

24  
81



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

## DISEÑO DE ESCOLLERAS

T E S I S  
Que para obtener el Título de  
INGENIERO CIVIL  
P r e s e n t a

MANUEL GARMILLA ESPINOSA



México, D. F.

Febrero 1986



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## INDICE

1. Introducción	1
2. Oleaje	3
2.1 Teoría lineal o de Airy	5
2.1.1 Ecuaciones características del oleaje	5
2.1.2 Movimiento de las partículas en el oleaje	7
2.1.3 Presión inducida por el movimiento de la ola	8
2.1.4 Celeridad de grupo	9
2.1.5 Energía y potencia de propagación	10
2.1.6 Profundidad relativa	11
2.1.7 Olas progresivas y estacionarias	12
2.2 Teoría para ondas de amplitud finita	13
2.2.1 Teoría de la onda trocoidal	14
2.2.2 Teoría de Stokes	14
2.2.3 Teoría de la onda cnoidal	15
3. Predicción de oleaje	16
3.1 Factores generadores de oleaje	18
3.1.1 Velocidad del viento	18
3.1.2 Fetch	21
3.1.3 Duración	22
3.1.4 Relación entre duración y fetch	23
3.2 Métodos de predicción	23
3.2.1 Método Sverdrup-Munk-Bretschieder	24
3.2.2 Método Pierson-Newmann-James	24
3.2.3 Método estadístico de predicción de oleaje	31
3.3 Predicción del oleaje en la zona de decaimiento	35
4. Cambios del oleaje	39
4.1 Refracción	39
4.2 Difracción y reflexión	45
4.2.1 Difracción	46
4.2.2 Reflexión	48
4.3 Rompiente	49
4.4 Alcance de la ola	55

5. Criterios de diseño	60
5.1 Tipos de escolleras	62
5.1.1 Escolleras de elementos sueltos	66
5.2 Materiales de construcción	68
5.2.1 Propiedades necesarias	68
5.2.2 Propiedades deseables	69
5.3 Dimensionamiento	69
5.3.1 Coraza	71
5.3.2 Núcleo	84
5.3.3 Filtros y apoyos	86
5.4 Estructuras sumergidas	90
5.5 Aspectos de la cimentación	91
5.6 Diseño en planta	92
5.7 Diseño óptimo	94
6. Construcción de escolleras	97
6.1 Métodos constructivos	97
6.1.1 Uso de equipo flotante	97
6.1.2 Construcción con estructuras fijas	99
6.2 Problemas constructivos particulares	100
6.2.1 Filtros	100
6.2.2 Núcleo	101
6.2.3 Elementos de la coraza	101
6.2.4 Corona	102
6.3 Problemas especiales	103
7. Modelos hidráulicos	105
7.1 Introducción	105
7.2 Teoría de la similitud	106
7.2.1 Ley de semejanza de Froude	107
7.3 Pruebas de estabilidad de escolleras	110
7.4 Otros tipos de modelos	113
8. Conclusiones y recomendaciones	116
- Bibliografía	118
- Agradecimientos	120

## 1. INTRODUCCION

El desarrollo y explotación de las costas es, si duda, fuente potencial de recursos económicos. México cuenta con 10000 kilómetros de litoral que en gran parte se encuentra subaprovechado. Para aprovechar esta fuente es necesario contar con la infraestructura adecuada como vías de comunicación, instalaciones para conectar los sistemas de transporte marítimo y terrestre, etc.

Las escolleras forman parte importante en el desarrollo de la infraestructura requerida en el desarrollo costero; ya que son estructuras que modifican las condiciones naturales de manera que se puedan realizar las actividades humanas.

El presente trabajo, tiene por objeto plantear la forma de proyectar una escollera; conocer las variables de diseño y considerar los distintos métodos constructivos principalmente.

El trabajo consta de 8 capítulos.

El capítulo 2 trata sobre las olas, algunos conceptos empleados en su estudio y las ecuaciones que definen sus propiedades y el 3 describe distintos métodos para la predicción del oleaje extraordinario. En el capítulo 4 se explican las modificaciones que sufre el oleaje al acercarse a la costa y al interactuar con las estructuras costeras.

Los diferentes criterios que se utilizan en las distintas partes que componen la escollera están consignados en el capítulo 5. En el capítulo 6, se incluyen los métodos constructivos más comunes para escolleras y su relación con el diseño de las mismas, mientras que en el 7 se analiza la teoría de los modelos aplicada a las obras marítimas. Por último, en el capítulo 8, se apuntan varias recomendaciones así como las conclusiones que se derivan de este trabajo.

## 2. OLEAJE

Cuando una persona se coloca sobre la costa y mira hacia el mar, observa ondas que vienen desde el mar, las cuales se repiten al cabo de unos cuantos segundos. Estas ondas reciben el nombre de olas. Con el transcurso del tiempo, si se continua viendo desde el mismo punto, se aprecia que las olas llegan más cerca o más lejos del observador. Esto es causado por variaciones en el nivel medio del mar, ello es provocado principalmente por ondas llamadas de marea. Al primer tipo de ondas mencionado se le conoce como ondas de periodo corto y son generadas por la acción del viento sobre la superficie del mar. El segundo tipo de ondas se conoce como ondas de periodo largo y se forman principalmente por la marea; en algunas ocasiones estas ondas pueden ser producidas también por deslizamientos submarinos de tierra (sismos), en esta condición se les llama tsunamis a las ondas. El presente capítulo tratará sobre las ondas de periodo corto, sus características, las ecuaciones que las representan, etc.

A continuación se presentan algunos términos de uso común en la descripción de las ondas del oleaje:

-Nivel de aguas tranquilas (NAT): nivel del agua cuando sobre la superficie no actúa oleaje alguno

- Cresta: máximo nivel alcanzado por la ola
- Valle: mínimo nivel del perfil de la ola
- Altura de la ola (H): distancia vertical entre una cresta y valle consecutivos
- Longitud de la ola (L): distancia horizontal entre dos crestas o valles sucesivos
- Periodo (T): tiempo requerido por dos crestas o valles sucesivos para pasar por un punto fijo
- Celeridad (C): velocidad a la que la ola viaja, se obtiene de la relación  $C=L/T$
- Esbeltéz: relación adimensional frecuentemente utilizada para caracterizar el perfil de la ola, se define como  $H/L$

Para estudiar las características del oleaje se hacen varias consideraciones:

- Las olas son bidimensionales
- Se considera un sistema de ejes coordenados tomando el eje X en la dirección de propagación de la ola y el eje Z hacia arriba
- El agua es incompresible y no viscosa
- El flujo es irrotacional.

En la fig 2.1 se muestran algunos de los conceptos señalados.

Se han propuesto varias teorías que permiten definir al oleaje, de tal manera que existen soluciones parciales que describen diferentes fenómenos con una aproximación adecuada.

- Cresta: máximo nivel alcanzado por la ola
- Valle: mínimo nivel del perfil de la ola
- Altura de la ola (H): distancia vertical entre una cresta y valle consecutivos
- Longitud de la ola (L): distancia horizontal entre dos crestas o valles sucesivos
- Periodo (T): tiempo requerido por dos crestas o valles sucesivos para pasar por un punto fijo
- Celeridad (C): velocidad a la que la ola viaja, se obtiene de la relación  $C=L/T$
- Esbeltez: relación adimensional frecuentemente utilizada para caracterizar el perfil de la ola, se define como  $H/L$

Para estudiar las características del oleaje se hacen varias consideraciones:

- Las olas son bidimensionales
- Se considera un sistema de ejes coordenados tomando el eje X en la dirección de propagación de la ola y el eje Z hacia arriba
- El agua es incompresible y no viscosa
- El flujo es irrotacional.

En la fig 2.1 se muestran algunos de los conceptos señalados.

Se han propuesto varias teorías que permiten definir al oleaje, de tal manera que existen soluciones parciales que describen diferentes fenómenos con una aproximación adecuada.

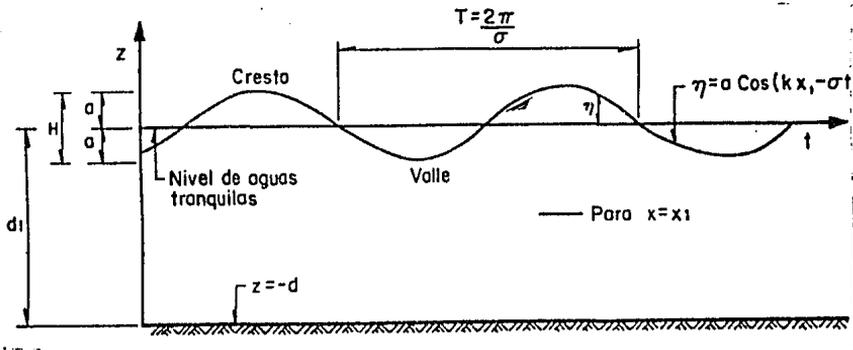


Fig 2.1 Definición de algunas variables del oleaje

## 2.1 Teoría lineal o de Airy

Como una primera aproximación de las características del oleaje, se acepta que su perfil se representa por una senoide y la altura de las olas es razonablemente pequeña comparada con su longitud y con la profundidad. En la parte abisal del océano estas características son ciertas y ello permite deducir las ecuaciones del oleaje en forma más sencilla (fig 2.2).

### 2.1.1 Ecuaciones características del oleaje

Las ecuaciones que definen las propiedades del oleaje se obtienen con base en las consideraciones mencionadas y algunas hipótesis simplificatorias. Haciendo uso del desarrollo de las ecuaciones diferenciales en serie de Taylor, se obtienen resultados satisfactorios. Algunos de estos resultados se muestran a continuación

-Longitud de la ola:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.1)$$

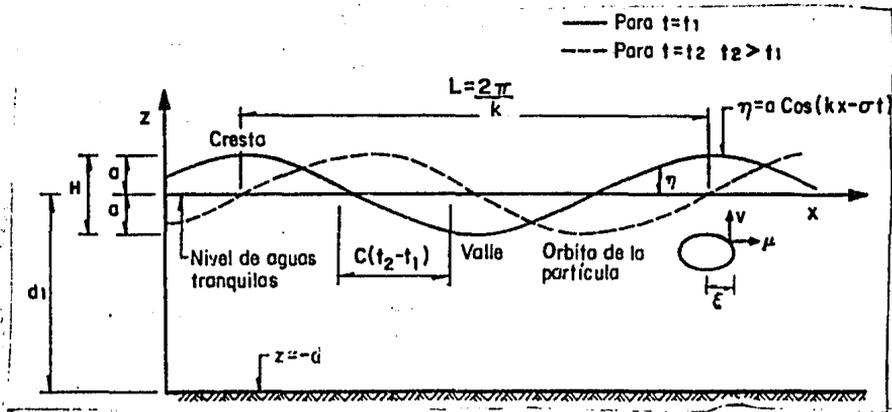


Fig 2.2 Perfil del agua según la teoría lineal

-Celeridad de la ola:

$$c = \frac{L}{T} \quad (2.2)$$

Si se considera la ecuación 2.1 en la 2.2 se obtiene:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (2.3)$$

o bien:

$$c = \frac{g}{\sigma} \tanh(kd) \quad (2.4)$$

donde:

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad ; \text{ frecuencia angular}$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad ; \text{ número de onda}$$

-Superficie libre del agua: El perfil de la superficie libre del agua se representa como:

$$\eta = a \cos(kx - \sigma t) \quad (2.5)$$

donde:

$\eta$  elevación de la superficie libre del agua medida desde el nivel de aguas tranquilas

$x$  distancia horizontal desde el origen

$t$  tiempo para el que se calcula  $\eta$

$a$  amplitud de la ola e igual a la mitad de su altura

$$a = H/2 \quad (2.6)$$

### 2.1.2 Movimiento de las partículas en el oleaje

Al pasar la ola sobre la superficie del agua, las partículas de agua no viajan con la ola sino que describen, de acuerdo con esta teoría, círculos o elipses cerrados. De esta forma pueden calcularse velocidad, aceleración y posición de la partículas para las trayectorias mencionadas (fig 2.3).

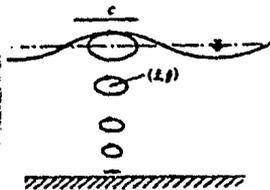


Fig 2.3 Movimiento de las partículas en la ola

-Velocidad horizontal y vertical de la partícula:

$$u = a\sigma \frac{\cosh k(d+z)}{\sen kd} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.7)$$

$$v = a\sigma \frac{\sinh k(d+z)}{\sen kd} \sen(kx - \sigma t) \quad (2.8)$$

donde:

$u$  velocidad en la dirección del eje  $x$

$v$  velocidad en la dirección del eje  $z$

-Aceleración de la partícula: Para obtener la aceleración de la partícula en el sentido de cada eje, basta derivar las expresiones de la velocidad con respecto al tiempo; es decir, se tiene que:

$$a_x = \frac{\partial u}{\partial t} = a\sigma^2 \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.9)$$

$$a_z = \frac{\partial v}{\partial t} = -a\sigma^2 \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.10)$$

-Posición de la partícula: Integrando las ecuaciones de la velocidad se obtiene el desplazamiento de las partículas:

$$\xi = \int u dt = (x - x_1) = -a \frac{\cosh k(d+z_1)}{\sinh kd} \sin(kx_1 - \sigma t) \quad (2.11)$$

$$\zeta = \int v dt = (z - z_1) = a \frac{\sinh k(d+z_1)}{\sinh kd} \cos(kx_1 - \sigma t) \quad (2.12)$$

donde  $\xi, \zeta$  son los desplazamientos de la partícula de agua sobre los ejes  $x$  y  $z$  respectivamente, ambos se miden a partir de una posición inicial  $(x_1, z_1)$ ;  $x, z$  son las coordenadas que corresponden a la nueva posición de la partícula.

-Trayectoria de la partícula: Elevando al cuadrado las ecs 2.11 y 2.12 y usando artificios algebraicos se obtiene:

$$\frac{(x - x_1)^2}{\left(a \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd}\right)^2} + \frac{(z - z_1)^2}{\left(a \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd}\right)^2} = 1 \quad (2.13)$$

La ec 2.13 corresponde a la de una elipse y representa la forma de la trayectoria de las partículas.

### 2.1.3 Presión inducida por el movimiento de la ola

La presión ejercida en cualquier punto dentro del líquido está dada por:

$$p = -\gamma z + \gamma \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} a \cos(kx - \sigma t) \quad (2.14)$$

o bien:

$$p = -\gamma z + \gamma K a \cos(kx - \sigma t) \quad (2.15)$$

donde:

$-\gamma z$	presión estática o hidrostática
$\gamma K a \cos(kx - \sigma t)$	presión dinámica, que es máxima en la superficie y disminuye con la profundidad
$K = \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}$	factor de respuesta de presión

#### 2.1.4 Celeridad de grupo

Si se estudian dos olas que tienen la misma amplitud pero periodos o celeridades ligeramente diferentes, sobre la superficie del agua, se aprecia que las amplitudes de olas consecutivas varían desde un máximo hasta un mínimo. Lo anterior origina que se tenga una apariencia de conjunto o grupo de olas que varían de altura, pero que se repiten sistemáticamente. Puede definirse una envolvente de estas olas, y obtener las características del grupo como si fuera una sola (fig 2.4).

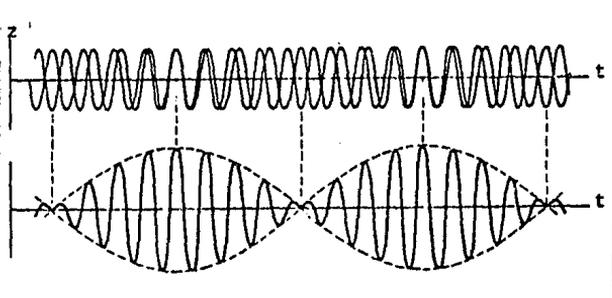


Fig 2.4 Superposición de oleaje y su envolvente

De esta manera se puede encontrar un valor que representa la velocidad o celeridad a la que viaja el conjunto de olas. Este valor es conocido como

celeridad de grupo y se representa de la siguiente manera:

$$C_g = 1/2 \left[ 1 + \frac{4\pi d}{L} \frac{1}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right)} \right] C = nC \quad (2.16)$$

$$n = 1/2 \left[ 1 + \frac{4\pi d}{L} \frac{1}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right)} \right] \quad (2.17)$$

donde:

- $C_g$  velocidad o celeridad del grupo de olas
- $C$  celeridad de una ola del grupo
- $n$  factor de grupo

### 2.1.5 Energía y potencia de propagación

La energía con que se propaga una ola es la suma de sus energías potencial y cinética. La energía potencial de la ola es originada por la posición de sus partículas con respecto al nivel de reposo y no depende del movimiento del líquido. La energía cinética de la ola es debida al movimiento de las partículas dentro del líquido. Tanto la energía potencial como la cinética se pueden determinar por ancho unitario y en toda la longitud de la ola. De esta forma la energía potencial de la ola se define como:

$$E_p = \frac{\gamma H^2}{16} L \quad (2.18)$$

y la cinética:

$$E_c = \frac{\gamma H^2}{16} L \quad (2.19)$$

Para obtener la energía total, basta sumar la potencial y la cinética:

$$E = E_p + E_c = \frac{\gamma H^2}{8} L \quad (2.20)$$

La potencia se define como la energía aplicada por unidad de tiempo. La potencia de la ola, tomando en cuenta un ancho unitario y su longitud, se puede obtener dividiendo la energía que tiene entre el tiempo que se propaga, es decir, entre el periodo:

$$P = \frac{E}{T} = \frac{\gamma H^2}{8} \frac{L}{T} = \frac{\gamma H^2}{8} C \quad (2.21)$$

y para un grupo de ondas (tomando en cuenta el concepto de celeridad de grupo):

$$P = \frac{\gamma H^2}{8} C_g = \frac{\gamma H^2}{8} nC \quad (2.22)$$

### 2.1.6 Profundidad relativa

Las ecuaciones de las olas presentadas hasta ahora son de carácter general. Las expresiones contienen funciones hiperbólicas que tienen como argumento a  $kd$ ; ( $kd=2\pi d/L$ ). Cuando estos argumentos toman valores extremos, es decir, tienden a infinito o a cero, se pueden hacer simplificaciones importantes en dichas ecuaciones.

Para fines prácticos se admite que  $kd \rightarrow \infty$  cuando  $d/L > 1/2$ , y se hablará entonces de una condición para aguas profundas. Cuando  $d/L < 1/25$ , se acepta que  $kd \rightarrow 0$  y se estará tratando con olas en aguas someras o bajas.

a) las ecuaciones características para aguas profundas son:

$$\eta_o = \frac{H_o}{2} \cos(k_o x - \sigma t) \quad (2.23)$$

$$u_o = \frac{H_o}{2} \sigma e^{k_o z} \cos(k_o x - \sigma t) \quad (2.24)$$

$$v_o = \frac{H_o}{2} \sigma e^{k_o z} \operatorname{sen}(k_o x - \sigma t) \quad (2.25)$$

$$C_o = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.26)$$

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.27)$$

$$p_o = -\gamma z + \frac{\gamma H_o}{2} e^{k_o z} \cos(k_o x - \sigma t) \quad (2.28)$$

$$n_o = 1/2 \quad (2.29)$$

$$C_{g_o} = 1/2 C_o \quad (2.30)$$

Donde el subíndice "o" indica que son aguas profundas.

b) De manera similar, las ecuaciones en aguas someras son:

$$\eta_b = \frac{H_b}{2} \cos(k_b x - \sigma t) \quad (2.31)$$

$$u_b = \frac{H_b \sigma}{2 k_b d} \cos(k_b x - \sigma t) \quad (2.32)$$

$$v_b = \frac{H_b \pi}{T} \left( \frac{d+z}{d} \right) \operatorname{sen}(k_b x - \sigma t) \quad (2.33)$$

$$C_b = \sqrt{gd} \quad (2.34)$$

$$L_b = T\sqrt{gd} \quad (2.35)$$

$$p_b = -\gamma z + \frac{\gamma H_b}{2} \cos(k_b x - \sigma t) \quad (2.36)$$

$$n_b = 1 \quad (2.37)$$

$$C_{g_b} = C_b \quad (2.38)$$

Donde el subíndice "b" indica que se trata de aguas someras.

### 2.1.7 Olas progresivas y estacionarias

Lo tratado en las secciones anteriores se aplica a olas que tienen una cierta velocidad en su recorrido (celeridad) y que por ello se llaman ondas progresivas. Si se sobreponen dos oleajes de igual amplitud y periodo pero desplazándose en sentido contrario, se forma un perfil cuya velocidad a lo largo del eje horizontal es nula y con una altura del doble de las originales.

Este fenómeno se presenta cuando existe algún obstáculo que refleja perfectamente una ola progresiva y se conoce como onda estacionaria o Clapotis. La formación de Clapotis se trata al estudiar el problema de reflexión del oleaje en muros verticales.

## 2.2 Teoría para ondas de amplitud finita

Aunque la teoría lineal es útil para resolver muchos problemas de ingeniería, existen fenómenos que no puede identificar claramente. En la práctica, se observa que el perfil del oleaje es más estrecho en las crestas que en los valles cosa que es distinta a lo indicado en la teoría de Airy. También se ha visto que las trayectorias de las partículas del líquido no son círculos o elipses cerradas.

Este hecho indica que existe un movimiento general del líquido en la dirección de avance de la ola que se conoce como transporte de masa (fig 2.5).

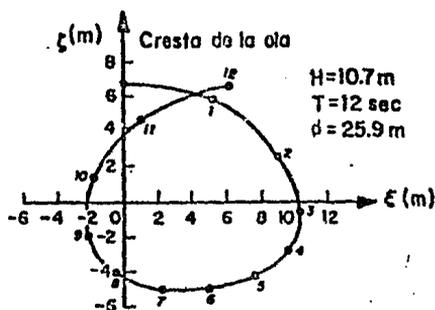


Fig 2.5 Diagrama típico de la trayectoria de una partícula

Por ello se hace necesario una teoría que, aunque más compleja, describa adecuadamente estos fenómenos. Existen varias teorías de oleaje de amplitud finita. Se tratarán brevemente algunas de ellas.

### 2.2.1 Teoría de la onda trocoidal

De las teorías de amplitud finita la trocoidal, desarrollada originalmente por Grestner, describe de manera adecuada el comportamiento del oleaje en aguas profundas. En esta teoría el perfil del agua queda definido por la trayectoria de un punto fijo en un disco que rueda sobre un plano horizontal. En la fig 2.6 se puede apreciar la forma de esta trayectoria llamada trocoide.

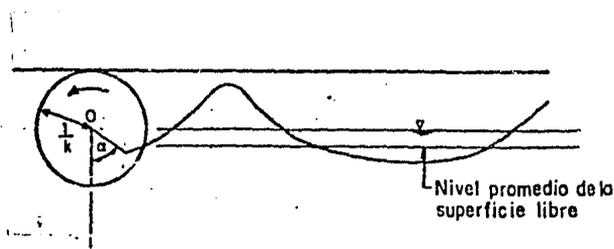


fig 2.6 Perfil de las ondas trocoidales

### 2.2.2 Teoría de Stokes

En la deducción de las expresiones de la teoría lineal se hacen desarrollos en serie y simplificaciones despreciando algunos términos. Es lógico suponer que al incluir la mayor cantidad de términos de orden superior se logrará refinar los valores. Así, dependiendo del número de términos del desarrollo en serie que se consideren, será el orden de aproximación obtenido. Por ejemplo, la segunda aproximación de Stokes contempla un perfil en el que las crestas son más puntiagudas y los valles más planos y en el que la trayectoria de las partículas no es ya una curva cerrada como sucede con la teoría lineal. Esta segunda aproximación está caracterizada por la suma de dos ondas senoidales de periodo  $T$  y  $T/2$  que producen los efectos representativos de una ola más real (fig 2.7).

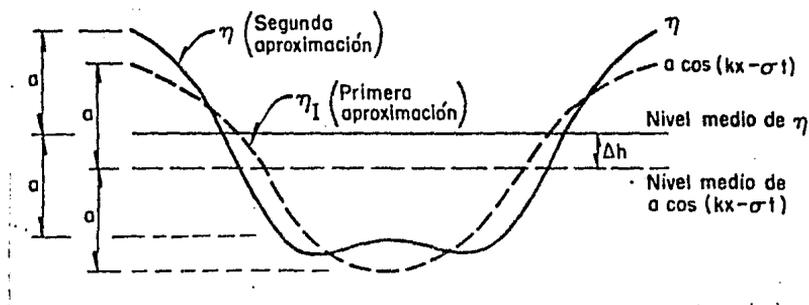


fig 2.7 Perfil de la segunda aproximación de Stokes y la teoría lineal

### 2.2.3 Teoría de la onda cnoidal

De manera semejante a como la teoría trocoidal explica el oleaje en aguas profundas, la cnoidal explica en forma adecuada el oleaje en aguas someras. La teoría cnoidal es una extensión especial de la teoría de Stokes. El nombre de onda "cnoidal" se debe a que el perfil de la ola está expresado por la función cnoidal "cn" de las funciones elípticas de Jacobi. La fig 2.8 es un esquema que describe a una onda cnoidal.

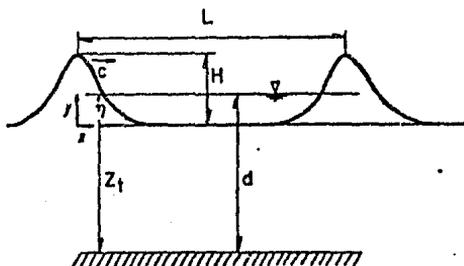


fig 2.8 Esquema de la onda cnoidal

### 3. PREDICCIÓN DE OLEAJE

Para el diseño de cierto tipo de estructuras se debe contar con datos de oleaje medidos para condiciones extraordinarias como pueden ser tormentas y ciclones. Dado que no es frecuente contar con ellos, es preciso recurrir a métodos indirectos que permitan estimarlos.

En la obtención de las características de este oleaje es necesario conocer los factores que afectan la generación de las olas. La estrecha relación entre el aire y la superficie del agua, hace que los fenómenos meteorológicos sean muy importantes en la formación de las olas.

Las olas se originan debido a la acción del viento sobre la superficie del agua. El área en que el viento actúa para formar un oleaje dado se llama zona de generación. Una vez formadas, las olas viajan alejándose del área en que fueron creadas y al salir de ella modifican sus características pasando a la zona de decaimiento. Finalmente, al seguir avanzando en rumbo a la costa, las olas empiezan a sentir el efecto del fondo el cual influye sobre sus características.

