

106
24



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PRESERVACION DE PLAYAS CON
ROMPEOLAS FUERA DE COSTA

TESIS

Que para Obtener el Título de
INGENIERO CIVIL

Presenta:

Tomás Christian Peña Pedroza

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

I N D I C E

CONTENIDO.	Pag.
1. INTRODUCCION.	1
2. ASPECTOS DE DISEÑO HIDRAULICO.	3
2.1 Consideraciones de Planeación.	4
2.1.1 Longitud del Rompeolas-Distancia de la Línea de Costa.	5
2.1.2 Oleaje en Exceso.	11
2.1.3 Permeabilidad del Rompeolas.	12
2.1.4 Posición con Respecto a la Zona de Rompiente.	12
2.1.5 Orientación del Rompeolas.	17
2.1.6 Otras Consideraciones.	17
2.2 Consideraciones del Sitio.	17
2.2.1 Generalidades.	17
2.2.2 Características del Oleaje en Aguas Profundas.	20
2.2.3 Límite de la Zona de Aguas Profundas.	29
2.2.4 Deformación del Oleaje en la Cercanía de la Costa.	30
2.2.5 Alcance de la Ola.	31
2.2.6 Características del Oleaje en la Rompiente.	32
2.2.7 Características del Oleaje después de la Rompiente.	32

CONTENIDO.	Pag.
2.2.8 Ubicación y Orientación del Rompeolas.	32
2.2.9 Pendiente de la Playa.	32
2.2.10 Amplitud de la Marea.	33
2.2.11 Transmisión del Oleaje.	36
2.2.12 Características del Oleaje en el Area Protegida por el Rompeolas.	36
2.2.13 Transporte Litoral.	37
2.2.14 Dimensionamiento de los Elementos Prefabricados del Rompeolas.	40
3. APLICACION NUMERICA.	43
4. CONCLUSIONES.	56
RECONOCIMIENTO.	61
BIBLIOGRAFIA.	62
APENDICE A Indice de Variables.	65
APENDICE B Tablas.	70
APENDICE C Figuras.	89

1. INTRODUCCION.

Regiones costeras sujetas a erosiones fuertes debido a la sobre-elevación del mar, a la reducción en la alimentación de sedimento de los ríos o a la interrupción del transporte fuera de costa por estructuras construidas por el hombre, debidas a una planeación inadecuada; requieren de la preservación de playas. Entre los métodos más comunmente utilizados se tiene la construcción de espigones, la de rompeolas fuera o en la línea de costa, así como la reposición del material de playa.

En algunos lugares donde los diques marinos (rompeolas en la línea de costa) y espigones no son efectivos, los rompeolas fuera de costa son un medio para proteger la playa de erosiones severas. A pesar de éste hecho los rompeolas fuera de costa no son tan populares como los espigones debido a su alto costo y a la dificultad de su construcción y mantenimiento.

Los rompeolas sensiblemente paralelos a la línea de costa, continuos o segmentados, ubicados fuera de costa, constituyen un método relativamente novedoso comparado con los otros métodos para controlar la erosión, por ello se conoce relativamente poco acerca de su hidrodinámica y el resultado del mecanismo del transporte de sedimentos en su vecindad, así que, poca información es aplicable para su diseño. Se conoce que las corrientes producidas por el oleaje detrás de los rompeolas depositan sedimento en el área resguardada formando una nueva forma morfológica llamada "saliente", hasta alcanzar una línea de costa en equilibrio. Si la saliente alcanza el rompeolas se le conoce como "tambala".

En este trabajo se pretende presentar el diseño hidráulico-marítimo de rompeolas fuera de costa para la preservación de playas, que tienen por objeto captar el material que se mueve en la costa en condiciones actuales.

La tesis se ha organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se exponen los aspectos relacionados con el diseño hidráulico-marítimo de los rompeolas fuera de costa; longitud, altura y dirección del oleaje, así como la abertura entre segmentos de rompeolas y otros parámetros no menos importantes como son el rango de la marea, la pendiente natural de la playa, el suministro de sedimentos y el tamaño del mismo. En el capítulo 3 se presenta una aplicación numérica de los métodos y criterios expuestos en el capítulo anterior. Las conclusiones han quedado consignadas en el capítulo 4.

2. ASPECTOS DE DISEÑO HIDRAULICO.

Cuando se construyen rompeolas fuera de la línea de costa para proteger una zona de la acción y de los efectos del oleaje, generalmente se rompe el equilibrio dinámico de la costa. Esto ocasiona cambios en esa zona litoral, que puede ser a corto o largo plazo, según sea el desequilibrio que exista entre la erosión y el depósito. Además, al disiparse la energía del oleaje contra el rompeolas se generan corrientes locales de gran intensidad que mueven el sedimento de una zona y lo depositan en otras. Esto puede convenir o no a los fines de un determinado proyecto.

Los rompeolas segmentados o discontinuos se localizan generalmente paralelos a la línea de costa, a profundidades mayores que las correspondientes a los extremos mar adentro de las escolleras o espigones, lo que hace posible controlar una zona más amplia del transporte litoral que las estructuras ligadas a la costa, logrando

además, que se produzcan corrientes que favorezcan la formación de "salientes", o en el mejor de los casos la formación de "támbolos".

Fig. 2.1.

Los rompeolas segmentados sensiblemente paralelos a la línea de costa, se localizan de tal forma para proteger un área de la acción del oleaje, que da lugar a una zona de relativa calma que favorezca la captación del material proveniente del arrastre de litoral y de mar adentro; y a la presencia de corrientes que permitan la formación de salientes o tómbolos.

La presencia de los rompeolas originan que la arena se deposite sobre la playa en el lado de sotavento al disipar la energía del oleaje causante del transporte. Los diagramas de difracción típicos de rompeolas segmentados, muestran que las alturas de oleaje en el lado de sotavento, son menores en un 50% a las alturas de ola de la parte no protegida por el rompeolas, lado de barlovento. Conforme la arena se deposita, se forma una saliente en la línea de costa, este desalineamiento de la playa actua como un espigón, el cual origina el avance de la línea de costa hacia mar adentro. Conforme se amplía la playa y la zona de transporte litoral se acerca al rompeolas, ésta saliente es muy eficiente, actuando como una barra litoral. Si el rompeolas tiene una longitud suficiente en relación con su separación de la costa, como para actuar como una barra litoral total, el depósito de arena continuará hasta que se forme un tómbolo cuya cima sea el rompeolas. En los sitios donde la barra se ha formado totalmente, un gran porcentaje de los depósitos se producen en el primer año, posteriormente el material empieza a moverse hacia el mar, alrededor del rompeolas. Es difícil predecir la forma precisa de la saliente formada por acumulación de material hacia el rompeolas, así como la erosión de la línea de playa, en las áreas vecinas a la saliente.

