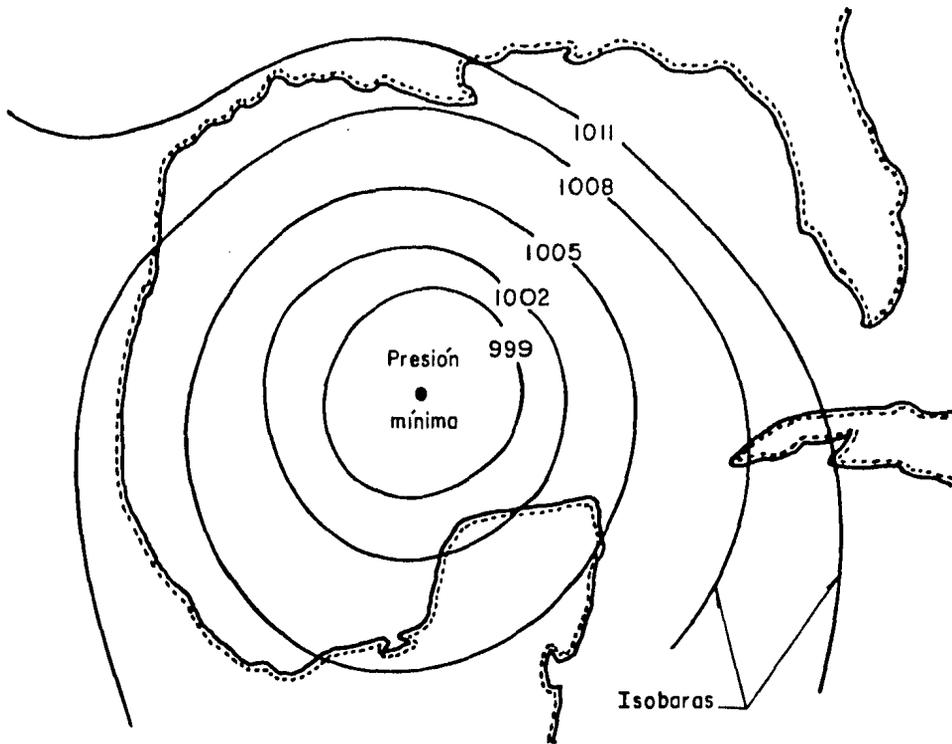


Fig 2.1 Zona de baja presión (ciclón)\*

## 2.2 Formación del oleaje extraordinario y etapas de su recorrido

La formación del oleaje extraordinario ocurre generalmente lejos de la costa y se propaga en todas direcciones, siendo la dirección de interés aquella que llegue al lugar donde va a estar la obra marítima. La distancia que existe entre el sitio en que se va a construir la estructura y el lugar donde se origina el oleaje, se divide en las siguientes tres longitudes.

- a) Fetch (longitud dentro de la zona de generación y en la dirección al sitio en estudio). A lo largo de esta longitud el viento transmite parte de su energía cinética al mar, dando origen al oleaje.
- b) Longitud de decaimiento. Una vez que el viento deja de tener influencia en la superficie del mar, se dice que el oleaje ha salido de la zona de generación y se observa que la altura de las olas empieza a disminuir.

Se llama longitud de decaimiento a la distancia que hay entre el final de la zona de generación y el sitio donde las longitudes de ola empiezan a ser afectadas por la profundidad.

- c) La última longitud es la que existe entre el sitio en que la altura de la ola empieza a ser afectada por la profundidad y el sitio donde estará la estructura.

## 2.3 Modificación del oleaje

A continuación se describe brevemente cómo son alteradas las alturas de las olas por efecto de la profundidad y para ello conviene distinguir una zona de aguas profundas y otra de aguas poco profundas (ref 3).

### 2.3.1 Oleaje en aguas profundas

En la fig 2.2 se muestran los rasgos sobresalientes y las dimensiones de las olas en aguas profundas donde no son afectadas por el fondo. La altu

ra de la ola, su longitud y su periodo varían con la velocidad del viento, con la distancia (fetch) y tiempo durante el cual el viento tiene influencia en la superficie del mar. Estas olas de aguas profundas son las olas de oscilación, llamadas así porque en ellas cada partícula de agua oscila en una distancia corta, en tanto que la forma de la ola misma se mueve hacia adelante.

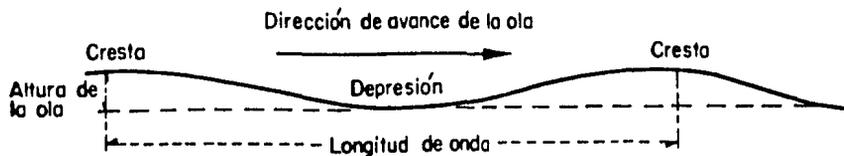


Fig 2.2 Perfil de las olas en aguas profundas

En consecuencia, el movimiento de la ola es muy diferente del movimiento de la partícula de agua dentro de ella. Cuando el viento barre sobre un campo de trigo o de pasto gigante, cada tallo se dobla en la dirección en la cual actúa el viento y después regresa a su posición original, produciendo un efecto parecido al de la ola. En el agua (fig 2.3), de modo parecido, la forma de la ola se mueve continuamente hacia adelante, pero cada partícula de agua gira en el mismo sitio conforme pasa la ola.

Esta oscilación de las partículas de agua, determinadas primero en forma teórica, fue posteriormente comprobada en laboratorio inyectando gotas de agua coloreada en un canal de olas con paredes de vidrio, fotografiando sus cursos con una cámara de cine.

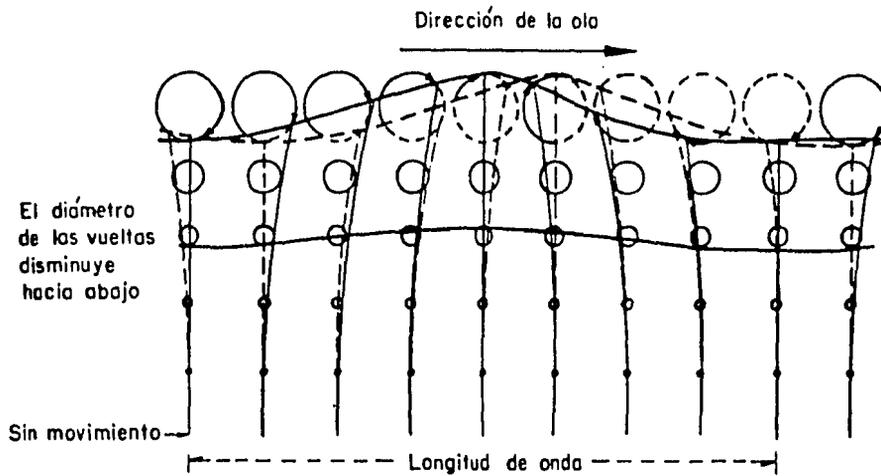


Fig 2.3 Movimiento de las partículas de agua en aguas profundas

Debido a que las olas son una consecuencia de la transferencia de energía del viento al mar, sólo se producen en agua superficial. Puesto que la forma de la ola es creada por el movimiento de oscilación de las partículas de agua, el diámetro de las vueltas en la superficie del agua es exactamente igual a la altura de la ola. Pero hay una progresiva pérdida de energía (expresada en la disminución del diámetro de los giros) hacia abajo desde la superficie del agua. La disminución de la energía hacia abajo es muy rápida, al grado tal que, a una profundidad igual a la mitad de la longitud de la ola en aguas profundas, los diámetros de las vueltas son tan pequeños que el movimiento es prácticamente imperceptible.

### 2.3.2 Oleaje en aguas poco profundas

El límite inferior efectivo del movimiento de las olas está constituido, por lo tanto, por una profundidad igual a la mitad de la longitud de la

ola en aguas profundas. A esa profundidad las olas que se mueven hacia la costa "tocan el fondo", lo cual afecta lentamente a la forma de la ola. El curso circular de las partículas de agua se hace gradualmente elíptico, y la velocidad del movimiento de las partículas de agua se acrecienta (fig 2.4).

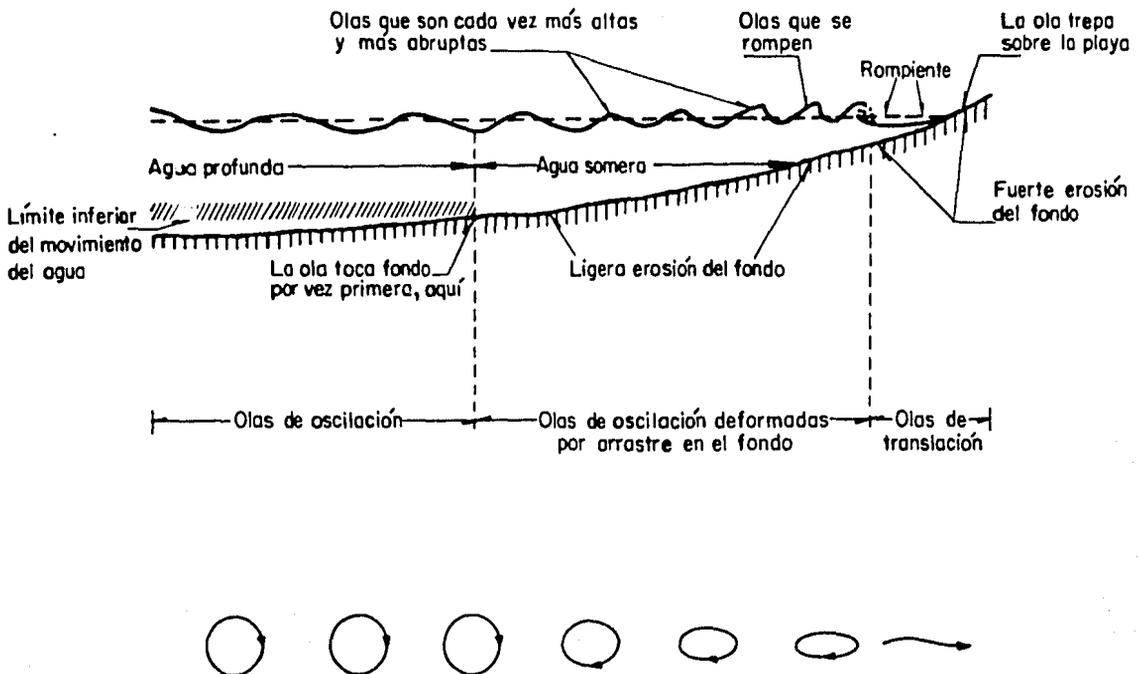


Fig 2.4 Cambios en el movimiento de las partículas de agua

A medida que las olas se mueven en aguas cada vez menos profundas, el movimiento en el fondo llega a ser suficientemente grande para mover partículas finas de roca hacia adelante y hacia atrás. Conforme la ola avanza, la interferencia cada vez mayor del fondo con su movimiento se convierte en una disminución de su longitud. A este fenómeno se le llama refracción del oleaje; a continuación se amplía un poco más su descripción y se da una secuela de cálculo.

#### 2.4 Refracción del oleaje

Para diseñar las obras marítimas, es necesario conocer las alturas de ola que llegan al sitio de interés. Como generalmente tales obras se localizan en la zona de aguas poco profundas, se requiere considerar el efecto que causa la disminución del fondo en la longitud de la ola.

Al acercarse las olas a la costa, éstas llegan con un cierto ángulo respecto a ella, así que para un mismo frente de ola (cresta), no toda ella "toca el fondo simultáneamente", por lo cual, a medida que cada parte va "tocando el fondo", la longitud de la ola empieza a disminuir

Y por tanto también su celeridad (cociente de la longitud y el periodo de la ola), mientras que su altura tiende a aumentar si se acerca a un promontorio, ó, a disminuir si se acerca a una playa.

Como resultado, la ola gradualmente adopta cierto paralelismo con la configuración del fondo y cambia su dirección, es decir, se refracta.

En resumen, la refracción de una ola es el proceso por medio del cual cambia la dirección de una serie o tren de olas que se mueven en aguas poco profundas, tratando de seguir la misma dirección de la línea de costa.

Existen varios métodos para considerar el efecto de refracción como lo son los de rayos de oleaje, frentes de onda y los numéricos.

A continuación se indica un procedimiento para dibujar el planode refracción del oleaje, para una altura significativa que se desee analizar, siguiendo el método de los Frentes de Onda (ref 4).

#### 2.4.1 Método de los frentes de onda

a) Calcular la altura significativa  $H_o$  y periodo significativo  $T_o$  del oleaje en aguas profundas. Esto se puede hacer con el método de predicción del oleaje descrito en el tercer capítulo. Ahí se definen estas variables.

b) Con el periodo significativo  $T_o$ , obtener la longitud de onda  $L_o$  en aguas profundas

$$L_o = \frac{gT_o^2}{2\pi} \doteq 1.56 T_o^2 \quad (2.1)$$

donde

$g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$T_o$  periodo significativo (s)

$L_o$  longitud de onda en aguas profundas (m)

- c) Calcular la profundidad  $d_o$  a partir de la cual el fondo empieza a influir en la altura de la ola

$$d_o = 0.5 L_o \quad (2.2)$$

- d) Según la escala que se tenga en el plano de batimetría del sitio en estudios, se escoge un espaciamiento " $n L_o$ " con el que se desee hacer el dibujo del diagrama de refracción. Este valor de " $n L_o$ " es la separación que se tiene entre crestas consecutivas, en la zona de aguas profundas.

- e) Para cada profundidad  $d_i$  (curvas batimétricas del plano) menor que  $d_o$ , se calcula el cociente  $d_i/L_o$  y se anota en la columna tres, en una tabla como la (2.1)

TABLA 2.1

$i$	$d_i$	$d_i/L_o$	$d_i/L_i$	$L_i$	$X_i$
-----	-------	-----------	-----------	-------	-------

- f) Para cada cociente  $d_i/L_o$ , de las tablas de Wiegel (ref 5) se encuentra sobre el mismo renglón de  $d_i/L_o$ , el cociente  $d_i/L_i$  y este valor se anota en la columna cuatro.

g) De la columna cuatro se despeja el valor de  $L_i$  y se anota en la columna cinco.

h) Se calcula el valor de  $X_i$  con la expresión (2.3) y éste se anota en la columna seis. Las variables  $X_0$  y  $X_i$  se definen en la fig (2.5). El valor de  $X_0$  se recomienda que sea de 15 cm o 20 cm

$$X_i = X_0 \operatorname{tanh} \frac{2\pi d_i}{L_i} \quad (2.3)$$

i) Una vez que se ha calculado toda la tabla (2.1) se dibuja una regleta como la de la fig (2.5). Conviene anotar en el lado  $\overline{AB}$  de la regleta, el número  $i$  que corresponde a cada  $nL_i$ , según la batimétrica  $d_i$  para la cual se calculó  $L_i$ , y en el plano batimétrico anotar también el número  $i$  según sea la batimétrica  $d_i$ , en donde,  $d_0$  ( $i=0$ ) es el límite de aguas profundas.

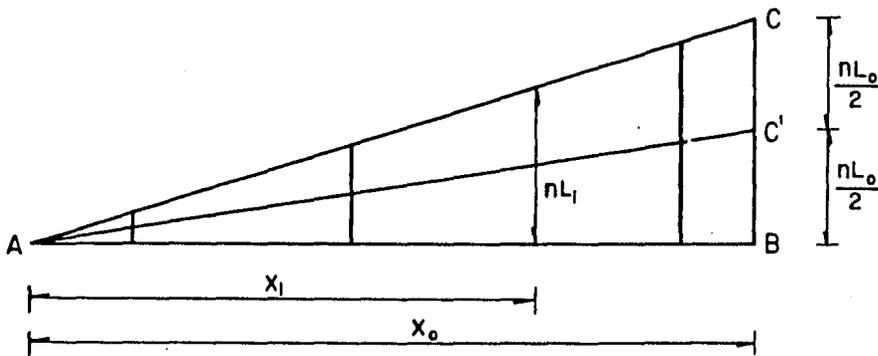


Fig 2.5 Regleta para dibujar el diagrama de refracción

#### 2.4.2 Aplicación del método de los frentes de onda

A continuación se describe cómo se aplica el método utilizando únicamen-

te la regleta de la fig 2.5.

a) Suponiendo que se tiene un plano cuya batimetría se muestra en la fig 2.6 , primero se identifica el límite de aguas profundas  $d_0$  como se indica en el inciso c), y hasta ahí se trazan los frentes de onda con una separación " $n L_0$ " y según la dirección que se haya encontrado factible (punto 3.4).