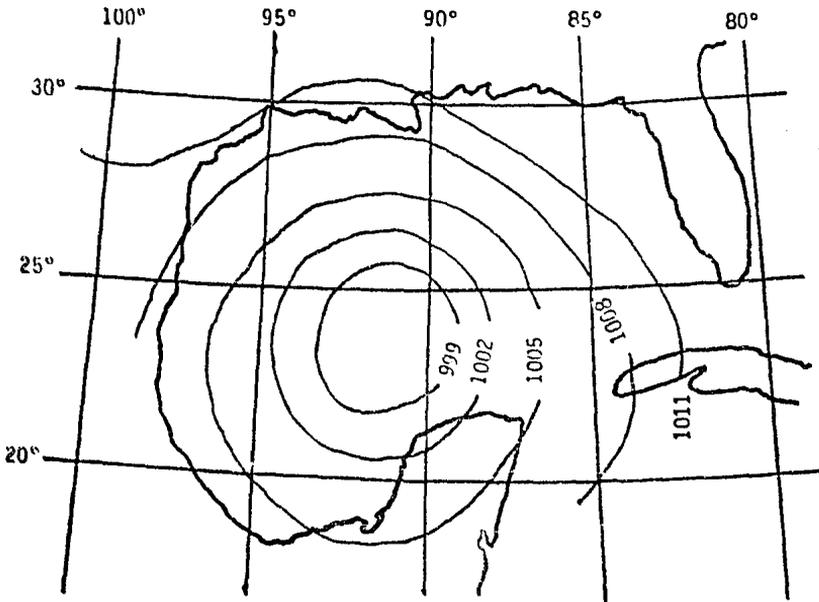


fig. 3.1 Configuración isobárica de un ciclón en el Golfo de México

$$V_g = 4.94 \frac{\Delta p}{\Delta n \operatorname{sen} \phi} \quad (3.2)$$

donde

- $V_g$  en m/s
- $\Delta p$  en milibares
- $\Delta n$  en grados de latitud
- $\phi$  en grados

Para diferencias entre isobaras de 3 y 5 mb, la velocidad del viento geostrofico se puede evaluar con ayuda de la fig 3.2.

### 3.1 Factores generadores del oleaje

Para estimar el oleaje que ocurre en un sitio, es necesario conocer cómo es su generación. A continuación se describen brevemente cuáles son los principales factores que intervienen en la formación del oleaje.

#### 3.1.1 Velocidad del viento

El viento es formado por el aire al moverse de zonas de mayor presión atmosférica a zonas de menor presión. Por consiguiente, para conocer la velocidad del viento, se requiere saber la distribución de la presión atmosférica en una determinada zona.

La distribución de presiones se presenta en cartas llamadas mapas de superficie, donde están dibujadas las isobaras (líneas de igual presión atmosférica) (fig 3.1). Para determinar el valor de la velocidad del viento que forma las olas, se utiliza el equilibrio entre cuatro fuerzas, a saber, las de presión, coriolis, centrípeta y de fricción.

Cuando las isobaras son rectas y la fuerza de fricción es despreciable, se obtiene el viento llamado geostrófico; su velocidad se encuentra a partir de

$$V_g = \frac{1}{2\rho a \omega \sin \phi} \left( \frac{\Delta p}{\Delta n} \right) \quad (3.1)$$

donde

- $V_g$  velocidad del viento geostrófico, en m/s
- $\rho a$  densidad del aire, aproximadamente igual a  $0.1247 \text{ kgf s}^2/\text{m}^4$
- $\omega$  velocidad angular de la tierra e igual a  $0.729 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$
- $\phi$  latitud correspondiente al centro de gravedad de la zona de generación, en grados
- $\Delta p$  diferencia entre isobaras, en milibares ( $1 \text{ mb} = 10.2 \text{ kgf/m}^2$ )
- $\Delta n$  distancia entre isobaras en grados de latitud ( $1^\circ \text{ lat} = 111120 \text{ m}$ )

Sustituyendo en la ec 3.1 las constantes, y haciendo algunas conversiones de unidades se obtiene:

$$V_g = \frac{1}{20\rho\sin\phi} \frac{\Delta p}{\Delta n}$$

para:  $\Delta p = 5 \text{ mb} \text{ \& } 3 \text{ mb}$   
 $\Delta n = \text{grados de latitud}$   
 $p = 1013.3 \text{ mb}$   
 $T = 10^\circ \text{C}$   
 $\rho = 1.2 \times 10^{-3} \text{ gm/cm}^3$

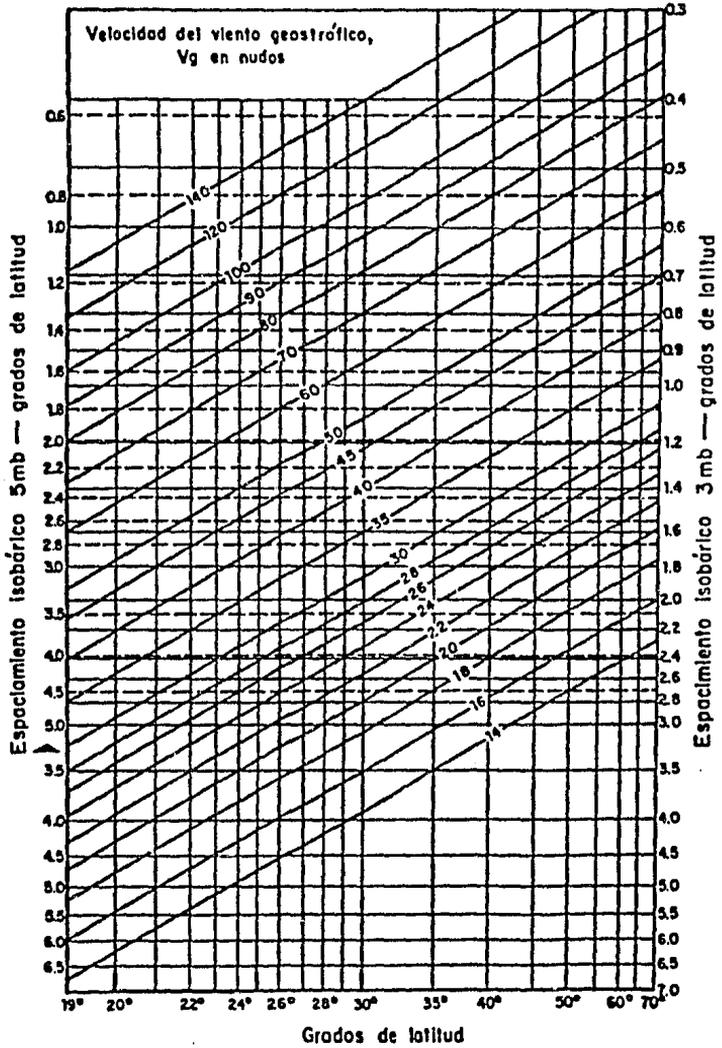


fig. 3.2 Velocidad del viento geostrófico

Cuando la forma de las isobaras es curva, en el flujo de aire hay que considerar el efecto de la fuerza centrípeta y con ello se obtiene la velocidad del viento gradiente.

Según sea la configuración de las isobaras en el mapa de superficie se puede tener un ciclón, si el centro del mismo es de baja presión, y el viento fluye hacia él, o un anticiclón si el centro es de alta presión y el viento circula tratando de alejarse de dicho centro.

Para conocer la velocidad del viento formativo del oleaje se debe corregir el valor del viento geostrófico tanto por curvatura de las isobaras, como por diferencia de temperaturas entre el mar y el aire. El factor de corrección ( $F_c$ ) puede obtenerse de la fig 3.3 tomando en cuenta la configuración isobárica (ciclón o anticiclón), el grado de curvatura de las isobaras y la diferencia de temperaturas entre mar y aire.

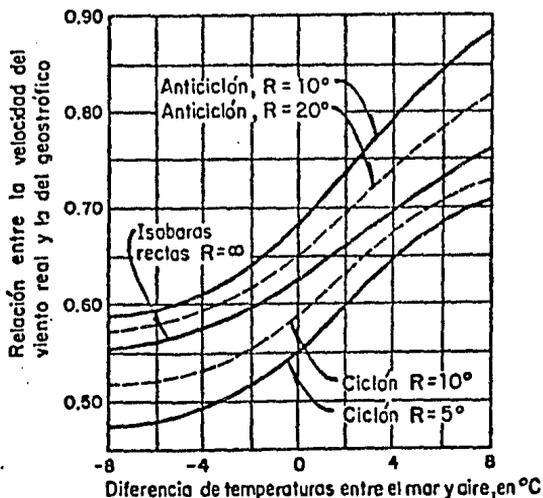


fig 3.3 Determinación del factor de corrección:

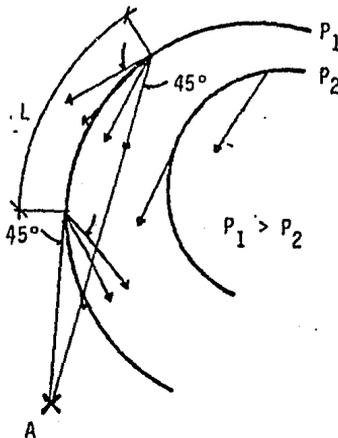
De esta forma la velocidad del viento formativo queda dada por:

$$U = Fc Vg \quad (3.3)$$

### 3.1.2 Fetch

Se requiere que el viento sople sobre un área determinada para que se generen olas que lleguen a un sitio de interés. Dentro de esta área, llamada de generación, se encuentra la recta de mayor longitud en dirección al sitio de interés, la cual se conoce como "fetch".

Para determinar el fetch, debe identificarse primero la zona de generación de las olas que llegan al sitio en estudio. Se ha observado que el viento sopla con ángulos de  $0^\circ$  a  $45^\circ$  respecto a la dirección de las isobaras, dependiendo de la curvatura de éstas. Así, si se tiene una zona con diferentes isobaras, la zona donde existe viento que produce oleaje hacia un sitio de interés, estará acotada por los puntos de la isobara en los que el viento, soplando en el campo de  $45^\circ$  mencionado, tenga alguna componente en dirección al sitio en estudio (fig 3.4).



$P_1, P_2$  líneas isobáricas

A sitio en estudio

L sección de la isobara donde existe viento que forma olas que afectan el sitio en estudio

fig 3.4 Zona de viento que produce oleaje en el sitio de interés

La zona de generación queda delimitada, por una parte, uniendo los puntos trazados anteriormente para cada isobara, y por otro, ya sea por la línea de costa, o por la última isobara con una separación razonable respecto a las otras.

Una vez delimitada la zona de generación, se ve cuál es la línea de longitud máxima en esta zona que pasa por el sitio en estudio. La distancia medida dentro de la zona de generación, es el fetch, y la que une el límite de la zona de generación con el sitio de interés se denomina distancia de decaimiento.

### 3.1.3 Duración

La energía que el viento transmite a la superficie del mar no sólo depende de la distancia en que actúa, sino también del tiempo en que lo hace. Para estimar este tiempo se utilizan mapas de superficie que, generalmente, presentan la configuración isobárica a cada seis horas.

Si se observa la dirección del fetch en mapas de superficie sucesivos, se puede apreciar el tiempo en que el viento sopló en cierta dirección.

Existen dos criterios para determinar la duración del viento, el acumulativo y el variable.

-Criterio acumulativo. Si la dirección del fetch en mapas de superficie sucesivos no varía en más de  $22.5^\circ$ , la duración se obtiene asignando tres horas al primer mapa, nueve al segundo, quince al tercero y así sucesivamente.

-Criterio variable. Si la dirección del fetch varía en más de  $22.5^\circ$  entre mapas de superficie sucesivos se consideran los siguientes casos:

Cambios en la dirección del fetch en grados	Duración asignada a cada mapa en horas
22.5	5
45.0	4
77.5	3
90	2
112.5	1

#### 3.1.4 Relación entre duración y fetch

Ya se ha mencionado que la generación de las olas está relacionada con la energía que transmite el viento a la superficie del mar al soplar con cierta velocidad y en una distancia y tiempo determinados. Para que el oleaje generado pueda alcanzar una energía máxima, el viento con una velocidad fija, debe actuar cierto tiempo y distancia mínimos. Al oleaje con esta máxima energía se le conoce como oleaje completamente desarrollado. Una vez que se ha alcanzado el completo desarrollo, la energía del oleaje no puede aumentar a menos que aumente la velocidad del viento y con ello el fetch y duración mínimos.

De esta forma, si el viento actúa con cierta velocidad, en una distancia menor al fetch mínimo, o con una duración menor a la mínima, el oleaje no alcanzará su completo desarrollo. Es decir, las características del oleaje generado por viento, a una velocidad constante, están determinadas ya sea por el fetch o por la duración.

#### 3.2 Métodos de predicción

Existen varias técnicas para predecir las características del oleaje utilizando diversos criterios y la información de campo disponible.

-Método de la ola significativa. Dado que el oleaje está constituido por olas de diferentes características entre sí, se ha propuesto una idealización de ellas definiendo una altura y periodo significantes del oleaje. Existen ciertas ventajas al poder representar un oleaje con sus características significantes, como es la de aplicar la mayor parte de los estudios teóricos realizados para olas monocromáticas. Estos valores han de-

mostrado ser útiles en la solución de problemas de ingeniería al ser representativos del oleaje. Los métodos de la ola significativa proporcionan el valor de la altura y periodo significantes en función de la velocidad del viento, fetch y duración. Se entiende por altura significativa de ola, al promedio del tercio de las mayores alturas de ola de un registro determinado. La altura significativa se representa como  $H_{1/3}$  o simplemente  $H_s$ . El periodo significativo es el promedio de los periodos entre las olas más grandes de un registro y se designa como  $T_{1/3}$  o  $T_s$ .

-Método del espectro de energía. El espectro de energía relaciona la energía de las olas con respecto a su frecuencia, para cada velocidad del viento; dado que la energía es una función del cuadrado de la altura de la ola, ésta puede ser obtenida a partir de aquella.

-Métodos estadísticos. Al hacer uso de la información disponible y utilizando algunos criterios teóricos razonables, se puede desarrollar un método de predicción en base a los datos históricos medidos en una zona.

### 3.2.1 Método Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB)

Con este método se obtiene la altura y periodo significantes ( $H_{1/3}, T_{1/3}$ ) en función de las características del viento formativo (fetch, duración y velocidad) obtenidas en los mapas de superficie.

En la fig 3.5 la altura  $H_{1/3}$  y el periodo  $T_{1/3}$  pueden estimarse en base a la combinación de la velocidad del viento y el fetch y en base a la velocidad del viento y su duración. De los valores obtenidos con cada combinación se escogen los menores ya que los parámetros con los que se obtiene son los que limitan el desarrollo del oleaje.

### 3.2.2 Método de Pierson-Newmann-James (PNJ)

Este método utiliza el espectro de energía para determinar las características del oleaje. El espectro de energía representa la distribución de la energía con respecto a las frecuencias del oleaje (fig 3.6a). Para la predicción del oleaje se usa el espectro coacumulativo del oleaje que se ob-

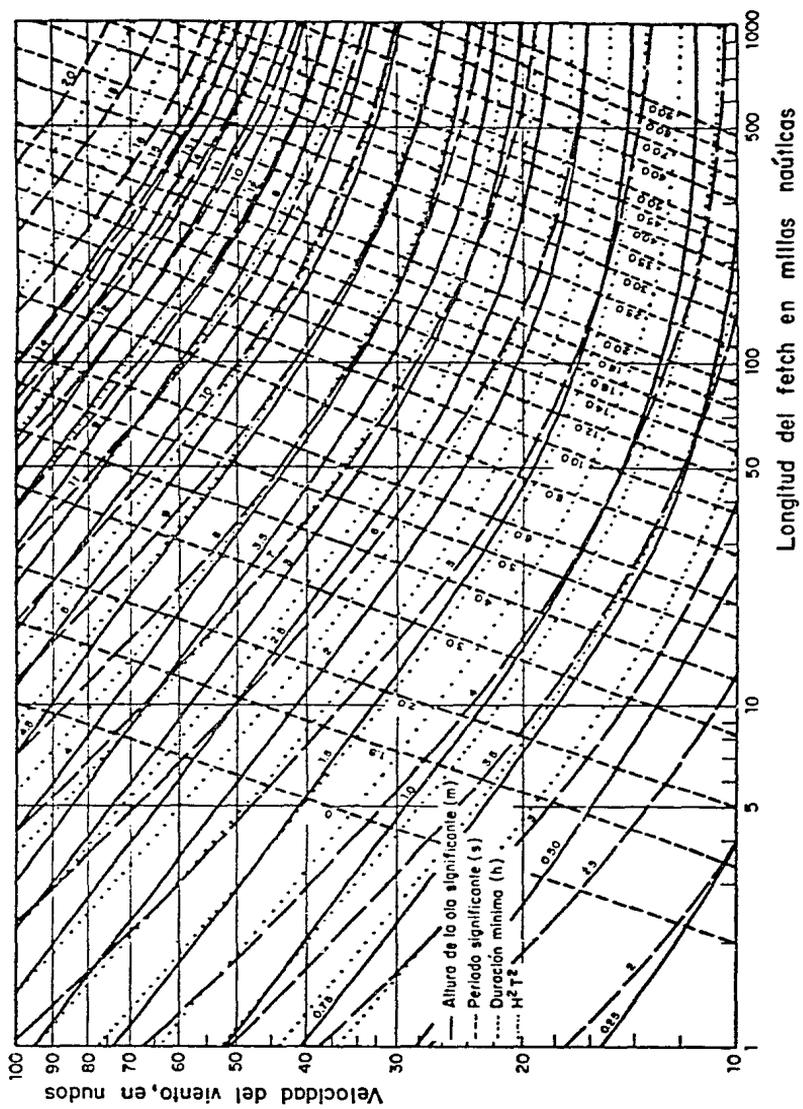


fig. 3.5 Características significantes del oleaje en función de la velocidad del viento formativo, (U), la duración, y el fetch. (según Sverdrup-Munk-Bretschneider)

tiene integrando la curva del espectro de energía a partir de las frecuencias altas (fig 3.6b).

La energía del oleaje también se puede representar en función de la altura de ola ( $H$ ) por lo que es posible encontrar la altura significativa del oleaje por medio del espectro coacumulativo del oleaje.

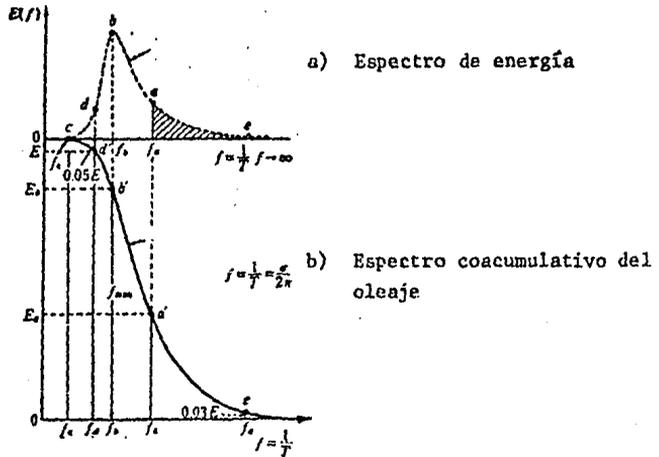


fig 3.6a,b Espectros de energía

Tomando por un lado la velocidad del viento y el fetch y, por otro, la velocidad del viento y su duración, se encuentra en la fig 3.7 los valores correspondientes de la energía  $E$ , tomándose como condición limitante la que proporcione el menor valor de  $E$ .

En la misma figura se puede obtener el valor de  $H_{1/3}$ , o bien por medio de:

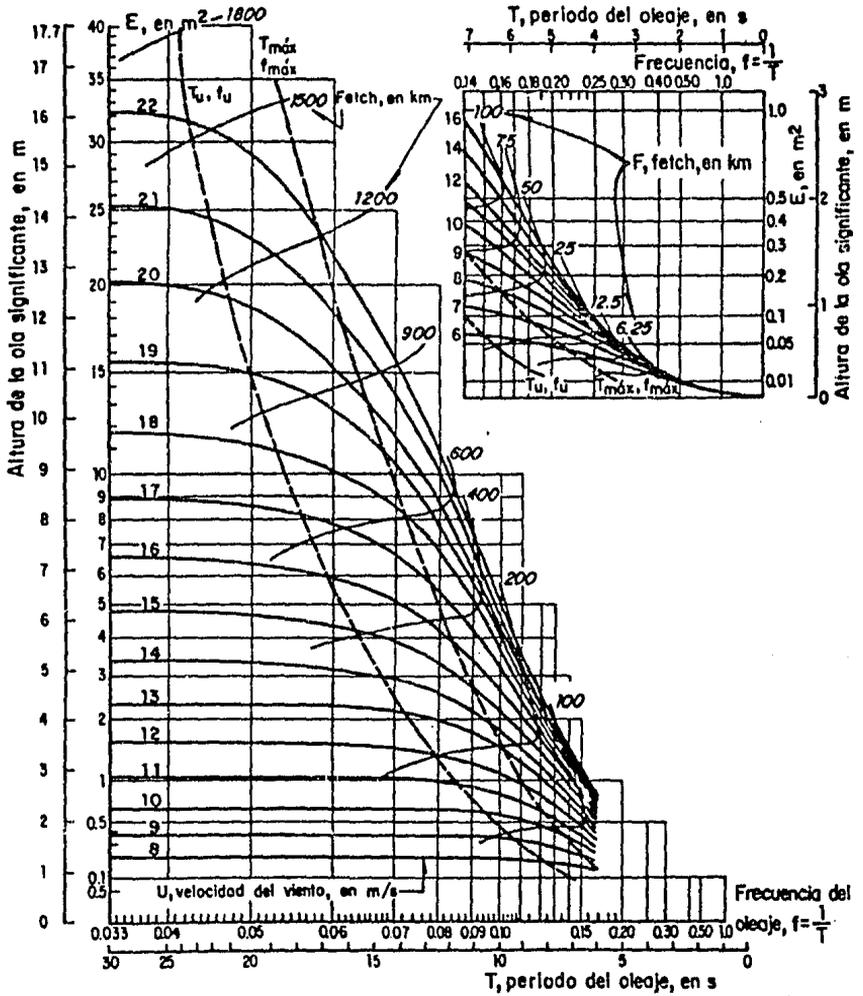


fig. 3.7 a) Gráfica para el fetch (velocidad del viento entre 8 y 22 m/s)

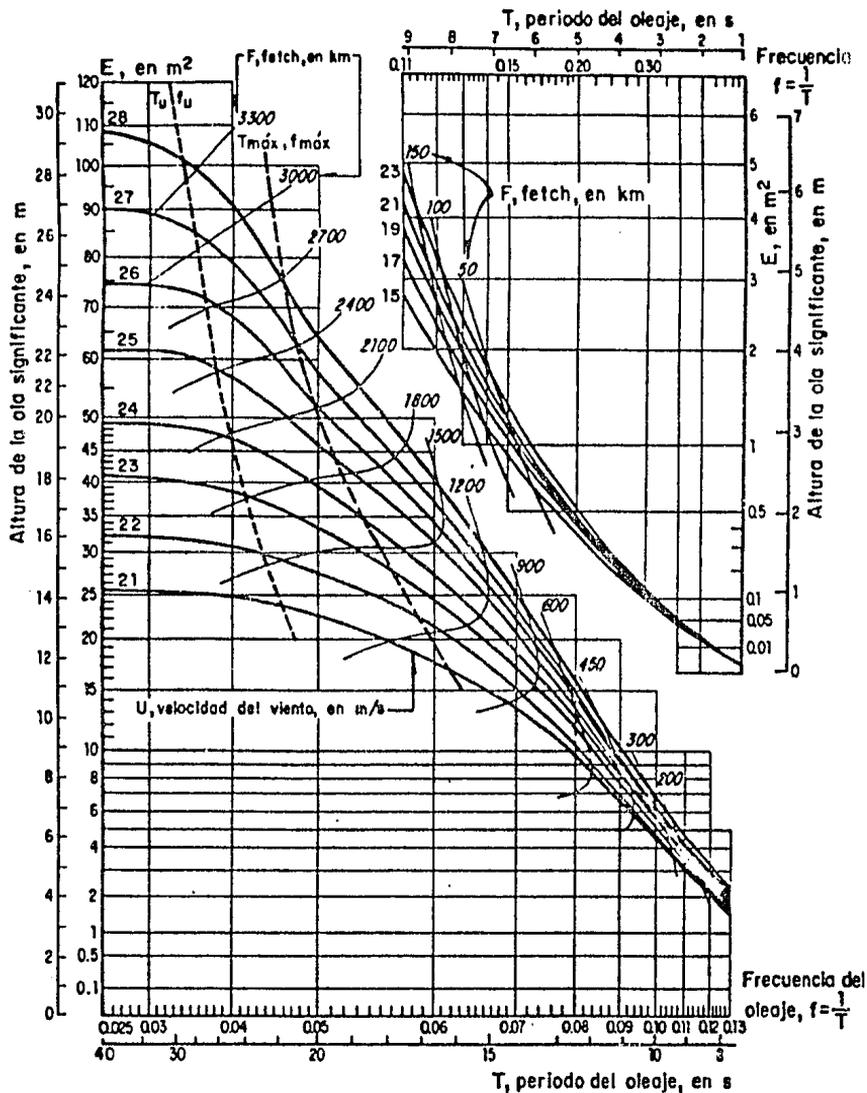


fig. 3.7 b) Gráfica para el fetch (velocidad del viento entre 21 y 28 m/s).