2.1 Consideraciones de Planeación.

Entre los factores que intervienen en la formación de tómbolos estan los siguientes.

2.1.1 Longitud del rompeolas-distancia de la línea de costa.

Rompeolas aislados.

Criterio del CERC, ref. [10].

El CERC, indica que si la longitud de la estructura (l) es menor que la distancia de la costa (y), $l < y$ (ver *fig.* 2.1), se forma una saliente, permitiendo la intersección de las crestas del oleaje difractado, antes de que el oleaje que entra por la abertura alcance la línea de costa; si la reducción del oleaje es normal, la posición de la cúspide de la saliente, se ubica en la intersección de las crestas del oleaje difractado, *fig.* 2.2. Cuando la longitud de la estructura (l) es mayor que la distancia de la costa (y), $l > y$, la formación "saliente" se incrementa, con posibilidad de formarse el tómbolo cuando $l < 2y$; de incrementarse la longitud de la estructura se forma doble saliente o tómbolo.

Criterio de Perlin Marc, ref. [11].

Mediante un modelo numérico se obtiene la amplitud de la saliente (y_s), para diferentes relaciones $U/y < 2, 3, 4$ y 6 , y $y = L_o$, al tomar en cuenta la refracción y difracción del oleaje, *figs.* 2.3 a 2.6. Las *figs.* 2.3 y 2.4 muestran que al incrementarse la longitud de la estructura, se incrementa la amplitud de la saliente y la captación de material, lo cual obedece, a que el gradiente de energía a lo largo de la línea de costa es mayor para $U/y = 3$, que el correspondiente a $U/y = 2$. Para la condición $U/y = 2$ la línea de costa ha alcanzado su equilibrio, no aconteciendo lo mismo para $U/y = 3$. Al incrementarse la longitud de la estructura, se forman dos salientes; para la condición $U/y = 4$ y 6 , alcanzando ésta última un mayor equilibrio.

Al cambiar la longitud del oleaje incidente L_o y mantener constante la relación $U/y = 2$, es decir $8L_o/4L_o$, $4L_o/2L_o$ y $L_o/0.5L_o$, *figs.* 2.7 a 2.9 respectivamente. La *fig.* 2.3 muestra la relación $2L_o/L_o$. Para $8L_o/4L_o$, *fig.* 2.7, la línea de costa permanece sin cambios, para las otras relaciones $4L_o/2L_o$ y $L_o/0.5L_o$ la saliente se incrementa conforme decrece la distancia entre la estructura y la

línea de costa.

El efecto de la esbeltez del oleaje H/L_0 se muestra en las *figs.* 2.10 y 2.11, para 0.0304 y 0.0076; al mantener constante la relación $U/y = 2L_0/L_0 = 2$. La *fig.* 2.3 corresponde a una esbeltez de 0.0152. La saliente se incrementa conforme se incrementa la esbeltez del oleaje.

En los análisis numéricos presentados por Perlin Marc, las líneas de costa adyacentes a la formación saliente, se erosionan para proveer de sedimento a la formación; sin embargo cuando ésta llega a un equilibrio, la cantidad de material que se requiere se reduce, y las líneas de costa adyacentes empiezan a rellenarse hasta alcanzar su posición original, esto se muestra en la *fig.* 2.12.

Criterio de Puh y Dalrymple, ref. [13].

Los estudios los realizaron en modelo hidráulico, para examinar los efectos de los parámetros geométricos en la morfología de la línea de costa. Los resultados del modelo los compararon contra los del prototipo.

Entre los parámetros geométricos adimensionales, toman en cuenta el ancho de la zona de rezaca (surf zone) $y_b^* = y_b/y$, la amplitud de las salientes $y_s^* = y_s/y$, la longitud del rompeolas $L_B^* = L/y$ y el volumen depositado $v_d^* = v_d/v_s$; siendo $v_s = y \ell d_B/2$.

Para un rompeolas aislado, el parámetro L_B^* es el más trascendental en la captación de material. En la *fig.* 2.13, al incrementarse L_B^* , se incrementa el parámetro y_s^* , que toma en cuenta la amplitud de las salientes; para un valor de L_B^* constante, el valor del parámetro y_s^* , se incrementa conforme se incrementa el parámetro y_b^* , que toma en cuenta el ancho de la zona de rezaca. En tanto que el rompeolas más cercano a la línea de costa es el más eficiente para captar material para el mismo valor de L_B^* .

De los resultados obtenidos en modelo y los reportados en prototipo, los de prototipo son más eficientes en términos del parámetro y_s^* , que

los del modelo. En prototipo el tómbolo se forma para $L_B^* \geq 1$, si la estructura no se localiza demasiado lejos de la línea de costa. La diferencia entre modelo y prototipo obedece a la variación del oleaje normal en prototipo y al efecto de la escala del modelo.

Suh y Dalrymple, presentan las siguientes expresiones para el diseño de rompeolas aislados.

$$v_d^* = \frac{\alpha y_a^*}{2} \quad (2.1)$$

$$y_a^* = 0.156 L_B^* \quad ; \quad y_b^* < 0.5 \quad (2.2)$$

$$y_a^* = 0.317 L_B^* \quad ; \quad 0.5 \leq y_b^* < 1 \quad (2.3)$$

$$y_a^* = 0.377 L_B^* \quad ; \quad y_b^* \geq 1 \quad (2.4)$$

Gourlay M. R. (1987) ref. [14], comentó el artículo de Suh y Dalrymple, ref. [13], sobre las consideraciones del mecanismo de las corrientes generadas por el oleaje para la formación de los tómbolos.