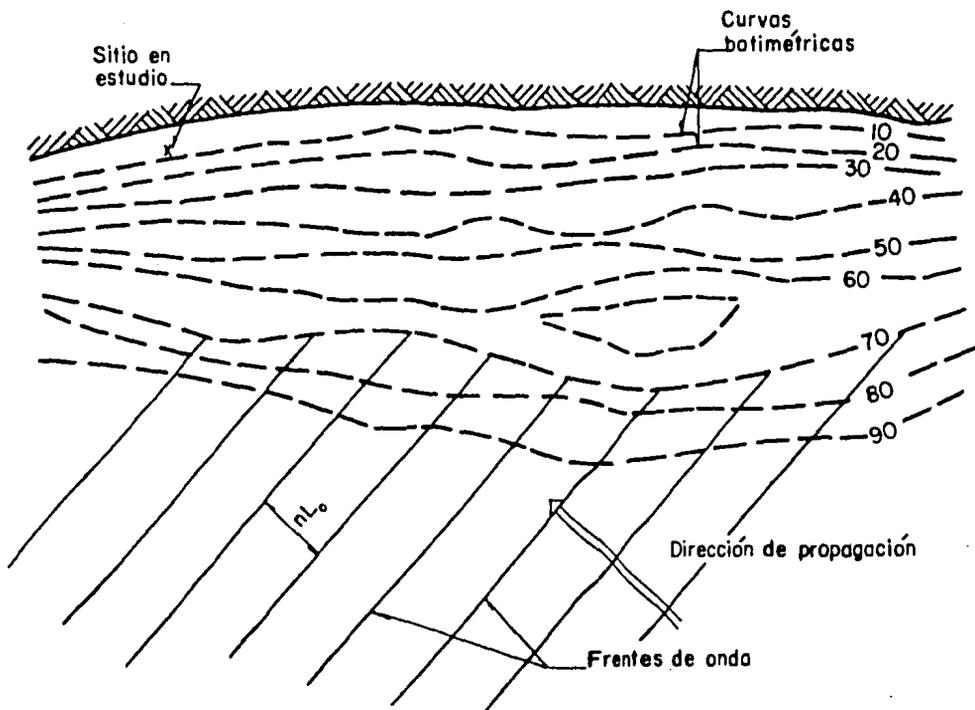


Fig 2.6 Trázo de los frentes de onda en aguas profundas (se supone que  $d_0 = 70$  m)

- b) El segmento  $\overline{AB}$  de la regleta se apoya sobre un frente de onda en aguas profundas (fig 2.7), en la posición 1, y se desplaza hacia la costa sobre el frente hasta que la línea  $\overline{AC'}$  de la regleta intercepte a la batimétrica en estudio, posición 2, que en este caso es  $d_0$ , en ese momento se marca un punto en el plano en el extremo C de la regleta. Con lo anterior se fija un punto por donde pasará el siguiente frente de onda.
- c) Se repite el procedimiento, poniendo la regleta en la posición 2 y tratando de aprovechar al máximo el frente de onda prolongado.

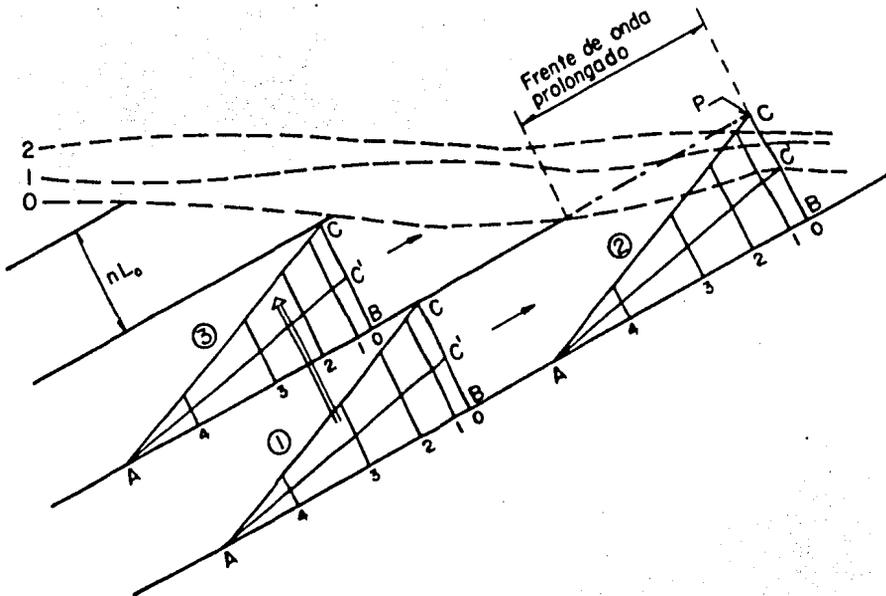


Fig 2.7 Empleo de la regleta en el método de los frentes de onda

### 2.4.3 Coeficiente de refracción

Una vez que se ha hecho el diagrama de refracción hasta el punto en estudio, se dibuja el canal de energía del oleaje tratando de que la intersección de los frentes de onda y las líneas del canal sean perpendiculares (fig 2.8). De este dibujo se determina el ancho "b" del canal en el sitio de estudio y el ancho "b<sub>o</sub>" en aguas profundas; con estos valores b y b<sub>o</sub>, se calcula el coeficiente de refracción del oleaje con la siguiente expresión

$$K_r = \sqrt{\frac{b_o}{b}} \quad (2.4)$$

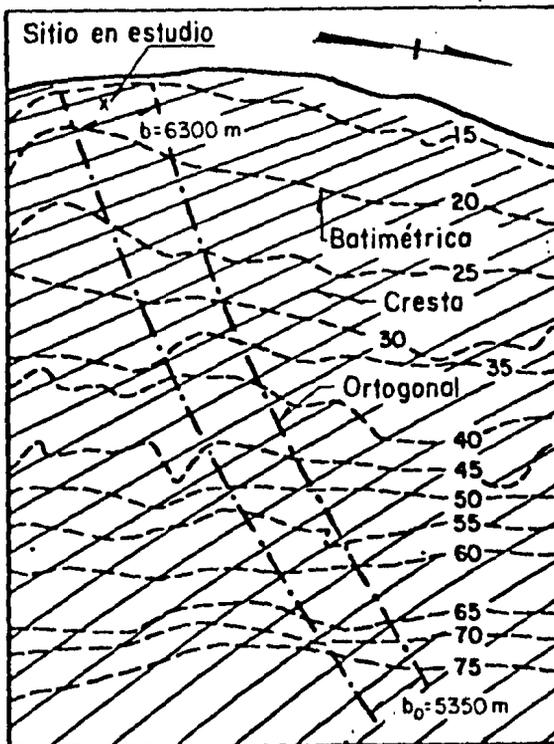


Fig 2.8 Diagrama de refracción del oleaje  
(H<sub>0</sub> = 10.83 m, T = 13.1 s)

#### 2.4.4 Coeficiente de fondo

Utilizando las tablas de Wiegel (ref 5) se determina el coeficiente de fondo  $K_s$  a partir de la relación  $d_i/L_o$ , donde  $d_i$  es la profundidad media del lugar en el cual se midió el ancho  $b$  del canal de energía.

#### 2.4.5 Cálculo de la altura significativa en el sitio de interés

Finalmente, se calcula la altura significativa  $H'_o$  que se presenta en el sitio con la siguiente expresión

$$H'_o = H_D (K_r) (K_s) \quad (2.5)$$

donde  $H_D$  es la altura significativa al final de la zona de decaimiento, siendo  $H_D = H_o$  para el caso en que la longitud de decaimiento sea despreciable.

El análisis de refracción del oleaje se hace sólo para el caso en que no se tengan mediciones de alturas de ola en el sitio en estudio y haya sido necesario utilizar el método de predicción expuesto en el punto 3.3, o algún otro método que dé las características del oleaje en aguas profundas.

### 3. PROBABILIDAD DE EXCEDER UNA ALTURA DE OLEAJE

Las alturas de oleaje extraordinario tienen un amplio rango de variación y a ello se atribuye la incertidumbre para escoger la altura de la ola para la cual conviene diseñar las obras marítimas. Por razones de seguridad, se suele seleccionar un valor grande, pero esto con frecuencia conduce a diseños sobrados y costosos.

En la actualidad se ha observado que es factible diseñar algunas estructuras marítimas para que soporten las acciones extraordinarias de tal forma, que no haya daños de gran magnitud en la obra.

Por lo anterior, es importante hacer estimaciones de las condiciones desfavorables del oleaje que se puedan presentar, y como éstas son eventuales conviene asociarlas con periodos de retorno.

Se define como periodo de retorno  $T_r$ , al número promedio de años en que

un evento es igualado o excedido. Así, por ejemplo, cuando se dice que una altura significativa del oleaje tiene un periodo de retorno de 10 años, significa que en promedio cada 10 años se presenta una altura significativa mayor o igual a ella.

La probabilidad del evento anterior se calcula como

$$P = 1/T_r \quad (3.1)$$

Se define como altura significativa de oleaje, a la altura promedio del tercio mayor de un grupo de olas y se denota como  $H_{1/3}$ . El tiempo que transcurre entre el paso de dos crestas consecutivas de altura significativa es el periodo significativo del oleaje  $T_{1/3}$ .

Para aclarar lo anterior se utiliza la fig (3.1), en la que se muestra un registro de alturas de ola

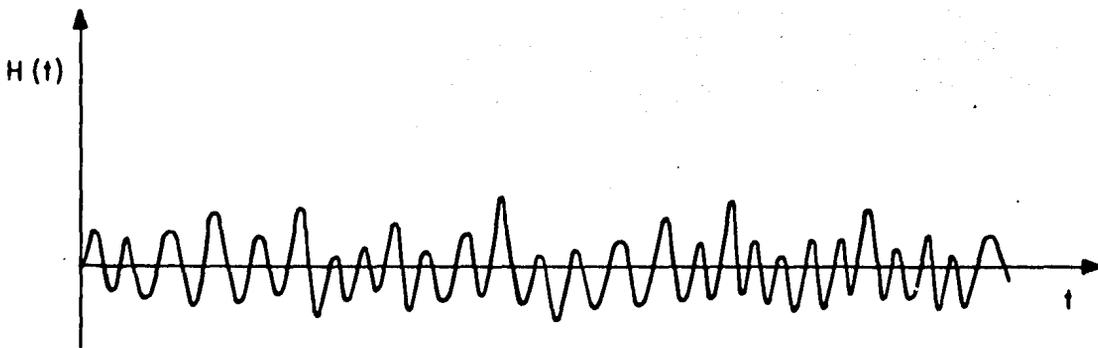


Fig 3.1 Registro de oleaje con duración de 10 minutos

Para obtener la altura significativa del oleaje, se cuentan las alturas de las olas registradas y se divide a tal número entre tres; por ejemplo,

si se tienen 30 alturas registradas, la tercera parte es diez, por lo que se toman los diez valores más altos del registro y se obtiene el promedio de ellas cuyo resultado es la altura significativa del oleaje de ese registro.

A continuación se presentan dos métodos para estimar alturas significantes de oleaje extraordinario asociadas con probabilidades de ocurrencia.

### 3.1 Oleaje significativo extraordinario obtenido de mediciones

En algunos lugares se obtienen diariamente registros de alturas de oleaje con duración de diez minutos a cada tres horas, con lo que se dispone de ocho registros diarios. De cada uno de estos registros se estima una altura significativa de oleaje. Cuando se dispone de este tipo de mediciones durante varios años (quince o más), se puede determinar la función de densidad de probabilidad que mejor represente los valores máximos anuales de altura significativa de oleaje.

A continuación se explican dos procedimientos para asociar alturas significantes de oleaje con periodos de retorno, según el número de años de medición que se tenga.

#### 3.1.1 Suficiente número de años de medición

Cuando se tienen registros de alturas significantes de muchos años (desde el punto de vista estadístico), se seleccionan los valores máximos anuales (una  $H_i$  por año), y se procede a calcular con ellos la función

de densidad de probabilidad que relacione lo mejor posible las alturas significantes del oleaje con probabilidad de excedencia. Para ello se puede aplicar el método de ajuste de momentos, el cual se explica en el Anexo.

### 3.1.2 Escaso número de años de medición

Generalmente existen mediciones de pocos años (3 ó 4). Cuando esto ocurre se sugiere aplicar el siguiente procedimiento.

De todos los valores registrados, se escogen los valores máximos diarios y a cada uno de ellos se le asigna un periodo de retorno de la manera como se indica en el anexo, siguiendo luego el mismo procedimiento que el indicado para valores máximos anuales.

Es importante recordar que el periodo de retorno se asocia con intervalos de tiempo en años, debido a que éste se obtiene tomando en cuenta sólo valores máximos anuales; pero como en este caso, para obtener el periodo de retorno se toman en cuenta valores máximos diarios, es necesario señalar que tal periodo de retorno indica el número promedio de días que se necesitan para que un evento sea igualado o excedido.

Cuando se trabaja con valores máximos anuales se suelen hacer extrapolaciones para cien o hasta mil años; pero en el caso de que se haya trabajado con valores máximos diarios se considera conveniente hacer interpolaciones para 15 o hasta 20 años. Lo anterior tiene su fundamento en tratar de ser congruente con el criterio de valores máximos anuales.

Todo lo antes explicado, representa un esfuerzo por tener estimaciones de condiciones extraordinarias que sirvan para diseñar algunas obras marítimas, por lo que se recomienda hacer estudios e investigaciones para mejorar el procedimiento o proponer y analizar otras ideas que sirvan para hacer tales estimaciones.

### 3.2 Distribuciones de probabilidad más comúnmente usadas para predecir oleaje extraordinario

Las funciones de densidad de probabilidad de valores extremos, como lo son la Gumbel y la de Weibull, y también la Lognormal, son las más utilizadas para relacionar probabilidades de excedencia (periodos de retorno), con alturas significantes de oleaje extraordinario.

A continuación se escriben los parámetros de dichas funciones de densidad de probabilidad y se da un ejemplo de aplicación de cada una de ellas (ref 6).

#### a) Distribución Lognormal:

La función de densidad de probabilidad Lognormal está dada por la expresión

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi} x} \exp \left[ -\frac{(\ln x - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2} \right] \quad (3.2)$$

$x \geq 0$

y la función de distribución de probabilidad acumulada es

$$F(X)^* = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{(L_n X - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}} \quad (3.3)$$

Esta función tiene como parámetros

$$\text{media } \mu = \exp\left(\frac{\mu_L + \sigma_L^2}{2}\right) \quad (3.4)$$

$$\text{variancia } \sigma^2 = \exp\left(2\mu_L + \sigma_L^2\right) \left[ \exp\left(\frac{\sigma_L^2}{2}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

#### b) Distribución Gumbel

La función de densidad de probabilidad Gumbel está dada por la expresión

$$f(X) = \alpha \exp^{-\alpha(X-\beta)} - \exp^{-\alpha(X-\beta)} \quad (3.6)$$

y la función de distribución de probabilidad acumulada es

$$F(X) = \exp^{-\exp^{-\alpha(X-\beta)}} \quad (3.7)$$

esta función tiene como parámetros

$$\text{media } \mu = \beta + \frac{0.577}{\alpha} \quad (3.8)$$

$$\text{variancia } \sigma^2 = \frac{\pi^2}{6\alpha^2} \quad (3.9)$$

---

\*La función F(X), está extensamente tabulada y se conoce como tabla de distribución de probabilidad normal.

## c) Distribución de Weibull

La función de distribución de probabilidad acumulada de Weibull es

$$F(X) = 1 - e^{-(x/a)^b} \quad (3.10)$$

esta función tiene como parámetros

$$\text{media } \mu = a\Gamma(1+1/b) \quad (3.11)$$

$$\text{variancia } \sigma^2 = a^2 [\Gamma(1+2/b) + \Gamma^2(1+1/b)] \quad (3.12)$$

$$\text{coef. de variación } v = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/b)}{\Gamma^2(1+1/b)} - 1} \quad (3.13)$$

Esta última expresión se representa en la gráfica de la fig 3.2.

## 3.2.1 Ejemplos de aplicación de las distribuciones de probabilidad

Estimar la altura significativa de oleaje que tiene un periodo de retorno de 15 años (5475 días), en un lugar donde la media y la desviación estándar de las alturas significantes del oleaje a lo largo de 3 años (1095 días), resultaron ser 3.50 m y 0.70 m respectivamente. Utilizar el método de ajuste de momentos.

## a) Lognormal

Igualando los parámetros de las funciones se tiene que

\* $\Gamma(Y)$  es la función matemática gama definida como  $\Gamma(y) = \int_0^{\infty} x^{y-1} e^{-x} dx$

y está tabulada en el libro de Milton Abramowitz and Irene A. Stegun,

"Mathematical of Functions," New York, N.Y.