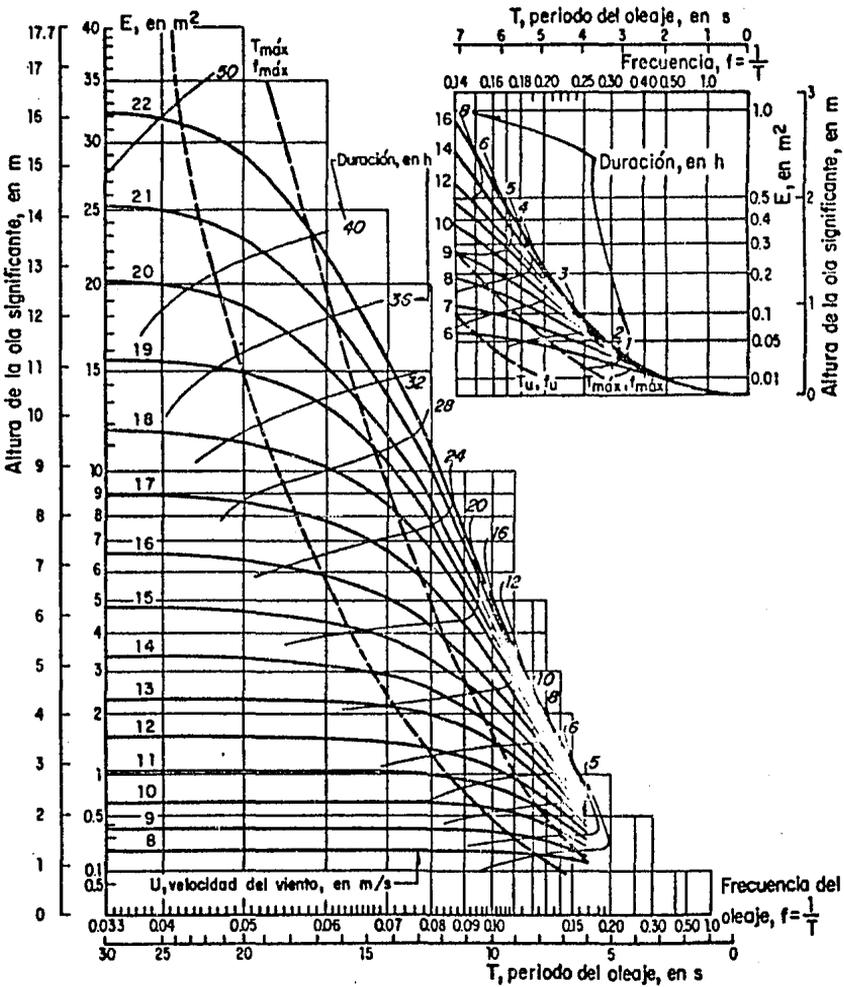


fig. 3.7 c) Gráfica para la duración (velocidad del viento entre 8 y 22 m/s).

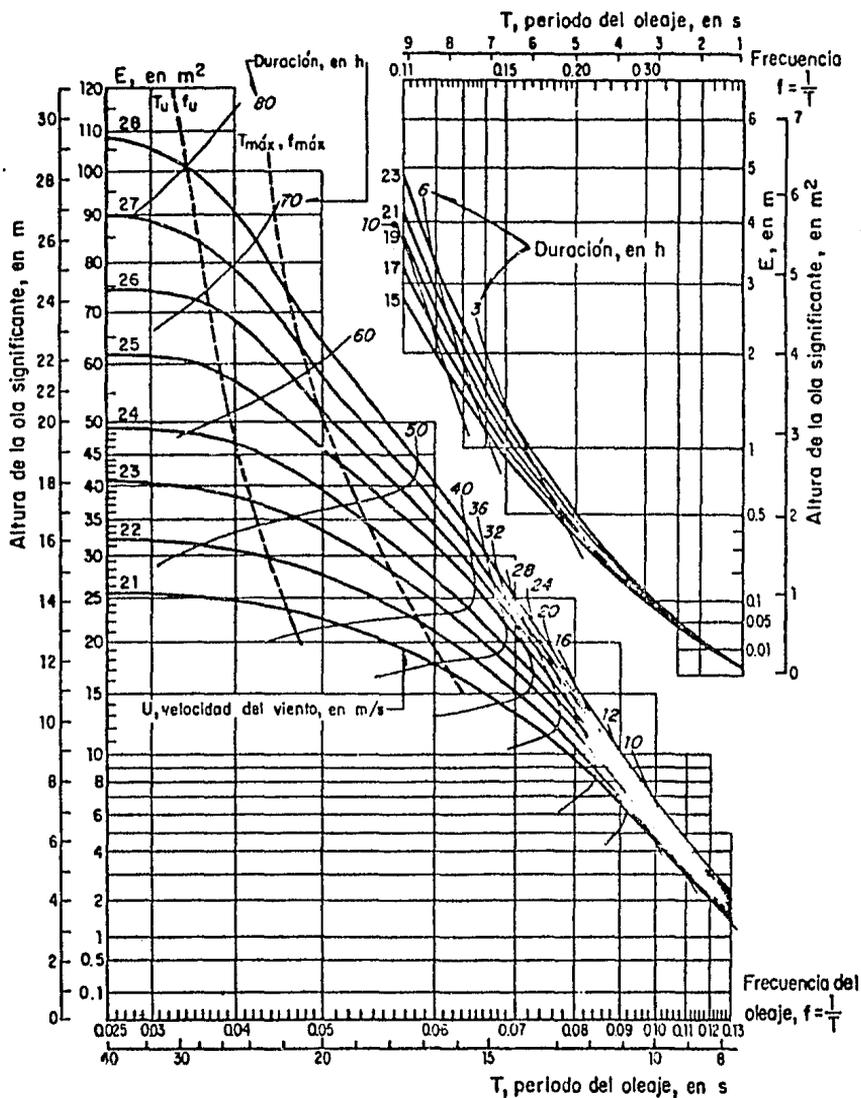


fig. 3.7 d) Gráfica para la duración (velocidad del viento entre 21 y 28 m/s)

$$H_{1/3} = 2.832\sqrt{E} \quad (3.4)$$

y el periodo significativo a partir de:

$$T_{1/3} = 3.86\sqrt{H_{1/3}} \quad (3.5)$$

### 3.2.3 Método estadístico de predicción de oleaje

En la costa del Golfo de México las condiciones de oleaje más adversas se presentan por la ocurrencia de ciclones. Es posible obtener las características del oleaje en esta zona, en función de datos estadísticos de ciclones.

Este método utiliza el concepto de probabilidad independiente:

"Si A y B son eventos independientes, la probabilidad de que ambos ocurran es igual al producto de sus probabilidades individuales"

$$P(A \cap B) = P(A) P(B) \quad (3.6)$$

Si consideramos como A el evento de que se presente un ciclón y B como el que un ciclón produzca un oleaje de altura significativa  $H_{1/3} \geq H$ , entonces  $P(A \cap B)$  representa la probabilidad de que se presente un ciclón que produzca una altura de ola  $H_{1/3} \geq H$ .

Antes de exponer el método es conveniente definir ciertos conceptos que son utilizados.

El índice de presión normal,  $IP_0$ , es el valor de la presión atmosférica en condiciones normales a nivel del mar y se encuentra en el exterior de un ciclón. Para el caso del Golfo de México  $IP_0 = 1013.24$  milibares.

$IP_H$  es el índice de presión capaz de producir oleaje de altura significativa  $H_{1/3} \geq H$ .

El método se puede resumir de la siguiente forma:

1. Se ubica el sitio de interés en las figs 3.8 y 3.9, con ello se conoce la zona (s) del Golfo en que está y se puede obtener el número de ciclones por año ( $\gamma_B$ ) y la velocidad de desplazamiento del ciclón ( $V_d$ ) correspondientes. A  $\phi$  (latitud del sitio) se le asigna el valor de la latitud del centro de la zona en que está el sitio de interés.

2. Se calcula la media y desviación estándar de la distribución de probabilidad de los índices de presión con las siguientes ecuaciones:

$$\overline{IP} = 1024.18 - 1.6884\phi \quad (3.7)$$

$$SIP = 54.03 - 1.013\phi \quad (3.8)$$

$\overline{IP}$  media de los índices de presión

$SIP$  desviación estándar de los índices de presión

$\phi$  latitud de la zona "s" en grados

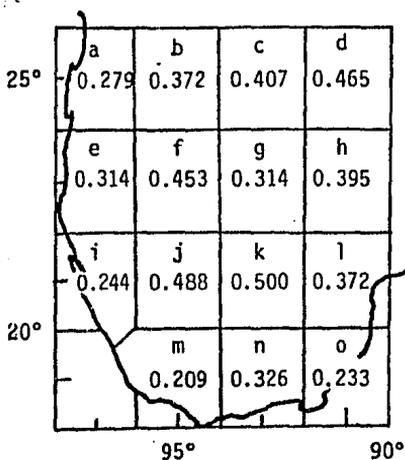


fig 3.8 Número de ciclones por año ( $\gamma_B$ )

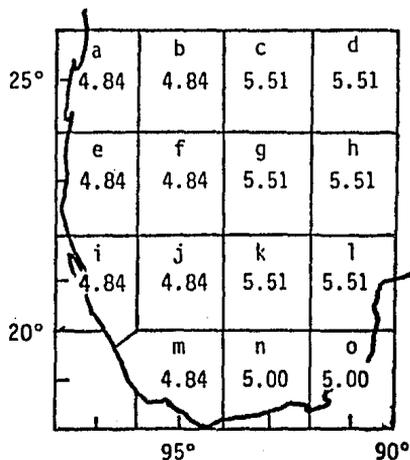


fig 3.9 Velocidad del desplazamiento del ciclón ( $V_d$ )

3. Se calcula la probabilidad de que se presente un ciclón ( $P_{B\phi}(IP_o)$ ) en el Golfo de México por medio de la variable estandarizada de  $IP_o = 1013.25$

$$\alpha_o = \frac{1013.24 - \overline{IP}}{SIP} \quad (3.9)$$

En seguida, de una tabla de distribución de probabilidad normal, se encuentra la probabilidad de obtener valores menores o iguales a  $\alpha_o$ , esa probabilidad corresponde a  $P_{B\phi}(IP_o)$ .

4. Se obtiene la probabilidad de que un ciclón produzca oleaje de altura significativa mayor que H,  $P(H)_s$  utilizando la ecuación

$$P(H)_s = 1 - \left[ \frac{t_{ms} - 1}{t_{ms}} \right]^{1/r_s} \quad (3.10)$$

donde

$t_{ms}$  periodo de retorno de un ciclón en las zona S capaz de producir un oleaje de altura significativa  $H_{1/3} \geq H$   
 $r_s$  número de ciclones por año en la zona s

5. Se encuentra la probabilidad de que el ciclón produzca un oleaje significativo mayor que H ( $P_{B\phi}(IP_H)_s$ )

$$P_{B\phi}(IP_H)_s = P_{B\phi}(IP_o)_s P(H)_s \quad (3.11)$$

donde

$P_{B\phi}(IP_o)_s$  probabilidad de que se produzca un ciclón en la zona s  
 $P(H)_s$  probabilidad de que el ciclón produzca un oleaje de altura significativa  $H_{1/3} \geq H$

6. Se encuentra el índice de presión  $IP_H$ . Con el valor de  $P_{B\phi}(IP_H)_s$ , de una tabla de distribución normal, se encuentra la variable estandarizada  $\alpha_H$  y se obtiene  $IP_H$  con la siguiente ecuación:

$$\overline{IP_H} = \overline{IP} + \alpha_H \overline{SIP} \quad (3.12)$$

7. Se calcula el radio de máximo viento y el índice de energía del ciclón

$$R = 0.0006574 e^{0.01155 IP_H} \quad (3.13)$$

$$E = 962.7097 (1013.25 - IP_H)^{1.1667} R^{0.6667} (\text{sen}\phi)^{-0.333} \left[ 1 + 0.418 \frac{V_d}{(1013.25 - IP_H)^{0.5}} \right]$$

(3.14)

donde

R radio de máximo viento

E índice de energía máxima del ciclón

 $V_d$  velocidad de desplazamiento del ciclón (fig 3.8)

8. Se calculan la altura de ola significativa y su periodo en aguas profundas al final de la zona de generación

$$H_{1/3} = 0.0051 E^{0.518} \quad (3.15)$$

$$T_{1/3} = 0.2768 E^{0.261} \quad (3.16)$$

El cálculo de la dirección del oleaje se hace considerando el sentido de giro del ciclón (en sentido antihorario en el hemisferio norte), la ubicación del sitio en estudio, el fetch (F) y la distancia mínima desde el centro del ciclón hasta la línea de energía máxima del ciclón (r) utilizando las ecuaciones

$$F = 0.12189 E^{0.553} \quad (3.17)$$

$$r = (1.4134 - 0.01 R)R \quad (3.18)$$

El método es como sigue:

a) Se escoge una dirección que se considere factible y se traza una recta  $\overline{OQ}$  con esta 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 supone una fuerza que vaya de mar hacia tierra sobre la línea  $\overline{OQ}$  y otra igual pero en sentido contrario sobre  $\overline{O'Q'}$  el par resultante gire en el mismo sentido que el ciclón.

- c) En el punto de la intersección de la línea  $\overline{O'Q'}$  con el paralelo correspondiente a la latitud  $\phi$  se define el centro del ciclón, punto C
- d) Se traza un círculo de radio R con centro C
- e) Se dibuja una recta perpendicular a  $\overline{O'Q'}$  que pase por C. La intersección de esta recta con la recta  $\overline{OQ}$  ubica al punto A
- f) A partir del punto A, se acota un segmento de  $0.25 F$  hacia O, con ello se encuentra el punto B. También se acota un segmento de longitud  $0.75 F$  en dirección opuesta para definir al punto E
- g) Es necesario que el círculo de radio R no toque la costa para que 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  $\overline{BO}$ .

### 3.3 Predicción del oleaje en la zona de decaimiento

Una vez que el oleaje abandona la zona de generación, se considera que el viento deja de suministrar energía a las olas, por consiguiente, el oleaje decrece principalmente por el fenómeno de la dispersión. La dispersión es causada por la diseminación angular y por la dispersión debida a la celeridad. La primera es debida a que el oleaje producido en la zona de generación avanza en diferentes direcciones y se dispersa en la medida en que viaja. La segunda dispersión provoca que las olas de baja frecuencia (largo periodo) se propaguen con mayor velocidad que las de alta frecuencia (corto periodo). Además de la dispersión, el oleaje disipa su energía por acción del viento y por fenómenos de fricción interna, especialmente en las ondas de menor periodo.

Para evaluar las características del oleaje en la zona de decaimiento, Bretschneider propuso unas gráficas para obtener la altura y periodo significantes al final de la distancia de decaimiento (límite de aguas pro-

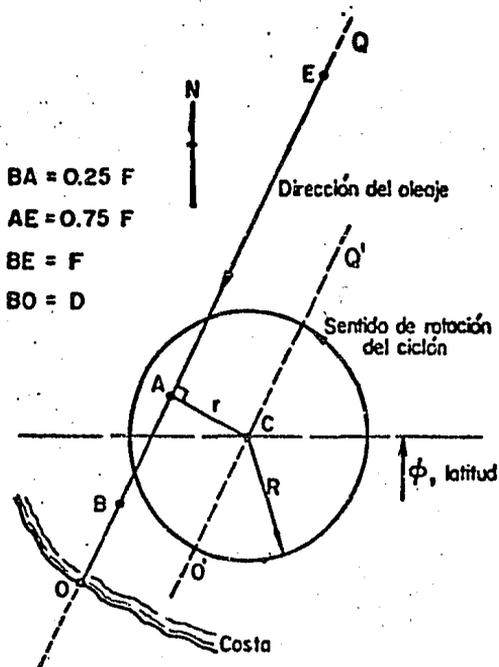


fig 3.10 Figura explicativa

fundas) en función de relaciones entre la distancia de decaimiento y el fetch mínimo y la distancia de decaimiento y la altura de ola o periodo significantes al final de la zona de generación según sea el caso (fig 3.11 y 3.12).

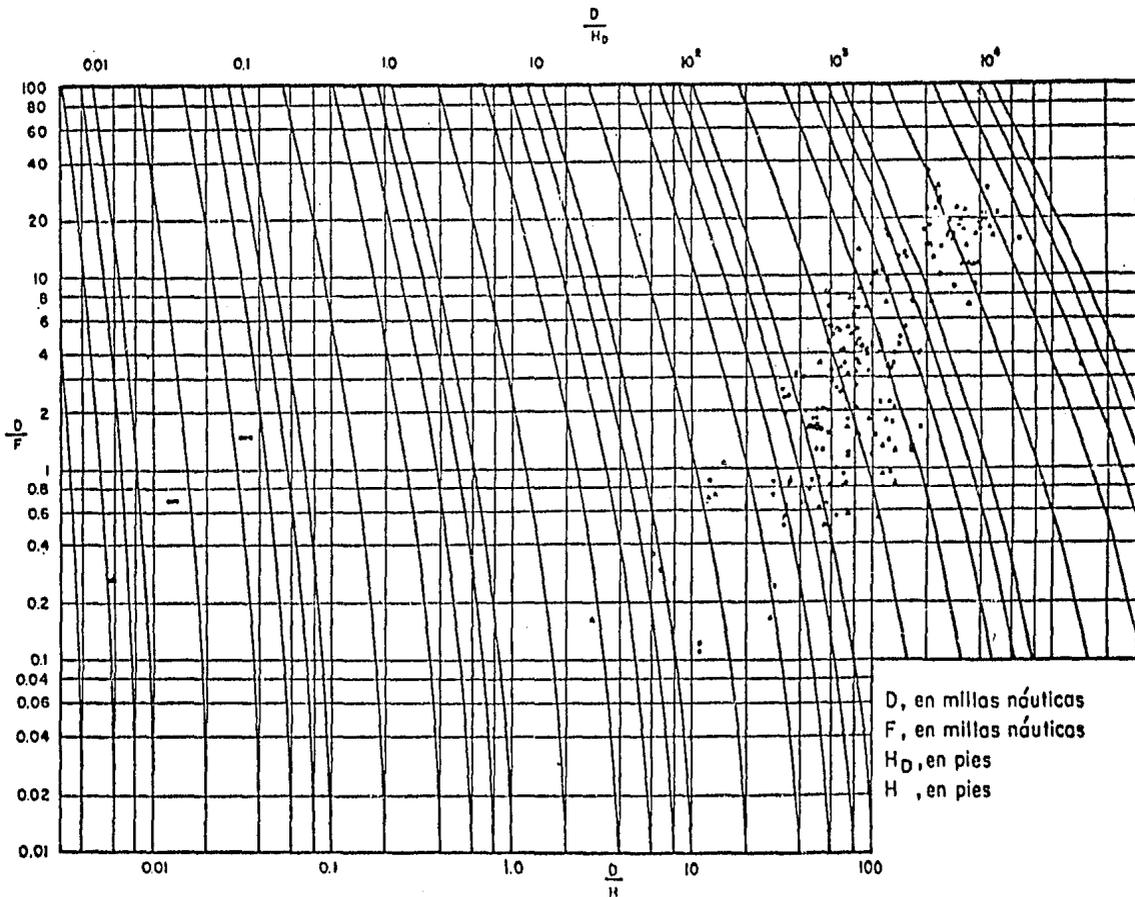


fig. 3.11 Obtención de la altura de ola al final de la zona de decaimiento.

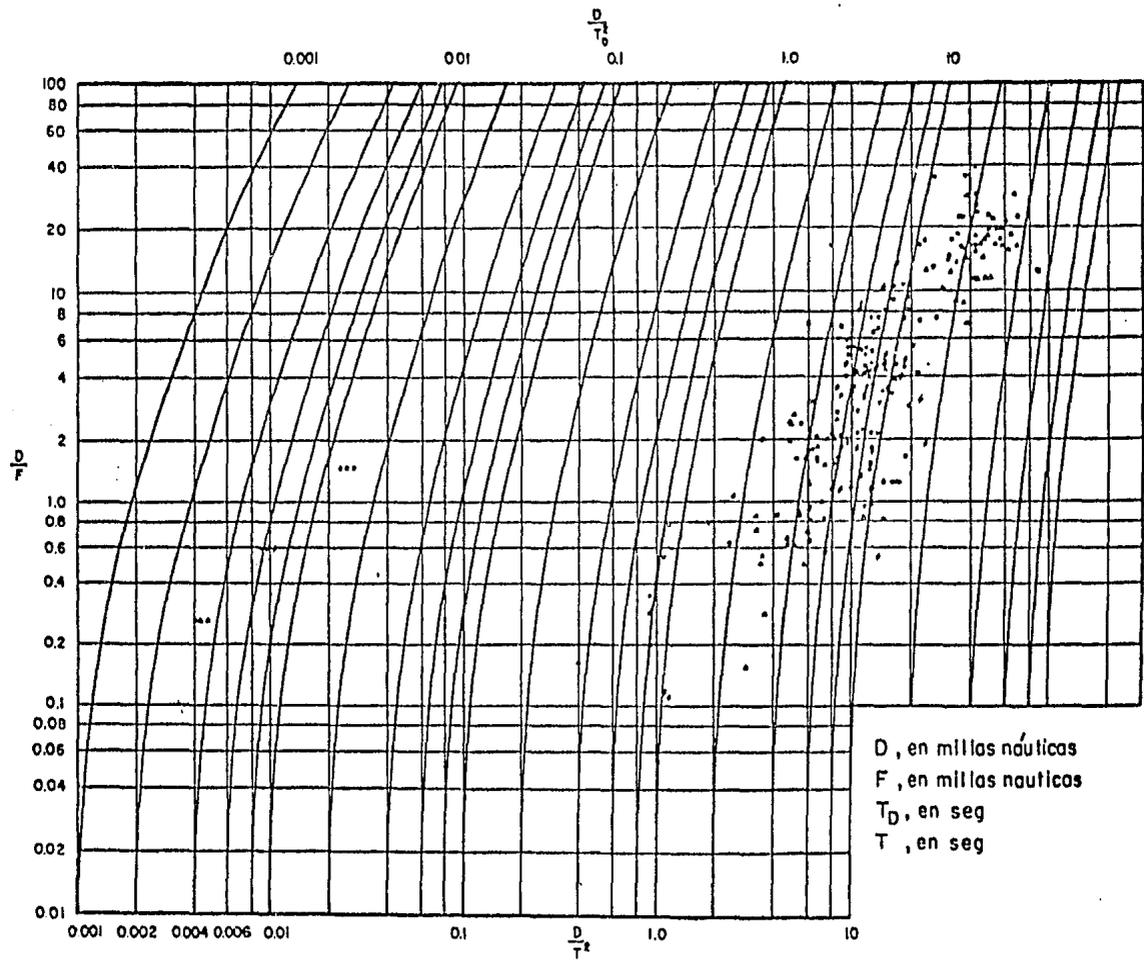


fig. 3.12 Obtención del periodo de la ola al final de la zona de decaimiento.

#### 4. CAMBIOS DEL OLEAJE

Las características del oleaje se ven afectadas cuando éste pasa de mar profundo a aguas intermedias y someras o por la presencia de obstáculos como islas o escolleras.

Algunos de los fenómenos que alteran el oleaje son la refracción, difracción, reflexión. También la ola se vuelve inestable y cambia bruscamente de forma a cierta profundidad. En este capítulo se tratarán las modificaciones del oleaje.

##### 4.1 Refracción

Cuando las olas se acercan a la costa, su celeridad disminuye conforme lo hace la profundidad. Si se observa una ola de cresta muy larga desplazándose oblicuamente respecto a la costa, una parte de ella llega primero a la profundidad de aguas intermedias mientras que la otra continúa en aguas profundas. De esta forma, la parte de la ola en aguas intermedias tendrá menor celeridad que la que aún está en aguas profundas. Esto ocasiona que el frente se flexione tendiendo a adoptar cierto paralelismo con la batimetría del lugar.

La refracción del oleaje se puede definir mediante la ley de Snell de manera similar al caso de la luz. Así, el ángulo de las olas refractadas  $\alpha_2$  está determinado por:

$$\frac{C_1}{\text{sen}\alpha_1} = \frac{C_2}{\text{sen}\alpha_2} \quad (4.1)$$

donde:

$C_1, C_2$  celeridades de la ola a las profundidades  $d_1$  y  $d_2$   
 $\alpha_1, \alpha_2$  ángulos del oleaje incidente y refractado (fig 4.1)

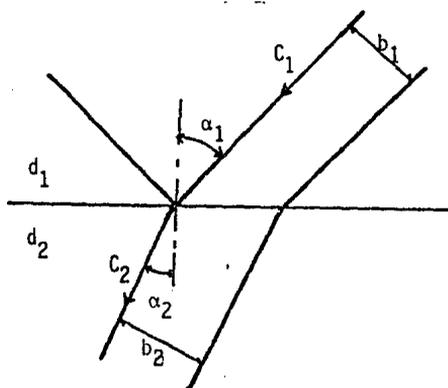


fig 4.1 Refracción del oleaje

La variación de la altura de la ola debido a la refracción puede estudiarse si se supone que la energía de la ola por unidad de tiempo contenida entre dos ortogonales sucesivas se mantiene constante (las ortogonales son líneas perpendiculares al frente de onda).

Lo anterior se puede expresar como sigue:

$$P_o = P \quad (4.2)$$

donde:

$P_o$  flujo de energía en aguas profundas  
 $P$  flujo de energía en aguas someras

es decir:

$$C_{g_o} b_o E_o = C_g b E \quad (4.3)$$

O bien, sustituyendo el valor de  $C_{g_o}, C_g, E_o$  y  $E$  según las ecs 2.16 y 2.20:

$$n_o C_o b_o \frac{1}{8\gamma H^2} = nCb \frac{1}{8\gamma H^2} \quad (4.4)$$

donde:

$b_o, b$  separación entre ortogonales en aguas profundas y someras respectivamente

De aquí se obtiene

$$\frac{H}{H_o} = \sqrt{\frac{n_o C_o b_o}{nCb}} \quad (4.5)$$

recordando que en aguas profundas  $n_o = 1/2$  (cap 2) se tiene:

$$\frac{H}{H_o} = \sqrt{\frac{C_o}{2nC}} \sqrt{\frac{b_o}{b}} \quad (4.6)$$

De esta forma la altura de la ola refractada queda dada por:

$$H = K_s K_r H_o \quad (4.7)$$

donde:

$$K_s = \sqrt{\frac{C_o}{2nC}} \quad (4.8)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{b_o}{b}} \quad (4.9)$$

Cuando la pendiente del fondo es uniforme, el ángulo de la ola refractada a cualquier profundidad se puede obtener fácilmente de la ec 4.1 y el coeficiente de refracción calcularlo como:

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_o}{\cos \alpha}} \quad (4.10)$$

Sin embargo, la configuración del fondo suele ser compleja e irregular. En estos casos, se puede utilizar el siguiente método para dibujar las ortogonales del frente de ola y obtener así el coeficiente de refracción.

i) Procedimiento cuando el ángulo de incidencia  $\alpha$  es menor de  $80^\circ$

Antes que nada, el periodo y el ángulo de incidencia  $\alpha$  deben ser determinados por métodos apropiados. Se calcula la longitud de onda en aguas profundas  $L_o$  y se consideran las batimétricas de menor profundidades que  $L_o/2$ .