- a) Para valores de $L_B^* = L/y$ mayores de dos, las trayectorias de las difracciones en los extremos del rompeolas segmentado no interfieren una con otra y se forman dos sistemas de corrientes independientes. Para valores muy grandes de L_B^* dos tómbolos pueden formarse, en los extremos del rompeolas.
- b) Para valores de L_B^* menores de 0.4 ó 0.5, las trayectorias de la difracción interfieren una con otra y las corrientes a lo largo de la línea de costa son reducidas en intensidad. Si el arrastre de fondo predomina ($H_0/v_f T < 1.5$), hay un movimiento general de la costa hacia el mar detrás del rompeolas. Si el transporte en suspensión predomina ($H_0/v_f T > 1.5$), la formación es compleja, pero en ningún caso se forma completamente un tómbolo.
- c) Hay un valor crítico intermedio de L_B^* para la formación de un tómbolo simple, esto ocurre cuando se producen dos corrientes suficientemente fuertes que dividen el área detrás del rompeolas, en dos regiones que no son afectadas por el oleaje que llega del extremo opuesto del mismo. Las condiciones para la

formación del tómbolo son:

- c.1) Si $L_B^{\circ} < 0.67$, no puede formarse un tómbolo completo y la línea de costa detrás del rompeolas, se desplaza hacia mar adentro.
- c.2) Si $L_B^{\circ} \geq 1$, probablemente se forme el tómbolo, si la estructura está en la zona de rezaca (surf zone), esto es $y_b^{\circ} = y_b/y \geq 1$
- c.3) Si $L_B^{\circ} \geq 1$ y la estructura está fuera de la zona de rezaca, la amplitud hacia mar adentro de la saliente está determinada por la posición del rompeolas.

De la *fig.* 2.13, para rompeolas aislados, se pueden establecer las condiciones siguientes:

- a) De la información de prototipo, si $L_B^{\circ} > 1$, es probable la formación del tómbolo, si la estructura se ubica en la zona de rezaca $y_b^{\circ} \geq 1$.
- b) De la información de laboratorio, si $L_B^{\circ} > 1.75$ a 2.00, es probable la formación del tómbolo, si la estructura se ubica en la zona de rezaca $y_b^{\circ} \geq 1$.

Herbich, J. B. (1988), ref. [15], comenta el artículo de Suh y Dalrymple, J, ref. [13], sobre la comparación entre los ensayos en modelo y mediciones en prototipo, al presentar una correlación, *fig.* 2.14, entre los parámetros v_d/y ℓd_B y y/ℓ .

Rompeolas segmentados.

Criterio del CERC, ref. [10].

Para producir la formación de tómbolos a lo largo de la costa, los rompeolas segmentados, se ubican cerca de la línea de playa a una profundidad tal que la transmisión de energía en la zona protegida por la estructura sea constante; capte material durante la época de oleaje normal y la mantenga depositada durante la época de tormentas a lo largo de la costa.

La energía del oleaje que alcanza a pasar entre los rompeolas segmentados esta controlada por el ancho de la abertura entre los

rompeolas y la difracción del oleaje a través de las aberturas. Las aberturas deberán tener como mínimo un ancho de dos veces la longitud del oleaje incidente $B = 2L$ y la longitud del rompeolas segmentado deberá tener como mínimo la distancia que hay entre la línea de costa y la estructura. Pocas aberturas de anchos mayores daran lugar a que en la línea de costa se produzcan formaciones salientes o tómbolos muy separados, y depósitos con relieves muy alargados, que no proporcionan una protección adecuada en épocas de tormentas. Al incrementar el número de aberturas y acortar la longitud de cada segmento se provocarán formaciones de menor relieve, proporcionando una protección más uniforme.

Criterio de Pope, J. y Dean, J., ref. [12].

Pope, J. y Dean, J. (1986), ref. [12], analizaron el comportamiento de algunas estructuras construidas para preservar las playas, mediante un rompeolas segmentado, construidos paralelamente a la línea de costa, sin que sobrepase el oleaje incidente; formando tómbolos o salientes. En la *Fig. 2.15*, se consignan los proyectos analizados, indicando los efectos que se producen a lo largo de la costa, el tipo de formación y la energía del oleaje en la parte protegida por el rompeolas. Las formaciones observadas en los proyectos analizados, se pueden agrupar en las siguientes cinco categorías.

a. Tómbolos permanentes.

El oleaje que llega a la costa presenta una energía mínima y la playa protegida es estable. Hay muy poco transporte a lo largo de la costa, al desplazarse el material hacia aguas profundas.

b. Tómbolos periódicos.

En uno o más segmentos del rompeolas, se forman tómbolos periódicos por la variación de la energía del oleaje en la parte protegida por el rompeolas. Pueden ser estables o inestables en el tiempo o variables a lo largo de la costa. Durante época de tormentas, la energía del oleaje es alta, los tómbolos pueden ser disminuidos en su longitud y constituirse en solo salientes. Durante época de oleaje normal se

acrecenta el depósito de sedimentos y retorna a la formación de tómbolo.

c. Salientes bien desarrolladas.

Este tipo de formación ocurre cuando la energía del oleaje es alta en la parte de sotavento de la estructura y está caracterizada por una captación de sedimento balanceada. Las salientes bien desarrolladas se manifiestan después de que ha transcurrido cierto tiempo. El movimiento de material a lo largo de la costa, el que entra y sale, son de la misma magnitud. La presencia de corrientes de retorno en el espacio de la abertura es raro, y muy poco material es perdido hacia mar adentro.

d. Salientes suavizadas.

La sinuosidad de la línea de costa no es tan clara y la amplitud de la saliente es de menor relieve. La playa protegida puede periódicamente retener y liberar sedimento. No obstante que la cantidad de material retenido permanece en el tiempo, habrá periodos de pérdida de material o ganancia y la uniformidad de la formación playera no es tan segura.

e. Sin sinuosidad.

Sí la energía alta del oleaje alcanza la línea de costa incluyendo el área detrás de los segmentos, la formación playera no refleja la presencia del rompeolas segmentado.

Adimensionalmente Pope, J. y Dean, J. evaluaron la influencia de la configuración o formación, *fig. 2.16*, a través del parámetro, L/B , que involucra la capacidad del rompeolas para reducir la energía del oleaje incidente; y el parámetro y/d_b que representa la influencia de la ubicación de la estructura en la formación de las salientes y la difracción del oleaje incidente.