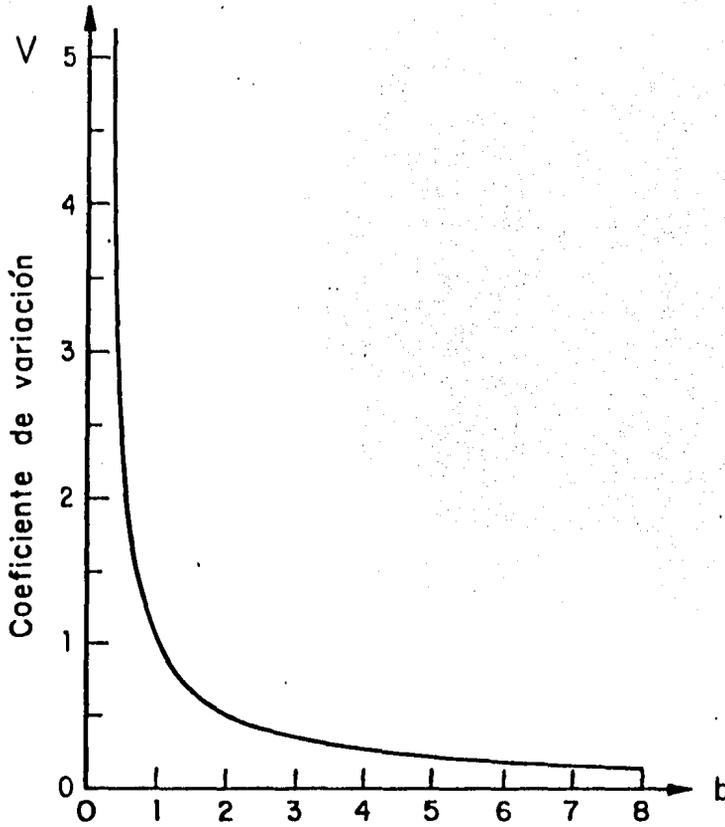


Fig 3.2 Relación entre el coeficiente de variación y b

Algunos valores de (b,V)

b	V	b	V	b	V
0.1	429.82	1.7	0.60	3	0.36
0.5	2.24	1.8	0.57	3.1	0.35
0.6	1.76	1.9	0.55	3.2	0.34
0.7	1.46	2.0	0.52	3.5	0.32
0.8	1.26	2.1	0.50	4.0	0.28
0.9	1.11	2.2	0.48	4.5	0.25
1.0	1.00	2.3	0.46	5.0	0.23
1.1	0.91	2.4	0.44	5.5	0.21
1.2	0.84	2.5	0.43	6.0	0.19
1.3	0.77	2.6	0.41	6.5	0.18
1.4	0.72	2.7	0.40	7.0	0.17
1.5	0.68	2.8	0.38	7.5	0.16
1.6	0.64	2.9	0.37	8.0	0.15

$$3.5 = \exp\left(\frac{\mu_L + \sigma_L^2}{2}\right)$$

$$(0.70)^2 = \exp\left(\frac{2\mu_L + \sigma_L^2}{2}\right) \left[ \exp\left(\frac{\sigma_L^2}{2}\right) - 1 \right]$$

resolviendo en forma simultánea las expresiones anteriores se tiene

$$\sigma_L = 0.1980 \text{ m y } \mu_L = 1.2332 \text{ m}$$

Como el periodo de retorno es el recíproco de la probabilidad, entonces

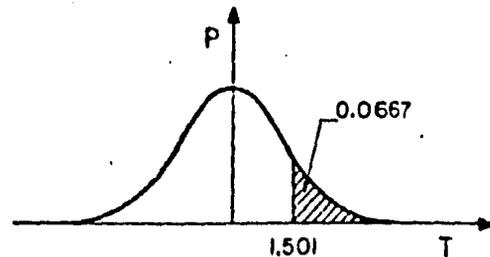
$$P(H_{1/3} \geq H) = 1/T_r = 1/15 = 0.0667$$

De una tabla de distribución normal se encuentra la variable estandarizada  $t = 1.501$

$$t = \frac{L_n H - \mu_L}{\sigma_L}$$

$$L_n H = t \sigma_L + \mu_L$$

$$L_n H = (0.1980)(1.501) + 1.2332$$



Finalmente  $H = 4.62 \text{ m}$

b) Gumbel

Igualando los parámetros de las funciones, se tiene que

$$3.5 = \beta + 0.577/\alpha$$

$$0.70^2 = \pi^2/6\alpha^2$$

resolviendo se obtiene  $\alpha = 1.8322$  y  $\beta = 3.1851$

Por otro lado, igualando el complemento del recíproco del periodo de

retorno con la función de distribución de probabilidad acumulada se tiene

$$1-1/T_r = \exp^{-\exp^{-\alpha(x-\beta)}}$$

despejando el valor de  $x$  (variable aleatoria) y sustituyendo

$$x = \frac{-1}{1.8322} \operatorname{Ln} \left[ -\operatorname{Ln} \left( \frac{15-1}{15} \right) \right] + 3.1851$$

finalmente  $x = 4.64$  m

### c) Weibull

Para encontrar los valores de  $a$  y  $b$  por el método de ajuste de momentos se procede de la siguiente manera: la media y la desviación estándar de los datos se igualan con  $\mu$  y  $\sigma$  respectivamente, y con el cociente

$\sigma/\mu$  se obtiene el coeficiente de variación  $V$ , con este valor se encuentra en la fig (3,2) el valor de  $b$  y finalmente, con la expresión (3,13) se calcula el valor de  $a$ . Procediendo de esta manera se tiene que  $\sigma = 0.70$  m y  $\mu = 3.50$  m

$$\text{entonces } V = \sigma/\mu = 0.70/3.50 = 0.20$$

$$\text{de la fig (3.2) se estima } b = 5.6$$

$$\text{como } \Gamma(1+1/5,6) = \Gamma(1.1786) \doteq 0.9237$$

$$a = 3.50/0.9237 \doteq 3.7891$$

Como la probabilidad de no excedencia es

$$1-1/T_r = 1-1/15 = 0.9333$$

y como  $F(X) = 1 - 1/T_r$

$$1-e^{-(x/a)^b} = 1 - 1/T_r$$

$$x = a[-\ln(1/T_r)]^{1/b}$$

$$x = 3.7891[-\ln(1/15)]^{1/5.6}$$

$$x \doteq 4.53 \text{ m}$$

### 3.3 Método de predicción de alturas significantes de oleaje extraordinario

Debido a que en México se tiene poca información sobre mediciones del oleaje, no se puede plantear un modelo probabilístico que represente el fenómeno del oleaje extraordinario, por lo que es necesario recurrir a métodos indirectos para establecer alguna relación entre el oleaje significativo y su periodo de retorno,

En esta sección se utiliza un método que predice alturas significantes de oleaje, generadas por condiciones meteorológicas adversas (ciclones), puesto que se sabe que éstas son las más desfavorables en el Golfo de México.

#### 3.3.1 Fundamentos del método de predicción

La siguiente información y definiciones se obtuvieron de las referencias 8 y 9.

a) Se tienen registros donde se reportan el número de ciclones que se han presentado en distintas zonas del Golfo de México durante 86 años

(1886-1971).

- b) Se entiende por índice de presión normal  $IP_o$  al valor de la presión atmosférica en condiciones normales, al nivel del mar, y este valor se encuentra en el exterior del ciclón.
- c) El índice de presión central  $IP_H$ , es el valor de presión mínimo registrado en un ciclón (ver fig 2.1). El índice de presión central sigue una distribución normal cuyo valor medio se puede calcular con la siguiente expresión

$$\overline{IP} = 1024.18 - 1.6884 \phi \quad (3.14)$$

y su desviación estándar como

$$\overline{SIP} = 54.03 - 1.013 \phi \quad (3.15)$$

donde  $\phi$  es la latitud media de la zona en estudio en grados e  $\overline{IP}$  y  $\overline{SIP}$  están dados en mb.

- d) El radio de máximo viento  $R$ , es la distancia que hay entre el centro del ciclón y el lugar donde, en dirección del fetch, ocurre la mayor velocidad del viento.

$$R = 0.0006574 e^{0.01155 IP_H} \quad (3.16)$$

donde  $R$  está dado en km e  $IP_H$  en mb.

- e) El índice de energía máxima  $E$  de un ciclón con desplazamiento, es una media de la transferencia de energía cinética del viento al mar y se calcula con la siguiente expresión

$$E = 962.7097 (IP_o - IP_H)^{1.1667} R^{0.6667} (\text{sen}\phi)^{-0.3333} \left[ 1 + \frac{0.418 V_d}{(IP_o - IP_H)^{0.5}} \right] \quad (3.17)$$

donde

$E$  es el índice de energía en  $\text{km}^3/\text{hra}^2$

$IP_o$  es el índice de presión normal y para el Golfo de México vale 1013.25 mb

$IP_H$  es el índice de presión central de un ciclón y tiene unidades en mb

R es el radio de máximo viento, en km

$\phi$  es la latitud media de la zona en estudio, en grados

$V_d$  es la velocidad media del desplazamiento del ciclón, en m/s (se obtiene de la fig 3.4).

f) La altura significativa del oleaje y su periodo significativo, están dados por las siguientes expresiones, respectivamente

$$H_o = 0.0051 E^{0.518} \quad (3.18)$$

$$T_o = 0.2768 E^{0.261} \quad (3.19)$$

En las expresiones anteriores E está dado en  $\text{km}^3/\text{h}^2$ ,  $H_o$  en m y  $T_o$  en s.

Para utilizar las expresiones anteriores se requiere determinar el índice de presión central del ciclón ( $IP_H$ ), el cual está asociado a la probabilidad de presentación del ciclón. Se ve entonces la importancia de definir este parámetro, ya que de ello dependen los resultados del método de predicción. Para llevarlo a cabo se propone una expresión que se basa en un análisis estadístico de ciclones y conceptos de teoría de probabilidades, a saber (ref 7).

$$P_{B\phi}(IP_H) = P_{B\phi}(IP_o) P(Z) \quad (3.20)$$

donde

$P_{B\phi}(IP_H)$  es la probabilidad de que se presente en la zona s un oleaje de altura significativa  $h_{1/3} \geq H$

$P_{B\phi}(IP_o)$  es la probabilidad de que se presente un ciclón en la zona s

$P(Z)$  es la probabilidad de que un ciclón produzca oleaje de altura significativa  $h_{1/3} \geq H$

$P(Z)$  se calcula con la siguiente expresión

$$P(Z) = 1 - \left[ \frac{T_r - 1}{T_r} \right]^{1/r_s} \quad (3.21)$$

$T_r$  periodo de retorno para la zona  $s$  de un ciclón capaz de generar un oleaje de altura significativa  $h_{1/3} \geq H$

$r_s$  es el número de ciclones en la zona  $s$ , capaces de producir oleaje de altura significativa  $h_{1/3} \geq 0$  por año (ver fig 3.3)

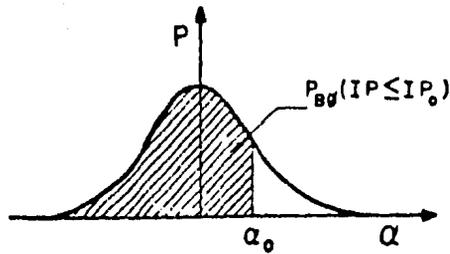
$P_{B\phi}(IP_H)$  sigue una distribución de probabilidad de Gauss; su media y desviación estándar son estimadas a partir de la latitud del punto en estudio, con las expresiones (3.14) y (3.15) como anteriormente se mencionó.

La deducción de las expresiones anteriores se puede ver en la referencia 7.

### 3.3.2 Secuela de cálculo

- a) Los datos de partida son: las coordenadas del sitio en estudio, la latitud  $\phi$ , el periodo de retorno  $T_r$ , el índice de presión  $IP_0 = 1013.25 \text{ mb}$  en el Golfo de México.
- b) Se ubica el sitio a estudiar en las figs 3.3 y 3.4 con lo que se conocer  $r_s$  y la velocidad de desplazamiento  $V_d$  del ciclón respectivamente.
- c) Con el valor de la latitud  $\phi$  se calcula la media  $\overline{IP}$  y desviación estándar  $\overline{SIP}$  de la distribución de probabilidad  $P_{B\phi}(IP_H)$  con las siguientes expresiones





f) Se calcula la probabilidad  $P(Z)$  de que un ciclón produzca oleaje de altura significativa  $h_{1/3} \geq H$

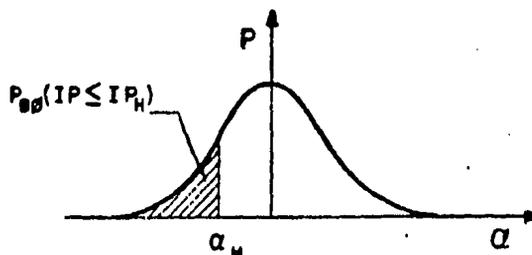
$$P(Z) = 1 - \left[ \frac{T_r - 1}{T_r} \right]^{1/r_s}$$

g) Se calcula la probabilidad de que se presente en la zona de latitud  $\phi$  una baja de presión capaz de producir un ciclón que genere oleaje de altura significativa  $h_{1/3} \geq H$

$$P_{B\phi}(IP_H) = P_{B\phi}(IP_0) P(Z)$$

h) Con el valor  $P_{B\phi}(IP_H)$  y de una tabla de distribución normal, se encuentra la variable estandarizada  $\alpha_H$  y con ella se calcula el valor de  $IP_H$

$$IP_H = \bar{IP} + \alpha_H \overline{SIP}$$



i) Se calcula el radio  $R$  de máximo viento para ese  $IP_H$

$$R = 0.0006574 e^{0.01155 IP_H}$$

j) Se calcula la energía  $E$  transmitida al mar

$$E = 962.7097 (1013.25 - IP_H)^{1.1667} R^{0.6667} (\text{sen } \phi)^{-0.3333} \left[ 1 + \frac{0.418 V_d}{(1013.25 - IP_H)^{0.5}} \right]$$

k) Finalmente se calcula la altura y periodo significantes al final de la zona de generación en aguas profundas

$$H_o = 0.0051 E^{0.518}$$

$$T_o = 0.2768 E^{0.261}$$

### 3.4 Dirección y decaimiento del oleaje

Para obtener la dirección con que llegan los frentes de ola se utiliza el siguiente procedimiento (ref 7). El método toma en cuenta la forma en que giran los ciclones en el Golfo de México (sentido positivo trigonométrico), la ubicación del sitio en estudio y con las siguientes expresiones calcula la longitud del fetch (en km) y la distancia  $r$  mínima desde el centro del ciclón hasta la línea de energía máxima del ciclón, respectivamente

$$F = 0.12189 E^{0.553} \quad (3.22)$$

$$r = (1.4134 - 0.01R)R \quad (3.23)$$

El método queda descrito por los siguientes pasos (fig 3.5):

- a) Se escoge una dirección que se considere factible y se traza una recta  $\overline{OQ}$  con esa dirección hasta el punto en estudio
- b) Se dibuja otra recta  $\overline{O'Q'}$  paralela a  $\overline{OQ}$  a una distancia  $r$ , colocada de

tal manera que si se imagina una fuerza que vaya del mar a la tierra sobre la recta  $\overline{OQ}$  y otra igual pero de sentido contrario sobre  $\overline{O'Q'}$ , el par resultante gire con el mismo sentido de giro del ciclón

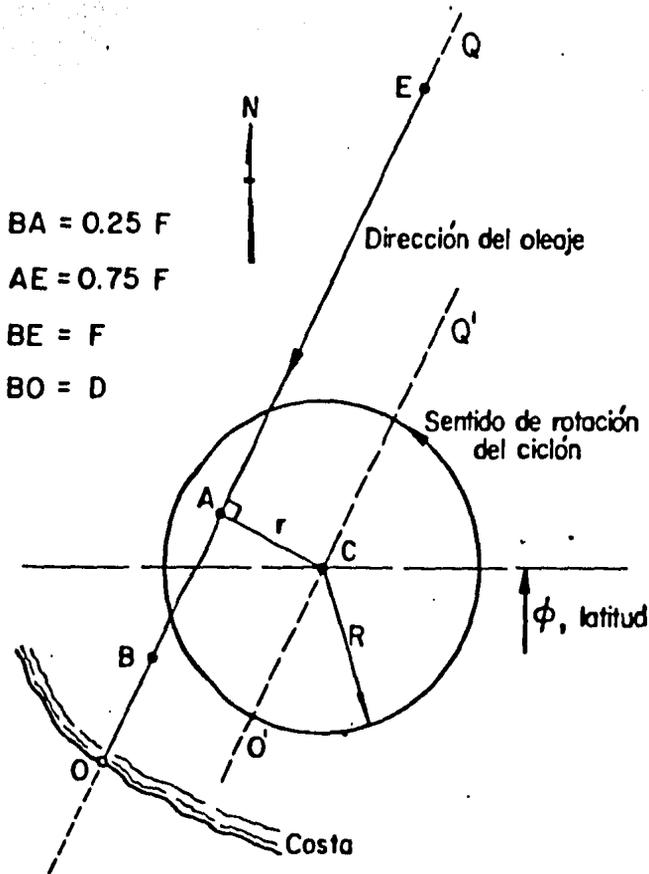


Fig 3.5 Estimación de la dirección del oleaje

- c) En el punto de intersección de la línea  $\overline{O'Q'}$  con el paralelo correspondiente a la misma latitud  $\phi$ , se define el punto del centro del ciclón, punto  $C$
- d) Se traza un círculo de radio  $R$  con centro en  $C$

- e) Se dibuja una línea perpendicular a  $\overline{O'Q'}$  que pase por C, la intersección de esta línea con la recta  $\overline{OQ}$  ubica al punto A
- f) A partir del punto A se acota un segmento de longitud  $0.25F$  hacia O, con ello se encuentra el punto B. También se acota un segmento de longitud  $0.75F$  en la dirección opuesta para definir el punto E
- g) Es necesario que el círculo de radio R no toque la costa para que la dirección propuesta sea factible; también se requiere que ninguno de los puntos B y E queden tierra adentro
- h) El fetch asociado a la dirección considerada es  $\overline{BE}$  y la distancia de decaimiento es  $\overline{BO}$ .

Aparentemente este método de obtener direcciones posibles de propagación de oleaje implica que muchas de ellas son factibles. En la práctica no sucede así porque al considerar las restricciones del inciso g), sólo en un reducido sector se pueden generar oleajes por ciclones que afecten de manera importante al sitio en estudio, ya que muchas direcciones consideradas en un principio como "factibles" requieren de la colocación del punto C lejos de la costa, con lo cual, aparte de tener otro valor de  $\phi$  (latitud), hace que la longitud de decaimiento crezca considerablemente y disminuya mucho la altura de la ola que pueda llegar de esas direcciones. Como conclusión se establece que el método identifica direcciones de oleaje producido por ciclones próximos al sitio en estudio.

Para calcular el decaimiento del oleaje se pueden usar las gráficas (figs 3.6 y 3.7) de Bretschneider (ref 7). Para emplear estas gráficas se obtienen  $D/F$ ,  $D/H_0$  y  $D/T_0^2$ ; donde F y D igual a  $\overline{BO}$  se expresan en millas náuticas, la altura de la ola  $H_0$  en pies y  $T_0$  en segundos. En la fig 3.6 se

bujan dos rectas, una vertical que pase por  $D/H_D$  y otra horizontal que pase por  $D/f$ , su intersección corresponde al punto P que se desplaza hacia arriba siguiendo una curva paralela a las que aparecen en tal figura, para que en la parte superior se lea el valor buscado  $D/H_D$ . Para la fig 3.7 se procede en forma semejante sólo que ahora la línea vertical pasa por el punto  $D/T_0^2$  y en la parte superior se leerá  $D/T_D^2$ . Los valores  $H_D$  y  $T_D$  corresponden a la altura y periodo significantes del oleaje corresponden al final de la zona de decaimiento.