La configuración de la batimetría se suaviza para eliminar las irregularidades pequeñas en comparación con la longitud de onda. Utilizando las ecs. 2.1, 2.2 y el periodo, se calcula la celeridad a la profundidad de las batimétricas dadas, así como la relación de celeridades correspondientes a batimétricas consecutivas  $C_1/C_2$ . Se construye una plantilla como la de la fig 4.2.

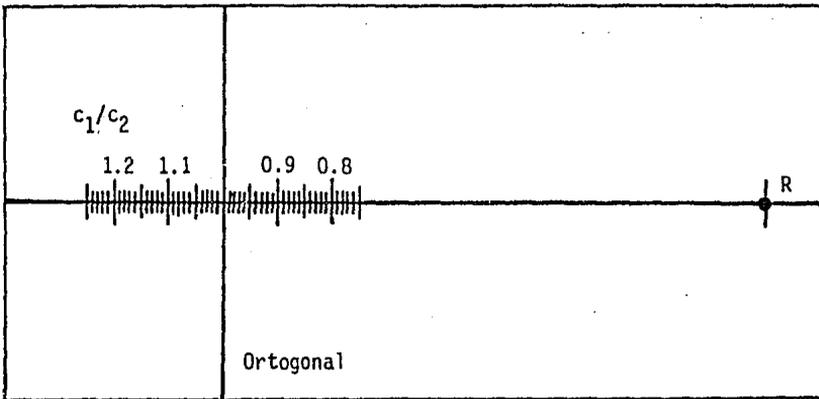


fig 4.2 Plantilla para el diagrama de refracción

Empezando con cualquiera de las ortogonales y utilizando la plantilla de refracción se siguen los siguientes pasos comenzando de mar afuera hacia la costa.

1. Se extiende la ortogonal incidente hasta la línea media entre dos batimétricas consecutivas, lo que determina el punto P'. Se traza una tangente a la línea media en el punto P'.
2. La línea de la plantilla marcada "ortogonal" se coloca sobre la ortogonal incidente con el punto marcado 1.0 sobre el punto P'. (fig 4.3).
3. Se gira la plantilla haciendo centro en R hasta que el valor  $C_1/C_2$  correspondiente al par de batimétricas en cuestión intersekte la tangente a la batimétrica media SQ. La nueva ortogonal tiene la dirección

de la ortogonal girada en la plantilla.

4. El punto de intersección  $P$  entre la ortogonal incidente  $AP'$  y la ortogonal refractada  $PB$  queda definido moviendo paralelamente la ortogonal de la plantilla de manera que la distancia  $\overline{AP}$  sea igual a la distancia  $\overline{PB}$ .
5. Los pasos anteriores se repiten para cada intervalo de líneas batimétricas.

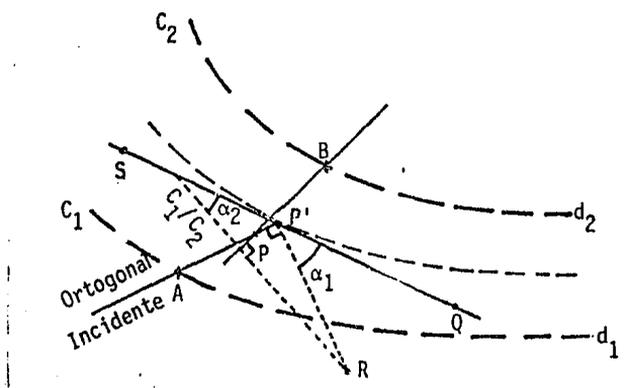


fig 4.3 Construcción del diagrama de refracción

ii) Procedimiento cuando el ángulo de incidencia  $\alpha$  es mayor de  $80^\circ$

Cuando el ángulo de incidencia de las ortogonales es mayor de  $80^\circ$  el procedimiento anterior no es adecuado. En este caso se establecen tramos entre dos batimétricas consecutivas. El espaciamiento  $R$  entre las líneas transversales a las batimétricas, se establece arbitrariamente como un múltiplo de la distancia  $J$  que separa a las batimétricas (fig 4.4). En el punto medio de la longitud  $R$  del tramo, se dibuja el ángulo de refracción  $\Delta\alpha$ . Para conocer el ángulo  $\Delta\alpha$  se recurre a la fig 4.5. Con la relación  $R/J$  y la de las celeridades  $C_1/C_2$ . La ortogonal refractada se dibuja hasta la parte media del siguiente segmento. Este procedimiento se repite hasta que

el ángulo de incidencia  $\alpha$  sea menor a  $80^\circ$ , entonces se usa el procedimiento para  $\alpha$  menor de  $80^\circ$

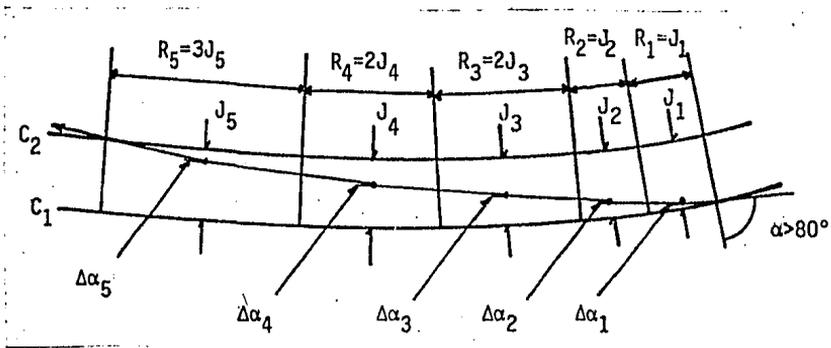


fig. 4.4 Construcción del diagrama de refracción

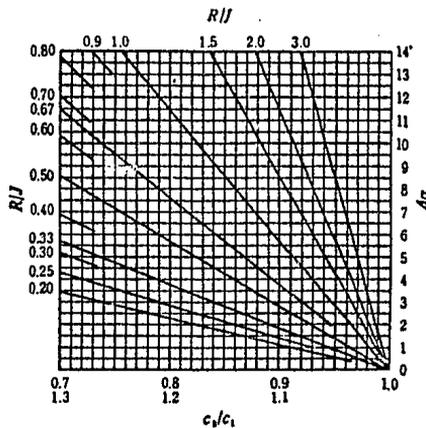


fig. 4.5 Diagrama para el ángulo de refracción  $\Delta\alpha$

La línea quebrada que se obtiene se suaviza;  $b_0$  y  $b$  se podrán medir sobre el dibujo y así calcular el coeficiente de refracción para cada profundidad.

## 4.2 Difracción y reflexión

Cuando un oleaje incide sobre una pared vertical, plana e impermeable, se producen dos tipos de fenómenos (fig. 4.6). La parte de las olas a la izquierda del rayo  $RR'$ , al rebasar el extremo  $O$  de la barrera  $OP$ , carece de soporte lateral y por ello su energía decae sucesivamente, primero en una zona llamada de penumbra;  $ZP$ , y después en una zona de sombra  $ZS$ , donde prácticamente no hay oleaje. La zona donde el oleaje no experimenta el fenómeno de la difracción se llama zona de luz  $ZL$ .

La parte de las olas a la derecha del rayo  $RR'$ , avanza hasta incidir con la barrera  $OP$  y allí "rebota" produciéndose el fenómeno de reflexión, de tal manera que el ángulo de incidencia  $Z_i$  es igual al de reflexión  $Z_r$ . De esta forma, en la zona de reflexión  $ZR$  coexisten los dos sistemas de olas, las incidentes (trazo lleno) y las reflejadas (trazo discontinuo). Cuando el ángulo de incidencia es cero, se forma un sistema de olas estacionarias llamadas clapotis.

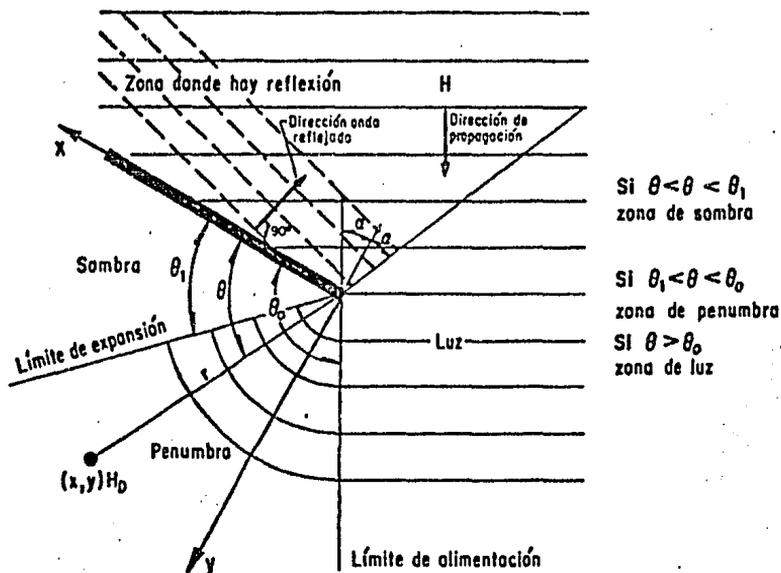


fig. 4.6 Difracción y reflexión

#### 4.2.1 Difracción

El estudio de la difracción permite definir las zonas dentro del recinto protegido donde es más conveniente el fondeo de los barcos. Al estudiar la difracción se supone que la profundidad es constante y que es aplicable la teoría lineal del oleaje. En la fig. 4.6 se muestra un esquema para definir el análisis de la difracción. El eje  $y$  está en la dirección de avance del oleaje y coincide con la línea de sombra del rompeolas. La altura de la ola difractada será:

$$H_D = K_D H_I \quad (4.11)$$

El coeficiente de difracción  $K_D$  es función del ángulo de incidencia del oleaje ( $\theta_o$ ), el ángulo entre el final del obstáculo y el punto en estudio ( $\theta$ ), y la relación  $r/L_I$ ; donde  $r$  es el radio vector y  $L_I$  la longitud de la ola incidente.

Por medio de la tabla 4.1 puede calcularse el coeficiente de difracción para diferentes condiciones.

Cuando se tiene la entrada a un puerto protegida por un par de rompeolas (fig. 4.7), se pueden utilizar distintos diagramas que muestran líneas de igual coeficiente de difracción, dependiendo de la relación entre la abertura y la longitud de onda del oleaje (ref. 8).

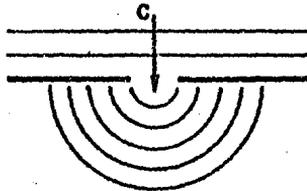


fig. 4.7 Difracción a través de una entrada

Tabla 4.1 Valores del coeficiente de difracción  $K_D$  (según Wiegel)

$\theta_o$	r/L	$\theta$						
		0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
30°	0.5	0.61	0.68	0.87	1.03	1.03	0.99	1.00
	1	0.50	0.63	0.95	1.05	0.98	1.01	1.00
	2	0.40	0.59	1.07	0.96	0.98	0.99	1.00
	5	0.27	0.55	1.04	1.02	0.99	1.01	1.00
	10	0.20	0.54	1.06	0.99	1.00	1.00	1.00
60°	0.5	0.40	0.45	0.60	0.85	1.04	1.03	1.00
	1	0.31	0.36	0.57	0.96	1.06	0.98	1.00
	2	0.22	0.28	0.55	1.08	0.96	0.98	1.00
	5	0.14	0.18	0.53	1.04	1.03	0.99	1.00
	10	0.10	0.13	0.52	1.07	0.98	1.00	1.00
90°	0.5	0.31	0.33	0.41	0.59	0.85	1.03	1.00
	1	0.22	0.24	0.33	0.56	0.96	1.05	1.00
	2	0.16	0.18	0.26	0.54	1.08	0.96	1.00
	5	0.10	0.11	0.16	0.53	1.04	1.02	1.00
	10	0.07	0.08	0.13	0.52	1.07	0.99	1.00
120°	0.5	0.25	0.27	0.31	0.41	0.60	0.87	1.00
	1	0.18	0.19	0.23	0.33	0.57	0.95	1.00
	2	0.13	0.14	0.17	0.26	0.55	1.07	1.00
	5	0.08	0.08	0.11	0.16	0.53	1.04	1.00
	10	0.06	0.06	0.07	0.13	0.52	1.06	1.00
150°	0.5	0.23	0.24	0.27	0.33	0.45	0.68	1.00
	1	0.16	0.17	0.19	0.24	0.36	0.63	1.00
	2	0.12	0.12	0.14	0.18	0.28	0.59	1.00
	5	0.07	0.08	0.08	0.11	0.18	0.55	1.00
	10	0.05	0.05	0.06	0.08	0.13	0.54	1.00
180°	0.5	0.20	0.23	0.25	0.31	0.40	0.61	1.00
	1	0.10	0.16	0.18	0.22	0.31	0.50	1.00
	2	0.02	0.12	0.13	0.16	0.22	0.40	1.00
	5	0.02	0.07	0.07	0.10	0.14	0.27	1.00
	10	0.01	0.05	0.06	0.07	0.10	0.20	1.00

Las variables  $\theta_o$ ,  $\theta$ , r y L están definidos en la fig

En la fig. 4.8 se muestra uno de estos diagramas. Cuando la relación entre la abertura y la longitud de onda es mayor a cinco, se consideran independientes la difracción en uno y otro extremos del rompeolas.

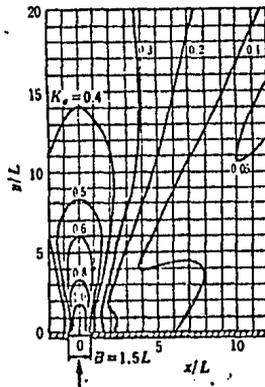


fig. 4.8 Diagrama de difracción

#### 4.2.2 Reflexión

El estudio de la reflexión del oleaje es importante en el diseño del recinto protegido. Oleaje de ciertas características respecto a la geometría del recinto puede reflejarse dentro de este, produciendo condiciones de agitación indeseables. La altura de la ola reflejada se puede estimar a partir de:

$$H_R = K_R H_I \quad (4.12)$$

donde:

- $H_R$  altura de la ola reflejada
- $H_I$  altura de la ola incidente
- $K_R$  coeficiente de reflexión

para valuar  $K_R$  puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$K_R = \frac{(H_I / L_I)_{crit}}{(H_I / L_I)} \quad (4.13)$$

donde:

- $\Omega$  coeficiente determinado experimentalmente. Igual a 1 para superficies lisas e impermeables, de 0.7 a 0.9 para superficies impermeables rugosas y de 0.3 a 0.6 para superficies permeables rugosas
- $H_I/L_I$  relación de esbeltez del oleaje incidente
- $(H_I/L_I)_{crit}$  relación de esbeltez crítica, debajo de la cual las olas se reflejan completamente; su valor se estima a partir de:

$$\left( \frac{H_I}{L_I} \right)_{crit} = \sqrt{\frac{\theta}{90^\circ}} \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \quad (4.14)$$

donde:

$\theta$  ángulo del talud a partir de la horizontal

independientemente, se han identificado coeficientes de reflexión para distintos tipos de estructura (tabla 4.2).

TABLA 4.2

	$K_R$
Muro vertical	0.8 - 1.0
Estructura con talud de 2 y 3	0.4 - 0.8
Estructura con bloques de concreto	0.2 - 0.4
Terraplenes	0.3 - 0.5
Playas	0.1 - 0.2

#### 4.3 Rompiente

Cuando el oleaje se acerca a la costa, disminuye su celeridad hasta que alcanza un punto en el que la velocidad de las partículas del agua es mayor que la celeridad y entonces la ola rompe disipando su energía.

Existen varios tipos de rompiente. Cuando la pendiente del fondo es moderada, se produce una rompiente continua (spilling) la cual disipa su energía en una distancia larga. Una pendiente mas fuerte genera una rom-

piente rodante (plunging) en la que la cresta de la ola se vuelca hacia adelante liberando su energía. En una pendiente fuerte, la ola se propaga hacia la costa donde produce una rompiente súbita (surging) prácticamente en la línea de costa.

Existe un procedimiento para determinar la altura ( $H_b$ ) y profundidad ( $d_g$ ) a la que rompe una ola sobre un fondo de pendiente uniforme.

- Se propone una altura de ola rompiente
- Se calcula  $H_b/gT^2$ . Con este valor y la pendiente del fondo  $m$ , de la fig. 4.9 se estima  $d_b/H_b$  y se despeja  $d_b$ .
- Con  $d=d_b$  se estima el coeficiente de refracción y se obtiene  $H'_0$  con la ecuación:

$$H'_0 = K_R H_0 \quad (4.15)$$

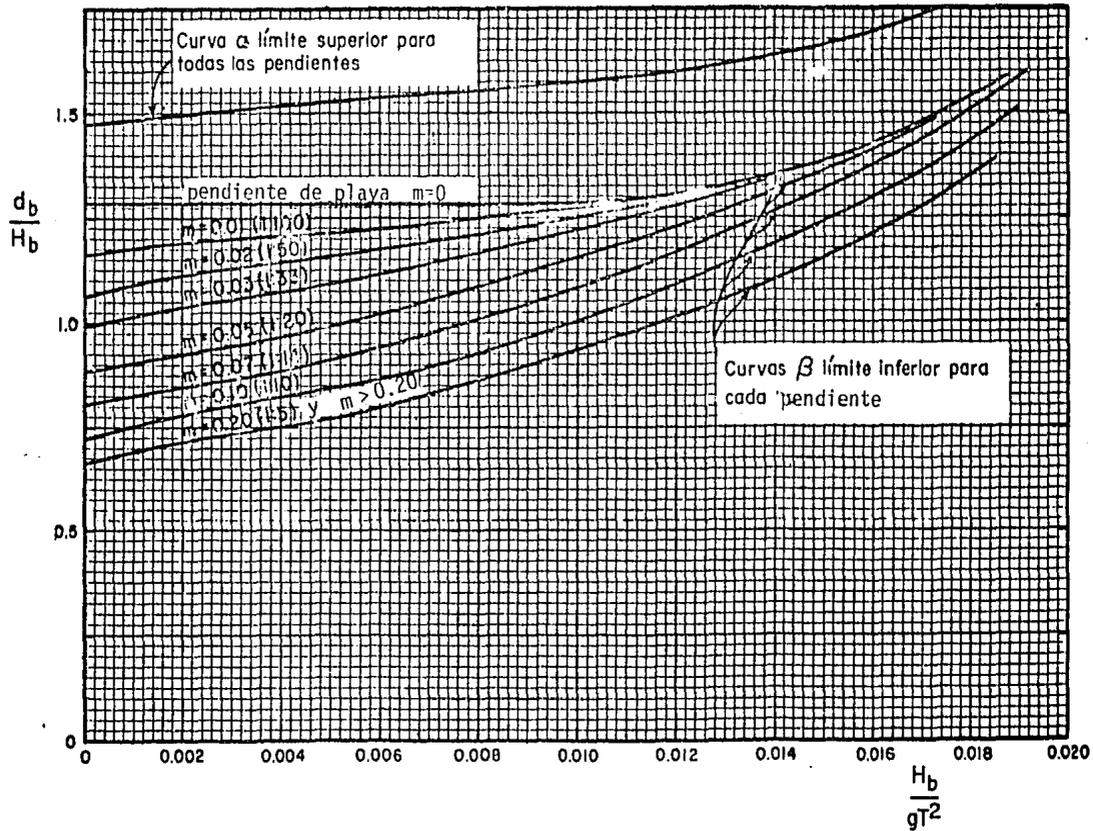
- Se calcula  $H'_0/gT^2$ . Con este valor y la pendiente del fondo  $m$ , de la fig. 4.10 se encuentra  $H_b/H'_0$ . De este cociente se calcula  $H_b$
- Si la altura  $H_b$  es muy parecida a la propuesta en el inciso a), está es la altura de interés y la profundidad de la rompiente ( $d_b$ ) es la obtenida en c).

Cuando se tiene una estructura marítima en aguas bajas, la rompiente es alterada. Para obtener la altura de rompiente y la profundidad en estas condiciones se utiliza el siguiente procedimiento.

Sea  $d_g$  la profundidad al pié de la estructura.

- Se estima  $H'_0$  en la cercanía de la estructura (ec. 4.15) y se le asigna el valor de A.
- Se calcula  $d_g/gT^2$ . Con este valor y la pendiente del fondo  $m$ , de la fig. 4.11 se estima  $H_b/d_g$  y se encuentra  $H_b$ .
- Con  $H_b/gT^2$  y la pendiente del fondo, de la fig. 4.12 se estima  $H_b/H'_0$ .

Fig. 4.9



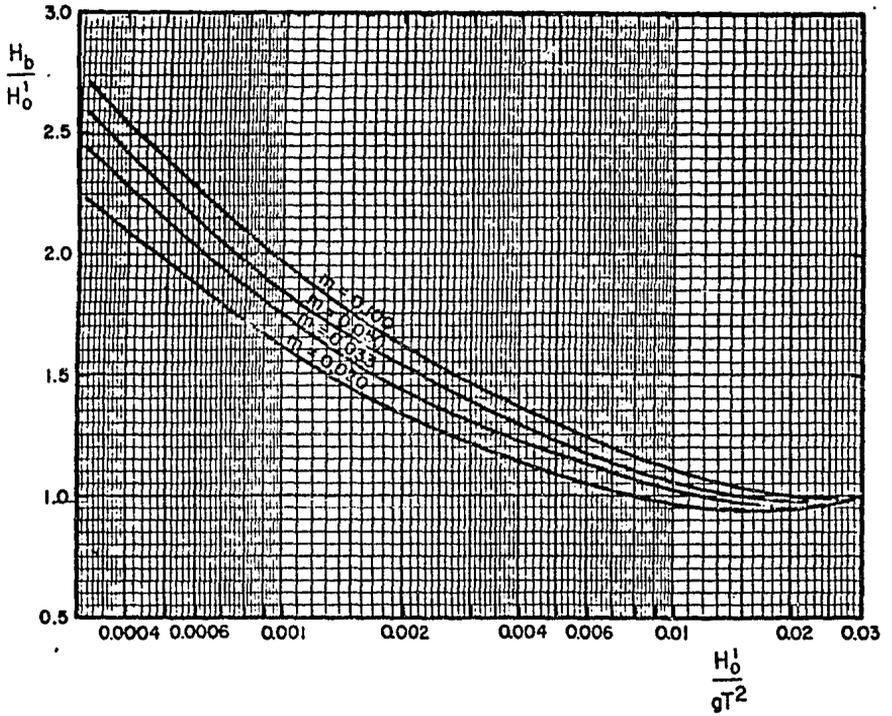


fig. 4.10



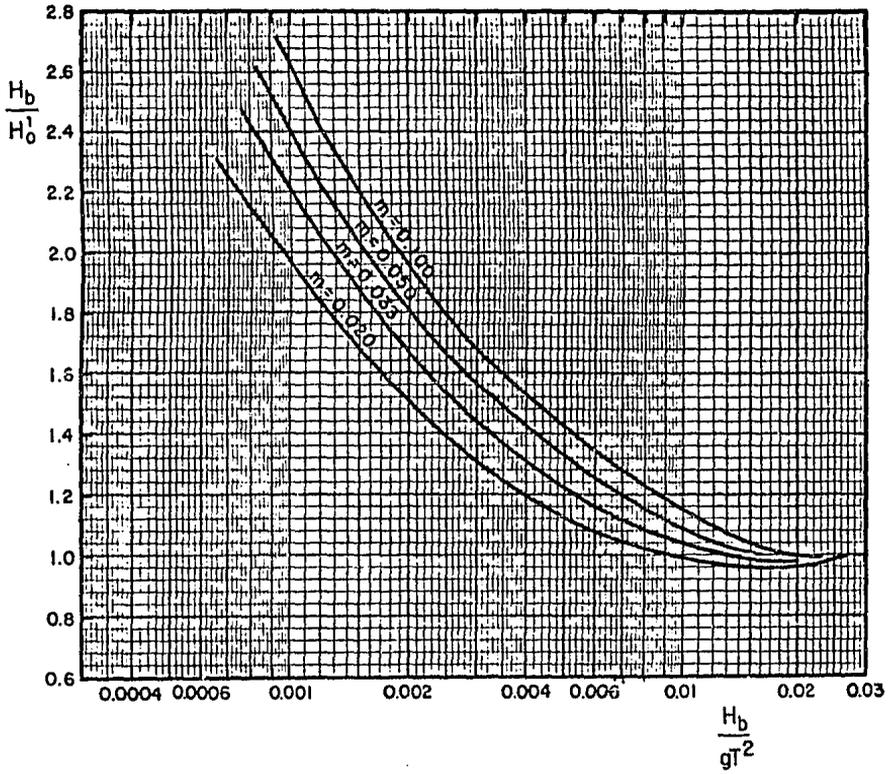


fig. 4.12

d) Se calcula  $H'_0$  del cociente  $H_b/H'_0$  obtenido en c). Se compara con la propuesta en a). Cuando  $A > H'_0$  el oleaje rompe antes de llegar a la estructura y se utiliza el primer procedimiento visto. Si  $A < H'_0$  o  $A$  es pa recida a  $H'_0$  ( $H'_0$  estimada en c) la altura de la rompiente es la estimada en b) y con  $H_b/gT^2$  y la pendiente del fondo, de la fig. 4.11 se obtiene  $d_b/H_b$  y de ahí  $d_b$ .

Una vez que ha roto, la ola sigue modificando su altura debido a la presen cia del fondo. En la fig. 4.13 se muestra un diagrama para calcular la altura de la ola una vez rota como función de de la pendiente del fondo y de la relación de la profundidad a la profundidad de rompiente. ( $d/d_b$ ).

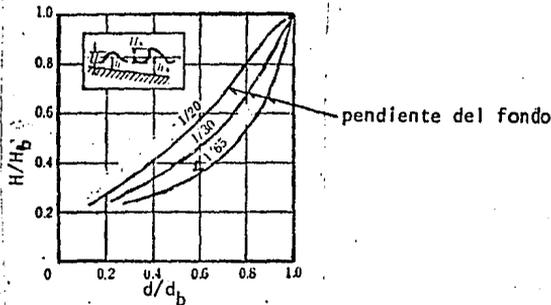


fig. 4.13 Altura de ola una vez que ha roto

#### 4.4 Alcance de la ola

Al encontrarse una ola con una estructura, su energía se convierte en energía potencial haciendo que la ola tienda a subir por la estructura. La distancia vertical desde el nivel de reposo hasta donde llega el agua se conoce como alcance de la ola (wave runup) (fig. 4.14). El alcance de la ola determina la altura mínima que debe tener una estructura para evitar ser rebasada.