Criterio de Puh y Dalrymple ref. [13].

Realizaron estudios para rompeolas segmentados, en modelo y prototipo,

utilizando como parámetros geométricos adimensionales los indicados en el caso de rompeolas aislados, y_s^* , y_b^* , L_B^* , v_d^* , y G_B^* (ancho de la abertura). La relación de parámetros adimensionales G_B^*/L_B^{*2} es el más representativo para estimar la efectividad de la estructura para captar material. En la *fig.* 2.17, el valor del parámetro y_s^* , que toma en cuenta la amplitud de las salientes, se incrementa hasta un valor de $G_B^*/L_B^{*2} = 0.5$, a partir del cual decrece rápidamente.

En prototipo el tómbolo se forma para valores de G_B^*/L_B^{*2} del orden de 0.5. La diferencia entre modelo y prototipo, al igual que en los rompeolas aislados, obedece a la variación del oleaje normal en prototipo y al efecto de escala del modelo.

Suh y Dalryple, presentan como expresión de diseño

$$y_s^* = 14.8 \left[\frac{G_B^*}{L_B^{*2}} \right] \exp \left[-2.83 \left[\frac{G_B^*}{L_B^{*2}} \right]^{1/2} \right] \quad (2.5)$$

Herbich, J. B., ref. [15], comentaron el artículo de Suh y Dalryple, ref. [13], haciendo notar que la esbeltez del oleaje es importante H_o/L_o , como se aprecia en la *fig.* 2.18, así como el grado de sumergencia, altura del rompeolas/profundidad del agua, abajo de 0.7 a 0.6, se reduce la captación de material.

2.1.2 Oleaje en exceso, ref. [10].

Los rompeolas fuera de costa pueden ser diseñados, para que parte de la energía del oleaje incidente pueda ser transmitida sobrepasando la estructura, lo que ayuda a prevenir la conexión de la saliente con la estructura. Una desventaja que se presenta es que las salientes de la línea de costa tienden a achatarse y desparramarse lateralmente de una manera uniforme. El oleaje transmitido es irregular y con un periodo más corto que el oleaje incidente. El nivel de la marea, la altura del oleaje y su periodo, el talud de la estructura y la rugosidad afectan la transmisión de la energía por oleaje en exceso.

Para favorecer la acumulación de arena detrás del rompeolas, la altura de la estructura sobresaldrá del nivel medio del mar, la que será función de la altura del oleaje incidente para que no sobrepase la estructura por roción, así como del rango de marea.

2.1.3 Permeabilidad del rompeolas, ref. [10].

Otra forma para prevenir la formación del tómbolo, es hacer la estructura permeable, es decir, que parte de la energía incidente pase a través del rompeolas. Esta energía es transmitida con el mismo periodo que el oleaje incidente y en general es más predecible y regular que la transmisión del oleaje en exceso. Sin embargo, la transmisión del oleaje es función del periodo. Si la estructura no está cumpliendo con el objetivo, es impráctico incrementar la permeabilidad como una solución al problema.

2.1.4 Posición con respecto a la zona de rompiente.

Criterio del USACE, ref. [10].

Colocar el rompeolas entre la línea de costa y la rompiente, podrá hacer que la costa cambie de posición formando tómbolos. Si se coloca en la zona de rompiente, un gran porcentaje del transporte a lo largo de la costa pasará hacia mar adentro, más allá de la estructura y los efectos en las líneas de costa adyacentes serán menos severos. Este criterio no es recomendable para costas con pendientes de playa abruptas y angostas en la zona de rezaca debido a que el área resguardada por el rompeolas tenderá a llenarse completamente, comportandose el rompeolas como un muro de protección.

Criterio de Hideaki-Noda, ref. [16].

Los autores al establecer la ecuación de continuidad, al volumen total de depósito, v_d , en la región *abb'a* mostrada en la *fig. 2.19*, obtienen.

$$v_d = v_G B + v_R \ell \quad (2.6)$$

donde v_G representa el volumen total de arena depositado por unidad de ancho de abertura entre dos segmentos de rompeolas, transportado a través de la abertura y v_R el volumen total de arena depositado por unidad de longitud del rompeolas, como resultado de la intrusión de arena a través del rompeolas permeable. Adimensionalmente la ecuación anterior toma la forma siguiente.

$$\frac{v_G}{v_R} = \frac{v_d}{v_R B} - \frac{\ell}{B} \quad (2.7)$$

la relación v_G/v_R puede ser evaluada a través de mediciones que se realicen, por ejemplo, mediante modelos hidráulicos que permitan calcular v_d y v_R .

Para lograr lo anterior, Hideaki-Noda, realizaron dos estudios experimentales, el primero de ellos, lo diseñó para estimar el material transportado de mar adentro a través de un rompeolas permeable, v_R ; y el segundo de los estudios, lo diseñó para estimar el material transportado a través del rompeolas y abertura entre rompeolas. Las condiciones de operación y resultados obtenidos, se indican a continuación:

a. Transporte a través del rompeolas.

Los ensayos se realizarán para cuatro condiciones de operación, al combinar dos tipos de perfiles playeros (el formado en época de tormentas, B y el formado por el oleaje normal, S) y dos tipos de oleaje, *tabla* 2.1 (B y S); para estimar el transporte de material a través del rompeolas permeable.

Para una condición específica de operación, el perfil original ($s = 1/10$) representada en modelo, se ajusta con el oleaje de tormenta (B) o con el oleaje normal (S). Posteriormente una vez ajustado el perfil playero y colocado el rompeolas, el modelo hidráulico se opera con cualquiera de los dos oleajes, el de tormenta (B) y el normal (S). De esta forma las combinaciones de perfil-oleaje utilizadas son B-B,

B-S, S-B y S-S.

De la *fig.* 2.20, que relaciona y/y_b (posición del rompeolas/posición de la rompiente) y v_d/v_o (volumen captado por la presencia del rompeolas/volumen original sin rompeolas); los valores máximos para las combinaciones perfil-oleaje (B-B, B-S, S-B y S-S) están comprendidas en el rango $0.5 < y/y_b < 1.0$.

b. Transporte a través del rompeolas y por la abertura del rompeolas segmentado.