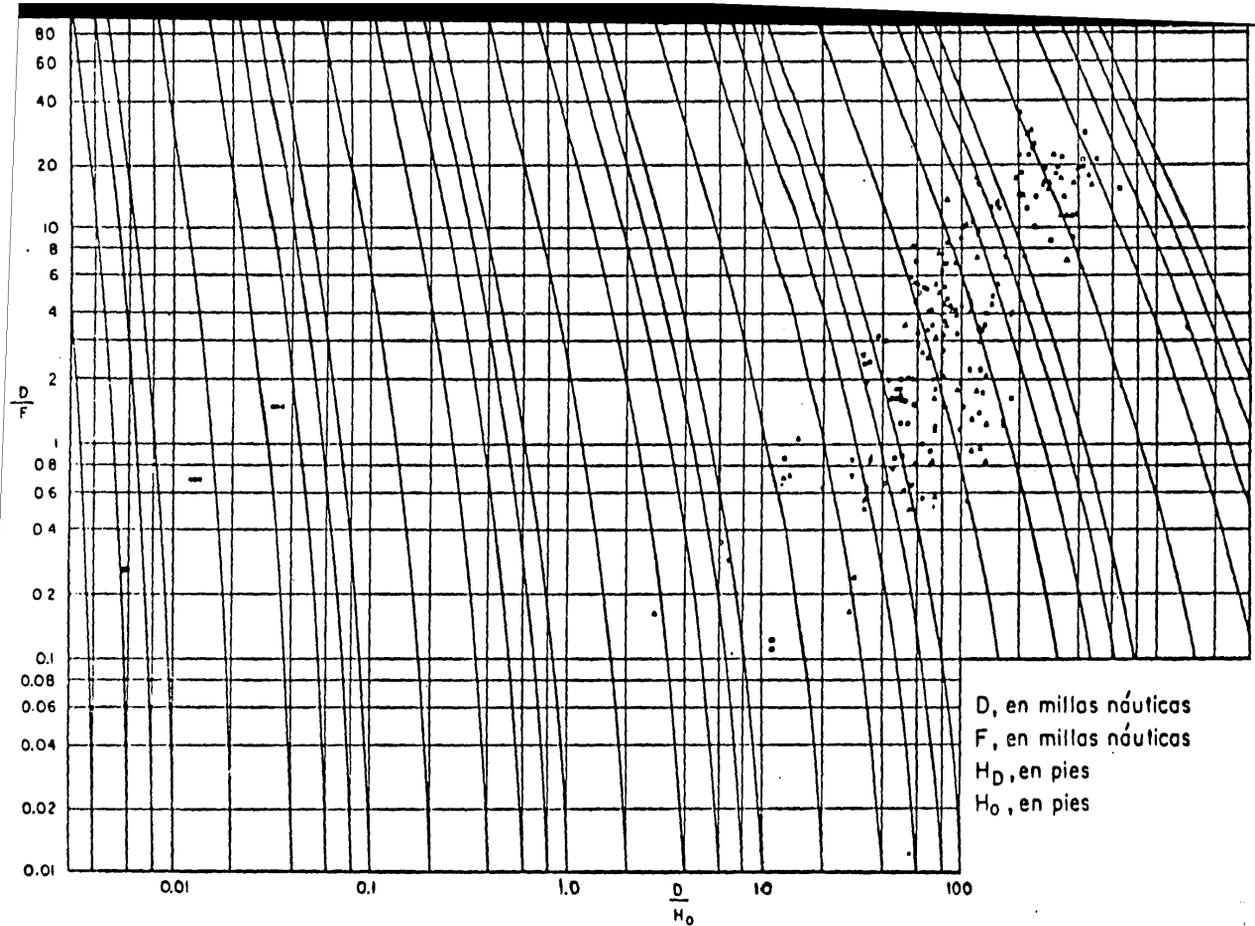


Fig 3.6 Obtención de la altura de la ola  $H_D$ , al final de la zona de decaimiento (gráficas propuestas por Wiegel, ref 5)

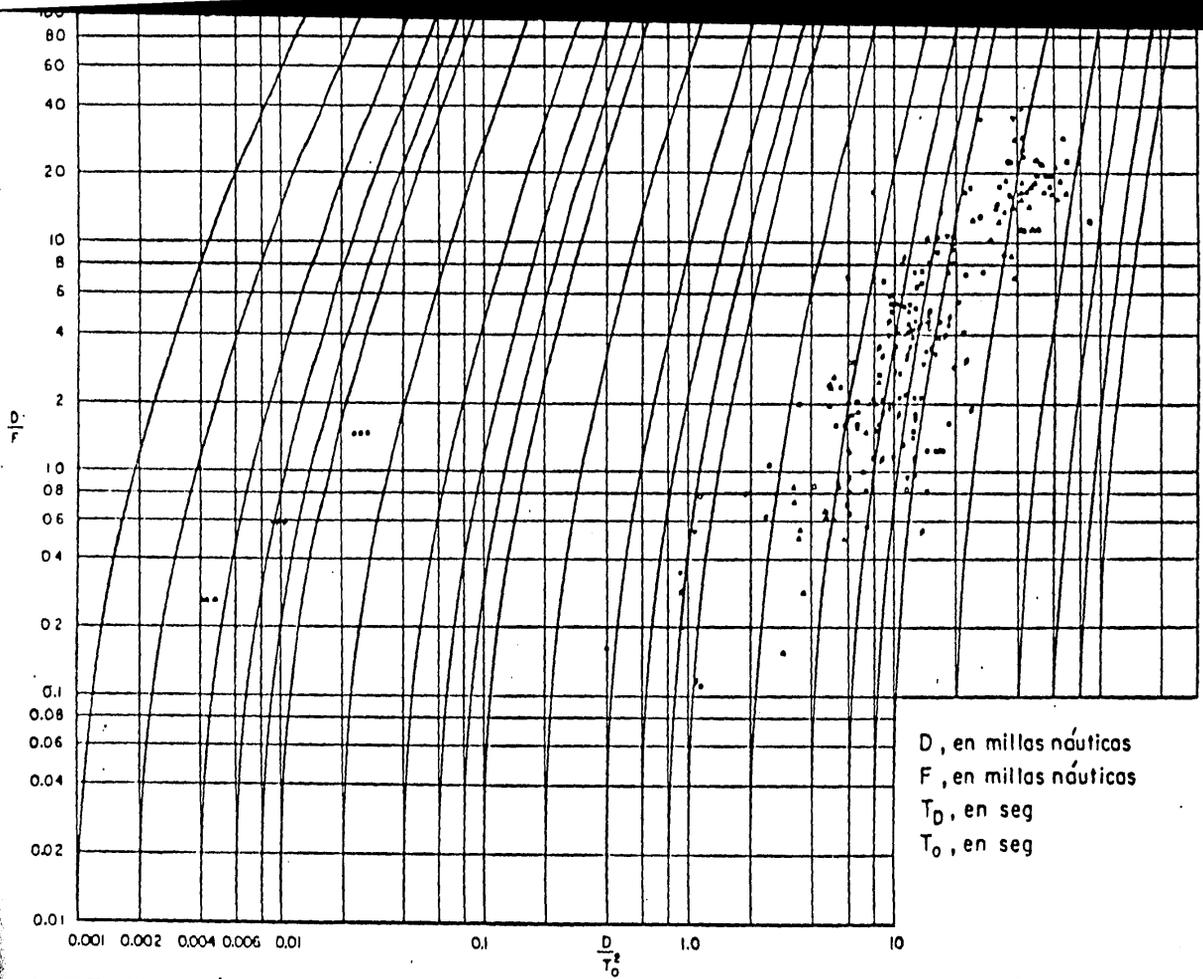


Fig 3.7 Obtención del periodo de la ola  $T_D$ , al final de la zona de decaimiento (gráficas propuestas por Wiegel, ref 5)

#### 4. ESCOLLERAS

Las escolleras o rompeolas se clasifican en los siguientes tres tipos

-verticales

-de gravedad

-mixtos

Los más utilizados son los de tipo gravedad, debido a que se ha observado que éstos tienen un mejor comportamiento al actuar el oleaje extraordinario.

Dentro de las escolleras tipo gravedad, se tienen a la vez diferentes formas de su sección transversal, según el acomodo que se les dé a los materiales que constituyen la estructura; dos de estas formas se muestran en las figs 4.1 y 4.2.



#### 4.1 Elementos de las escolleras (tipo gravedad)

Las secciones transversales de las escolleras están formadas por las siguientes capas (ref 10).

Coraza (I). Es la parte exterior de la estructura y está formada por una o dos capas de elementos que son los que reciben la acción directa del oleaje. El peso  $W$  de estos elementos se determina de acuerdo a la fórmula de Hudson que posteriormente se explicará (ref 11).

Capa secundaria (II). Sirve para soportar los elementos de la coraza y además como filtro para evitar que salgan los elementos de la capa en que se apoya. Puede haber una o más capas secundarias y cada una de ellas formada con dos capas de elementos.

Núcleo (III). Sirve como soporte y relleno a la estructura y es de tipo masivo.

Delantales (IV). Tiene por objetivo proteger la escollera contra la socavación al pie de la misma; se recomienda que su espesor  $e$  sea mayor de 50 cm y su longitud  $L$  mayor de 5.00 m en el lado expuesto al oleaje y variable de 1.5 m a 2 m en el lado protegido (ver figs 4.1 y 4.2). En muchas ocasiones se construyen utilizando los mismos elementos del núcleo y nunca debe evitarse su construcción ya que este elemento da mayor seguridad a la obra.

Filtro y Apoyo (V). Se utiliza para evitar el hundimiento de las piedras

durante la construcción debido a las corrientes y el oleaje. También evita que la arena del fondo sea succionada y extraída de entre los huecos dejados por las rocas cuando se presentan grandes tormentas. De ocurrir lo anterior se propicia el hundimiento o deslizamiento de algunas zonas de la estructura.

#### 4.2 Diseño de escolleras

En el diseño de la sección transversal de una escollera intervienen varios factores como por ejemplo, el tipo de elementos que van a formar la estructura, ya que éstos pueden ser fabricados u obtenidos directamente de un banco de materiales. El tipo de oleaje que enfrenta la escollera, puesto que puede ser rompiente, no rompiente o que rompa en la estructura, etc. pero fundamentalmente, se considera la altura significativa del oleaje, puesto que con este valor y utilizando la fórmula de Hudson, se calcula el peso de los elementos de la coraza y con ello también se calculan los pesos de los elementos de las capas interiores, según se puede observar en las figs 4.1 y 4.2.

La fórmula de Hudson es la que se aplica con mayor frecuencia para calcular el peso de los elementos de la coraza, ya que presenta la ventaja de obtener un valor ( $K_D$ ) que depende exclusivamente del tipo de elemento en la coraza y además, toma en cuenta los siguientes factores: número de capas en la coraza, forma de las unidades, grado de trabazón entre las unidades, modo de colocación y tipo de oleaje incidente.

#### 4.2.1 Peso de los elementos de la coraza

La siguiente expresión es de tipo empírico y se conoce con el nombre de fórmula de Hudson

$$W = \frac{\gamma_s H_d^3}{K_D (S_g - 1)^3 \cot \theta} \quad (4.1)$$

donde

$W$  peso de un elemento de la coraza (ton)

$\gamma_s$  peso específico seco de los elementos de la coraza ( $\text{ton}/\text{m}^3$ )

$S_g$  peso específico relativo al agua de mar ( $S_g = \gamma_s / \gamma_w$  y  $\gamma_w \approx 1.025 \text{ ton}/\text{m}^3$ )

$H_d$  altura de la ola significativa de diseño que llega al lugar donde estará la escollera (m)

$\theta$  ángulo del talúd de la escollera con respecto a la horizontal

$K_D$  coeficiente de estabilidad que varía principalmente debido a la forma de los elementos de la coraza, a su rugosidad, agudeza de aristas e interconexión de los elementos obtenida al colocarlos y a la posibilidad de que rompa o no la ola sobre la estructura. Además de la ubicación de los elementos en la escollera, ya sea que estén en el extremo terminal llamado morro o en una parte intermedia (es adimensional)

Los valores  $K_D$  obtenidos de pruebas de laboratorio se muestran en la tabla 4.1. Estos valores se utilizan cuando el diseño de la escollera se hace para un daño del 0%.

En la actualidad se cuenta con una gran investigación en lo referente a las condiciones que producen olas no rompientes, pero en cambio se dispone

TABLA 4.1 COEFICIENTE DE ESTABILIDAD  $K_D$

Criterio "Sin Daño" y Sobre-elevación Mínima							
Unidad	n*	Colocación	Cuerpo		Morro		Talud Cot $\theta$
			$K_D$		$K_D$		
			Oleaje Rompiente	Oleaje no Rompiente	Oleaje Rompiente	Oleaje no Rompiente	
<b>Piedra</b>							
Lisa redondeada	2	al azar	2.1	2.4	1.7	1.9	1.5 a 3.0
Lisa redondeada	3	al azar	2.8	3.2	2.1	2.3	De 1 a 1.5
Rugosa angular	1	al azar		2.9		2.3	a 1 a 3
					2.9	3.2	1.5
Rugosa angular	2	al azar	3.5	4.0	2.5	2.8	2.0
					2.0	2.3	3.0
Rugosa angular	3	al azar	3.9	4.5	3.7	4.2	De 1 a 1.5
Rugosa angular	2	especial	4.8	5.5	3.5	4.5	a 1 a 3
<b>Tetrápodo y Cuadrípodo.</b>							
	2	al azar	7.2	8.3	5.9	6.6	1.5
					5.5	6.1	2.0
					4.0	4.4	3.0
<b>Tribarra</b>							
	2	al azar	9.0	10.4	8.3	9.0	1.5
					7.8	8.5	2.0
					7.0	7.7	3.0
<b>Dolos</b>							
	2	al azar	22.0	25.0	15.0	16.5	2.0
					13.5	15.0	3.0
<b>Cubo modificado</b>	2	al azar	6.8	7.8	-	5.0	De 1 a 1.5
<b>Hexápodo</b>	2	al azar	8.2	9.5	5.0	7.0	a 1 a 3
<b>Tribarra</b>	1	uniforme	12.0	15.0	7.5	9.5	
<b>Piedra (<math>K_{RR}</math>)</b>							
Graduada angular	-	al azar	2.2	2.5			

\* n es el número de unidades en el espesor de la coraza.

de muy escasas pruebas respecto a olas rompientes. Aún no han sido completamente establecidas las condiciones de profundidad y pendiente del fondo capaces de producir las características de la ola rompiente de mayor destructividad. Por el momento se considera recomendable aplicar una reducción a los valores de  $K_D$  determinados para olas no rompiente, para aplicarlos a una ola de diseño en rompiente. Tal reducción puede ser más conservadora que los valores indicados por las pruebas de laboratorio aún incompletas.

Por otro lado, si se acepta algún grado de daño en la coraza, se pueden usar valores un poco mayores de  $K_D$  para el diseño. Se han llegado a determinar valores de  $K_D$  en función del porcentaje de daños. Estos valores de  $K_D$  se muestran en la tabla 4.2 en la cual  $H$  es la altura significativa de la ola correspondiente al daño  $d$ ,  $H_d=0$  representa la altura significativa de la ola correspondiente a un daño de 0 a 5%, generalmente referido como condición sin daño, y  $K_D$  es el coeficiente de estabilidad para el elemento y condición de daños respectivos.

Este porcentaje de daño está basado en el volumen de unidades desplazadas de su lugar por una altura de ola especificada.

#### 4.2.2 Elevación de la corona

Uno de los efectos provocados por el talúd de la estructura es el ocasionar la rotura de la ola, al hacer que las trayectorias orbitales se destruyan y con ello que la energía de la ola incidente se disipe, pero parte de esta energía hace que la ola, después de rota, trepe por el ta-

TABLA 4.2 VALORES DE  $H/H_{D=0}$  EN FUNCION DEL DAÑO EN LA CORAZA

Unidad		Porcentaje de Daño (D)						
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50
Piedra (lisa)	$H/H_{D=0}$	1.00	1.08	1.14	1.20	1.29	1.41	1.54
	$K_D$	2.4	3.0	3.6	4.1	5.1	6.7	8.7
Piedra (rugosa)	$H/H_{D=0}$	1.00	1.08	1.19	1.27	1.37	1.47	1.56
	$K_D$	4.0	4.9	6.6	8.0	10.0	12.4	15.0
Tetrápodos y cuadrípodos	$H/H_{D=0}$	1.00	1.09	1.17	1.24	1.32	1.41	1.50
	$K_D$	8.3	10.8	13.4	15.9	19.2	23.4	27.8
Tribarra	$H/H_{D=0}$	1.00	1.11	1.25	1.36	1.50	1.59	1.64
	$K_D$	10.4	14.2	19.4	26.2	35.2	41.8	45.9

Estos valores se obtuvieron para el cuerpo,  $n = 2$ , oleaje no rompiente, colocación de las unidades al azar y roci6n m6nima.

lúd hasta una distancia que es función de la inclinación, rugosidad del talúd y de las características propias de la ola.

La elevación de la corona deberá ser tal que garantice dos cosas

- a) Que en la zona interior, aquella a la que se pretenda dar protección, se tenga la suficiente calma para que la estructura cumpla con el fin propuesto

Para calcular la elevación de la corona que cumpla con la restricción anterior se pueden utilizar las gráficas de la fig 4.3 (ref 10).

Para utilizarlas se calcula el cociente  $H_0/L_0$ , donde  $H_0$  es la altura de la ola y  $L_0$  su longitud, correspondientes a la condición de aguas profundas y al final de la zona de generación.

Según el talúd de la obra se escoge la figura y se obtiene con el cociente anterior y la curva de  $h/L_0$ , un valor de  $R_L/H_0$  de donde se despeja  $R_L$ . La definición de las literales se obtiene de la figura 4.4.