La forma de determinar el alcance es mediante la siguiente ecuación:

$$R = f R_L \quad (4.16)$$

donde:

- R alcance de la ola sobre la estructura  
 f factor de corrección en función del material y acabado de la superficie  
 $R_L$  alcance teórico en una superficie lisa e impermeable

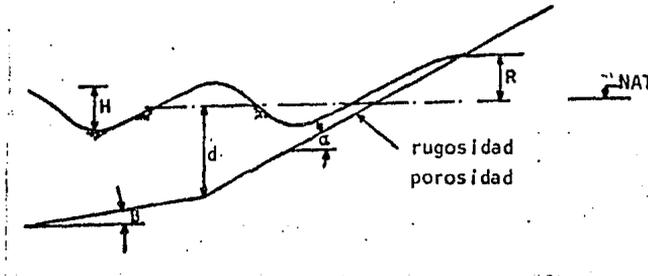


fig. 4.14 Alcance de la ola

En la ecuación del alcance de la ola se presentan tres condiciones:

- La ola ha roto antes de llegar a la estructura
  - La ola no ha roto antes de llegar a la estructura y no rompe sobre ella
  - La ola no ha roto antes de llegar a la estructura y rompe sobre ella.
- La ola ha roto antes de llegar a la estructura. Para determinar esto se utilizan los procedimientos del inciso 4.3 y el alcance se determina a partir de la figura 4.16 . Se escoge la figura a partir de la pendiente de la playa y el talud de la estructura, y con  $H_0/L_0$  y la curva correspondiente a  $d/L_0$  se determina el alcance.
  - La ola no ha roto y no rompe sobre la estructura. Esta situación se presenta si el ángulo del talud de la estructura es menor que cierto ángulo crítico  $\alpha_c$  ; que se puede calcular como:

$$\sqrt{\frac{2 \alpha_c}{\pi}} \frac{\sin^2 \alpha_c}{\pi} = \frac{H_o}{L_o} \quad (4.17)$$

o bien, mediante la fig. 4.15

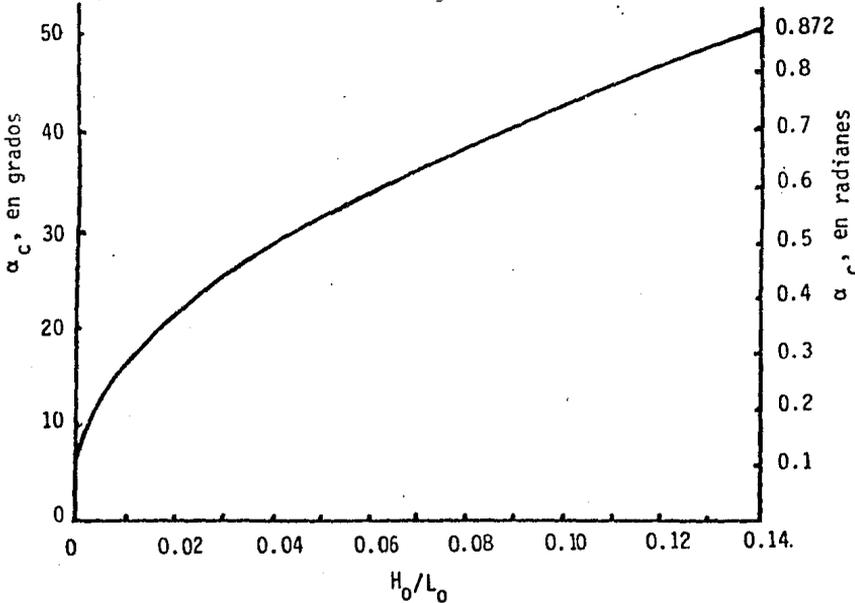


fig. 5.15 Estimación de  $\alpha_c$ .

Entonces el alcance se calcula mediante:

$$R_L = \left[ \sqrt{\frac{\pi}{2 \alpha}} + \pi \frac{H}{L} \coth kd \right] K_S H_o \quad (4.18)$$

c) La ola no ha roto y rompe sobre la estructura. Esto ocurre cuando  $\alpha < \alpha_c$  y el alcance teórico se estima como:

$$R_L = \left[ \sqrt{\frac{\pi}{2 \alpha}} + \pi \frac{H}{L} \coth kd \right] \left( \frac{\cot \alpha_c}{\cot \alpha} \right)^{2/3} K_S H_o \quad (4.19)$$

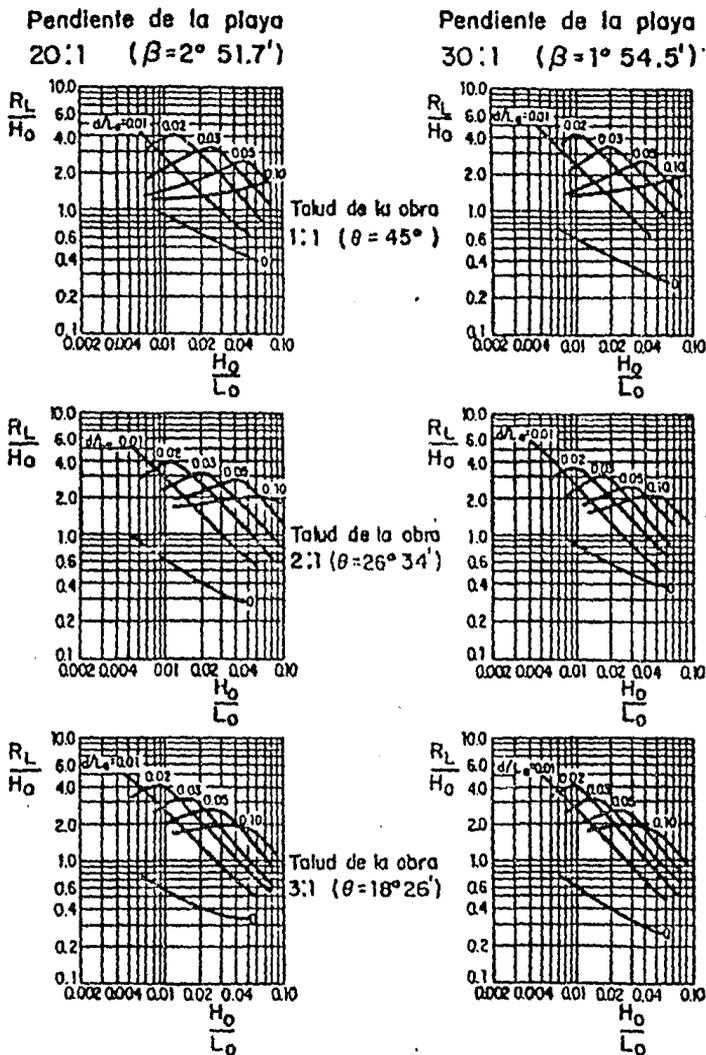


fig. 4.16 Alcance de la ola sobre una estructura

Por último, el alcance teórico debe afectarse por el factor  $f$  para obtener el alcance real. Este factor se muestra en la tabla 4.3 para los diferentes tipos de superficie.

TABLA 4.3

Material y acabado de la superficie	f
Losa de concreto	1.0 - 1.009
Capa de rezaga sobre una superficie impermeable	0.8
Piedra acomodada	0.75 - 0.8
Piedra redonda	0.6 - 0.8
Piedra volteo	0.5 - 0.6
Dos o mas capas de enrocamiento o rezaga	0.5
Elementos prefabricados	0.5
Mampostería (dos capas)	0.5 - 0.55
Mampostería (una capa)	0.8

## 5. CRITERIOS DE DISEÑO

Las escolleras y rompeolas son estructuras construidas dentro del mar, por medio de las cuales se logra aislar o proteger una zona del oleaje o de las corrientes.

El propósito de un rompeolas es dar protección contra las olas a una zona, ya que, a excepción del transporte de petróleo, todo el manejo de carga, general o a granel, se debe de realizar con un oleaje pequeño para que las maniobras de carga y descarga de las embarcaciones sean sin riesgo, tanto para ellas como para las estructuras de atraque. Los efectos del oleaje y las corrientes deben ser minimizados para obtener esta seguridad. La mejor manera en que, artificialmente, puede lograrse esta protección es mediante la construcción de diques, rompeolas, etc.

Una escollera puede servir para reducir la cantidad de dragado de mantenimiento a la entrada de un canal de navegación. Esto puede ser debido a la interrupción del transporte litoral o por aumento de la intensidad de la corriente en el canal debido a un estrechamiento en su entrada.

En localidades donde no existen protecciones naturales, el rompeolas puede proporcionar facilidades de atraque dependiendo del tipo de estructura de que se trate.

Otro uso importante que se le puede dar a una escollera es el de conducir corrientes en un canal de navegación o a lo largo de la costa.

Es evidente que un rompeolas tiene más de uno de los fines mencionados y que su diseño ha de ser de acuerdo a su función principal.

En ocasiones se menciona como sinónimo de rompeolas el de escollera. Estos términos, si bien muy parecidos, no significan precisamente lo mismo. Un rompeolas es una estructura de abrigo que brinda protección a una bahía o cuerpo de agua contra la acción del oleaje disminuyendo la fuerza destructiva del mismo. Por escollera se entiende una estructura que se adentra en un cuerpo de agua con el fin de dirigir o confinar una corriente, ya sea fluvial o de marea, hacia un canal determinado o para combatir el azolve. Una vez hecha esta aclaración en lo subsecuente se llamarán indistintamente. (fig. 5.1)

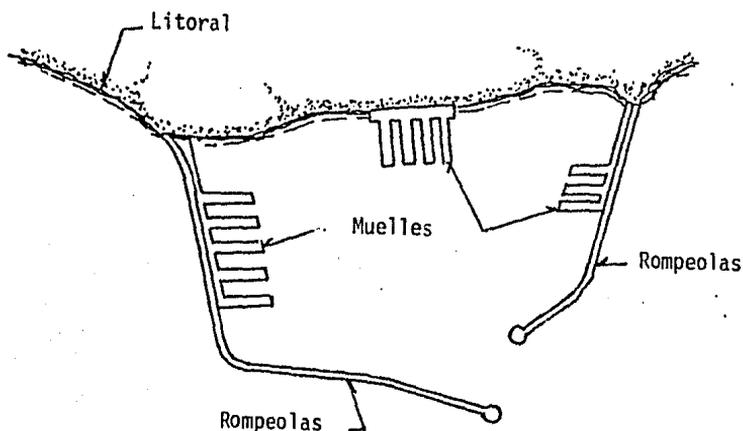


fig. 5.1a) Ejemplo de un rompeolas

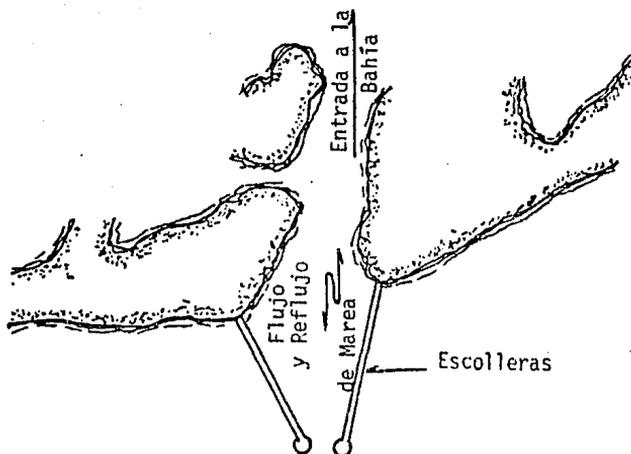


fig. 5.1b) Ejemplo de una escollera

fig. 5.1 Diferencia entre escollera y rompeolas

### 5.1 Tipos de escolleras

Existen dos grandes tipos de escolleras, las formadas por elementos sueltos y las de pared vertical. Las escolleras del primer tipo se identifican comúnmente por la clase de material que las constituye: roca natural, combinaciones de roca y concreto, elementos prefabricados de concreto y pueden ser complementadas por monolitos de concreto o diques para destruir la fuerza de las olas o prevenir el paso del agua sobre su corona.

En el segundo tipo de escollera entran formas como: paredes de bloques de concreto, cajones de concreto o células de tablestacas rellenas de roca o arena, filas de pilas de concreto o acero, bolsas rellenas de concreto, etc.

El tipo de escollera a utilizar está determinado por la disponibilidad de materiales en el lugar, la profundidad del agua, las condiciones mecánicas del fondo, la función del área protegida, el equipo y técnicas de construcción disponibles, etc.

En virtud de que la función principal de un rompeolas es brindar protección contra el oleaje, es evidente que el conocimiento de las fuerzas y sollicitaciones que impone el oleaje es fundamental en su diseño. Otro aspecto importante en el diseño son las características del fondo que, en última instancia, es quien absorbe los ataques contra la estructura.

Ya que la mayoría de estas estructuras basan su estabilidad en el peso propio, en rompeolas con pared vertical con profundidades mayores a 20 m, se recomienda hacer una cimentación de enrocamiento por debajo de este nivel, formandose con ello los rompeolas mixtos.

Existen diferencias considerables entre los dos tipos de rompeolas. Los de pared vertical difieren de los formados por elementos sueltos en la forma de resistir el oleaje. La pared vertical puede reflejar la ola sin liberar ninguna fuerza destructiva, produciendo una ola estacionaria conocida como clapotis (fig. 5.2a). Los rompeolas formados por elementos sueltos, disipan la energía por medio del ascenso de la ola por su talud. En estos casos la fricción ocasionada por la superficie irregular juega un papel importante en la disipación de la energía destructiva de la ola (fig.5.2b).

La forma de trabajo y las características geométricas de cada tipo de rompeolas les otorga ventajas y desventajas. Así por ejemplo los rompeolas de pared vertical tienen a su favor que:

- Generan mayor área protegida y tienen la posibilidad de contar con una entrada más estrecha al recinto protegido en virtud de la inclinación de sus paredes.
- Se puede utilizar fácilmente el costado protegido de la estructura para operaciones portuarias.

- Puede sujetarse a cálculos menos inciertos en su diseño debido a su forma de trabajo.
- El costo de mantenimiento es pequeño.
- Implica un ahorro considerable de material, sobre todo en aguas profundas.

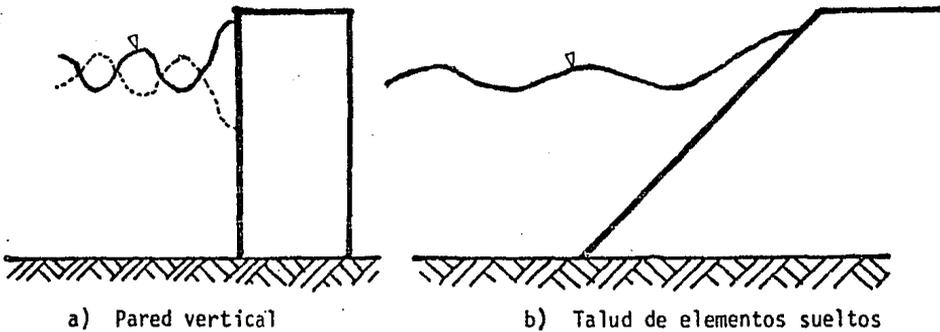


fig. 5.2 Funcionamiento de los diferentes tipos de rompeolas

Sin embargo, presentan estas desventajas:

- Las condiciones de cimentación deben ser excelentes para garantizar seguridad.
- No tiene la misma flexibilidad que la estructura de elementos sueltos para adaptarse a los asentamientos del suelo.
- Una vez dañado, su reparación es difícil y costosa.
- Por su forma de trabajo (reflejando la ola) la elevación de la corona es, en general, mayor que la de un rompeolas de talud.

En la tabla 5.1 se consignan, comparativamente, estas características.

TABLA 5.1

	Tipo de escollera	
	Elementos sueltos	Pared vertical
Costo Mantenimiento	Comparativamente mayor	Pequeño
Costo Reconstrucción	Pequeño	Grande
Entrada al Recinto	Ancha debido a los taludes	Más estrecha
Flexibilidad	Acepta asentamientos sin dificultad	No tolera asentamientos grandes
Diseño	Incertidumbre en los cálculos	Cálculos más certeros
Volumen de material	Grande (sobre todo en aguas profundas)	Menor
Condiciones del subsuelo	Acepta una variedad de condiciones	Deben ser excelentes

Existen otros tipos de escolleras que han sido utilizados aunque su eficiencia es muy baja, como son:

- Rompeolas neumáticos o hidráulicos, que mediante la eyección de aire o agua a presión logran hacer que la ola pierda energía disminuyendo su altura (fig. 5.3).

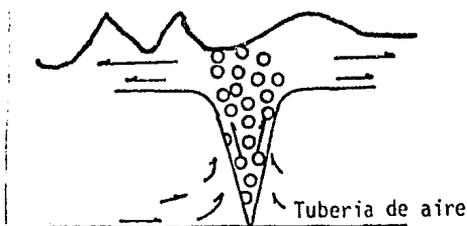


fig. 5.3 Rompeolas neumático

Esta clase de rompeolas se puede utilizar para proteger areas pequeñas en lapsos de corta duración. Sus principales ventajas son: la rapidez en su construcción; no afecta el tráfico de las embarcaciones; es esté tico (no se ve), no es dañado por el oleaje fuerte. En cuanto a sus desventajas, su costo de operación es elevado, es efectivo, solo en olas pequeñas, la tubería puede cubrirse de sedimentos si se utiliza con poca frecuencia.

- Los rompeolas flotantes, pueden ser rígidos o flexibles y se utilizan generalmente como una solución temporal. Entre sus ventajas están la facilidad de moverlo de un lado a otro, la rapidez en su construcción, y la independencia del fondo (a excepción de los anclajes). Entre sus desventajas se pueden citar: su poca eficiencia con oleaje grande, la posibilidad de entrar en resonancia con ciertas frecuencias de oleaje y sufre daños severos cuando las condiciones de diseño se exceden (fig. 5.4).

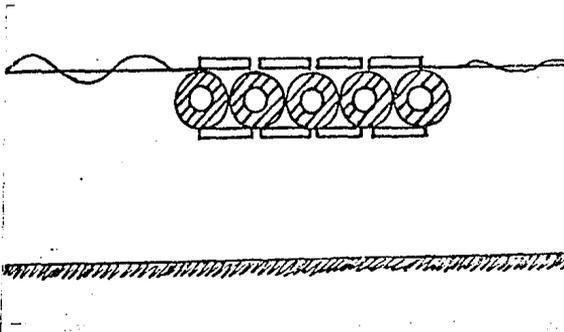


fig. 5.4 Rompeolas flotante

#### 5.1.1 Escolleras de elementos sueltos

Las escolleras de talud formadas por elementos sueltos han demostrado funcionar adecuadamente en las condiciones de oleaje y tipo de costas que se tienen en nuestro país; por eso el presente trabajo enfatizará en el diseño de este tipo de estructuras.

El uso que se haga del area protegida por la escollera de elementos sueltos es importante al determinar la posibilidad del paso de la ola sobre su corona. En general, mientras menos importante sea la actividad en la zona protegida mayor cantidad de agua podrá pasar sobre la corona. Por ejemplo, el rompeolas debe proteger la carga y descarga de contenedores, las condiciones de agitación deben ser mínimas y por consiguiente no se debe permitir el paso de agua sobre la corona. Por otro lado, si la función de la estructura es dirigir alguna corriente, el paso de las olas por la corona es de poca relevancia.

Si una escollera se diseña para que el agua pase sobre su corona, se deben tomar medidas para proteger el talud interno de la obra. Si la estructura no debe ser excedida, debe asegurarse que el agua no llegue al talud interno. Por esta razón un rompeolas sin paso del agua sobre su corona es de mayor altura.

Secciones representativas de estas clases de escolleras se presentan en las figs. 5.5 y 5.6.

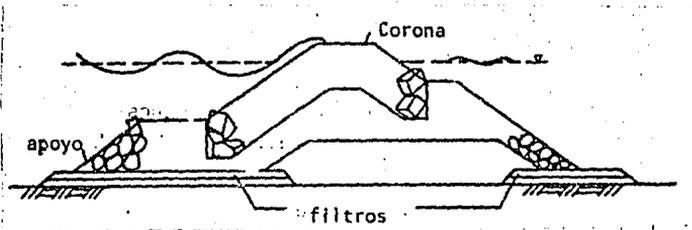


fig. 5.5 Escollera con paso del agua sobre su corona

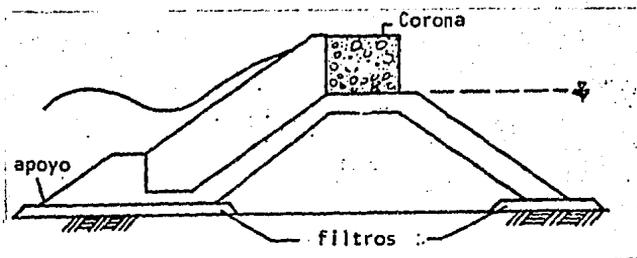


fig. 5.6 Escollera sin paso de agua por su corona

Los rompeolas de elementos sueltos están formados por capas superpuestas como se ve en las secciones transversales de las figuras anteriores. Como regla general, se puede decir que cada capa debe diseñarse para que el material mas fino bajo ella no escape por los vacíos entre sus elementos. Es decir, las capas superiores deben tener un efecto confinante. Obviamente las capas exteriores, tanto durante su construcción como al final de esta, deben ser capaces de soportar las sollicitaciones del oleaje. Asimismo, cada capa debe poder ser construida por el equipo y tecnología disponibles.

## 5.2 Materiales de construcción

Las escolleras están constituidas con material que se va depositando en capas hasta obtener su configuración final. Existen ciertas características que deben tener estos materiales.

### 5.2.1 Propiedades necesarias en los materiales

El material debe ser capaz de resistir la intemperie a lo largo de la vida útil de la estructura. Las olas, especialmente las rompientes, ejercen fuertes presiones dinámicas en los materiales. Las fuerzas de impacto son mayores en superficies planas, por lo que las secciones de superficie irregular son las mas utilizadas. El agua de mar y contaminantes propios de la operación portuaria, pueden atacar químicamente los materiales de la estructura.

Adicionalmente a la resistencia al ambiente, los materiales deben tener una densidad relativamente alta. Como se verá mas adelante, el peso de la coraza de la escollera depende estrechamente de la densidad del material. Evidentemente el material debe ser mas denso que el agua pero, además, la resistencia al desplazamiento debida a la fricción depende del peso sumergido.

Es conveniente que el rompeolas sea económico, ya que en él se utiliza un gran volumen de material. Como se explicará, la economía no signifi

ca necesariamente lo mas barato. Por ejemplo, el uso de concreto para elementos prefabricados puede resultar mas económico que la roca, una vez que se contemplan los ahorros en equipo y material de construcción.

### 5.2.2 Propiedades deseables

Aunque las siguientes propiedades no son indispensables, su existencia ha probado hacer mas económica la estructura.

Materiales con una relación de vacios alta, tienen mayor capacidad para disipar la energía del oleaje, además de dar valores mas bajos de peso total de la estructura. Esta característica puede estar en contraposición con la capacidad de retener los elementos de las capas interiores. Un criterio en cuanto a la granulometría de las capas para que su funcionamiento confinante sea efectivo es:

$$D_{15}(\text{superior}) = 5 D_{85}(\text{inferior}) \quad (5.1)$$

donde:

- $D_{15}$  tamaño tal que, el 15%, en peso del material sea menor o igual
- $D_{85}$  tamaño tal que, el 85%, en peso del material sea menor o igual

Cuando existe cierta trabazón entre los elementos de la coraza, la resistencia a las fuerzas del oleaje aumenta debido a que dichas fuerzas se reparten entre los elementos interconectados. Sin embargo, si esta trabazón se pierde, pueden resultar daños grandes en la estructura.

### 5.3 Dimensionamiento

La sección transversal de la escollera está compuesta, como ya se mencionó, por diferentes capas. Estas se enumeran a continuación:

- **CORAZA.** Es la capa que resiste la acción del oleaje, y está formada por una o dos capas de elementos. El tamaño de los elementos se determina mediante la fórmula de Hudson.

- **CAPA SECUNDARIA.** Sirve de soporte a los elementos de la coraza y actúa como filtro para contener el material de la capa interior que es el núcleo. Pueden existir una o dos capas secundarias, cada una formada por dos capas de elementos.
- **NUCLEO.** Es el soporte y relleno de la estructura y es de tipo masivo.
- **FILTROS Y APOYOS.** Sirven como ayuda para evitar hundimientos excesivos de la estructura, así como socavaciones en su base.

En la fig. 5.7 se muestra la sección transversal típica de una escollera.

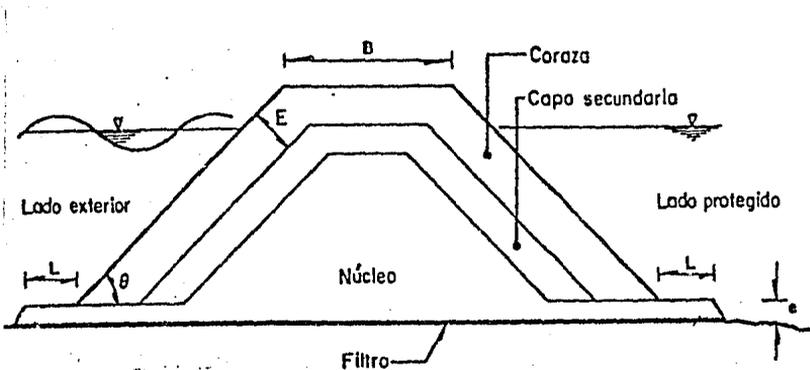


fig. 5.7 Sección transversal de una escollera

Para diseñar una escollera es necesario tomar en cuenta estos factores:

- Características del oleaje en aguas profundas y frente a la estructura; así como el conocer si la ola es rompiente o no.
- La disponibilidad de materiales de construcción. Distancia y calidad de los bancos de roca en la zona para determinar la conveniencia o no de elementos prefabricados.
- Algunas características geométricas de la estructura como el ángulo de inclinación del talud, si la sección pertenece al cuerpo de la escollera o a la parte final (morro).