La operación del modelo, al igual que el realizado con el modelo anterior (inciso "a"), se hizo con las características del oleaje indicado en la *tabla* 2.2; al ubicar el rompeolas conforme se indica en la *tabla* 2.3.

Al ajustar la pendiente de la playa y operar el modelo de acuerdo con la condición de oleaje A (*tabla* 2.2) y la posición del rompeolas C (*tabla* 2.3), el cambio de la línea de playa mostrado en la *fig.* 2.21, indica que la disposición máxima de desarrollo del tómbolo ocurre cuando el rompeolas se ubica para $y/y_b = 0.56$. Shinohara y Tsubaki ref. [17] reportan que la posición del rompeolas, para la alternativa de transporte de material a través del rompeolas, inciso "a", para las mismas características de ajuste de la pendiente de la playa y operación del modelo; corresponde a $y/y_b = 0.39$.

En la *fig.* 2.22, se muestra la relación entre v_d/AD_n y y/y_b , obteniendo para las condiciones de operación A-A y C-C; así como la relación v_r/yD_n , para las condiciones de operación B-B (inciso "a"). Una comparación de los resultados, para las condiciones de operación A-A y B-B, con características de oleaje similares, muestra que el volumen total de arena depositado por unidad de ancho de la abertura entre dos segmentos de rompeolas, transportado a través de la abertura es tres veces mayor que el volumen total de arena depositado por unidad de longitud del rompeolas, como resultado de la intrusión de arena a través del rompeolas permeable; concluyéndose que el depósito de arena captado entre la línea de costa y el rompeolas no solo es función de la relación y/y_b , sino también de L/B , exceptuando el

valor obtenido para $y/y_b = 0.25$

Finalmente de los ensayos realizados por Hideaki-Noda, sobre el efecto de depósito de arena de un rompeolas fuera de costa, debido al transporte de arena de mar adentro y a lo largo de la costa, concluye que:

- 1) La posición óptima, al tomar en cuenta el transporte a través del rompeolas corresponde a una relación $y/y_b = 1.0$ para oleaje de tormenta.
- 2) El transporte de material a través del rompeolas permeable es mínimo cuando la estructura se ubica más allá de la línea de rompiente; y cuando se ubica en la zona de rezaca (surf zone) una gran cantidad de material es arrastrado hacia la línea de costa.
- 3) La cantidad de arena depositada por unidad de ancho a través de la abertura entre segmentos de rompeolas es de tres veces mayor que el que se transporta a través del rompeolas, cuando las dimensiones y ubicación son elegidas apropiadamente.

Criterio de Toyoshima Osamu, ref. [17].

Del análisis estadístico realizado en 86 sitios donde utilizaron rompeolas segmentados no se encontró un parámetro característico para la captación de arena; el autor propone un criterio de diseño, con base en los resultados del análisis y experiencias obtenidas, de acuerdo a la profundidad del agua.

a. En la línea de costa.

Este tipo de estructura se ubica cerca de la costa, utilizándose en sitios donde: la pendiente de la playa es abrupta; la arena es suministrada en pequeña escala; se previene la socavación frente a la estructura; se requiere mantener la línea de costa. Toyoshima propone los rompeolas segmentados para que la arena penetre por las aberturas y se intercepte el arrastre litoral por difracción del oleaje. La longitud del rompeolas será de 2 a 3 veces la longitud del oleaje, de 40 a 60 m; la abertura entre segmentos de rompeolas de una vez la

longitud del oleaje, de 20 m. Pueden presentarse socavaciones al frente de los rompeolas, especialmente construidos en mar abierto.

b. En aguas someras.

Se ubican a profundidades menores de un metro, en playas relativamente suaves, en rango de marea alto. El depósito de arena se produce a pesar de que la captación no es suficiente.

Toyoshima O. recomienda los rompeolas segmentados, con longitudes de 3 a 5 veces la longitud del oleaje, de 60 a 100 m; la abertura de una vez la longitud del oleaje, del orden de 20 m. La longitud del rompeolas no deberá exceder 10 veces la longitud del oleaje. La ubicación de la estructura queda determinada por la profundidad del sitio, pero una distancia muy alejada de la costa no es muy ventajosa.

c. En aguas intermedias.

Se ubican en la zona de rezaca (surf zone), a profundidades de 2 a 4 m y excepcionalmente a 6 m de profundidad. Los rompeolas fuera de costa continuos reducen la energía del rompeolas, mientras que los segmentados producen acumulación de arena detrás de la estructura.

Cuando el rompeolas es aislado, la longitud será de 3 a 10 veces la longitud del oleaje, de 100 a 300 m. Para rompeolas segmentados la longitud de la estructura será de 2 a 6 veces la longitud del oleaje, de 60 a 200 m y la abertura de una vez la longitud del oleaje, de 20 a 50 m. No obstante que la posición del rompeolas queda definido por la profundidad, la distancia entre la línea de costa y la estructura sera de 0.3 a 1 la longitud del oleaje, de 30 a 100 m.

d. En aguas profundas.

El rompeolas se ubica fuera de la zona de rezaca (surf zone), su función es la disipación de la energía del oleaje y no el captar arena de mar adentro ó a lo largo de la costa.

2.1.5 Orientación del rompeolas, ref. [10].

La orientación con respecto a la dirección del oleaje predominante y la dirección de la línea de costa pueden tener un marcado efecto en el tamaño y forma de la saliente o tómbolo.

Un cambio en la orientación de la estructura modifica las trayectorias de la difracción del oleaje en la línea de costa y su efecto sobre la misma. Para oleajes que son extremadamente esviados con respecto a la línea de costa, recomiendan orientarlos paralelos a la incidencia del oleaje.

2.1.6 Otras consideraciones.

Otros factores dignos de considerar son los de tipo ecológico, los estéticos, el flujo entre las aberturas y los de tipo constructivo.

2.2 Consideraciones del Sitio.

2.2.1 Generalidades.

Los parámetros que en cierta forma ayudan a la preservación de la costa por la presencia de los rompeolas son aquellos que afectan la difracción del oleaje. La longitud, altura y dirección del oleaje, así como la longitud del rompeolas aislado o la abertura entre segmentos de rompeolas, todos ellos afectan la difracción resultante. Otros parámetros no menos importantes son el rango de la marea, la pendiente natural de la playa, el suministro de sedimentos y el tamaño del mismo.