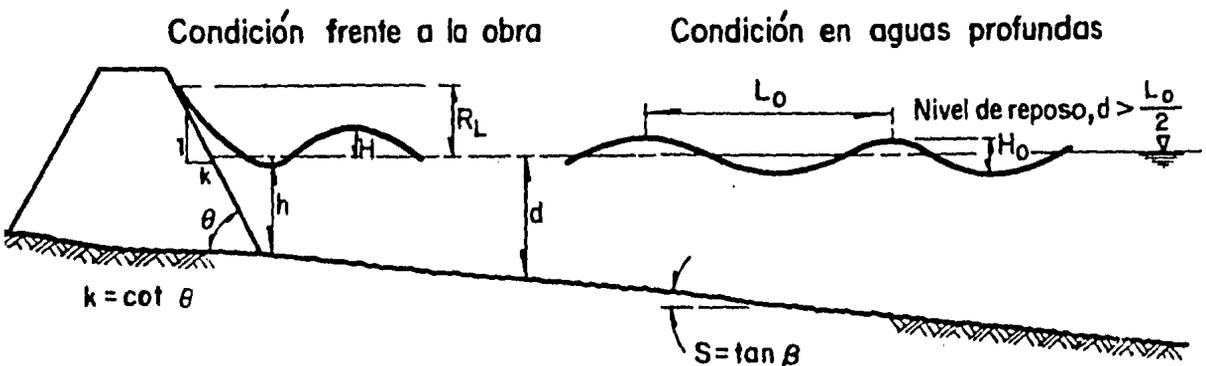
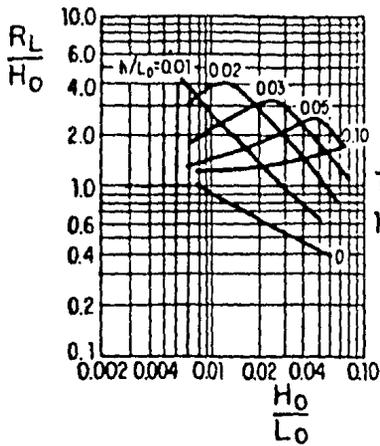


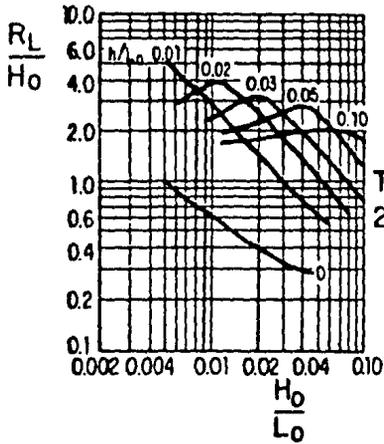
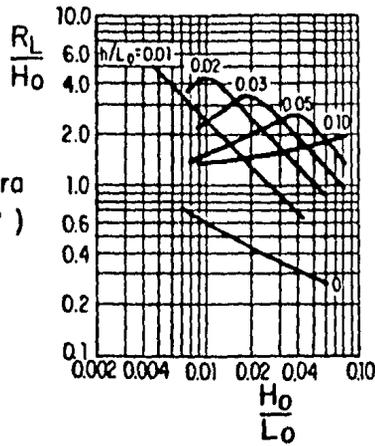
Fig 4.4 Definición de los términos utilizados en el alcance de la ola

Pendiente de la playa  
20:1 ( $\beta = 2^\circ 51.7'$ )

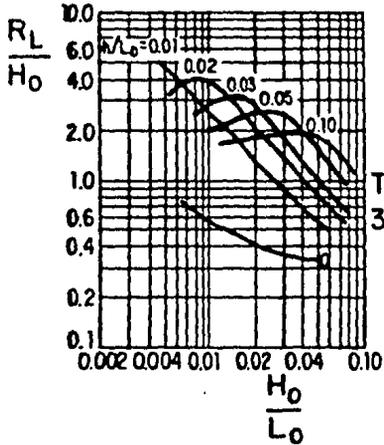
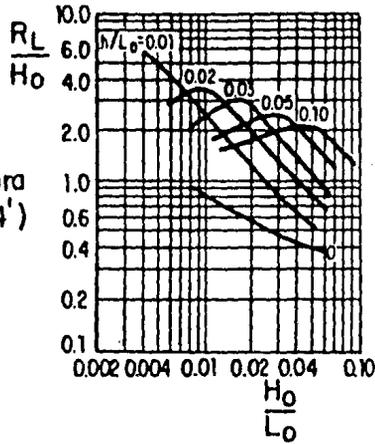


Talud de la obra  
1:1 ( $\theta = 45^\circ$ )

Pendiente de la playa  
30:1 ( $\beta = 1^\circ 54.5'$ )



Talud de la obra  
2:1 ( $\theta = 26^\circ 34'$ )



Talud de la obra  
3:1 ( $\theta = 18^\circ 26'$ )

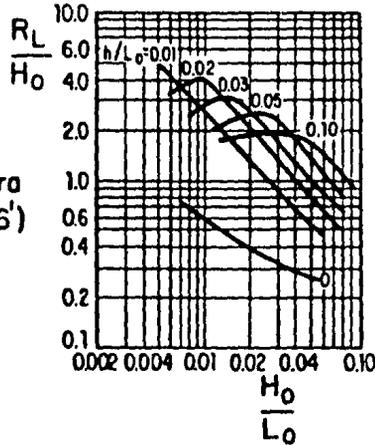


Fig 4.3 Valor del alcance de la ola sobre estructuras ó pendiente de la playa, según Toyoshima, Shuto y Hashimoto (1966)

Lo anterior es válido sólo cuando la ola rompe antes de llegar a la estructura; cuando esto no sucede la ola puede romper en la estructura o no romper, y para tomar una decisión se hace el siguiente análisis.

a) Con el cociente  $H_0/L_0$  (condiciones de aguas profundas), y utilizando la fig 4.5 se estima el valor de  $\alpha_c$

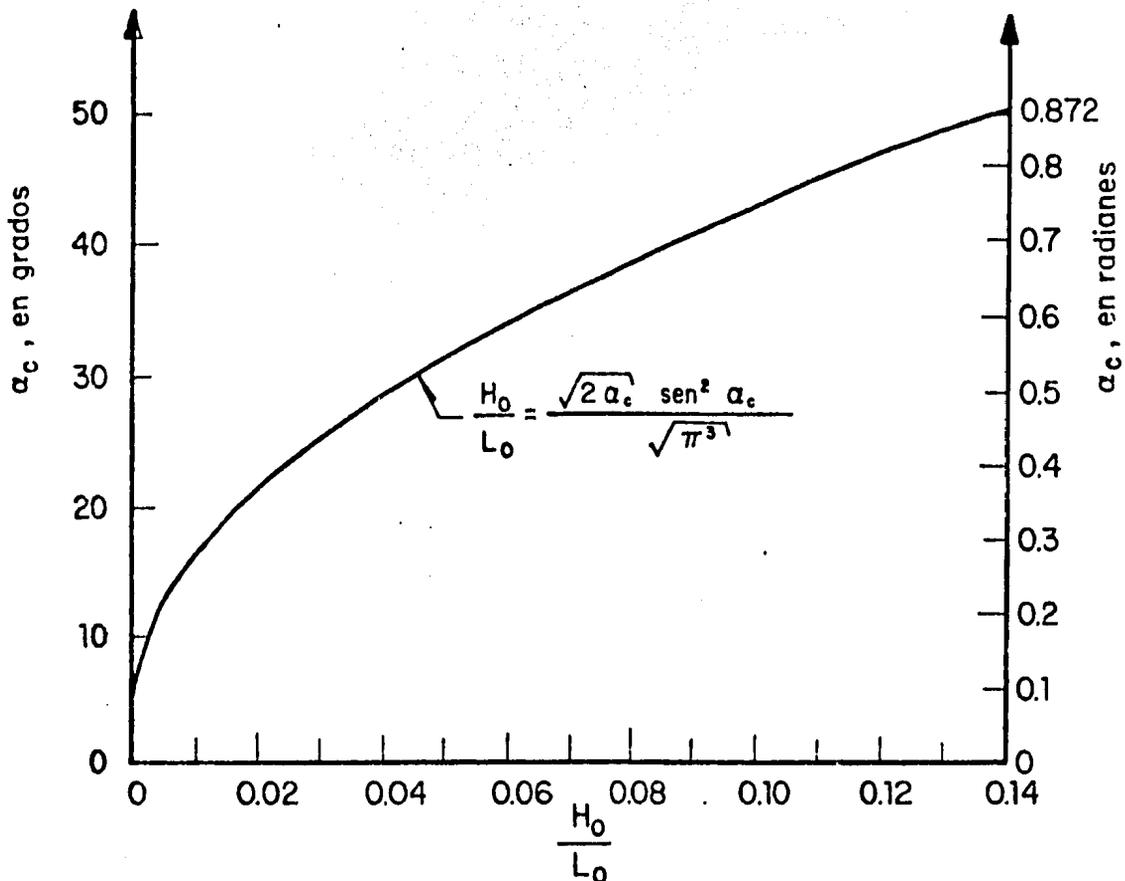


Fig 4.5 Estimación del ángulo  $\alpha_c$

Nota. En las expresiones 4.2 y 4.3,  $K_s$  es el coeficiente de fondo (punto 2.24) y  $k$  es el número de oleaje, y es igual a  $2\pi/L$ .

b) Si el valor de  $\alpha_c$  es mayor que el ángulo  $\theta$  (talúd de la estructura), la ola rompe sobre la estructura y el valor de  $R_L$  se calcula con la expresión 4.2

$$R_L = H_o K_s \left[ \frac{\tan \theta}{\tan \alpha_c} \right]^{2/3} \left[ \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} + \frac{\pi H}{L} \coth k d \right] \quad (4.2)$$

c) Si  $\alpha_c$  es menor o igual que  $\theta$ , la ola es no rompiente y el valor de  $R_L$  se calcula con la expresión 4.3

$$R_L = H_o K_s \left[ \sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} + \frac{\pi H}{L} \coth k d \right] \quad (4.3)$$

Los valores de  $R_L$  que se calculan con las expresiones 4.2 y 4.3 son válidos para el caso en que la superficie de la estructura es lisa, en caso de que la superficie sea diferente, los valores de  $R_L$  se afectan por algún factor de la tabla 4.3, según sea el caso.

Tabla 4.3 Factores de corrección para estimar el alcance de la ola, según la superficie del talúd

Material y acabado de la superficie	Factor f
Losa de concreto	1 - 0.9
Pastos	0.85 - 0.90
Una capa de rezaga colocada sobre una superficie impermeable	0.8
Piedra acomodada	0.75 - 0.80
Piedra redonda	0.60 - 0.65
Piedra colocada a volteo	0.50 - 0.60
Dos o más capas de enrocamiento o de rezaga	0.50
Elementos prefabricados	0.50
Mampostería (dos capas)	0.90 - 0.55
Mampostería (una capa)	0.80

b) El procedimiento de construcción. La escollera se construye formando parcialmente la sección transversal de tierra hacia el mar; para ello se avanza dejando terminada la totalidad de las capas bajo un determinado nivel que puede ser la línea AA' o la línea BB' mostradas en las figuras 4.1 y 4.2. Es decir, la sección queda determinada en un primer avance hasta el nivel de la corana del núcleo o de la capa secundaria. Cualquiera que sea la línea o el nivel seleccionado quedará a una distancia  $\Delta H$  sobre el nivel de pleamar media superior, (NPMS)\*; este valor de  $\Delta H$  es aproximadamente igual a 0.50 m con lo que se logra trabajar adecuadamente siempre que el oleaje sea pequeño. Sobre esa elevación se coloca una capa de rezaga que permita el tránsito del equipo de construcción.

Una vez que se ha construido la escollera en la forma indicada se procede a terminar la escollera avanzando desde el morro hacia el arranque. Esa terminación consiste en la formación de la corona de la coraza o de la coraza y capa secundaria (ver fig 4.1). Antes de colocar la parte faltante, la capa de rezaga que sirvió para rodamiento deberá removerse, lo cual se logra fácilmente aplicando chorros de agua a presión.

Generalmente esta última restricción es la que rige para fijar la elevación de la corona.

#### 4.2.3 Ancho de corona

El ancho de corona depende del grado de rociación permitida y del tamaño de

---

\* NPMS es el nivel más alto de un registro de mareas

pedras en la coraza. Se calcula con la siguiente expresión

$$B = n K_{\Delta} \left( \frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (4.4)$$

donde

B es el ancho de corona (m)

n número de elementos que forman la capa (se recomienda 3 como mínimo)

W peso de los elementos que forman la coraza

$K_{\Delta}$  coeficiente de capa (se obtiene de la tabla 4.4)

$\gamma_s$  peso volumétrico de los elementos de la coraza

TABLA 4.4 Coeficientes de capa y porosidades de varios tipos de elementos de coraza

Elemento de coraza	n	Colocación	Coeficiente de capa $K_{\Delta}$	Porosidad (P) en porcentaje
Roca de cantera (liza)	2	volteo	1.02	38
Roca de cantera (rugosa)	2	volteo	1.15	37
Roca de cantera (rugosa)	>3	volteo	1.10	40
Cubo modificado	2	volteo	1.10	47
Tetrápodo	2	volteo	1.04	50
Quadri-podo	2	volteo	0.95	49
Hexá-podo	2	volteo	1.15	47
Tribar	2	volteo	1.02	54
Dolos	2	volteo	1.00	63
Tribar	1	unidorme	1.13	47

## 5. ESTIMACION DE COSTOS DE CONSTRUCCION Y REPARACION DE UNA ESCOLLERA

En este capítulo se expone una manera de calcular el costo de construcción de una escollera y el costo de daño que sufre cuando se presenta una altura mayor a la de diseño.

### 5.1 Costo de construcción de la escollera

Conviene recordar que para diseñar una escollera es necesario proponer una altura significativa de diseño  $H_d$ , con lo que se obtienen las dimensiones de la estructura y las características de los elementos que la forman. Una vez hecho lo anterior, se realiza la cubicación de la estructura para una cierta longitud que sea homogénea en cuanto a los elementos que la constituyen y se calcula su costo de construcción.

En la sección 7.3 se presenta un ejemplo de aplicación en el cual se obtiene una expresión algebraica para calcular el costo de construcción de

la escollera en función de  $H_d$ .

## 5.2 Daños en la escollera

Cuando se presenta un oleaje de altura significativa  $H$  mayor a  $H_d$ , los elementos que forman la coraza son movidos de su lugar por lo que se dice que se tiene un daño en ella, el cual es directamente proporcional a la altura significativa que se presenta.

La tabla 4.2 da una idea de los daños que experimenta la coraza cuando se presenta un oleaje de altura significativa mayor al de diseño. Esta tabla se tomó de la referencia 11, y ahí se menciona que fue obtenida a partir de múltiples ensayos hechos en laboratorio.

Como puede observarse en la tabla 4.2, al establecerse el cociente entre la altura significativa que enfrenta la coraza y la altura significativa de diseño, el excedente a la unidad corresponde, aproximadamente al porcentaje de daño que sufre la coraza en tales condiciones, es decir

$$d = H/H_d - 1 \quad (5.1)$$

para  $H_d \leq H$

$H$  es la altura significativa de oleaje que enfrenta la escollera

$H_d$  altura significativa de diseño del elemento de la coraza

$d$  daño máximo en porcentaje que experimenta la coraza

De la misma tabla se ve que el valor máximo del porcentaje de daño registrado es del 50% por lo que se considera que no es prudente admitir daños en la coraza mayores a este porcentaje porque ello pondría en peligro la

escollera y muy probablemente dejaría de servir para el fin que se construyó. Por lo anterior, se supondrá que la falla total de la escollera ocurrirá para la altura significativa del oleaje que hace que el porcentaje de daño exceda el 50%.

### 5.3 Costos por daño

El costo por daño que sufre la escollera cuando se presenta un oleaje de altura significativa mayor que el considerado en su diseño se calcula de la siguiente manera

$$C_R = \begin{cases} \frac{C_c}{2} d & \text{para } H_d < H \leq 1.5 H_d \\ C_e + C_s & \text{para } H > 1.5 H_d \end{cases} \quad (5.2)$$

donde

$C_R$  costo de daño

$C_c$  costo de la coraza de la escollera (está dividida entre dos porque se considera únicamente el lado expuesto al oleaje)

$C_e$  costo de la escollera

$C_s$  costo causado por la suspensión del servicio en el puerto, al fallar la escollera

### 5.4 Costo esperado de daño

Recordando que cada oleaje de altura significativa  $H$  está asociado a una probabilidad de excedencia  $P_m$ , se ve que el daño que produce el oleaje de altura  $H$ , también lo está, y por ello, se puede calcular para diferentes valores de  $P_m$  un costo de daño respectivo, con cuyos valores se hace una

gráfica de costo de daño y probabilidad de ocurrencia, parecida a la que se muestra en la fig 5.1.

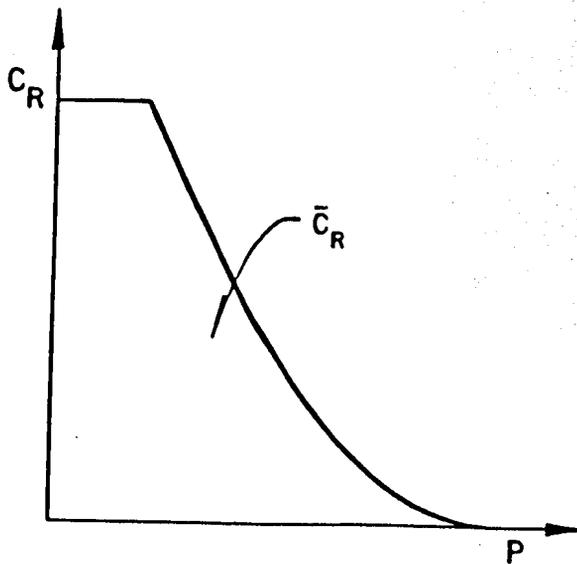


Fig 5.1 Variación del costo de daño en función de la probabilidad de excedencia  $P_m$ .