- Funciones especiales de la escollera, por ejemplo, la necesidad de visibilidad a cierta distancia de la estructura puede tener implicaciones en la elevación de la corona.
- El ángulo de ataque de las olas puede influir en el tipo de elemento de la coraza.

### 5.3.1 Coraza

La estabilidad de los elementos de la coraza depende de su peso y características geométricas. En 1953, Hudson propuso una ecuación basada en el estudio de datos de modelos. La ecuación es la siguiente:

$$W = \frac{\gamma H^3}{K_D \Delta^3 \cot \theta} \quad (5.2)$$

donde:

- W peso del elemento en kg
- H altura de la ola en m
- $K_D$  coeficiente de estabilidad adimensional
- $\theta$  ángulo de inclinación del talud respecto a la horizontal en grados

$$\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

- $\gamma_s$  peso específico del material en  $\text{kg/m}^3$
- $\gamma$  peso específico del agua donde está la estructura en  $\text{kg/m}^3$

La ecuación de Hudson presenta varias ventajas respecto a otras ecuaciones similares y ha sido verificada tanto en modelos como en prototipos. Sin embargo tiene algunas limitaciones:

- a) Es válida para pendientes tales que  $\cot \theta$  sea mayor a 1.5 ( $\theta < 33.7^\circ$ )
- b) Fue desarrollada para la parte exterior de la escollera sujeta a oleaje no rompiente. Esto implica que la profundidad al pie de la estructura (d) es suficientemente grande para que las olas incidentes no rompan o sean inestables. Cuando este no es el caso ( $H/d > 0.6$ ) el efecto se

puede tomar en cuenta disminuyendo el valor de  $K_D$  (este valor es cercano al 87% del correspondiente para olas no rompientes).

c) Es solo válida para la parte exterior del rompeolas. No se considera la acción del oleaje sobre la corona o el talud protegido. Se considera que la elevación de la corona es superior al alcance de la ola.

d) Las características del oleaje están determinadas por su altura  $H$ , y aunque el efecto de la ola rompiente se puede considerar, la duración de las condiciones del oleaje no se toma en cuenta. Se ha encontrado que el daño es razonablemente independiente de la duración, excepto cuando la altura de la ola de diseño es excedida en más del 30%.

En general, la altura de la ola de diseño es la altura significativa ( $H_g$ ), las pruebas originales fueron realizadas con ondas monocromáticas. Estudios posteriores demostraron el peligro de sustituir la altura significativa por una altura regular. Se encontró que el daño causado por un espectro de olas con cierta altura significativa es mayor que el causado por olas monocromáticas de la misma altura. Este efecto se hace más pronunciado a medida que el espectro se ensancha. En última instancia esta deficiencia puede subsanarse escogiendo una altura de ola mayor.

A pesar de que la ecuación se obtuvo para el cuerpo principal de la escollera, tiene aplicación en el diseño del morro y capas secundarias.

#### 5.3.1.1 Valores característicos de los elementos de la coraza

Afortunadamente, las propiedades de los elementos de la coraza se pueden expresar mediante cuatro parámetros, dos de los cuales ya se mencionaron y son de importancia para la estabilidad. Los otros parámetros son fundamentales en el dimensionamiento y evaluación del costo de la escollera.

- El peso específico del material ( $\gamma_s$ ). Es la única propiedad intrínseca del material que se toma en cuenta por lo que se tratarán brevemente las densidades de algunos materiales de uso común.

El granito es una roca de uso frecuente en corazas. Tiene un peso espe-

cífico entre 2650 y 3000 kg/m<sup>3</sup> y en la mayoría de los casos cerca de 2700 kg/m<sup>3</sup>. El basalto, otra roca comunmente usada tiene un peso específico de 2900 kg/m<sup>3</sup>. En muy contados casos se utiliza piedra caliza en un rompeolas; su baja resistencia al ataque del medio ambiente y su baja densidad (2300 - 2750 kg/m<sup>3</sup>) son un problema. Los elementos de concreto tienen un peso específico entre 2300 y 3000 kg/m<sup>3</sup>. Los agregados especiales para aumentar este peso específico han demostrado ser antieconómicos. El concreto debe tener una resistencia a los 28 días de 300 kg/cm<sup>2</sup> y se debe tener cuidado en que los elementos no sean muy frágiles.

- El coeficiente de estabilidad ( $K_D$ ). Muchas propiedades de los elementos se expresan mediante este coeficiente.

- a) La forma de los elementos de la coraza, es decir, rocas o elementos prefabricados como tetrápodos, cubos, etc.
- b) El número de unidades que constituyen el espesor de la coraza (generalmente son dos).
- c) La forma de colocar los elementos; al azar o acomodados.
- d) El tipo de ola que incide sobre la estructura, rompiente o no rompiente.
- e) Localización del elemento a lo largo de la estructura, es decir, si se trata del cuerpo o del morro.
- f) La rugosidad y grado de trabazón de los elementos.
- g) Porcentaje de daños admitido al actuar el oleaje de diseño.

- Coeficiente de capa ( $K_A$ ). Indica el grado de empaque que tienen los elementos y se utiliza para calcular el ancho de la capa. (tabla 5.2)

- Porosidad ( $n$ ). El volumen de vacíos en la capa de la coraza se representa en porcentaje por la porosidad y es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la coraza. (tabla 5.2)

#### 5.3.1.2 Elección de los elementos de la coraza

En la tabla 5.3 se presentan los valores de  $K_D$ . En los valores de esta

TABLA 5.2

ELEMENTO DE CORAZA	N	COEFICIENTE ( $K_{\Delta}$ )	POROSIDAD (n)
ROCA DE CANTERA (LISA)	2	1.02	38
ROCA DE CANTERA (RUGOSA)	2	1.15	37
ROCA DE CANTERA (RUGOSA)	3	1.10	40
CUBO MODIFICADO	2	1.10	47
TETRÁPODO	2	1.04	50
CUADRÍPODO	2	0.95	49
HEXÁPODO	2	1.15	47
TRIBARRA	2	1.02	54
TRIBARRA *	1	1.13	47
DOLOS	2	1.00	63

\* COLOCACIÓN UNIFORME

TABLA 5.3 Valores recomendados de  $K_D$  para determinar el peso de las unidades de coraza

Tipo de elementos en la coraza	n(1)	Colocación	Cuerpo (tronco) de la escollera $K_D$ (4)		Horro de la escollera $K_D$		Talud cot θ
			Ola rompiente	Ola no rompiente	Ola rompiente	Ola no rompiente	
Roca de cantera Lisa y redondeada	2	Azar	2.1	2.4	1.7	1.9	1.5 a 3.0
Lisa y redondeada	> 3	Azar	2.8	3.2	2.1	2.3	(5)
Rugosa y angulosa	1	Azar(2)	(2)	2.9	(2)	2.3	(5)
Rugosa y angulosa	2	Azar	3.5	4.0	2.9 2.5 2.0	3.2 2.8 2.3	1.5 2.0 3.0
Rugosa y angulosa	> 3	Azar	3.9	4.5	3.7	4.2	(5)
	2	Especial(3)	4.8	5.5	3.5	4.5	(5)
Tetrápodo y Cuadrípodo	2	Azar	7.2	8.3	5.9 5.5 3.7	6.6 6.1 4.1	1.5 2.0 3.0
Tribar	2	Azar	9.0	10.4	8.3 7.8 7.0	9.0 8.5 7.7	1.5 2.0 3.0
Dolos	2	Azar	22.0(6)	25.0(6)	15.0 13.5	16.5 15.0	2.0(7) 3.0
Cubomodificado	2	Azar	6.8	7.8	--	5.0	(5)
Hexápodo	2	Azar	8.2	9.5	5.0	7.0	(5)
Tribar	1	Uniforme	12.0	15.0	7.5	9.5	(5)

- (1) Número de elementos de la capa de coraza
- (2) El uso de una capa de coraza formada con un solo elemento de roca sujeta a olas rompientes no es recomendada y sólo bajo condiciones especiales para olas no rompientes. Cuando se emplee las rocas se deben colocar cuidadosamente
- (3) Colocación especial con el eje longitudinal de la roca puesto en dirección perpendicular al paramento de la escollera
- (4) Aplicable en taludes comprendidos entre 1.5:1 y 5:1
- (5) Hasta no tener más información disponible acerca de la variación de  $K_D$  con respecto al talud, el uso de  $K_D$  deberá limitarse a taludes comprendidos entre 1.5:1 y 3:1. Esto se debe a que los resultados de algunas pruebas indican dependencia del valor de  $K_D$  con el talud
- (6) Datos disponibles únicamente para taludes 2:1
- (7) Pendientes mayores de 2:1 no son recomendables en la actualidad

tabla se admite un daño entre el 0 y 5%. El porcentaje de daños se refiere al porcentaje de los elementos de la coraza, en un área expuesta a la acción del oleaje, que son desplazados de manera que no puedan seguir cumpliendo su función de coraza. En la misma tabla se muestran los valores para ola rompiente y no rompiente, si la sección es del morro o del cuerpo de la escollera y el número de elementos que forman el espesor de la coraza.

Si se está dispuesto a aceptar cierto daño en la escollera, se puede disminuir el valor de  $K_D$  de la ecuación 5.2. En la tabla 5.4 se muestran valores de  $K_D$  para diferentes porcentajes de daños admitidos.

TABLA 5.4

Tipo de elemento		Daños, en porcentaje (D)						
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50
Roca de cantera (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
Roca de cantera (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
Tetrápodo y cuadrípodo	$H/H_{D=0}$	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
Tribar	$H/H_{D=0}$	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

Si se escoge un tipo de elemento de escollera con peso (D), las variables por determinar en la ecuación de Hudson son H y  $K_D$ . La ec. 5.2 se puede escribir como:

$$K_D = \frac{\gamma_s H^3}{W \Delta^3 \cot \theta} \quad (5.3)$$

Aceptando cierto porcentaje de daños:

$$K_D^* = \frac{\gamma_B H^{*3}}{W \Delta^3 \cot \theta} \quad (5.4)$$

donde:

$K_D^*$  coeficiente de estabilidad para cierto porcentaje de daños  
 $H^*$  altura de ola que produce el porcentaje de daños elegido

De las ecs. 5.3 y 5.4 se puede obtener la relación:

$$\frac{K_D^*}{K_D} = \left( \frac{H^*}{H} \right)^3 \quad (5.5)$$

o bien:

$$\frac{H^*}{H} = \left( \frac{K_D^*}{K_D} \right)^{1/3} \quad (5.6)$$

Se utiliza: la ec. 5.6 para comparar diferentes elementos. En la tabla 5.4 se presentan las relaciones  $H^*/H$  para diferentes porcentajes de daños admitidos. En la fig. 5.8 se presentan graficados los valores de  $H^*/H$  de diferentes elementos.

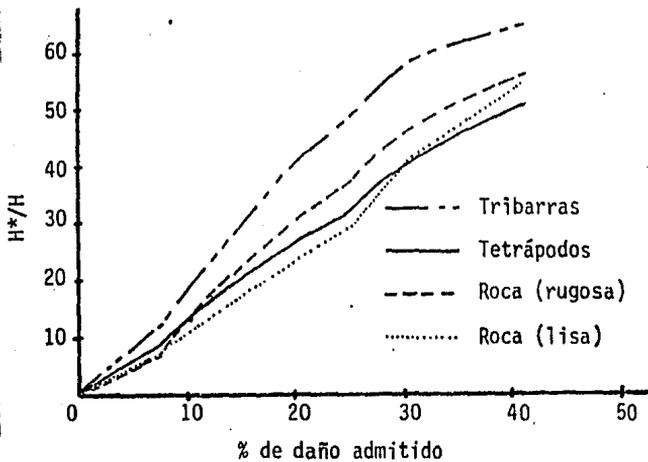


fig. 5.8 Valores de  $H^*/H$  para diferentes daños admitidos

Se debe tener cuidado al hacer conclusiones de estas gráficas, pues no se indica nada respecto al peso total de los diferentes elementos o a la diferencia de costos de los mismos.

Los datos requeridos para elaborar la fig. 5.8 están disponibles solo para algunos elementos, para oleaje no rompiente, en el tronco de la estructura y con dos capas de elementos colocados al azar. Se recomienda hacer pruebas en modelos para otros tipos de elementos y condiciones.

Otro factor en la elección del tipo de elemento es la resistencia estructural del mismo. Recientemente han ocurrido fallas en rompeolas debido a la ruptura de los elementos por no poder resistir las cargas a los que fueron sometidos. Este problema surgió cuando los diseñadores fueron mas allá de la experiencia en el uso de dolos, tetrápodos y otros elementos esbeltos al aplicarlos a problemas de mayor escala (grandes profundidades y alturas de ola). Como ya se mencionó este tipo de elementos tiene gran estabilidad hidráulica debido a los efectos de trabazón entre los mismos; por otra parte esta trabazón produce mayores esfuerzos estáticos y dinámicos bajo el ataque del oleaje. Aunque estos problemas no son de importancia en obras pequeñas, el diseño estructural de los elementos de gran dimensión llega a ser relevante.

Un tipo especial de elementos de coraza es el llamado "bolsacreto". El desarrollo de las fibras textiles en los últimos años ha permitido el desarrollo de cimbras flexibles de gran resistencia. Esto permite la fabricación de los elementos de la coraza en el sitio de su colocación de proyecto. La tecnología de fabricar las rocas de la coraza "in-situ" es originalmente mexicana y presenta muchas ventajas de orden técnico, social y económico. El equipo requerido no necesita de grandes inversiones en infraestructura como puede ser la construcción de caminos para el acceso de vehículos pesados. La mano de obra no requiere de gran especialización, por lo que puede utilizarse la local. Si bien este tipo de obras que se puede realizar con este sistema no tiene dimensiones excesivamente grandes, el método puede ser utilizado para iniciar el desarrollo económico de cierto lugar.

Un último factor que se tratará en la elección del tipo de elemento es el ángulo de ataque del oleaje. En una escollera, el ángulo de ataque no es importante para la estabilidad de la coraza. La estabilidad se mantiene constante mientras el ángulo de incidencia es menor a  $45^\circ$ . Después de esto, la estabilidad aumenta. Sin embargo los elementos con un alto grado de trabazón, como los dolos, sufren de pérdida de estabilidad cuando el ángulo de incidencia es oblicuo, especialmente en taludes empinados. Esta característica se ejemplifica con la fig. 5.9. Según la figura, la falla ocurre más rápidamente a medida que el ángulo se incrementa de 0 a  $60^\circ$ , para después lograr mayor estabilidad.

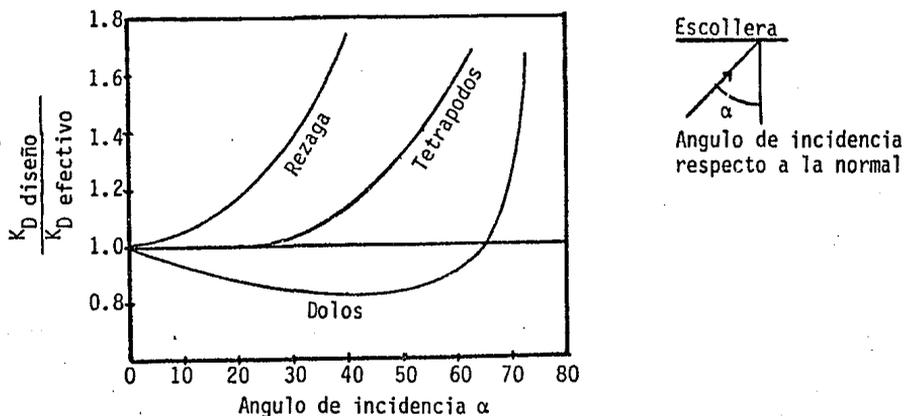


fig. 5.9 Estabilidad de la coraza en función del ángulo de incidencia

### 5.3.1.3 Sensibilidad de la fórmula de Hudson

En un problema de diseño, no todos los parámetros de la ecuación de Hudson se pueden determinar exactamente. Por consiguiente es conveniente estimar la influencia de pequeños cambios en los parámetros en el valor resultante del peso del elemento. Por conveniencia se reproduce la ec. 5.2:

$$W = \frac{\gamma_s H^3}{K_D \Delta^3 \cot \theta} \quad (5.2)$$

Asumiendo constantes todos los parámetros menos la altura del oleaje se tiene:

$$W = C H^3 \quad (5.7)$$

Al incrementarse en 10% la altura de la ola, el peso lo hace en 33%. Al disminuir la altura en 10% el peso disminuye 27%. La ecuación multiplica los pequeños errores en la estimación de la altura de la ola.

Al aumentar la densidad del elemento de la coraza en 10% se disminuye en 30% el peso del mismo. Por el contrario, si la densidad disminuye 10%, el peso aumenta en 55%. Este aspecto es importante al elegir el tipo de roca si se tienen varios disponibles. Por ejemplo, granito ( $\gamma_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ) y basalto ( $\gamma_s = 2900 \text{ kg/m}^3$ ) suponiendo el peso específico del agua igual a  $1025 \text{ kg/m}^3$ , la relación de pesos es:

$$\frac{W_{\text{granito}}}{W_{\text{basalto}}} = \frac{2650}{(2650-1025)^3} \times \frac{(2900-1025)^3}{2900} = 1.4 \quad (5.8)$$

es decir, los elementos deben ser 40% más pesados que los de basalto para proporcionar la misma estabilidad.

#### 5.3.1.4 Otras aplicaciones

- Morro. Es de esperarse que la forma convexa del morro aumente la exposición de la coraza al ataque de las olas. Esta convexidad puede disminuir la trabazón entre los elementos. Estos efectos pueden tomarse en cuenta en la fórmula de Hudson disminuyendo apropiadamente el valor de  $K_D$ . Esta reducción es del orden de un 10 a un 40% dependiendo del tipo de elemento. La disminución es mayor en elementos con  $K_D$  grande (mayor efecto de trabazón) (tabla 5.3). En algunos casos la disminución del  $K_D$  es compensada seleccionando pendientes más tendidas de manera que se pueda utilizar el mismo tamaño de elemento.

- Capa secundaria. La escollera debe ser estable tanto durante su construcción como en su vida útil. Por eso es importante que las capas bajo la coraza sean dimensionadas para soportar las condiciones adversas que se puedan presentar durante el periodo de construcción. La ec. 5.2 puede ser aplicada directamente a este problema de manera semejante a como se hace con la coraza. Considerando que el tiempo de exposición es menor, puede utilizarse una tormenta (altura de ola) menos severa. Generalmente, esta segunda capa está formada por elementos de alrededor de la décima parte del peso de los de la coraza (suponiendo que la coraza está hecha con el mismo tipo de elemento).

- Talud interno. La fórmula de Hudson puede utilizarse para evaluar la estabilidad del talud interno de la escollera sujeto al ataque directo de las olas provenientes del lado protegido. Estas olas pueden ser generadas por el paso de embarcaciones, por el oleaje difractado en la entrada al recinto o bien por el paso de la ola sobre la corona de alguna otra parte de la estructura. La fórmula no es adecuada para estimar el peso de los elementos de la coraza con olas provenientes del lado exterior de la estructura. Un estudio en modelo es lo más conveniente para determinar el comportamiento de la obra en estas circunstancias.

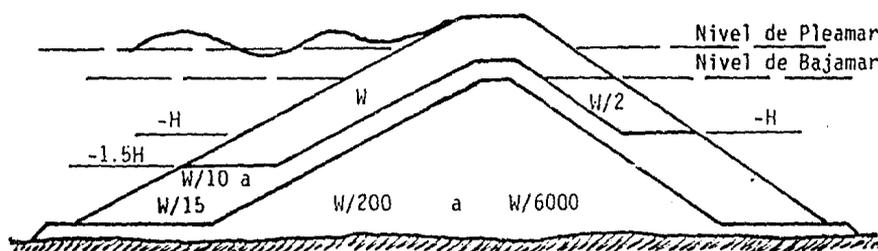
- Corona. La ec. 5.2 también es inadecuada para dimensionar los elementos de la corona de la escollera con paso del agua sobre ella. Una vez más es recomendable el estudio en modelo.

### 3.3.1.5 Ancho y espesor de la coraza

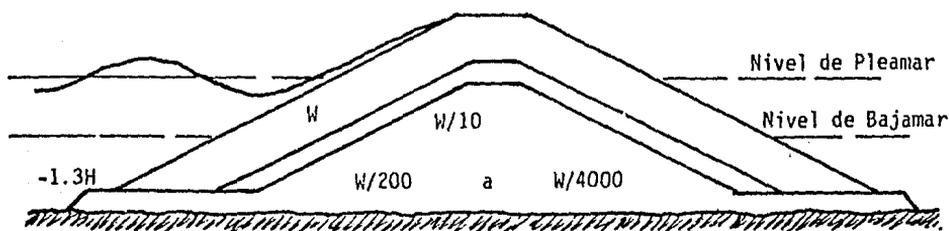
En virtud de que el costo de la coraza puede ser el más significativo, es ventajoso limitar el área cubierta por esta tanto como sea consistente con las condiciones de estabilidad.

Solo algunas fórmulas aproximadas existen con respecto a estas dimensiones de la coraza y en función de la importancia del proyecto, deberán revisarse con un modelo.

Los elementos de la coraza deben extenderse hasta una elevación igual a la altura de la ola de diseño, medido a partir del nivel de bajamar, o de  $1.5H$  a partir del nivel de pleamar, la que resulte mas crítica, cuando la profundidad es mayor a  $1.5H$ . Si la profundidad es menor de  $1.5H$ , la coarza debe extenderse hasta los apoyos (fig.5.10).



a) Profundidad mayor a  $1.5H$



b) Profundidad menor a  $1.5H$

fig. 5.10 Elevación de la coraza

La coraza se extiende sobre el talud expuesto por lo menos hasta la altura de la corona. Si esta se ha escogido de manera que el alcance de la ola no llegue a ella, no hay razón para extender la coraza sobre la corona o el talud interior. Es antieconómico construir una escollera de altura mayor a la necesaria para evitar el paso de la ola por la corona. Alguna razón para aumentar la altura podría ser la necesidad de visibilidad, pero es mas conveniente instalar un sistema adecuado de señalización. No obstante, como se verá despues, el método constructivo puede tener influencia en este aspecto.

Por otro lado, si se espera que la corona sea rebasada por el oleaje, la coraza debe extenderse sobre la corona y el talud interior hasta una elevación ligeramente inferior al nivel de bajamar (fig. 5.10).

Cuando se construye una corona monolítica para proveer soporte a cierto tipo de elementos (tribarras, tetrápodos) generalmente no se admite el paso de la ola. El aumento de altura requerido para prevenir lo anterior se ve compensado con pendientes mas pronunciadas y facilidad en la construcción del lado protegido.

El ancho de la coraza puede ser calculado como sigue:

$$E = m K_{\Delta} \left[ \frac{W}{\gamma_s} \right]^{1/3} \quad (5.8)$$

donde:

- m número de capas transversales de elementos; generalmente 2
- K coeficiente empírico de capa
- W peso del elemento en toneladas
- $\gamma_s$  peso volumétrico del elemento en ton/m<sup>3</sup>

El número de elementos de coraza por unidad de area puede ser estimado mediante:

$$C = m K_{\Delta} (1-n) \left[ \frac{\gamma_s}{W} \right]^{2/3} \quad (5.9)$$

donde:

- n porosidad de una capa de elementos

### 5.3.1.6 Ancho y elevación de la corona

La elevación de la corona queda condicionada por alguno de los siguientes factores: las condiciones de oleaje, el método constructivo.

Si se diseña la escollera para que el agua no pase sobre ella, la elevación estará determinada por el alcance de la ola de diseño. Si la estructura ha de construirse con equipo sobre ella, la elevación será la necesaria para la circulación, mas el espesor que se haya determinado para la capa secundaria y la coraza, La elevación que se considera apropiada para que el equipo pueda trabajar eficientemente es la del nivel de pleamar mas un bordo libre de unos 50 cm, siempre y cuando el oleaje lo permita. De las condiciones anteriores se deberá escoger la de elevación mayor.

El ancho de la corona está determinado por el paso o no del agua sobre ella, así como por los requerimientos constructivos. Cuando no hay paso de agua, el ancho no se ve afectado por la ola. Si se espera el paso sobre la corona, el ancho debe ser por lo menos el suficiente para colocar tres elementos de coraza sobre ella y se tiene:

$$B = m' K_{\Delta} \left( \frac{W}{\gamma_s} \right)^{1/3} \quad (5.10)$$

donde:

$m'$  número de elementos sobre la corona; generalmente 3

Cuando la escollera va a ser construida o mantenida por equipo trabajando sobre su corona, el ancho estará determinado por el requerido para el eficiente uso del equipo.

### 5.3.2 Núcleo

#### 5.3.2.1 Función del núcleo

La primera función del núcleo de una escollera es brindar apoyo a las capas superiores y mantenerlas en su lugar. Una función secundaria, cuando

la estructura debe contener el arrastre litoral, es su relativa impermeabilidad a la arena. En la práctica no se diseñan escolleras que sean impermeables a la arena; ya que el crecimiento de flora y fauna marina en ella, reduce significativamente su impermeabilidad en unos años.

Ocasionalmente se requiere que la escollera sea impermeable al agua. Esto es importante cuando, por ejemplo, la estructura sirve para guiar el agua de enfriamiento en una planta termoeléctrica. En estos casos, la descarga directa del efluente a la zona de la toma, puede ser perjudicial para la eficiencia termodinámica de la planta. El núcleo debe construirse con especificaciones especiales.

El tipo de material del núcleo puede influir en los elementos de la coraza. A medida que el núcleo se hace más impermeable, la energía aplicada sobre las capas superiores se hace más intensa, haciendo el efecto del leaje más importante.

#### 5.3.2.2 Materiales del núcleo

A causa de que, prácticamente cualquier material no flotante es adecuado para usarse en el núcleo, la elección del material está generalmente condicionada por requerimientos constructivos o económicos.

Cuando se utiliza roca para la coraza, la rezaga obtenida en la cantera puede ser usada ventajosamente en el núcleo. Debido a su distribución granulométrica este material forma un núcleo más o menos impermeable y compacto. Si este tipo de material bien graduado no está disponible, pueden utilizarse bloques de concreto o cascajo producto de demoliciones.

Si se requiere un núcleo impermeable, pero el material disponible no se presta a ello, se puede utilizar asfalto o inyecciones de mortero para disminuir la permeabilidad. De estos materiales, probablemente el asfalto sea más adecuado debido a que mantiene cierta plasticidad durante el asentamiento de la estructura.