Longitud del oleaje.

En general, la cantidad de energía transmitida al rompeolas se incrementa con la longitud del oleaje. De acuerdo a la teoría de difracción, la longitud de la ola no afecta la trayectoria de las crestas. Sin embargo, la longitud del oleaje afecta la amplitud de la

difracción en un punto en particular. Oleajes mayores proveen una energía mayor en la zona protegida por el rompeolas, especialmente con incidencia del oleaje esviado, impidiendo la formación del tómbolo.

Altura del oleaje.

En aguas someras, la dispersión de la amplitud del oleaje por efecto de la difracción se distorsiona, al cambiar la trayectoria de los frentes de ola, de circular a un arco con radio decreciente, *fig. 2.23*. Para esta situación la celeridad está expresada en función de la profundidad y de la amplitud del oleaje.

$$C = [g(d+H)]^{1/2} \quad (2.8)$$

En situaciones donde la dispersión de la amplitud es importante, la formación de los tómbolos es más probable, por la trayectoria de los frentes de ola, al alcanzar primeramente la línea de costa que la intersección de los frentes de ola difractados por ambos extremos del rompeolas.

Dirección del oleaje.

La forma que alcance la línea de costa detrás de un rompeolas es función de la dirección natural del oleaje. Un oleaje muy esviado produce corrientes fuertes a lo largo de la playa que puedan evitar la formación del tómbolo o restringir el tamaño de la saliente. La forma que alcanza la línea de playa entre la cuspide de la saliente o la cima del tómbolo, es función del oleaje predominante.

Longitud de un segmento de rompeolas.

Junto con la abertura entre segmentos de rompeolas, y la distancia que deben guardar estos con respecto a la línea de costa, la longitud de un segmento de rompeolas es un factor importante que interviene en la formación de las salientes y tómbolos.

Abertura entre segmentos de rompeolas.

La relación apertura entre segmentos de rompeolas y longitud de oleaje B/L, afecta la distribución de la altura del oleaje detrás del rompeolas. Al incrementarse la relación B/L, se incrementa la energía en la zona protegida por el rompeolas.

Rango de la marea.

El efecto de la marea en la formación de la saliente o tómbolo, es difícil de predecir. En rangos de marea grandes, mayores de 1.5 m evitan la formación del tómbolo, especialmente cuando el oleaje sobre pasa al rompeolas; en cuanto a las salientes, éstas no alcanzan un estado de equilibrio.

Pendiente de la playa.

Si el perfil de la playa es suave y la estructura es colocada fuera de la zona de rezaca (surf zone), el rompeolas puede captar material eficazmente siempre y cuando éste sea lo suficientemente alargado.

Alimentación de material.

De existir una alimentación suficiente de sedimento, el ajuste de la línea de costa a una saliente o un tómbolo es posible que se logre. El transporte mar adentro modificará el perfil de la playa protegida por la estructura, como resultado de diferentes condiciones de equilibrio que puedan alcanzarse. En los sitios donde hay variación estacional en el suministro de material, es posible que las salientes se incrementen o decrezcan.

Tamaño del material.

La distribución granulométrica del material en una playa afecta la forma y crecimiento de la saliente afectando el perfil de equilibrio de la playa y el grado de transporte del sedimento. El material fino responde a los cambios del oleaje y a la formación de tómbolos.

2.2.2 Características del oleaje en aguas profundas.

Se determinarán para las condiciones de oleaje normal y extraordinario.

El conocimiento de las características del oleaje normal nos permite estudiar la recuperación de las playas, pues ellas constituyen el mecanismo fundamental de la conformación a largo plazo. En especial, interesan las condiciones estacionales de oleaje normal, ya que ellas condicionan los perfiles característicos extremos de las playas.

El conocimiento de las características del oleaje extraordinario nos permitirá dimensionar las obras que preservarán las playas, una vez que éstas se "transladen" al sitio de ubicación de las mismas.

a. Oleaje normal.

La manera más confiable que existe para conocer las características del oleaje para un sitio determinado, sería el realizar mediciones directas durante un lapso que se recomienda no sea menor de un año, para lo cual en la actualidad existen diferentes aparatos que permiten llevarlo a cabo.

Sin embargo, la medición directa casi nunca es posible realizarla, bien por motivos de orden económico o por la necesidad de contar con datos rápidos, por lo que es común hacer uso de fuentes de información que definen las variables de oleaje en cuanto a periodo y altura. A continuación se presentan dos de ellas.

OCEAN WAVE STATISTICS, ref. [21].

Esta fuente de información fue editada en 1967 por el Laboratorio Nacional de Física, Ministerio de Tecnología de la Gran Bretaña y contiene los datos estadísticos del oleaje, estimados visualmente por barcos voluntarios que navegaron en las rutas establecidas en todo el mundo durante los años de 1953 a 1961.

Los datos reportados por los observadores son: dirección, periodo y

alturas de ola, no haciéndose ningún tipo de distinción entre el oleaje local (Sea) y el distante (Swell). De acuerdo a la captación de datos que realizaron, la información se presenta agrupada en diferentes zonas, tal y como se muestra en la *fig. 2.24*.

La forma de presentación de los datos para cada zona es la siguiente:

- 1) *Régimen*: anual (todas las estaciones), invierno (diciembre-febrero), primavera (marzo-mayo), verano (junio-agosto) y otoño (septiembre-noviembre).
- 2) *Dirección*: azimut con variaciones de 10° y datos agrupados en sectores de 30° (p.e. 020° - 030° - 040°).
- 3) *Periodos*: Se presentan los datos de acuerdo a la codificación de la *tabla 2.4*.
Los periodos reportados corresponden al promedio de los reportados en olas bien formadas.
- 4) *Altura*: de acuerdo a la codificación de la *tabla 2.5*.
Se presentan tablas o matrices que relacionan periodo-altura-dirección, por régimen, pudiéndose transformar en matrices frecuenciales de esas mismas variables o deducir los tiempos de acción de ellas.

SEA AND SWELL CHARTS, ref. [21].

En este caso la información se refiere a las publicaciones denominadas "Atlas of sea and swell charts" tanto del "Northeastern Pacific Ocean" como del "North Atlantic Ocean", ambas editadas por la U.S. Navy Oceanographic Office, Washington, D.C.