El área bajo la curva de la fig 5,1 representa la esperanza o valor esperado del costo de daños en cualquier año de la vida útil de la obra (ref 7), a este valor se le define como costo esperado de daños  $\bar{C}_R$ . Se ve aquí la importancia de estimar la altura significativa de oleaje  $H$  en función de la probabilidad de excedencia  $P_m$ , como se comentó en el capítulo tres.

A continuación se da un procedimiento sencillo para obtener el costo esperado de daño  $\bar{C}_R$ .

- a) Se propone un valor de  $H_d$
- b) Se calcula el costo de construcción  $C_e$  y el costo de la coraza  $C_c$  de la escollera, para ese valor de  $H_d$
- c) Se calcula con la expresión (5.1) los daños  $d_i$  en función de las alturas significantes  $H_i$  que tienen probabilidades de ocurrencia  $P_i$
- d) Con la expresión (5.2) se calculan los costos por daño  $C_{Ri}$  para todos los daños  $d_i$
- e) Se dibuja una gráfica de coordenadas  $(P_i, C_{Ri})$ . Al unir todos los puntos con una línea continua se define una superficie limitada por la línea que une los puntos, por el eje  $P$  y el eje  $C_R$ . El área de la superficie anterior da el costo esperado de daño  $\overline{C_R}$  que es el que se utiliza para reparar anualmente la estructura, durante su vida útil.

## 6. SELECCION DE LA ALTURA SIGNIFICANTE DE DISEÑO

El diseño óptimo de la escollera corresponde a aquel que tiene un costo total anual mínimo.

El costo total anual es la suma de los costos de construcción más el costo de reparación que se tiene en un año, los cuales, según se vió en el capítulo anterior, son función de la altura significativa de diseño.

### 6.1 Costo total anual

La manera de obtener este costo es la siguiente. Una vez que se construye la obra, se ve la ventaja de hacer una inversión bancaria  $I$ , de tal forma que ésta sea equivalente, durante toda la vida útil de la estructura, a la suma de los costos de reparaciones anuales.

El comportamiento de dicha inversión  $I$  en el tiempo se explica a conti-

nuación con ayuda de la figura 6.1 y tomando como ejemplo una vida útil de cinco años.

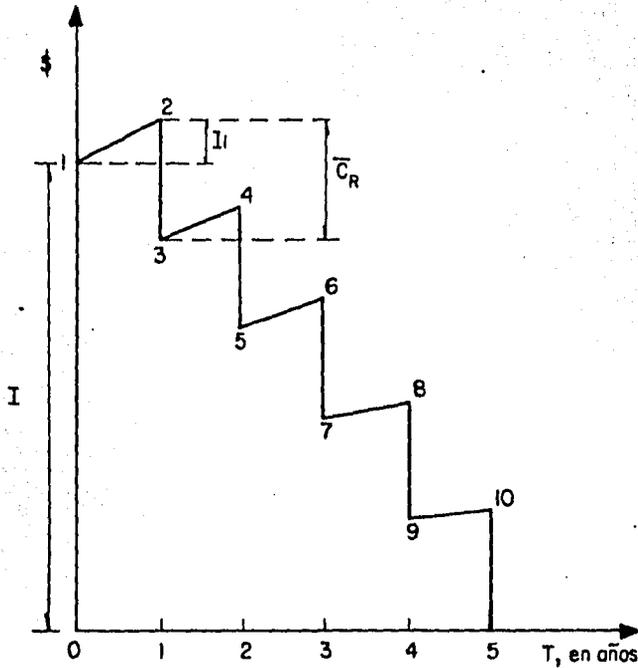


Fig 6.1 Comportamiento de la inversión I en el tiempo

Cuando se hace la inversión se está en el punto uno de la gráfica. Después de un año se está en el punto dos por intereses ganados pero se saca una cantidad  $\overline{C}_R$  para hacer la reparación de ese año y se pasa al punto tres. Al cumplirse el segundo año se está en el punto cuatro por intereses ganados y otra vez se retira una cantidad  $\overline{C}_R$  para reparación por lo que se pasa al punto cinco. Así sucesivamente hasta llegar al final del año cinco, en el cual se tiene en el banco únicamente lo necesario para hacer la última reparación de la esollera.

Seguendo el planteamiento antes descrito, se deduce la siguiente expresión

$$\left[ \left\{ \left[ I(1+i) - \overline{C}_R \right] (1+i) - \overline{C}_R \right\} (1+i) - \overline{C}_R \right] (1+i) - \overline{C}_R = 0 \quad (6.1)$$

despejando de (6.1) a I se tiene

$$I = \overline{C}_R \sum_{j=1}^5 (1+i)^{-j}$$

por lo que en general para una vida útil de n años

$$I = \overline{C}_R \sum_{j=1}^n (1+i)^{-j}$$

como  $\sum_{j=1}^n (1+i)^{-j} = \frac{1-(1+i)^{-n}}{i}$

entonces  $I = \overline{C}_R \left[ \frac{1-(1+i)^{-n}}{i} \right]$

por tanto  $\overline{C}_R = I \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} \quad (6.2)$

De la expresión (6.2) se puede concluir que el factor  $F^* = i / [1-(1+i)^{-n}]$  transforma un costo total en un costo anual. Por lo anterior, si se afecta el costo de construcción de la escollera por el factor F, da como producto el costo de construcción anual, si a éste se le suma el costo de reparación anual  $\overline{C}_R$ , se obtiene el costo total anual de la escollera, es decir,

$$C_T = \overline{C}_R + \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} C_e \quad (6.3)$$

\* A F se le conoce como factor de capital de recuperación o factor de amortización del capital e intereses (ref 12)

Por otro lado, para que la construcción de la obra sea justificable únicamente por razones económicas, es necesario que el costo total anual sea menor que el beneficio anual que se obtenga con ella.

## 6.2 Costo total anual mínimo

Como el costo de construcción de la escollera y el costo esperado de daños son función de la altura significativa de diseño, entonces el costo total anual también lo es; por ello se puede hacer una gráfica como la de la fig 6.2 en donde en el eje de las ordenadas se lleven los costos y en el eje de las abscisas las alturas significantes de diseño.

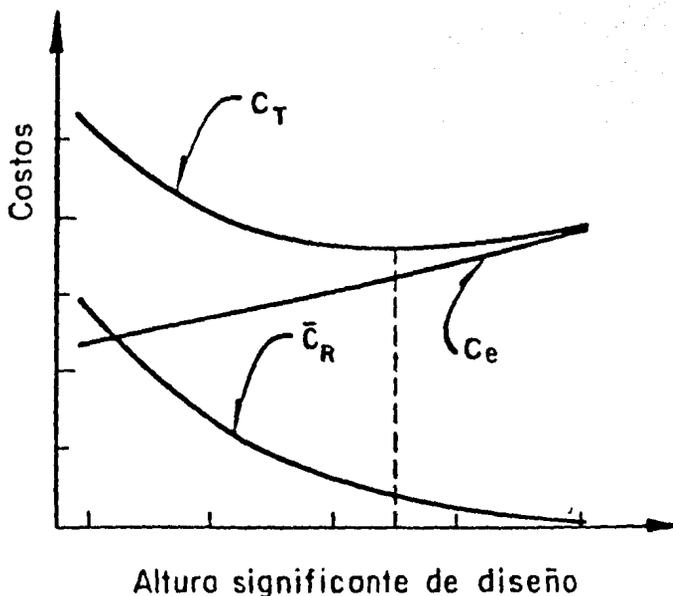


Fig 6.2 Comparación de costos anuales de la escollera contra altura significativa de diseño.

La altura significativa de diseño ( $H_d$ ) de la escollera es aquella para la cual el costo total anual es mínimo. Con ello se ve la inconveniencia de diseñar para periodos de retorno muy grandes, pues esto llevaría a tener costos más altos que no tienen otro fundamento que el riesgo a que se tengan daños excesivos en la coraza de la escollera.

## 7. APLICACION AL PUERTO ALTAMIRA, TAMAULIPAS

En este capítulo se desarrolla una metodología a través de varios ejemplos, que tienen la finalidad de seleccionar la altura significativa de oleaje, para diseñar de manera óptima las escolleras del Puerto Industrial de Altamira, Tamps.

### 7.1 Predicción del oleaje extraordinario

Predecir la altura significativa de oleaje que tiene un periodo de retorno de 50 años, en un lugar cercano a Altamira, Tamps. ubicado a  $22.5^\circ$  de latitud norte y  $97,7^\circ$  de longitud este, considere condición de aguas profundas y que la longitud de decaimiento es despreciable.

#### Solución

Siguiendo la metodología indicada en 3.3.2, se tiene

a)  $T_r = 50$  años,  $I P_o = 1013.25$  mb

b) El lugar de interés se ubica en la zona e, de las figs 3.3 y 3.4, de ahí se obtiene  $r_s = 0.314$  y  $V_d = 4.84$  m/s

c) Escogiendo  $\phi = 23^\circ$  (latitud media de la zona e), la media y la desviación estándar del índice de presión son respectivamente para esa zona

$$\overline{IP} = 1024.18 - 1.6884(23) = 985.3468 \text{ mb}$$

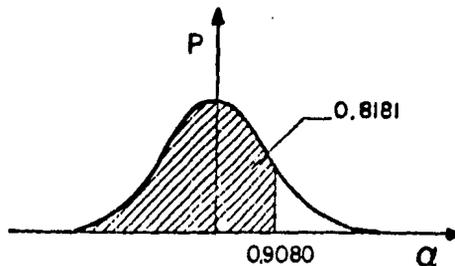
$$\overline{SIP} = 54.03 - 1.013(23) = 30.731 \text{ mb}$$

d) El valor de  $I P_o = 1013.25$  mb tiene una variable estándar de  $\alpha_o$

$$\alpha_o = \frac{1013.25 - 985.3468}{30.731} = 0.9080$$

e) De una tabla de distribución normal y con  $\alpha_o = 0.9080$ , se encuentra la probabilidad de  $P_{B\phi}(I P_o)$  de tener valores menores o iguales a  $\alpha_o$

$$P_{B\phi}(I P_o) = 0.8181$$



f) Se procede a calcular la probabilidad  $P(Z)$  de que un ciclón produzca oleaje de altura significativa  $h_{1/3} \geq H$

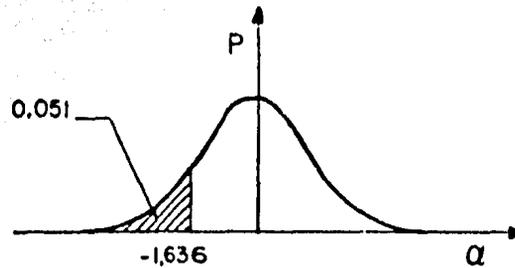
$$P(Z) = 1 - \left[ \frac{50-1}{50} \right]^{1/0.314} = 0.0623$$

g) Se calcula la probabilidad  $P_{B\phi}(I P_H)$

$$P_{B\phi}(I P_o) = (0.8181)(0.0623) = 0.051$$

h) Nuevamente de una tabla de distribución normal y con  $P_{B\phi}(I P_o) = 0.051$  se obtiene  $\alpha_H = -1.636$ , por lo que

$$I P_H = 985.3468 - 1.636(30.731) = 935.071$$



i) Con  $I P_H = 935.071$  mb

$$R = 0.0006573 e^{(0.01155)(935.071)} = 32.33 \text{ km}$$

j) La energía  $E$  es

$$E = 962.7097(1013.25 - 935.071)^{1.1667} (32.22)^{0.6667} (\text{sen}23)^{-0.3333} \left[ 1 + \frac{0.418(4.84)}{(1013.25 - 935.071)^{0.5}} \right]$$

$$E = 2649654.129 \text{ km}^3/\text{hra}^2$$

k) Finalmente, la altura y el periodo significantes son respectivamente

$$H_o = 0.0051(2649654.129)^{0.518} = 10.83 \text{ m}$$

$$T_o = 0.2768(2649654.129)^{0.261} = 13.14 \text{ s}$$

De la misma manera se calcularon la altura significativa y su periodo significativo para distintos periodos de retorno. Los resultados se anotan en la tabla 7.1.

TABLA 7.1 Altura significativa del oleaje asociada a diferentes periodos de retorno

Periodo de retorno en años	Probabilidad de excedencia	Altura significativa del oleaje (m)	Periodo significativo del oleaje (s)
10 000	0.0001	11.65	13.6
50	0.02	10.83	13.1
25	0.04	10.31	12.8

TABLA 7.1 (continuación)

Periodo de retorno en	Probabilidad de excedencia	Altura significativa del oleaje (m)	Periodo significativo del oleaje (s)
16.67	0.06	9.97	12.6
12.50	0.08	9.67	12.4
10.00	0.10	9.39	12.2
8.33	0.12	9.12	12.1
7.14	0.14	8.87	11.9
6.25	0.16	8.62	11.7
5.55	0.18	8.37	11.5
5.00	0.20	8.13	11.4
4.54	0.22	7.89	11.2
4.16	0.24	7.65	11.1
3.84	0.26	7.41	10.9
3.57	0.28	7.17	10.7
3.33	0.30	6.93	10.5
3.12	0.32	6.69	10.3
2.94	0.34	6.45	10.1
2.78	0.36	6.21	9.9
2.63	0.38	5.97	9.7
2.50	0.40	5.73	9.5

## 7.2 Refracción del oleaje

Sabiendo que la altura y periodo significantes del oleaje en aguas profundas son  $H_0 = 10.83$  m y  $T_0 = 13.1$  s, con un periodo de retorno de 50 años, obtener la altura significativa del oleaje en aguas poco profundas (sitio marcado con X de la fig 2.8).

### Solución

Utilizando el método de los frentes de onda indicados en la sección 2.4, se ha dibujado el diagrama de refracción de la fig 2,8, y de ahí se obtiene

$$b = 6300 \text{ m}$$

$$b_0 = 5350 \text{ m}$$

el coeficiente de refracción resulta

$$K_r = \sqrt{\frac{5350}{6300}} = 0.9215$$

Para obtener el coeficiente de fondo se procede la siguiente manera;

como  $L_o = 1.56 T_o^2 = 1.56(13.1)^2 = 267.71$  m; para la profundidad del punto X,  $d=11$  m, se tiene  $d/L_o = 0.0411$  a lo cual corresponde el coeficiente de fondo  $K_s \doteq 1.059$  (Tablas de Wiegel, ref 5).

Finalmente, la altura significativa para el sitio X de la fig 2.8 según la expresión 2.5 es

$$H'_o = 10.83(1.059)(0.9215) = 10.57 \text{ m}$$

Procediendo de la misma manera para algunas de las alturas significantes consideradas en la tabla 7.1, se obtiene la tabla 7.2.

TABLA 7.2 Alturas significantes del oleaje (en aguas poco profundas) en función del periodo de retorno

Probabilidad de excedencia	$H'_o$ en m	$L_o$ en m	$d/L_o$	$K_r$	$K_s$	$H'_o$ en m
0.0001	11.65	288.53	0.0381	0.8944	1.075	11.20
0.02	10.83	267.71	0.0411	0.9215	1.059	10.57
0.04	10.31	255.59	0.0430	0.9150	1.050	9.91
0.06	9.97	247.67	0.0444	0.8704	1.044	9.06
0.10	8.39	232.19	0.0474	0.8778	1.032	8.51
0.14	8.87	220.91	0.0498	0.8885	1.023	8.06
0.22	7.89	195.69	0.0562	0.8805	1.003	6.97
0.30	6.93	171.99	0.0640	0.8835	0.9837	6.02
0.40	5.73	140.79	0.0781	0.9038	0.9576	4.96

En la fig 7.1 se muestran dos curvas que tienen por coordenadas la altura significativa del oleaje y su probabilidad de excedencia. La línea discontinua se refiere a la condición de aguas profundas y cuyos valores aparecen en la tabla 7.1. La línea continua representa la condición de aguas bajas y los valores son los de la tabla 7.2. Esta última curva es importante porque permite conocer todos los demás valores de las alturas significativas que se presentan en el sitio, asociadas a una probabilidad de excedencia.

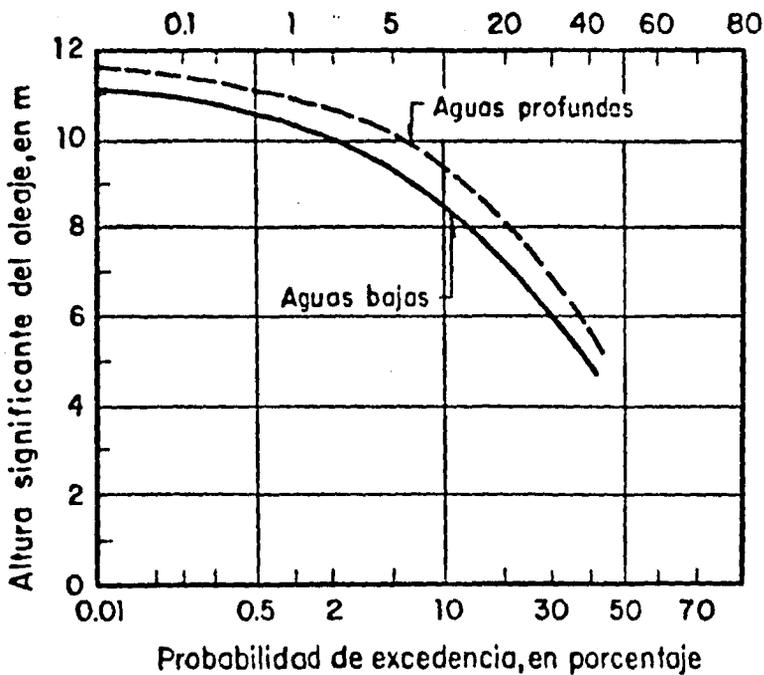


Fig 7.1 Altura significativa del oleaje y la probabilidad de excedencia

### 7.3 Costo de construcción de una escollera

Calcular el costo de construcción para 100 m longitudinales de la escollera sur del puerto de Altamira, Tamps. Las dimensiones de la sección transversal de la escollera que se muestra en la fig 7.2 fueron proporcionadas al Instituto de Ingeniería junto con las siguientes especificaciones y precios que aparecen en la tabla 7.3.