Adicionalmente, existe una técnica desarrollada en México que consiste en llenar grandes bolsas permeables al agua con material producto de dragados. El agua pasa a través del material de la bolsa, reteniéndose los elementos sólidos, dando lugar a la formación de grandes bloques de "bolsaroca" que configuran el núcleo.

### 5.3.3 Filtros y apoyos

El filtro es la capa inferior de una escollera y tiene la función de evitar un asentamiento excesivo de la estructura. Esta función se cumple evitando la erosión del fondo debido a la circulación del agua.

La construcción del filtro es por demás importante donde el fondo está formado por material fácilmente erosionable como puede ser arena fina.

Los apoyos forman una extensión del filtro sobre la sección transversal de la escollera y sirven para brindar soporte a la parte inferior de la coraza y evitar que los elementos de esta se deslicen.

#### 5.3.3.1 Mecanismos de falla

La erosión del material bajo el rompeolas es producida por las corrientes de agua debidas a la fluctuación de presión de la ola. En la fig 5.11 se muestra esquemáticamente este fenómeno.

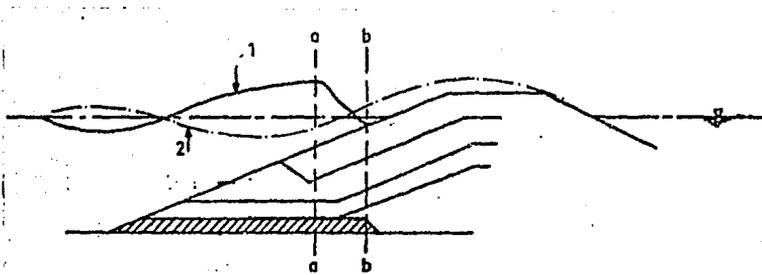


fig.5.11 Fluctuación de presiones debidas a la ola

Cuando n  
a y b se  
perfil d  
flujo de  
instanc  
Este flu  
ducient

La teo  
presio  
núcleo  
granul

Las ve  
difici  
que la  
cillas  
irregul  
a la ex  
vación  
amortiz  
brio.  
den pr  
puede

Otra f  
sustrat  
partic  
con el  
puede  
poro se  
dismin  
consol  
cortan  
para p

La parte inferior de las secciones  
na. Sin embargo, al presentarse el  
fuerza de presiones que origina un  
de los poros de la escollera. Un  
mas y el flujo se invierten (2).  
vación local del material, pro-  
tura.

para definir la distribución de  
presiones generadas en el talud y el  
debido al tipo de material y

encia de presiones son aún mas  
sicos tienen problemas debido a  
las no sigue leyes de escala sen-  
del flujo puede ser pequeña, la  
de producir velocidades mayores  
el fondo con la consiguiente soca-  
estructura se asienta, el efecto  
y eventualmente alcanza un equili-  
la construcción del filtro, se pue-  
atras y el desperdicio de material

estructura es por falla mecánica del  
idos formados por acumulación de  
de sedimentos se van consolidando  
so muy rápidamente, el depósito  
sin disipar. Estas presiones de  
tanto que las presiones de poro  
ocante, un depósito marino nom-  
de la resistencia al esfuerzo  
decar la presión adicional  
necesario que un depósito

posea desde su formación una presión de poro para que falle por efecto del paso de las olas, ya que las olas mismas pueden generar o incrementar considerablemente la presión de poro existente en la masa de sedimentos. Este fenómeno se conoce como licuación del suelo y hace que su resistencia al esfuerzo cortante sea prácticamente nula.

#### 5.3.3.2 Criterios de diseño de filtros y apoyos

La construcción de un filtro en una superficie arenosa debe satisfacer dos condiciones:

- Debe prevenir la erosión del material de la base, causada por la presencia de flujos horizontales de agua.
- Debe evitar que se presente el fenómeno de licuación al existir un incremento repentino de la presión vertical sobre la arena del fondo.

En general, al satisfacer alguna de las condiciones mencionadas, se satisface también la otra. Como se apuntó, el uso de modelos físicos tiene problemas de escala, por lo que, en función de la importancia del proyecto, puede llegar a justificarse el estudio en escala natural.

El espesor de la capa de filtro depende de la profundidad y tamaño del material de la capa, pero no debe ser menor de 50 cm para asegurar que las irregularidades del fondo sean cubiertas. Es práctica común extender el filtro hasta una distancia de 1.5 m del apoyo (fig. 5.12). La granulometría del filtro depende del tamaño característico del material del fondo y para su elección puede utilizarse la ec. 5.1.

#### 5.3.3.3 Materiales para filtros y apoyos

Un filtro convencional está integrado por varias capas sucesivas de material cada vez más grueso. El trabajo de construcción del filtro debe ser realizado con cuidado, pues un defecto en este puede llegar a ocasionar una falla en la estructura. Cierta sobredimensionamiento del filtro es justificable para asegurar su funcionamiento.

Si se requiere construir un filtro en un sitio sujeto a condiciones severas de oleaje o corrientes, es posible que el material fino sea removido tan pronto como se coloque. En este caso se puede utilizar un colchón impermeable a la arena. Este colchón puede ser colocado en su sitio y luego fijado con una capa de balasto (grava). Otra posibilidad es fijar la malla con bloques de concreto sobre ella. A veces es conveniente colocar una capa de junco para evitar la fricción entre el concreto y la malla. Este tipo de filtros es más delgado que el convencional.

Existe otro tipo de filtro consistente en una capa de asfalto colocada sobre el fondo. Se han depurado técnicas que permiten la colocación del asfalto bajo el agua.

Los apoyos constan de elementos ligeros que sirven de soporte a la coraza y protegen al filtro del ataque directo de las olas. La construcción de apoyos es crítica cuando la escollera se encuentra en aguas de poca profundidad y está sujeta a oleaje rompiente. Algunas soluciones en el diseño del apoyo se muestran en la fig. 5.12.

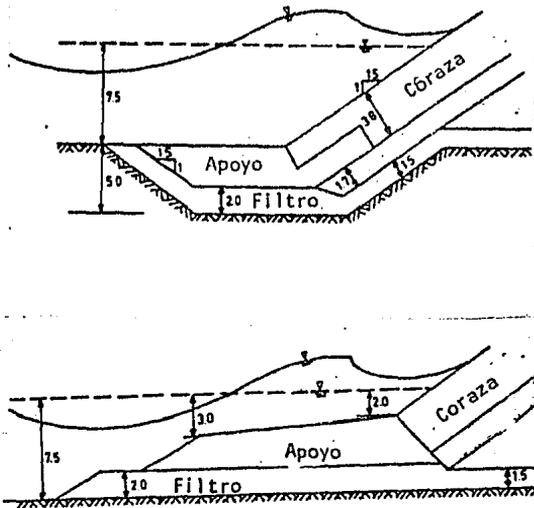


fig. 5.12 Algunos tipos de apoyos

El apoyo, aunque con una gran cantidad de material, sostiene a toda la co-  
 raza. Una vez fijo el peso de los elementos del apoyo, su pendiente máxi-  
 ma se puede determinar con la fórmula de Hudson y las condiciones de oleaje  
 esperadas.

#### 5.4 Estructuras sumergidas

Se han utilizado escolleras sumergidas de varios diseños con distintos re-  
 sultados para la protección de caminos y playas. El principal problema con  
 estas estructuras es que, para absorber la energía del oleaje, en forma e-  
 fectiva, deben hacer que este rompa sobre ellas. Esto causa la generación  
 de grandes fuerzas y la posibilidad de cuantiosos daños.

En el puerto de Sines en Portugal, se llegó a construir un rompeolas sumer-  
 gido para limitar la altura del oleaje que llega al rompeolas "principal"  
 una vez que este fué dañado por una tormenta. (fig. 5.13).

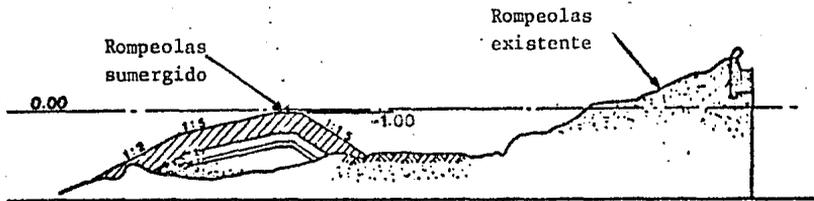


fig. 5.13 Rompeolas sumergido en el puerto de Sines

En un estudio teórico de Jefferys se determinó la relación de las olas inci-  
 dente y transmitida, resultando:

$$\frac{H_T}{H_I} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[ \left( \frac{0.25d_s}{d_s - h} \right)^{1/2} - \left( \frac{0.25d_s - 0.25h}{d_s} \right)^{1/2} \right]^2} \cdot \sin^2 \left[ \frac{2\pi b}{\sqrt{gT}} \left( \frac{1}{d_s - h} \right)^{1/2} \right]} \quad (5.12)$$

donde:

- $d_s$  profundidad al pie de la estructura
- $h$  altura de la estructura sobre el fondo
- $b$  ancho de la corona
- $g$  gravedad
- $T$  periodo

El desarrollo de la ec. 5.12 no considera la disipación de energía, y por consiguiente no toma en cuenta las olas que rompen en la estructura ni la pérdida por fricción. Adicionalmente, la ecuación es válida solo para aguas someras donde:  $d_s/gT^2 \leq 0.00155$  y no debe ser usada para  $h/d_s < 0.8$ . Cuando el ancho de la corona es pequeño con respecto a su altura ( $b/h \leq 0.5$ ) el valor de  $H_T/H_I$ , dado por la ecuación, puede ser demasiado grande.

### 5.5 Aspectos de la cimentación

Obviamente, la presencia de una escollera somete a los estratos del suelo a un nuevo estado de esfuerzos. Como en cualquier estructura, es de esperarse que ocurra un asentamiento que puede predecirse con las técnicas tradicionales de la mecánica de suelos.

Adicionalmente, el propio cuerpo de la estructura se asienta debido a su mismo peso. La acción de las olas puede remover material del rompeolas y disminuir la porosidad del mismo, con el consiguiente asentamiento. Este último se hace evidente por el cambio de niveles entre la corona y la base de la estructura.

En virtud de que la escollera es una estructura flexible, ninguno de estos asentamientos va en detrimento de la capacidad estructural de la misma. Sin embargo, la disminución de la elevación de la corona, puede tener consecuencias en cuanto al paso del agua sobre ella y daños al talud interno

o la transmisión del oleaje al recinto protegido.

El oleaje rompiente cerca de los apoyos puede causar variaciones de presión tales que generen condiciones inestables en el suelo junto a los apoyos. Si existen corrientes, la arena será removida del lugar. Aún cuando no haya corrientes, el material no contribuye mas a soportar la construcción. En este caso, es necesario descontar la presencia de este material en los análisis de estabilidad de los taludes y cimentación al utilizar las superficies de falla. Es posible que un círculo de falla crítico, que pase por el cuerpo de la escollera y el suelo, determine la extensión horizontal del apoyo y la capa de filtro. En condiciones extremas, un círculo de falla puede determinar la pendiente máxima del talud de la escollera.

#### 5.6 Diseño en planta

El diseño en planta de escolleras y rompeolas debe tomar en cuenta el area que se desea proteger, la batimetría del lugar, la dirección del oleaje mas frecuente y la del mas intenso, la zona en que la calma del agua debe ser absoluta y la interacción que la obra puede tener con las corrientes locales y el transporte litoral.

Cuando la importancia del proyecto lo amerita, el trazo de la escollera se estudia en modelo reducido. Este puede tener fondo fijo o móvil para así observar el funcionamiento conjunto de los procesos costeros y la obra. Una vez definida la geometría, se pueden analizar las condiciones de agitación en el recinto con un modelo de fondo fijo no distorsionado.

Cuando las escolleras se construyen para mantener la estabilidad de la boca de un río, conviene que sean paralelas y que alcancen la batimetría que coincida con la profundidad del canal. Lo anterior debe ser sujeto de un análisis económico entre el costo de la escollera para alcanzar la profundidad deseada y el costo del mantenimiento de la profundidad del canal para así definir la longitud óptima.

Cuando las escolleras se construyen para mantener la estabilidad de la boca de una laguna litoral, conviene que converjan, teniendo en el arranque una

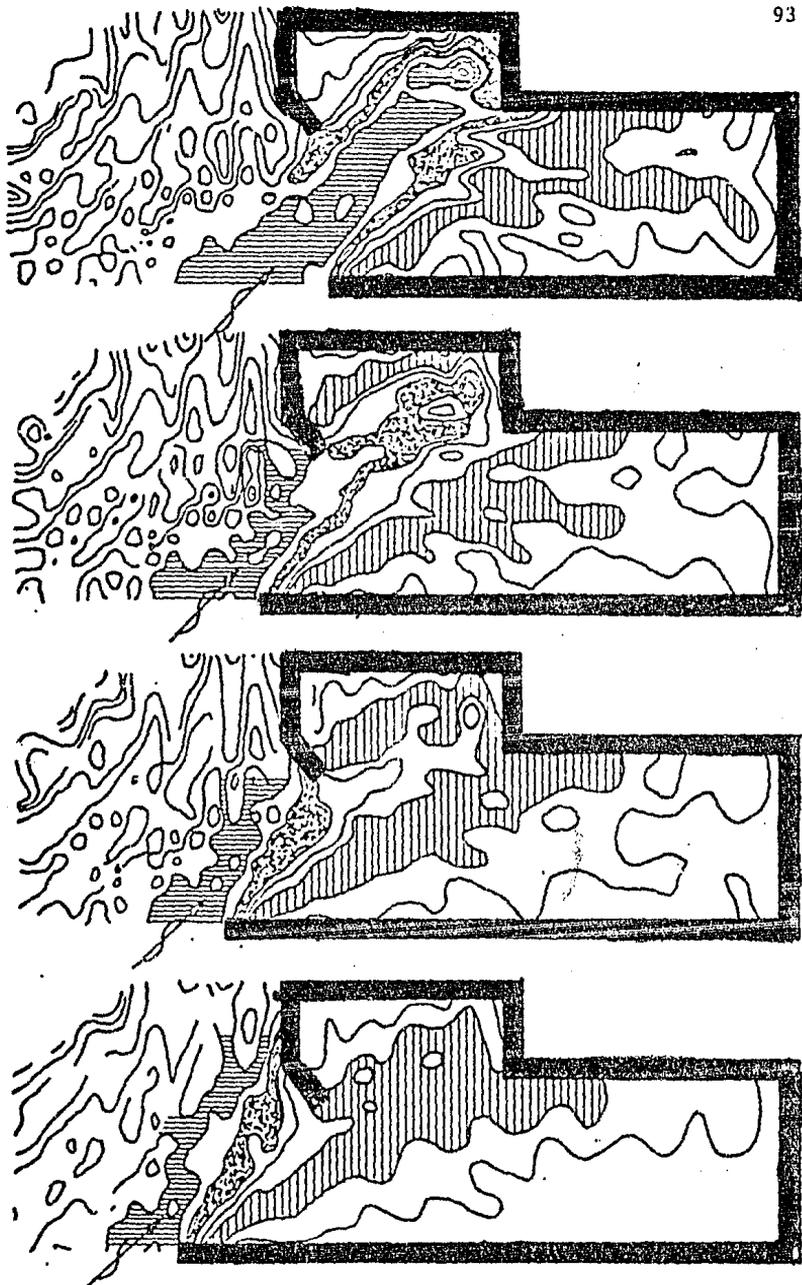


fig. 5.14 Agitación en un recinto protegido en función de la longitud del rompeolas

separación de dos a tres veces el ancho del canal de comunicación entre laguna y mar, y en los morros una distancia igual al ancho del canal.

En el caso de plantas termoeléctricas, las escolleras deben situarse de manera que se logre un máximo amortiguamiento del oleaje frente a la casa de bombas y se evite el paso de arena. Si este no se puede evitar, debe dejarse espacio para que la arena se deposite y pueda maniobrar el equipo de dragado.

En la fig. 5.14, se muestra el resultado de un estudio de agitación en un recinto, para diferentes longitudes del rompeolas.

### 5.7 Diseño óptimo

El diseño óptimo se refiere al dimensionamiento de una estructura de manera que una variable, definida según cierto criterio, alcance un valor extremo. El criterio seleccionado puede ser la minimización de costos de mantenimiento, la maximización de la relación beneficio-costos, etc.

La elección del criterio tendrá un efecto en la configuración final de la obra. El problema será encontrar un balance entre los costos de construcción y reparación por daños, de manera que la suma de ambos sea mínima.

Los parámetros que intervienen en la realización del diseño óptimo de una escollera pueden ser determinados definiendo las causas de los daños. Estas causas provocan dos tipos diferentes de daño: los directos y los indirectos.

Los daños directos están asociados al propio rompeolas e incluyen los costos de mantenimiento y reparación de la estructura. Los costos por daños indirectos, son originados por defectos en el área protegida cuando se produce una falla. Esta falla puede no afectar directamente al rompeolas, por ejemplo, el paso de la ola sobre su corona, puede hacer la entrada al recinto protegido tan difícil que ningún barco pueda pasar, aún cuando el rompeolas no sufra daño alguno.

Se hace la distinción entre los tipos de daños porque influyen en diferentes

aspectos del diseño global. El gasto por daños directos es ocasionado por la pérdida de estabilidad en alguna parte de la escollera. Esta estabilidad depende solamente de los detalles que se modifiquen en su sección transversal típica.

Por otro lado, el gasto por daños indirectos es originado por el oleaje en el recinto protegido. Esta acción del oleaje se ve influenciada solo ligeramente por los detalles de la sección transversal, mientras que es fuertemente dependiente de la geometría en planta del rompeolas, su localización, el ancho de la entrada, etc.

El diseño completo consiste en armonizar dos problemas mas o menos independientes, Primeramente, y basandose en los costos aproximados causados por daños directos e indirectos, se hace un diseño de la geometría del recinto y se determina la cantidad de energía que puede ser transmitida a través o sobre el rompeolas. El diseñador utiliza esta información para obtener valores mas precisos de los costos de construcción y reparación por daño, y así obtener un diseño de la sección. Los costos de construcción y daños deben compararse con los hechos en un principio. Como puede verse este es un ciclo que puede requerir varias iteraciones.

Al diseñador de la sección transversal de la escollera le interesan mas los detalles de la misma por lo que se debe fijar en la segunda parte del ciclo iterativo: la optimización de la sección transversal en base a los costos de mantenimiento y reconstrucción por daños directos.

El costo de construcción, así como los daños ocurridos en la estructura son función de su altura. A mayor altura de la ola, la escollera es mas costosa en su construcción pero menor el costo por mantenimiento y posible daño. Mientras menor sea la ola de diseño, la estructura será mas barata pero su costo anual por mantenimiento y posible daño será mayor.

En la fig. 5.15 se muestra la relación entre estos costos y como es posible obtener el costo global mínimo.

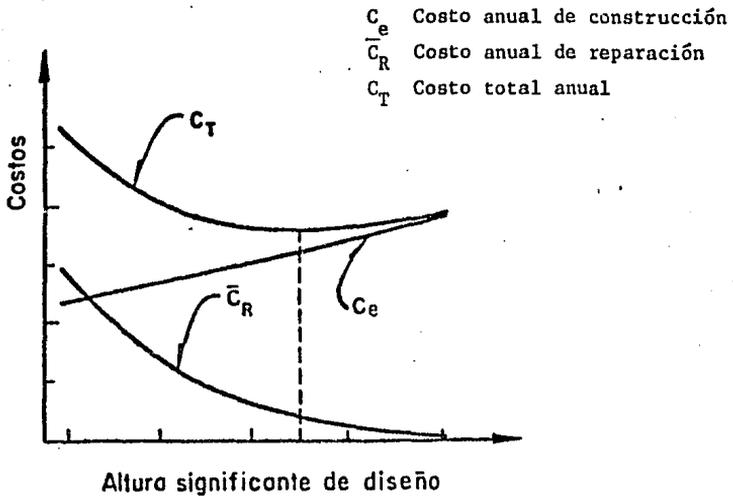


fig. 5.15 Costo global de la escollera en función de su altura

Debe entenderse que este diseño óptimo se hace para una escollera de ciertas características. Debe hacerse un análisis similar para distintos modelos de escollera, por ejemplo, con diferentes elementos de coraza, distinta inclinación de taludes, etc. El diseño final será el que proporcione el valor más adecuado de entre los diferentes análisis realizados.

## 6. CONSTRUCCION DE ESCOLLERAS

En la elaboración de un proyecto, generalmente se considera por separado el diseño de la estructura y el proceso constructivo. Este concepto no debe ser aplicado a las escolleras debido a que el procedimiento constructivo puede tener gran significancia en el costo total de la obra.

### 6.1 Métodos constructivos

Existen diversos métodos para la construcción de escolleras, cada uno de los cuales tiene sus ventajas y desventajas.

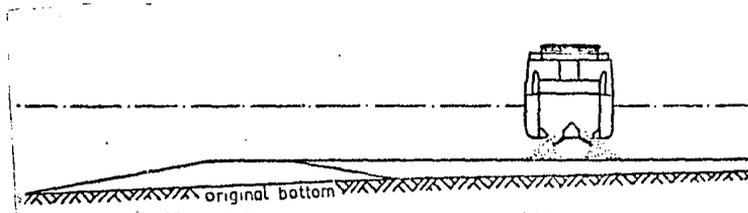
#### 6.1.1 Uso de equipo flotante

La colocación del material de la escollera a través de barcazas puede ser muy atractivo desde el punto de vista económico cuando la localización del banco de material hace factible proporcionarlo por vía marítima.

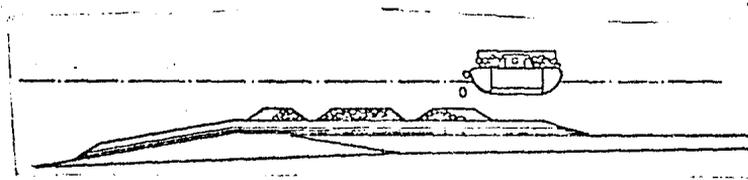
Las barcazas para realizar este trabajo son de descarga por el fondo o de descarga lateral (fig. 6.1a, 6.1b). Las embarcaciones de descarga por el fondo, tienden a depositar su carga rápidamente y en un lugar concen-

trado, mientras que las de descarga lateral pueden hacerlo mas lentamente y formar así capas mas delgadas de material. Esta operación se puede realizar hasta que la obra alcance una altura sobre el fondo que dificulte el uso de las barcazas. Esto limita la máxima elevación a aproximadamente tres metros bajo el nivel del agua. Sin embargo, esta altura puede ser mayor cuando se trabaja adecuadamente con las mareas.

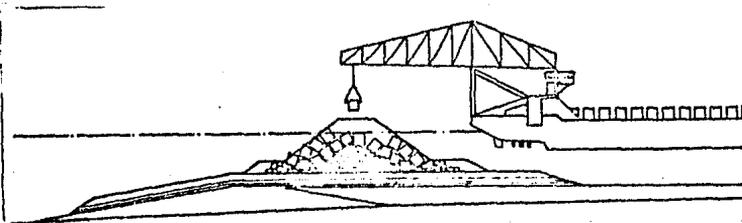
Se pueden construir barcazas especiales con una grúa auxiliar para colocar material a mayor elevación, pero el diseño y fabricación de este equipo puede no justificarse con la importancia de la obra (fig. 6.1c).



a) Descarga por el fondo



b) Descarga lateral



c) Barcaza con grúa

fig. 6.1 Distintos tipos de barcazas.

### 6.1.2 Construcción con estructuras fijas

La estructura fija puede ser un puente provisional colocado sobre pilas que, finalmente, queda enterrado en el cuerpo de la escollera. El material y equipo de construcción se transportan sobre el puente, que debe ser lo suficientemente alto para evitar problemas con el oleaje.

Otra alternativa puede ser el uso de un sistema cable-canastilla. Si bien el material colocado con este método no puede ser depositado tan precisamente como con el anterior, tiene la ventaja de ser bastante independiente de las condiciones atmosféricas. Debido a sus propias características este método es apropiado para estructuras con segmentos largos y rectos

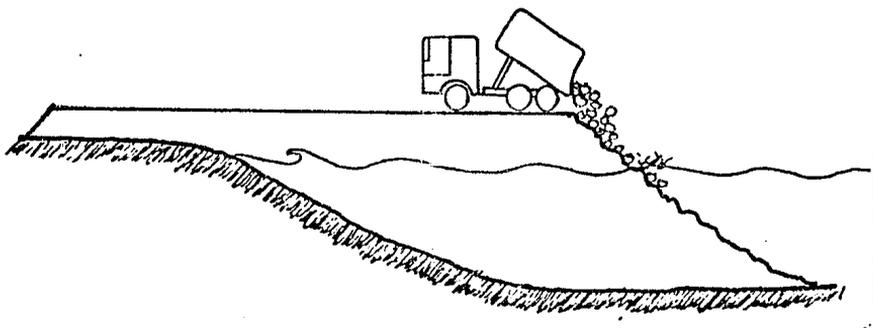


fig. 6.2 Construcción desde la corona de la escollera

Un tipo de puente para construir la escollera puede ser la escollera misma. La construcción comienza de la costa hacia el mar y el material es proporcionado sobre la corona de la porción terminada. El equipo de construcción, (camiones, grúas, etc.) impone ciertas características al diseño de la estructura. La corona debe ser lo suficientemente ancha y alta

para permitir el uso eficiente del equipo en una variedad de condiciones atmosféricas. Esto puede hacer que la altura o ancho sean mayores de lo que serían por otro método constructivo. Aún con la altura y corona mayores, la velocidad de ejecución puede limitarse por la capacidad de la grúa en el frente mar adentro. Es posible aumentar esta capacidad mediante el uso de grúas autoelevables o montadas sobre chalanes que ayuden a colocar elementos desde afuera de la corona(fig.5.2).

Debido a la poca resistencia del material del núcleo al ataque del oleaje, deberá establecerse en cada caso la longitud máxima del núcleo que puede construirse antes de ser protegido por la capa secundaria.

Cuando se utilizan elementos de la coraza para proteger la corona de la escollera, la superficie resultante no es adecuada para la circulación del equipo. Esto puede resolverse ya sea colocando una capa de material mas fino sobre la corona ya construida, que al final se remueve con agua a presión, o aplazando la construcción de la corona hasta que se complete la escollera y terminarla partiendo del morro hacia la costa. Debido a que ambos procedimientos dejan una superficie irregular, los trabajos de mantenimiento se dificultan.