Los datos presentados por esta fuente, obedecen a observaciones visuales del estado del mar, realizadas desde embarcaciones durante un periodo de diez años. Para su presentación el oleaje se agrupa en dos tipos, dando la siguiente definición para cada uno de ellos:

Oleaje local (Sea). Olas generadas por vientos locales, mismas que son generalmente de periodos cortos, superficie irregular rápidamente cambiante que se desplaza en la misma dirección que el viento generado.

OleaJe distante (Swell). Olas que han avanzado más allá de la influencia de los vientos generadores. Son más largas en periodo, de crestas redondeadas más uniformes, de mayor altura y su dirección es independiente de la dirección del viento.

Los datos de oleaje se presentan agrupando las observaciones realizadas en un área o zona determinada. Para el caso de la República Mexicana corresponden 16 zonas de las que 10 son para el Océano Pacífico y 6 para el Golfo de México y Mar Caribe, *fig.* 2.25.

Cada rosa de oleaje *fig.* 2.26, es una representación gráfica de la frecuencia mensual resultante de la acumulación de datos durante el periodo de observación. Una explicación de la representación gráfica se puede consultar en la ref. [21].

Tanto el oleaje local como el distante, se dividen en 3 rangos de alturas de ola, las cuales aparecen en la *tabla* 2.6.

b. Oleaje extraordinario.

Como en la República Mexicana existe poca información para plantear un modelo de probabilidad a partir de mediciones de oleaje, es decir, una relación entre el oleaje significativo y su periodo de retorno; se tiene que recurrir a métodos indirectos como el de Sverdrup-Munk-Bretschneider, el Huracán Estandar y el Estadístico, que analizan las condiciones extremas de oleaje producidas por la presencia de ciclones.

Para la aplicación práctica de los métodos indirectos es necesario contar con la información siguiente:

- 1) Trayectoria de la perturbación.
- 2) Selección de la (s) posición (es) del huracán más desfavorable (s) en cuanto al lugar donde se quieren conocer las características del oleaje.
- 3) Variables específicas que alimentan a cada método.

La información correspondiente se puede obtener en las oficinas del

Servicio Meteorológico Nacional, en forma de cartas isobáricas.

METODO SVERDRUP-MUNK-BRETSCHNEIDER (SMB), ref. [2].

La aplicación del método requiere determinar previamente las características del viento generador y el área sobre el cual actúa; para posteriormente obtener las características del oleaje significativo.

A. Características del viento generador.

Las características del oleaje generado se obtienen de la manera siguiente.

Duración del viento.

Para estimar la duración del viento se utilizan los mapas de superficie, empleando las características isobáricas mostradas en ellos, las que generalmente están calculadas cada 6 horas. A continuación se describe como se obtiene la duración utilizando estos mapas.

Se observa la dirección del fetch para el lugar en estudio en mapas de superficie sucesivos (es decir, cada 6 horas), con lo cual se estima de manera aproximada la persistencia del viento en la zona de generación de acuerdo con los siguientes criterios: acumulativo y variable.

- a) *Acumulativa.* Si conforme a la rosa de vientos se observa que la dirección del fetch no varía con respecto a cada uno de los rumbos de ella más de $360^{\circ}/16$, la duración se obtiene de la siguiente manera: al primer mapa se le asignan tres horas, nueve al segundo, quince al tercero y así sucesivamente. Siguiendo este procedimiento la duración del viento en algunos casos puede ser mayor al tiempo entre mapas de superficie.
- b) *Variable.* Si la dirección del fetch varía más de $360^{\circ}/16$ con respecto a los rumbos de la rosa de los vientos, se consideran los casos que se indican en la *tabla 2.7.*

Para cada velocidad de viento, el oleaje generado puede llegar a alcanzar una energía máxima y para ello se requiere que dicho viento actúe durante un cierto tiempo mínimo y a lo largo de cierta distancia mínima, los que tendrán que ser mayores cuanto mayor sea la velocidad del viento. Al oleaje con energía máxima para una velocidad del viento constante (U) se le denomina oleaje completamente desarrollado, y a la distancia y tiempo mínimos en que debe actuar se denomina fetch y duración mínimos, respectivamente. Alcanzada la condición de completo desarrollo, el oleaje permanece con características prácticamente constantes.

Si al actuar un viento con velocidad U a lo largo de una distancia infinita, lo hace durante un tiempo menor que la duración mínima, el oleaje no alcanza a desarrollarse completamente y se dice que dicho oleaje está limitado por la duración. Si por el contrario el viento con velocidad U actúa durante un tiempo infinito a lo largo de una distancia menor que el fetch mínimo, el oleaje tampoco alcanza a desarrollarse completamente y se dice que dicho oleaje está limitado por fetch.

Velocidad del viento.

La velocidad del viento geostrófico se obtiene a partir de la ecuación siguiente:

$$v_g = \frac{1}{2 \Omega \rho \sin \phi} \frac{\Delta p}{\Delta n} \quad (2.9)$$

Para la aplicación de la expresión anterior es necesario determinar el punto medio del fetch y estimar su ubicación en latitud ϕ . Así como el espaciamento entre isobáras en grados de latitud.

Radio de curvatura.

El radio se determina midiendo la distancia del centro del huracán al punto medio del fetch, en grados de latitud.

Velocidad del viento formativo.

Con el radio de curvatura conocido y la temperatura media del mar-aire, se obtiene de la *fig.* 2.27, el factor de reducción por el que se afecta la velocidad de viento geostrófico para estimar la velocidad de viento formativo U.

B. Características del oleaje significativo.

La altura de ola y periodo significantes se determinan de la forma siguiente:

- a) Con la duración asignada a las cartas isobáricas en estudio, se calcula el parámetro (gt/U), donde t es la duración, U es la velocidad de viento formativo y g la aceleración de la gravedad.