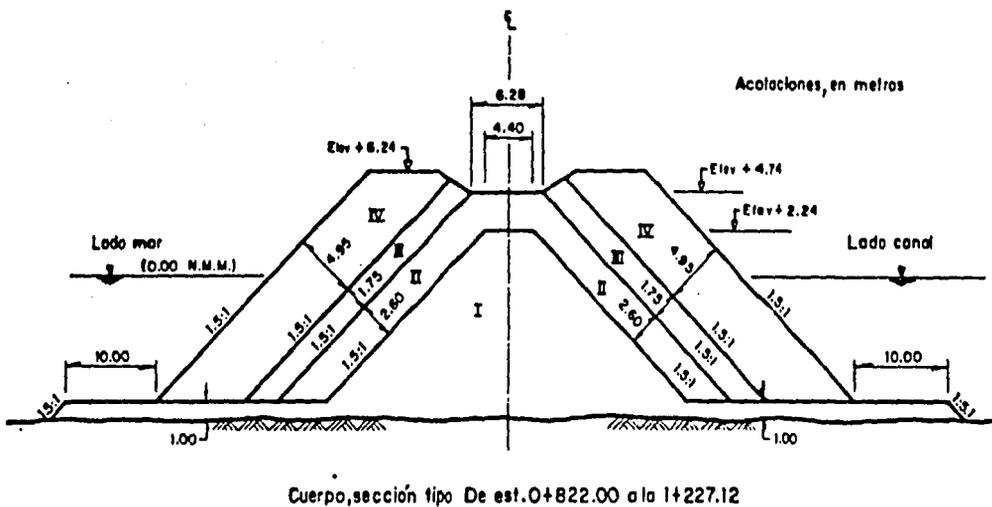


Fig 7.2 Sección tipo de la escollera sur de Altamira, Tamps.

#### Especificaciones para la escollera

- Los elementos de la coraza son "cubos ranurados"
- El peso específico del material de los cubos es de  $2.2 \text{ ton/m}^3$
- La profundidad media del fondo es de 11 m
- El coeficiente de estabilidad  $K_D$  es igual a 11
- Se considera condiciones de oleaje no rompiente

- . Las dimensiones de la figura corresponden al diseño de una escollera para  $H_d = 6.5$  m
- . El número de cubos en la coraza se calcula considerando un 47% de vacíos con colocación al azar, en dos capas, un coeficiente de capa de 1.03 y talúd de 1.5:1
- . El peso específico de la piedra para las capas interiores es de 2.6 ton/m<sup>3</sup>, con una colocación al azar y 30% de vacíos (hay piedras de varios tamaños).

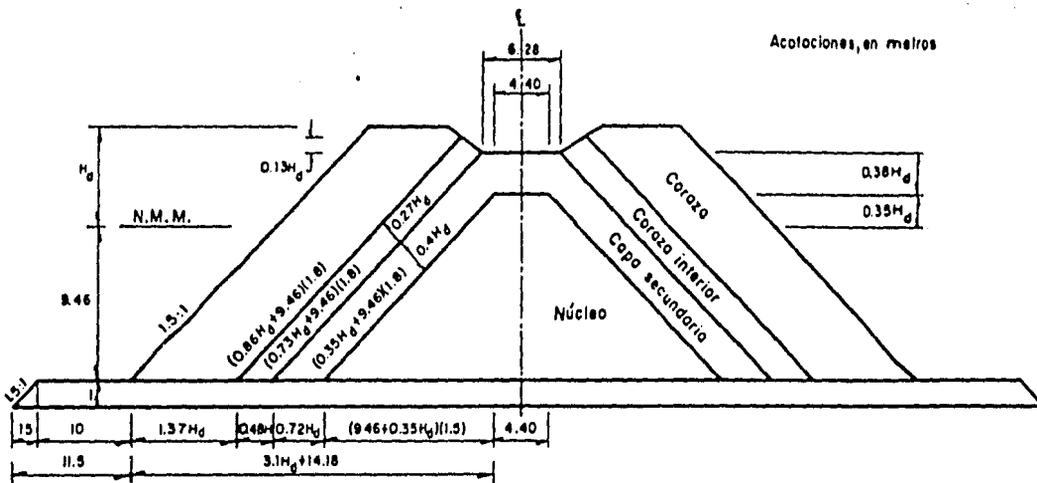
TABLA 7.3 Costos\* de las tarifas de colocación de elementos en los rompeolas de Altamira, Tamps.

	Escollera norte	Escollera sur
Núcleo (piedra de 30-100 kg)	\$ 1,017.87/ton	\$ 931.46/ton
Capa secundaria (piedra de 1-4 ton)	1,113.03/ton	1,026.62/ton
Coraza 1 (piedra de 4-6 ton)	1,117.62/ton	1,091.21/ton
Coraza 2 (piedra 6-12 ton)	1,194.18/ton	1,107.77/ton
Coraza (cubos de 25 ton)	63,274.61/pza	63,274.61/pza

Con base en la sección transversal de la fig 7.2 y sabiendo que dicha sección se diseñó con  $H_d = 6.5$  m, se ponen todas las dimensiones de la sección en función de  $H_d$  (fig 7.3). Esto se hace con la idea de obtener una expresión algebraica que permita calcular el costo de construcción de la escollera única y exclusivamente en función de  $H_d$ .

Se ve la conveniencia de obtener una expresión para calcular el costo de cada capa y posteriormente sumar dichas expresiones para obtener el

\* Costos según convenio adicional con precios actualizados dados por teléfono por el Ing. Trejo desde Altamira, Tamps. el lunes 2 de enero de 1984.



Sección tipo de la escollera (del Km 0+227.12)

Fig 7.3 Dimensiones en función de la altura significativa de diseño de la escollera sur de Altamira, Tamps.

costo total.

. Costo de la coraza para 100 m longitudinales

Con las especificaciones anteriormente escritas y utilizando la fórmula de Hudson (expresión 4.1) se obtiene

$$W = 0.09095 H_d^3 \quad (7.1a)$$

$$N_c = \frac{(10+H_d)(2915.28)}{H_d^2} \quad (7.1b)$$

$$C_c = 0.671 H_d^2 + 6.71 H_d \quad (7.1)$$

donde  $W$  es el peso de cada cubo de la coraza, en ton,  $N_c$  el número de cubos por cada 100 m de escollera y  $C_c$  el costo de la coraza, en millones de pesos para 100 m de escollera y  $H_d$  es la altura significativa de diseño, en m

. Costo de las capas interiores y el núcleo

Las siguientes expresiones se obtuvieron haciendo la cubicación de la sección transversal de la fig 7.3 y tomando los costos de la tabla 7.3

$$C_I = 0.034 H_d^2 + 3.396 H_d + 46.554 \quad (7.2)$$

$$C_{II} = 0.16 H_d^2 + 3.373 H_d \quad (7.3)$$

$$C_{III} = 0.17 H_d^2 + 2.154 H_d \quad (7.4)$$

donde  $C_I$ ,  $C_{II}$  y  $C_{III}$  son los costos en millones de pesos por cada 100 m de escollera del núcleo, capa secundaria y coraza interior respectivamente. La suma de las expresiones (7.1) a (7.4) da la expresión (7.5) para calcular el costo total de la escollera

$$C_e = 1.03 H_d^2 + 15.633 H_d + 46.554 \quad (7.5)$$

En la tabla 7.4 se presenta un resumen de costos para diferentes alturas significantes de diseño.

TABLA 7.4 Costos de la escollera en función de la altura de diseño

Altura de diseño $H_d$ en (m)	Peso de los elementos de coraza en (ton)	Número de elementos de coraza en 100 m de long.	Costo de coraza *	Costo de capa interior *	Costo de capa secundaria *	Costo de núcleo *	Costo total
4	5.82	2250.87	37.58	11.34	16.05	60.68	125.65
5	11.37	1749.17	50.33	15.02	20.87	64.38	150.59
6	19.65	1295.68	64.42	19.04	26.00	68.15	177.61
7	31.20	1011.42	79.85	23.41	31.45	71.99	206.70
8	46.57	819.92	96.62	28.11	37.22	75.90	237.86
9	66.30	683.83	114.74	33.16	43.32	79.87	271.09
10	90.95	583.06	134.20	38.54	49.73	83.91	306.38
11	121.05	505.96	155.00	44.26	56.46	88.02	343.75

\*Costos en millones de pesos para 100 m de escollera

#### 7.4 Costo esperado de daño

Estimar el costo esperado de daño para un año, que se tendrá en una escollera si ésta se diseña para una altura significativa de 7 m. La estructura está en la zona de aguas poco profundas de la fig 2.8, considere que los costos de la coraza y de la escollera completa se pueden calcular con las expresiones (7.1) y (7.5) respectivamente. Suponga que el costo por suspender la operación del puerto por falla completa de la escollera es de  $\$50 \times 10^6 / 100$  m de estructura.

#### Solución

Siguiendo la secuela de cálculo dada en 5.4, se tiene lo siguiente

- a) El valor de  $H_d$  es 7 m
- b) El costo de construcción de la coraza  $C_c$  y de la escollera  $C_e$  son respectivamente

$$C_c(H_d=7) = \$79.85 \times 10^6$$

$$C_e(H_d=7) = \$206.70 \times 10^6$$

- c) En la tabla 7.5 se muestra el daño causado por otras alturas significantes que enfrenta la escollera, para ello se utiliza la expresión (5.1)
- d) Con la expresión (5.2) se calculan los costos por daño para todos los probables daños. Estos también se anotan en la tabla 7.5
- e) En la fig 7.4 se muestra la gráfica de costos por daño y sus respectivas probabilidades, el área bajo esa curva nos da el costo esperado de daño anual si la escollera se diseña para  $H_d = 7$  m. Tal costo espera-

do para este caso  $\bar{C}_R = \$9.03 \times 10^6/\text{año}$ .

TABLA 7.5 Probables costos de daño para  $H_d = 7$  m

Probabilidad	Altura del oleaje (m)	Daño (%)	Costo de daño ( $\$ \times 10^6$ )
0.0001	11.20	100	256.70
0.02	10.57	100	256.70
0.04	9.91	41.57	16.60
0.06	9.06	29.43	11.75
0.08	8.85	26.43	10.55
0.10	8.50	21.43	8.55
0.12	8.20	17.14	6.84
0.14	8.00	14.29	5.70
0.16	7.60	8.57	3.42
0.18	7.40	5.71	2.28
0.20	7.15	2.14	0.86
0.22	6.90	0	0
0.24	6.70	0	0
0.26	6.40	0	0
0.28	6.20	0	0
0.30	6.02	0	0
0.32	5.70	0	0
0.34	5.50	0	0
0.36	5.30	0	0
0.38	5.10	0	0
0.40	4.96	0	0

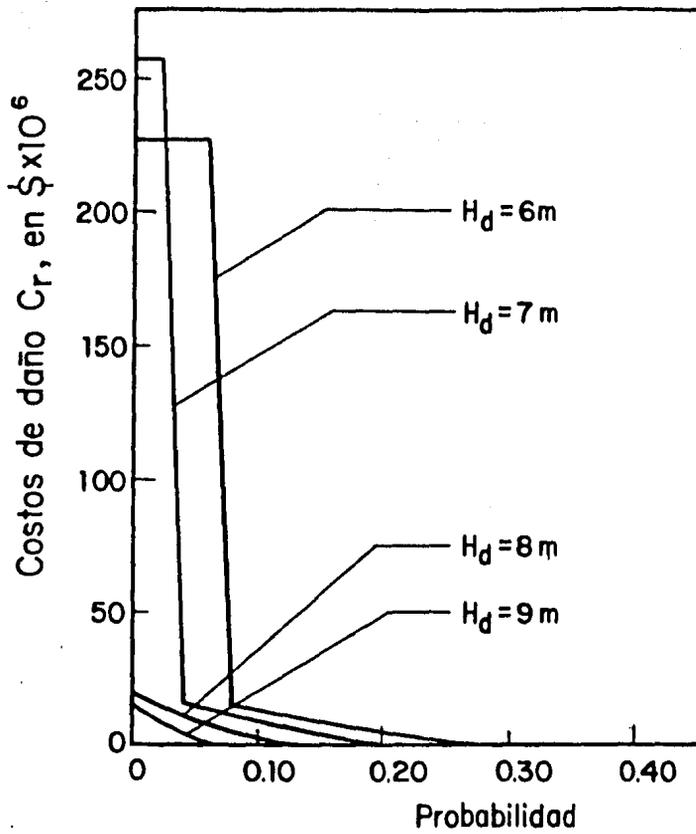


Fig 7.4 Curvas de costo de daño contra probabilidad para diferentes alturas significantes de diseño

Repitiendo el procedimiento anteriormente descrito para otras alturas significantes de diseño se han obtenido los resultados que se muestran en la fig 7.4 y en la tabla 7.6.

TABLA 7.6 Costos esperados de daño para diferentes alturas de diseño

Altura significativa de diseño (m)	Costo esperado de daño (\$x10 <sup>6</sup> /año)
6	17.64
6.5	13.57
7	9.03
7.5	1.47
8	1.05
8.5	0.71
9	0.46
9.5	0.30
10	0.16
10.5	0.06
11	0.01

#### 7.5 Selección de la altura significativa de diseño óptimo de la escollera

Obtener la altura de diseño para la cual el costo total anual de la escollera es mínimo. El costo de construcción de la escollera para diferentes alturas de diseño, está dado en la tabla 7.4 y el costo esperado de daño anual para diferentes alturas de diseño aparece en la tabla 7.6; se estima que la vida útil de la obra son 30 años y la tasa de interés anual del 8%.

#### Solución

Recordando que el costo total anual de la escollera está dado por la expresión (6.3) y que el factor para convertir un costo total en un costo

anual es

$$F = \frac{i}{1-(1+i)^{-n}} = \frac{0.08}{1-(1+0.08)^{-30}} = 0.0888$$

A continuación se escribe en la tabla 7.7 las alturas significantes de di seño propuestas, sus respectivos costos esperados de daño y los costos anuales de construcción de la escollera.

TABLA 7.7 Costos anuales de la escollera en función de la altura signifi cante de diseño

Altura significativa $H_d$ en (m)	Costo <u>esperado</u> de daño $C_R$ , en \$x10 <sup>6</sup> /año	Costo anual de la escollera $F C_e$ en \$x10 <sup>6</sup> /año	Costo total $C_R + F C_e$
6	17.64	15.78	33.42
6.5	13.57	17.06	30.62
7	9.03	18.36	27.39
7.5	1.47	19.72	21.19
8	1.05	12.13	22.18
8.5	0.71	22.58	23.29
9	0.46	24.08	24.54
9.5	0.30	25.62	25.92
10	0.16	27.21	27.37
10.5	0.06	28.85	28.91
11	0.01	30.53	30.55

Según los valores del costo total anual (para 100 m de longitud de estruc tura) la altura significativa de diseño debe ser 7.5 m.

En la fig 7.5 se muestran en forma gráfica los resultados que aparecen en la tabla 7.7.

Con la altura de diseño  $H_d = 7.5$  m y de las expresiones (7.1a) a (7.5) se obtiene

Peso de los cubos de la coraza	38.37 ton
Número de elementos de la coraza (100 m)	907
Costo de la coraza*	88.07
Costo de la capa interior*	25.72
Costo de la capa secundaria*	34.30
Costo del núcleo*	73.94
Costo de la escollera*	222.02

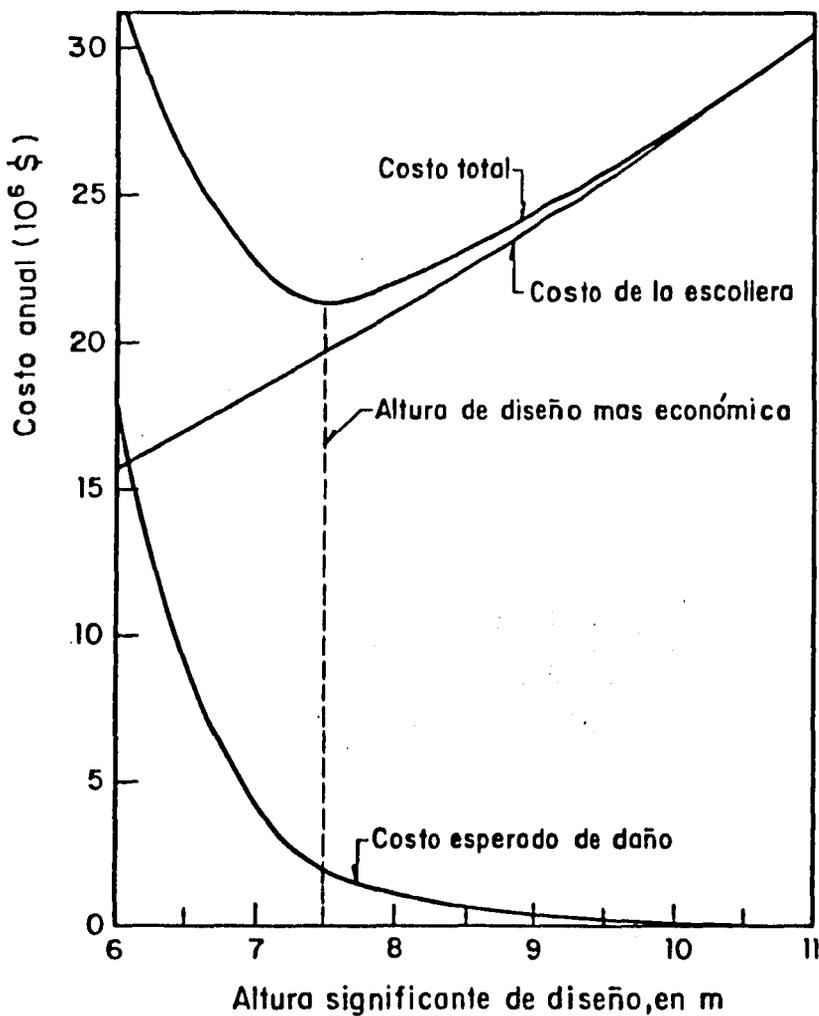


Fig 7.5 Variación de costos (por 100 m de escollera) con respecto a la altura significativa de diseño

\*Todos los costos en millones de pesos para 100 m de escollera

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante señalar que el método de predicción de oleaje extraordinario deducido en la ref 7, está basado en fórmulas y criterios teóricos que no han sido plenamente comprobados en laboratorio y menos en el sitio de estudio. Conviene recordar que el oleaje es un fenómeno de carácter aleatorio que se ha caracterizado con el oleaje significativo, cualquier consideración sobre decaimiento y refracción se hace para este oleaje, lo cual da una idea aproximada de lo que realmente sucede.