Una alternativa a lo anterior es la construcción de una corona monolítica que elimine este problema, aunque sea mas costosa. Sin embargo, la corona monolítica puede soportar elementos de coraza especiales como tetrápodos o tribarras que hacen posible contar con taludes mas empinados o elementos mas ligeros. Ambas modificaciones permiten el uso de equipo de construcción mas ligero.

## 6.2 Problemas constructivos particulares

### 6.2.1 Filtros

Cuando es necesario el uso de filtros, estos pueden constituir la parte mas importante de la estructura, pues esta no será estable si su cimen-

tación es mala. De aquí el cuidado en la construcción del filtro.

Con excepción de aguas muy someras, los filtros de grava, en general se construyen tirando material desde barzacas de descarga lateral en movimiento. La velocidad de la barcaza y de descarga deben escogerse de manera que cada partícula vaya colocándose en una serie de subcapas. Esto da mayor uniformidad en la distribución del material de la capa, reduciendo la posibilidad de imperfecciones locales que puedan provocar una falla.

Los filtros fabricados con asfalto o nylon, generalmente constan de una sola película. Este trabajo, que debe ser ejecutado con la máxima precisión, suele hacerse desde barcos anclados. Esta clase de filtros por lo común se cubren con una capa de grava cuyo fin principal es brindar protección a la película contra el impacto directo del material subsecuente.

#### 6.2.2 Núcleo

La colocación del núcleo constituye el trabajo complejo de la construcción de la escollera. Si las corrientes y el oleaje no dificultan la operación, el único problema es obtener los taludes deseados al colocar el material. Los taludes pueden arreglarse si no se obtiene el de proyecto, pero en general es más económico evitarse el trabajo aunque se utilice mayor cantidad de material.

#### 6.2.3 Elementos de la coraza

Los elementos de la coraza son colocados casi exclusivamente mediante grúa, ya sea flotante o apoyada en la corona. Es claro que la grúa debe ser capaz de colocar los elementos en cualquier lugar que requiera ser protegido. La elección del tipo de elemento para la coraza puede verse condicionada por la disponibilidad de la grúa. Aún cuando los elementos de la coraza son colocados al azar, se requiere una operación cuidadosa para garantizar una cubierta uniforme a lo largo de toda la escollera. En algunas situaciones se llegan a hacer planos para la colocación de los elementos. En el caso de elementos que requieran un patrón espe-

cífico de colocación, como es el de las tribarras, se debe poner especial atención para que este patrón sea cumplido lo mejor que se pueda, aún bajo el agua.

En el caso de que se requieran diferentes tamaños de elementos, pueden evitarse confusiones y problemas en el sitio de construcción de los elementos variando el peso volumétrico de los mismos y manteniendo fijo el tamaño. Esto produce ahorros en el uso de cimbras y en los aditamentos del equipo de construcción como pueden ser las garras o cables de la grúa.

Por lo que respecta a las rocas fabricadas "in situ" (bolsacreto) estas se fijan, mientras están vacías, a los elementos adyacentes hasta que el concreto bombeado a su interior les permite mantenerse en la posición proyectada. Esta operación requiere de la intervención de personal con equipo de buceo ligero. Debido a que la bolsa que sirve de cimbra es impermeable, el concreto no está en contacto con el medio exterior, evitándose así contaminación o deslaves del material. Una vez llena la bolsa, se retira la manguera y se cierra en forma manual sin mayor problema.

El equipo utilizado para fabricar estos elementos es sumamente económico, lo que ahorra recursos en comparación con los sistemas convencionales cuando, por alguna razón, deben suspenderse los trabajos. La construcción de una escollera por este procedimiento puede hacerse en varias etapas sin incurrir en los grandes gastos que implica la movilización de equipo en otros métodos constructivos.

Si bien, la rapidez de construcción está definida por la capacidad de las bombas, la posibilidad de tener varios frentes de construcción permite acelerar los trabajos en forma práctica.

#### 6.2.4 Corona

Cuando la construcción o el mantenimiento de la escollera han de realizarse desde la corona, esta debe presentar una superficie adecuada para

la operación eficiente del equipo. Es posible que el ancho necesario para el mantenimiento sea menor que el de la construcción debido a los distintos volúmenes de equipo en uno y otro caso. Durante la construcción puede resultar económico tener dos carriles de circulación sobre la corona, especialmente si la estructura es muy larga.

El tipo de corona monolítica se utiliza con elementos de coraza especiales (tribarras y tetrápodos). Este tipo de corona proporciona una excelente superficie de rodamiento pero no está exenta de problemas; pues debe ser capaz de aceptar los asentamientos que, se espera, tendrá la estructura.

### 6.3 Problemas especiales

Las corrientes y oleaje pueden atacar al núcleo durante su construcción. Si las condiciones no son muy graves, se puede aceptar la pérdida de cierta cantidad de material y colocar un mayor volumen.

Si las condiciones son demasiado severas, lo anterior deja de ser económico. La pérdida de material del núcleo, puede disminuirse construyendo primero la capa secundaria y después rellenar el espacio con material del núcleo. En la fig. 6.3 se muestra la secuencia de construcción.

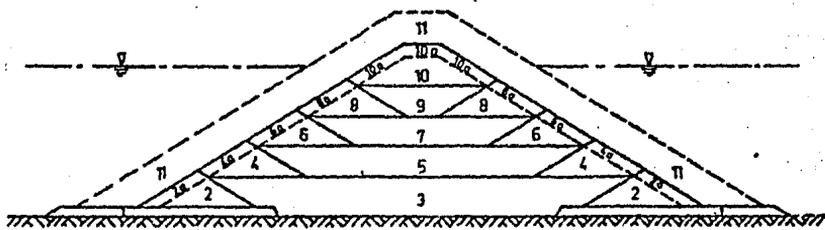


fig. 6.3 Construcción en condiciones de oleaje y corrientes severas

Los pasos de este sistema se enumeran a continuación:

1. Colocación de la capa de filtros.
2. Se coloca un cordón de capa secundaria. Únicamente la porción 2a se requiere para la estabilidad final de la estructura.
3. Material del núcleo colocado entre los cordones de capa secundaria.
- 4-9. Construcción alternada de capa secundaria y núcleo.
10. La última capa consta únicamente de material de capa secundaria.
11. Colocación de la coraza una vez terminada la sección transversal.  
Si las condiciones son muy adversas, se coloca la coraza mientras avanza la construcción.

En este caso se utiliza una mayor cantidad de material de capa secundaria. Esto no tiene efectos económicos importantes debido a que el precio del material es similar. El éxito del método constructivo depende de la capa cidad del material de la capa secundaria para atenuar el efecto erosivo del agua. En caso de que las corrientes sean muy fuertes, el núcleo puede ser construido enteramente con material de la capa secundaria o pequeños elementos prefabricados del tipo de los de la coraza.

La economía en la construcción de la escollera depende en gran medida de la coordinación de los diferentes equipos de construcción. Por ejemplo, cuando la parte inferior es construida por barcasas y la superior por camiones desde la corona.

El cálculo del costo unitario del rompeolas debe tomar en cuenta las erogaciones por concepto de: explotación, selección, acópio, carga, acarreo, des perdicios, regalías por uso de banco y descarga, ya sea en el sitio de cong trucción o en un patio de almacenamiento como puede ser el caso de los ele mentos de la capa secundaria o de la coraza.

## 7. MODELOS HIDRAULICOS

### 7.1 Introducción

A lo largo de este trabajo se ha hecho la observación de que algunas de las características de un diseño deben ser revisadas en un modelo hidráulico. Para ello es necesario estudiar lo que son, y la ayuda que proporcionan en el diseño de una estructura.

Un modelo es un sistema que proporciona información fidedigna en la elaboración de un proyecto. Los modelos pueden ser de dos tipos: matemáticos y físicos. En los modelos matemáticos, las ecuaciones definen cierto fenómeno en forma más o menos simplificada. Sin embargo, no todas las características de un problema pueden representarse por medio de ecuaciones con la precisión deseada. En estos casos, el estudio en modelos a escala es el más eficiente y en ocasiones la única manera de resolver el problema. Los modelos físicos permiten reproducir condiciones geométricas y de frontera que los matemáticos no siempre pueden hacer.

En el diseño de obras marítimas, los modelos físicos se utilizan para estudiar fundamentalmente, la penetración y difracción del oleaje al cho-

car con un obstáculo y el efecto del oleaje incidente y reflejado dentro de un recinto protegido, así como el movimiento de embarcaciones. También se utilizan en estudios de acarreo litoral que, eventualmente, pueden definir la longitud de las escolleras, o bien, en estudios de estabilidad de la sección transversal de la misma.

## 7.2 Teoría de la similitud

Para que los resultados obtenidos en un modelo puedan ser utilizados en la estructura real (prototipo), es necesario que modelo y prototipo sean hidráulicamente semejantes. Para que se cumpla esta condición, se deben satisfacer tres requisitos: semejanza o similitud geométrica, cinemática y dinámica.

La semejanza geométrica implica que la relación de distancias entre puntos homólogos en modelo y prototipo sea siempre la misma. Puntos homólogos son los que tienen correspondencia geométrica.

La relación entre una magnitud del prototipo y su correspondiente en el modelo se denomina escala y a la magnitud tratada se le adiciona el subíndice "e"; así, por ejemplo, en el caso de las longitudes

$$L_e = \frac{L_p}{L_m} \quad (7.1)$$

donde:

- $L_e$  escala de longitudes
- $L_p$  longitud en el prototipo
- $L_m$  longitud en el modelo

La semejanza cinemática se refiere a la condición de puntos homólogos recorran trayectorias homólogas en tiempos proporcionales. Esto obliga a contar con una escala de tiempos

$$t_e = \frac{t_p}{t_m} \quad (7.2)$$

y con ello una escala de velocidades

$$v_e = \frac{v_p}{v_m} = \frac{L_p t_m}{L_m t_p} = \frac{L_e}{t_e} \quad (7.3)$$

La semejanza dinámica se tiene si las fuerzas ejercidas en puntos homólogos están relacionadas por un valor constante llamado escala de fuerzas.

Conviene aclarar que para que exista semejanza dinámica es menester que exista semejanza, tanto geométrica, como cinemática.

#### 7.2.1 Ley de semejanza de Froude

En el estudio de un problema, no todas las fuerzas de la naturaleza intervienen con la misma importancia en el desarrollo del fenómeno. La ley de Froude representa la condición de similitud dinámica en que el comportamiento del modelo está regido por las fuerzas de gravedad. En el caso de modelos marítimos, la fuerza de gravedad es la más importante en relación a las de inercia, de esta manera se puede escribir:

$$\frac{F_{Ip}}{F_{Im}} = \frac{F_{gp}}{F_{gm}} \quad (7.4)$$

donde:

$F_{Ip}$ ,  $F_{Im}$  fuerzas de inercia en el prototipo y modelo

$F_{gp}$ ,  $F_{gm}$  fuerzas de gravedad en prototipo y modelo

o bien:

$$F_{Ie} = F_{ge} \quad (7.5)$$

Por otro lado, las fuerzas de inercia son:

$$F_I = m a = \rho L^3 L / t^2 = \rho v^2 L^2 \quad (7.6)$$

y las de gravedad se representan como:

$$F_g = m g = \rho L^3 g \quad (7.7)$$

donde:

m masa  
 a aceleración  
 $\rho$  densidad  
 v velocidad  
 L longitud  
 g gravedad

Sustituyendo en la ecuación 7.5, se puede escribir:

$$\rho_e v_e^2 L_e^2 = \rho_e L_e^3 g_e \quad (7.8)$$

de manera que se puede establecer:

$$\frac{v_e}{\sqrt{g_e L_e}} = 1 \quad (7.9)$$

que es lo que se conoce como condición de Froude. De esta manera se indica la relación de escalas para que el modelo sea representativo del prototipo.

Una vez determinadas dos de las escalas, la tercera queda fija por la fórmula (ec.7.9). La escala de gravedad tiene un valor constante e igual a la unidad; conviene elegir la escala de longitudes de manera que la de velocidades queda definida como:

$$v_e = L_e^{\frac{1}{2}} \quad (7.10)$$

así mismo, y de la ec. 7.3, se obtiene la escala de tiempos:

$$t_e = \frac{L_e}{v_e} = L_e^{\frac{1}{2}} \quad (7.11)$$

En la tabla 7.1 se presentan las escalas para distintas magnitudes físicas.

TABLA 7.1

Relaciones entre escalas para modelos marítimos de fondo fijo.

ESCALA	Modelo no distorsionado	Modelo distorsionado
Longitud horizontal, $L_h$	$L_e$	$L_h$
Longitud vertical, $L_v$	$L_e$	$L_v$
Pendiente de la playa, $S_e$	1	$L_v/L_h$
Distorsión,	1	$L_h/L_v$
Longitud de onda	$L_e$	$L_v$
Celeridad, $C_e$	$L_e^{1/2}$	$L_v^{1/2}$
Periodo, $T_e$	$L_e^{1/2}$	$L_v^{1/2}$
Tiempos, $t_e$	$L_e^{1/2}$	$L_v^{1/2}$
Altura de oleaje, $H_e$	$L_e$	$L_v$
Velocidades orbitales, $u_e$	$L_e^{1/2}$	$L_v^{1/2}$
Volúmenes, $V_e$	$L_e^3$	$L_h^2 L_v$
Areas en planta, $A_h$	$L_e^2$	$L_h^2$
Areas de secc. trans, $A_v$	$L_e^2$	$L_h L_v$
Fuerza, $F_e$	$L_e^3 \gamma_e$	-
Pesos, $W_e$	$L_e^3 \gamma_e$	-
Presión, $p_e$	$L_e \gamma_e$	-
Energía de la ola, $E_e$	$L_e^4 \gamma_e$	$L_h L_v^3 \gamma_e$

### 7.3 Pruebas de estabilidad de escolleras

Los estudios en modelos son particularmente importantes en el diseño de la sección transversal de la escollera, entre otros aspectos, se puede:

- Precisar las dimensiones generales, los taludes, espesores de capas, ancho de filtros, geometría de los apoyos, etc. que permitan asegurar la estabilidad de la obra para el tipo de condiciones previstas.
- Determinar la forma y colocación de los elementos de la coraza en el talud expuesto de la obra.
- Definir la forma y elevación de la corona. Puede estudiarse la conveniencia de construir la estructura de manera que la ola no pase sobre su corona a pesar del gasto que ello represente.
- Diseñar la geometría de las secciones mas débiles o expuestas, como puede ser un cambio de dirección en el trazo o el morro de la escollera.
- Obtener información sobre el comportamiento del rompeolas para diferentes ángulos de ataque del oleaje.

Adicionalmente, sobre el modelo se puede estudiar como la obra:

- Resistirá las diferentes condiciones climáticas durante la etapa de construcción, lo que servirá para formular un programa de construcción.
- Se comportará en sus diferentes partes (coraza, corona, etc.) tras la ocurrencia de una falla local.
- Volverá a un estado de equilibria despues de una falla.

Estos estudios se pueden hacer colocando la sección transversal de la escollera en un canal de oleaje, o bien, reproducir todo el cuerpo del rompeolas en un tanque.

En los canales el estudio es bidimensional, mientras que en los tanques el estudio se hace en tres dimensiones.

Las escalas de las magnitudes físicas son las mismas de la tabla 7.1. Adicionalmente, el peso específico del material con que se deben construir los elementos de la coraza se obtiene por medio de la ecuación:

$$\gamma_{sm} = \frac{(\gamma_s - \gamma)_p}{\gamma_e} + \gamma_m \quad (7.12)$$

donde:

- $\gamma_s$  peso específico de los elementos de la coraza
- $\gamma$  peso específico del líquido

Conviene aclarar que  $\gamma_e$  es distinto a la unidad debido a que, en general, en el prototipo el líquido es agua de mar ( $\gamma_p = 1026 \text{ kg/m}^3$ ) y en el modelo se trata de agua dulce ( $\gamma_m = 998 \text{ kg/m}^3$ ).

De esta manera se puede obtener el peso de los elementos del modelo con ayuda de la ec. 7.13:

$$W_m = \frac{W_p}{\gamma_{se} L_e^3} \quad (7.13)$$

donde:

- $W_m$  peso de los elementos de la coraza en el modelo
- $W_p$  peso de los elementos de la coraza en el prototipo
- $\gamma_{se}$  escala de pesos específicos de los elementos; igual a  $\gamma_{sp} / \gamma_{sm}$
- $L_e$  escala de longitudes

Al realizar las pruebas, ya sea en canal de olas o en tanque de morros, debe asegurarse una reproducción aceptable del fenómeno en estudio. Es decir, los efectos, tanto de modelo como de escala, deben minimizarse. Las causas más importantes de estos efectos son:

- La generación del oleaje. El oleaje en el modelo, generalmente es

producido por un batidor que genera olas monocromáticas. Estas olas (todas de las mismas características) se asocian con las características de la ola significativa ( $H_g$ ). Sin embargo, este tipo de oleaje no es representativo de la realidad. Debido a esto se han desarrollado métodos para generar olas con una distribución similar a la del oleaje real. Los movimientos del batidor son controlados por un servomecanismo hidráulico que produce el movimiento de agua requerido. Se ha visto que los efectos producidos por un oleaje variable de una altura significativa dada, son mayores que los producidos con un oleaje monocromático de la misma altura  $H_g$ .

- Fuerzas viscosas. Al realizar los modelos hidráulicos de acuerdo con la ley de semejanza de Froude, se desprecian las fuerzas debidas a la viscosidad. Cuando la escala es muy grande, estas fuerzas viscosas empiezan a tener importancia. De investigaciones realizadas, puede decirse que se presentan este tipo de efectos de escala cuando el número de Reynolds en el modelo es muy pequeño ( $Re < 3.5 \times 10^4$ ). Definiendo el número de Reynolds como:

$$Re = \frac{\sqrt{g H l}}{\nu} \quad (7.14)$$

donde:

- g gravedad
- H altura de la ola
- $\nu$  viscosidad cinemática del agua
- l dimensión característica del elemento de la coraza ( $l = \text{Volumen}^{\frac{1}{3}}$ )

- Los elementos de la coraza. Los elementos del modelo están hechos de materiales como: mortero, resinas, aluminio o porcelana. La fricción, así como el ángulo natural de reposo, pueden variar considerablemente. Así, por ejemplo, elementos de mortero con alto coeficiente de fricción, pueden sobreestimar la estabilidad del prototipo. Otro efecto del modelo es que, a diferencia de los del prototipo, los elementos del modelo no se rompen, siendo en ocasiones la ruptura de los elementos, causa de fallas en toda la escollera. En los modelos, esta característica puede

reproducirse disminuyendo de antemano la resistencia de los elementos del modelo en secciones preestablecidas.

Por estas razones, es aconsejable contar con valores de escala pequeños. Los mas convenientes están entre 20 y 40. Los modelos de escala mayor a 60 pueden presentar problemas de efecto de escala.

Actualmente, se hacen esfuerzos para evaluar adecuadamente las cargas que sobre los elementos de la coraza ejerce el oleaje. Los modelos en que se realizan estos estudios llegan a ser con escala de 1:7.

#### 7.4 Otros tipos de modelos

Existen modelos de otros tipos que pueden servir en el diseño de una escollera. Algunos de estos modelos son los siguientes:

- Modelos de fondo fijo. A este grupo corresponden los modelos del inciso 7.3; en ellos se estudian distribuciones de velocidad, presión, agitación, etc.
- Modelos de fondo móvil. Son aquellos en los que el movimiento del fluido afecta las características de la frontera. Estos modelos sirven para hacer estudios sobre sedimentación y transporte litoral y así evaluar la conveniencia, por ejemplo, de alargar las escolleras que protegen un canal de navegación, hasta una profundidad dada, contra el mantenimiento del canal por medio de alguna de las modernas técnicas de dragado.
- Modelos no distorsionados. Los modelos del inciso precedente también son de este tipo. En estos modelos la escala de longitudes ( $L_e$ ) en cualquier dirección, es la misma.
- Modelos distorsionados. En este tipo de modelos, la escala de longitudes en una dirección es diferente de las otras dos. Los modelos distorsionados, generalmente tienen una escala de longitudes horizontales y otra para las verticales. El grado de distorsión se indica como:

$$\Omega = \frac{L_{he}}{L_{ve}} \quad (7.15)$$

donde:

$L_{he}$  escala de longitudes horizontales  
 $L_{ve}$  escala de longitudes verticales

Este tipo de modelos se usa en estudios que tengan que abarcar una gran extensión de terreno y en los que, de no existir la distorsión, las medidas en el sentido vertical serían difíciles de obtener.

Al existir distorsión en el modelo, las escalas para diferentes magnitudes varían según se apunta en la tabla 7.1.

La tabla 7.2 muestra los usos de las diferentes combinaciones de modelos según el fenómeno que se desee estudiar, así como las escalas recomendadas.

TABLA 7.2

Relación de escalas Fronte- ras	No distorsionado		Distorsionado	
	Estudio	Escala de líneas	Estudio	Escala de líneas H V
Fondo fijo	Agitación en puertos	80-200	Corrientes litorales	100-300 50-100
	Oleaje contra estructuras	20-60	Estuarios	200-2500 50-150
Fondo móvil	Erosión local por corrientes	20-60	Arrastre litoral y azolve en puertos	80-200 30-100
	Erosión local por oleaje	40-80		

Valores de escalas de longitudes para diferentes modelos marítimos.

No es bueno confiar ciegamente en ciertos perfiles que se encuentran en libros, revistas o publicaciones, pues se puede tratar de proyectos con diferentes condiciones. Igualmente, no es bueno hacer uso irracional de los modelos, pues no en todas ocasiones se obtienen datos cuantitativamente adecuados según ya se explicó. Sin embargo, el empleo racional de modelos puede generar indicaciones de gran interés, y el examen atento de la operación del modelo puede ayudar al ingeniero a comprender, concebir y construir mejor este tipo de obras.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño de una escollera es un proceso elaborado que debe hacerse con cuidado, ya que la construcción de este tipo de obras representa una fuerte inversión económica. La experiencia del ingeniero es importante para lograr una estructura que permita la óptima utilización de recursos, tanto naturales como económicos.

Es fundamental el conocimiento de las condiciones físicas que imperan en el sitio de interés para realizar un diseño racional. La información de oleaje permite conocer en forma más certera las posibles solicitaciones que tendrá la escollera. Existen formas de inferir valores extremos del oleaje y otros parámetros físicos; pero siempre en la consideración de que no deja de ser una aproximación teórica.

Por diferentes motivos, en una variedad de lugares es necesaria la construcción de una escollera. Para ello, se hace el estudio analítico de los diferentes parámetros de diseño; pero debido a la gran cantidad de factores que intervienen, se deben confirmar mediante pruebas en modelos a escala. En ellas se simulan las características del entorno de la es-

estructura con mayor precisión y es factible apreciar su funcionamiento para distintas condiciones de trabajo.

En la fórmula de Hudson, utilizada para estimar el peso de los elementos de la coraza, el coeficiente de estabilidad  $K_D$  tiene un papel importante, pues su magnitud debe evaluar parámetros difíciles de estimar cuantitativamente. El tipo de ola, rompiente o no, la localización a lo largo de la escollera y el porcentaje de daños que se admite en la misma, son factores que determinan el valor del coeficiente de estabilidad. Las diferentes referencias sirven como guía al diseñador en la búsqueda de la solución más adecuada. No existe un modelo preestablecido que se aplique indiscriminadamente a cualquier caso.

El equipo y tecnología disponibles para la construcción de la escollera son un aspecto a considerar, ya que las características generales de la estructura dependen del método constructivo.

El diseño óptimo de una escollera será el que logre armonizar el costo de construcción y el de reconstrucción por daños de manera que la suma de ambos sea mínima. La selección del peso de los elementos de la coraza de la escollera es fundamental, pues a mayor peso, menor probabilidad de daños, sin embargo, el costo de construcción es mayor.

El diseño de una escollera necesariamente va aparejado al de la actividad con que se relaciona, así por ejemplo, para el caso de un puerto, las condiciones de agitación permitidas por el barco de diseño, influyen en las dimensiones y propiedades de la escollera.

## BIBLIOGRAFIA:

1. Bruun P., "Port Engineering"; Gulf Publishing Co., 2<sup>nd</sup> Ed. U.S. 1976
2. Coastal Engineering Research Center, "Shore Protection Manual"; U.S. Army Corps of Engineers, U.S. 1977
3. D.H.L., "West Breakwater Sienes"; Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands 1983
4. D.H.L. "Hydro Delft" No.65; Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands 1983
5. Franco V., Maza J.A., "Técnicas Experimentales"; Cap. A.2.15, Manual de diseño de obras civiles, C.F.E. México 1983
6. García M., "Estabilidad del Fondo Marino, Enfoques Geotécnicos e Hidráulicos"; Memorias de la 2<sup>a</sup> reunión nacional de mecánica de suelos, México 1985
7. Groeneveld R.L. et al., "Optimization of Breakwater Lengths in Relation to Wave Penetration"; Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands 1983
8. Hrikawa K., "Coastal Engineering"; Halsted Press, New York U.S. 1978
9. Larras J., "Cours d'Hydraulique Maritime et de Travaux Maritimes"; Dunod, 1961
10. Maza J.A., "Hidráulica Marítima"; Cap. A.2.13, Manual de diseño de obras civiles, C.F.E. México 1983
11. Massie W.W. et al. "Coastal Engineering Vol.III" (breakwater design); Delft University of Technology", The Netherlands 1979
12. Oorschot J.H., Wevers A., "Sea-bed Configuration in Relation to Breakwaters Stability"; Delft Hydraulics Laboratory The Netherlands 1975

13. Paape A., Ligteringen H., "Model Investigations as Part of the Design of Rubble-mound Break-waters"; Delft Hydraulics Laboratory The Netherlands 1980
14. Willock A.F., Price W.A., "Dolosse Blocks as Breakwater Armouring": HRS Notes No.19; Hydraulics Research Station, England June 1977
15. Jimenez A., "Diseño optimo de escolleras y su aplicación al puerto de Altamira"; Tesis profesional, México 1985

#### AGRADECIMIENTOS

Al M. en I. Oscar Arturo Fuentes Mariles por los consejos, sugerencias y correcciones en la realización de este trabajo.

Al Intituto de Ingeniería (Hidráulica) por las facilidades que me brindó para elaborar esta tesis.