Para estimar el porcentaje de daños en la coraza se ha confiado en los resultados de la tabla 4.2 de la ref 11, y por ello no se realizaron pruebas de laboratorio para su comprobación.

Los costos de la escollera para alturas significantes de diseño diferentes a 6.5 m, se obtuvieron conservando la sección tipo, clase de elementos y manteniendo los costos por unidad de volumen.

Para saber cómo son los resultados del método de predicción, se buscó en varias publicaciones recientes algunos métodos alternativos o datos con los cuales se pudiera hacer una comparación, teniéndose poco éxito al encontrar lo siguiente.

Se obtuvieron datos de alturas significantes producidas por ciclones en las costas de E.E.U.U. (ref 13) y con ellos se hizo una comparación con las estimaciones del método de predicción (ver fig 8.1).

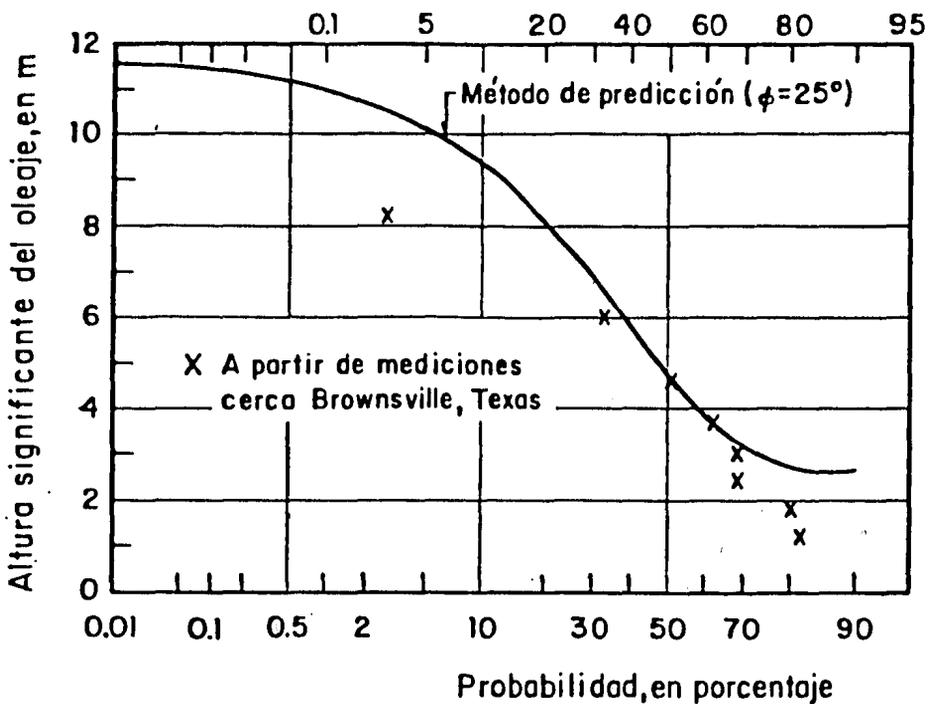


Fig 8.1 Comparación entre mediciones con el método de predicción

Tal comparación muestra que los resultados del método son conservadores, aunque no se puede establecer alguna conclusión debido a que se trata de sólo una muestra y de mediciones a la orilla de la zona en estudio.

Por otro lado, en la ref 11 se reporta un método de predicción del oleaje para ciclones, aceptado ampliamente, aunque en él no se considera el periodo de retorno. Se hizo una comparación entre los resultados de algunas de sus fórmulas con las del método de predicción, utilizado en este trabajo, encontrándose que sólo en un rango muy estrecho de valores de radio de máximo viento y diferencia de índice de presión central e índice de presión normal existe concordancia. La aplicación del método de la ref 11 para ciertos valores de los parámetros da resultados ilógicos, mientras que el aquí utilizado no. Las figs 8.2 y 8.3 muestran parte de lo mencionado anteriormente.

Con respecto a la manera de seleccionar la altura significativa de diseño óptimo se considera que, pese a todas sus limitaciones, es adecuado y correcto en su metodología, y que en todo caso una mejor estimación de algunas de sus partes dará un procedimiento más confiable.

Finalmente, es importante señalar la necesidad de hacer investigaciones en pruebas de laboratorio para precisar lo referente al porcentaje de daños en la coraza de la escollera y a la falla total de la obra; con lo cual se podrá plantear una expresión más apropiada para el cálculo de los costos por daño.

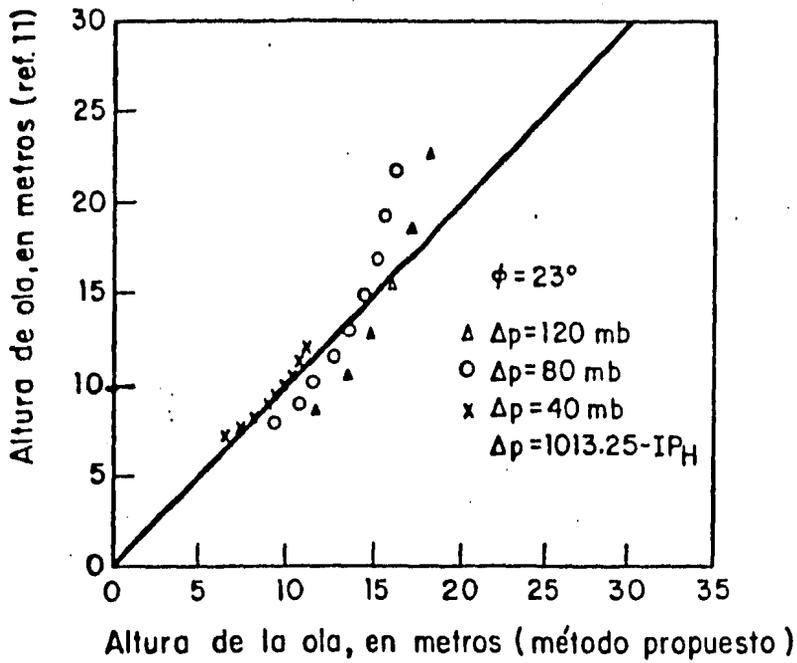


Fig 8.2 Comparación entre las alturas de ola entre dos métodos de predicción

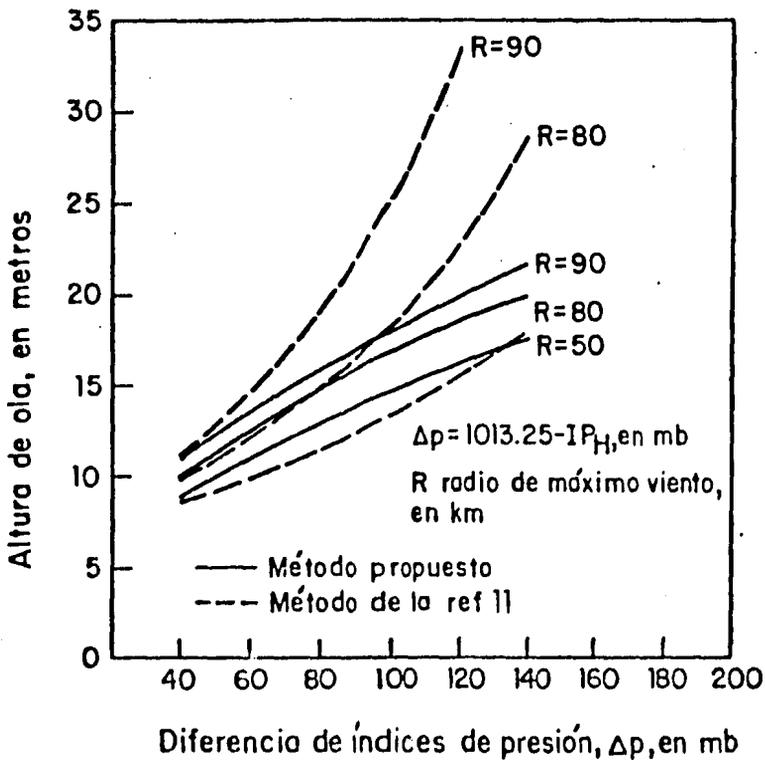


Fig 8.3 Variación de la altura del oleaje contra la diferencia de índices de presión

## A P E N D I C E

### A. Método de Ajuste de Momentos

Este método se recomienda debido a la sencillez de su aplicación y sirve para encontrar los parámetros de la función de densidad de probabilidad que mejor se ajusta a los datos medidos. El método consiste en igualar los parámetros estadísticos (media, desviación estándar, etc.) calculados a partir de las mediciones, con los momentos de la función de densidad de probabilidad que se desee considerar, y de esta manera obtener los parámetros de dicha función (ref 6).

#### A.1 Parámetros de los datos

Los parámetros más comúnmente usados en el método de ajuste de momentos son la media, la variancia y en algunas ocasiones , el coeficiente de asimetría, los cuales se calculan con las siguientes expresiones, respecu

tivamente

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A.1})$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (\text{A.2})$$

$$G_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{X})^3}{S_x^3} \quad (\text{A.3})$$

## A.2 Momentos de las funciones de densidad de probabilidad

Los momentos de primero, segundo y tercer orden, son medidas descriptivas de las funciones y se obtienen con las siguientes expresiones respectivamente (media, variancia y coeficiente de asimetría).

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(X) dx \quad (\text{A.4})$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^2 f(X) dx \quad (\text{A.5})$$

$$\gamma = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{\infty} (x-\mu)^3 f(X) dx \quad (\text{A.6})$$

La expresión (A.4) es el momento de primer orden con respecto al origen y la expresión (A.5) es el momento de segundo orden con respecto a la media, siendo este último momento una medida de qué tan dispersos están los valores con respecto a la media.

A continuación se describe en forma breve la manera en que se calculan los parámetros de alguna función de distribución de probabilidad que se desee considerar.

### A.3 Secuela de cálculo .

a) Se obtiene el valor medio y la variancia de los valores disponibles se gún sean máximos anuales o máximos diarios, con las expresiones (A.1) y (A.2) respectivamente.

b) Se igualan los parámetros  $\bar{X}$  y  $S_x^2$  con los momentos de primero y segundo orden  $\mu$  y  $\sigma^2$  respectivamente, según sea la función de densidad de pro babilidad que se esté considerando. Lo anterior nos lleva a tener dos ecuaciones simultáneas (en el caso de que sean dos los parámetros que tenga la función), y resolviéndolas en forma simultánea se obtienen los parámetros de la función de densidad de probabilidad considerada.

Una vez que se ha aplicado el método anterior se procede a obtener por ejemplo; a partir de un periodo de retorno (recíproco de la probabilidad de excedencia), algún valor de la variable aleatoria que pueda ser igualado o excedido en ese periodo de retorno, o viceversa, dado el va lor de una variable aleatoria, se procede a obtener su periodo de re- torno (ver ejemplos del punto 3.2.1).

### A.4 Nivel de significancia

Para saber qué tan representativa es la función de distribución de probabilidad considerada de los datos obtenidos en campo, es necesario fijar un nivel de significancia y revisar si se cumple éste (ref 6).

Se llama nivel de significancia al valor máximo de la probabilidad que el

investigador acepta tener de error. Por ejemplo, en la práctica es común usar niveles de significación del 1 y del 5%. Si se diseña una prueba de hipótesis con 5% de nivel de significación, se tendrán en promedio 5 de 100 oportunidades de rechazar la hipótesis cuando debería aceptarse, y consecuentemente, una probabilidad del 0.95 de hacer una buena decisión.

Existen algunos métodos para estimar la bondad del ajuste, de los cuales dos de ellos se escriben a continuación, y para aplicarlos conviene primero llenar una tabla como la A.1, de la siguiente manera.

- a) Se procede a ordenar de mayor a menor los valores considerados (ya sean máximos anuales o diarios) y se les asigna un valor  $m$  a cada uno de ellos según su orden, es decir,  $m$  igual a uno al valor más grande,  $m$  igual a dos al inmediato inferior, etc. y estos se anotan en la tabla A.1.

TABLA A.1

$m$	$H$	$T$	$F(H)_{\text{obs}}$	$H_e$	$F(H)_{\text{es}}^*$
-----	-----	-----	---------------------	-------	----------------------

- b) A cada valor de  $H$  se le asigna un periodo de retorno con la siguiente expresión

$$T = \frac{N + 1}{m}$$

donde  $N$  es el número total de valores que se utilizan y  $m$  es el número que le corresponde a cada valor según su orden. El valor de  $T$  se anota en la columna tres.

- c) Se calcula el recíproco de la probabilidad de excedencia de cada valor  $H$  con

$$F(H)_{\text{obs}} = 1 - \frac{1}{T}$$

este valor se anota en la columna cuatro.

d) Con los valores de la columna cuatro se estima, para cada uno de ellos, un valor estimado de la variable aleatoria  $H_e$  y se anota en la columna cinco.

e) Con los valores de  $H$  anotados en la columna dos y utilizando la función de distribución de probabilidad acumulada se calcula el complemento de la probabilidad de excedencia de ese valor  $H$ . Este valor se anota en la columna seis y es  $F^*(H)_{\text{es}}$ .

#### A.4.1 Bondad del ajuste con $x^2$

Se calcula el valor de  $x^2$  con

$$x^2 = \sum_{i \neq 1}^N \frac{(F(H)_{\text{ob}} - F^*(H_i)_{\text{es}})^2}{F^*(H_i)_{\text{es}}}$$

Se calcula  $\nu$  con

$$\nu = N - 1 - n$$

donde  $N$  es el número de datos y  $n$  es el número de parámetros de la función de probabilidad considerada. Se fija un nivel de significancia  $\alpha$ , y con  $\nu$ , de una tabla de distribución de  $x^2$  se obtiene  $x_1^2$ . Se considera que el ajuste es bueno si  $x^2 < x_1^2$ .

#### A.4.2 Bondad del ajuste con Kolmogorov-Smirnov

Se Calcula  $D_2$

$$D_2 = \max_{i=1}^N |F(H_i)_{ob} - F(H_i)_{es}|$$

Se fija un nivel de significancia  $\alpha$ , y con el tamaño  $N$  de la muestra, se obtiene de la tabla A.2 un valor  $C$ . Se considera que el ajuste es bueno si  $D_2 < C$ .

TABLA A.2 Bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

Tamaño de la muestra	$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
5	0.51	0.56	0.67
10	0.37	0.41	0.49
15	0.30	0.34	0.40
20	0.26	0.29	0.35
25	0.24	0.26	0.32
30	0.22	0.24	0.29
40	0.19	0.21	0.25
n grande	$1.22/\sqrt{n}$	$1.36/\sqrt{n}$	$1.63/\sqrt{n}$

#### AGRADECIMIENTOS

Al M. en I. Oscar A. Fuentes Mariles quien con paciencia, buena voluntad y brillantes ideas me ayudó a realizar este trabajo.

A la Srta. Susana Maldonado quien mecanografió de excelente manera el presente trabajo.

Al Instituto de Ingeniería (sección de hidráulica) por las facilidades que me brindó en la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

1. Sánchez B., J.L. "Manual de Hidráulica Marítima Elemental", Informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F., 1982
2. William L. Donn, "Meteorología", Primera impresión, México, D.F., 1978
3. Lonwell y Flind, "Geología Física", Primera edición, México, D.F., 1979
4. Apuntes de la clase de "Ingeniería Marítima", por el M. Ing. Murillo Bagundo J.L., en la F.I., UNAM, México, D.F., Nov 1983 - Mayo 1984
5. Wiegel R.L., "Oceanographical Engineering", Prentice Hall, E.U., 1964
6. Apuntes de la clase de "Aprovechamientos Hidráulicos", por el M. Ing. Fuentes Mariles O.A., en la DEPFI, México, D.F., abril - octubre 1984
7. Fuentes M., "Diseño Optimo de las Escolleras del Puerto de Altamira, Tamps, Primer Informe", informe interno del I.deI., UNAM, México, D.F. 1984
8. Springall, G.R., "Estudio y Análisis Estadístico del Oleaje Generado por Huracanes en el Suroeste del Golfo de México", Pub. No. 361, I.deI., UNAM, México, D.F., 1975

9. Sorensen R.M., "Basic Coastal Engineering", Wiley Interscience, E.U., 1978
10. Maza E.A., "Hidráulica Marítima, Cap. A.2.13", Manual de Diseño de Obras Civiles, C.F.E. México, D.F., 1983
11. U.S. Army Coastal Engineering, "Shore Protection Manual", Washington 1973
12. R.K. Linsley y J.B. Franzini, "Ingeniería de los Recursos Hidráulicos", Décimo primera impresión. CECSA, México, D.F., 1980
13. Wilson, B.W., "Hurricane Wave Statistics for Gulf of México", Department of Oceanography and Meteorology, Agricultural and Mechanical College of Texas, Oceanography and Meteorology Series No 100, U.S.A.