Del Shore Protection Manual, ref. [10].

$$\frac{gt}{U} = K \exp \left\{ \left[A \operatorname{Ln} \left[\frac{gF}{U^2} \right]^2 - B \operatorname{Ln} \left[\frac{gF}{U^2} \right] + C \right]^{1/2} + D \operatorname{Ln} \left[\frac{gF}{U^2} \right] \right\} \quad (2.10)$$

(donde K = 6.5882, A = 0.0161, B = 0.3692, C = 2.2024 y D = 0.8798)

- b) Con el Fetch calculado y el Fetch medio obtenido de las cartas isobáricas, se determina el parámetro (gF/U²), utilizando aquel que resulte menor para el cálculo de T_{1/3} y H_{1/3}, por medio de las ecs. 2.11 y 2.12, ref. [10].

$$\frac{gH_{1/3}}{U^2} = 0.283 \tanh \left[0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right] \quad (2.11)$$

$$\frac{gT_{1/3}}{2\pi U} = 1.20 \tanh \left[0.077 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25} \right] \quad (2.12)$$

METODO DEL HURACAN ESTANDAR, ref. [2].

Las características del oleaje generado por un huracán se pueden obtener con el método de SMB u otros similares, pero los resultados que se obtienen con ellos no son confiables ya que el campo de vientos provocado por un huracán es irregular y como consecuencia de ello la determinación del fetch es laboriosa y algunas veces complicada, además se tienen cambios en la velocidad, dirección y duración del viento ya que el huracán se desplaza.

De los análisis realizados para diferentes huracanes, el CERC propone utilizar dos fórmulas empíricas que pueden ser usadas para estimar la altura y periodo de la ola significativa en aguas profundas, para el punto donde se tenga el viento máximo, y son:

$$H_{1/3\text{máx}} = 5.03 e^{\left[\frac{R \Delta p}{4700} \right]} \left[1 + \frac{0.29 \alpha_v v_F}{(U_R)^{1/2}} \right] \quad (2.13)$$

$$T_{1/3\text{máx}} = 8.60 e^{\left[\frac{R \Delta p}{9400} \right]} \left[1 + \frac{0.145 \alpha_v v_F}{(U_R)^{1/2}} \right] \quad (2.14)$$

La velocidad máxima del viento se calcula a partir de las expresiones:

$$U_R = 0.865 U_{\text{máx}} \quad (2.15)$$

$$U_R = 0.865 U_{\text{máx}} + 0.5 v_F \quad (2.16)$$

donde la primera de ellas corresponde a la condición de huracán estacionario, mientras que la segunda, a la de huracán desplazándose.

La velocidad máxima del viento gradiente se calcula con la expresión:

$$U_{\text{máx}} = 0.446 (14.5 (p_n - p_o)^{1/2} - 0.31R (2\omega \text{ sen } \phi)) \quad (2.17)$$

Para la zona del Golfo de México, a partir de los datos de huracanes registrados, el método propone utilizar la siguiente ecuación para

calcular R.

$$R = 1.85 \left[10 \left[\frac{P_0}{150} - 3.45 \right] \right] + \Delta R \quad (2.18)$$

$$\Delta R = 1.85 \left[10 \frac{1}{2} \left[\frac{P_0}{38} - 16.74 \right] \right] \quad (2.19)$$

donde R y ΔR están en km y P_0 en mm de Hg.

Para definir la altura y periodo de decaimiento se puede utilizar para los métodos anteriormente expuestos, el método de Bretschneider.

Las ecuaciones del método son las siguientes:

$$\frac{(H_{1/3})_D}{(H_{1/3})_G} = \left[\frac{k_1 F}{k_1 F + D} \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

$$\frac{(T_{1/3})_D}{(T_{1/3})_G} = \left[2 - \frac{(H_{1/3})_D}{(H_{1/3})_G} \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

METODO ESTADISTICO, PARA EL GOLFO DE MEXICO, ref. [7].

En las costas del Golfo de México las condiciones meteorológicas más adversas para la generación del oleaje son los ciclones, y el método aquí expuesto sólo es aplicable a estas costas, aunque es posible desarrollar métodos aplicables a otros lugares.

En la determinación del oleaje a partir de un ciclón se considera tanto la ocurrencia de éste como su intensidad. El método de predicción está basado en un análisis estadístico y su deducción se puede consultar en la ref. [23].

Las ecuaciones que se utilizan en el método de predicción del oleaje son:

$$\overline{IP} = 1024.18 - 1.6684\phi \quad (2.22)$$

$$\overline{SIP} = 54.03 - 1.013\phi \quad (2.23)$$

$$P(H) = 1 - \left[\frac{T_a - 1}{T_a} \right]^{1/r} \quad (2.24)$$

$$R = 0.0006574 e^{0.01155 IP_H} \quad (2.25)$$

$$E = 962.7097(1013.25 - IP_H)^{1.1667} R^{0.6667} \quad (2.26)$$

$$(\text{sen } \phi)^{-0.3333} \left[1 + 0.418 \frac{v_d}{(1013.25 - IP_H)^{0.5}} \right]$$

$$\overline{H}_{1/3} = 0.0051 E^{0.518} \quad (2.27)$$

$$\overline{T}_{1/3} = 0.2768 E^{0.261} \quad (2.28)$$

La aplicación del método para predecir el oleaje producido por los ciclones en el Golfo de México, se resume en los siguientes pasos.

- 1) Se localiza el sitio en estudio.

Se ubica el punto de interés en las *figs.* 2.28 y 2.29 con lo cual se obtiene el número de ciclones por año r , y la velocidad de desplazamiento del ciclón v_d . Para ϕ se escoge el valor de la latitud del centro de la zona en la que está el punto de estudio.

- 2) Se calcula la media y desviación estándar de los índices de presión.

Para realizar esto se utilizan las fórmulas 2.22 y 2.23.

- 3) Se encuentra la probabilidad de que se presente un ciclón $P_{B\phi}(IP_0)$.

Como en el Golfo de México, $IP_0 = 1013.25$ mb, se obtiene:

$$\alpha_0 = \frac{1013.25 - \overline{IP}}{\overline{SIP}} \quad (2.29)$$

En seguida, de una tabla de distribución normal se encuentra la probabilidad de tener valores menores o iguales a α_0 . Tal probabilidad corresponde a $P_{B\phi}(IP_0)$.

- 4) Se obtiene la probabilidad de que un ciclón produzca un oleaje significativo mayor que cero, $P(H)$.
Se sustituye el periodo de retorno en 2.24.
- 5) Se encuentra la probabilidad de que el ciclón produzca un oleaje significativo mayor que H , $P_{B\phi}(IP_H)$.
Los resultados encontrados en los pasos 3 y 4 se sustituyen en la ecuación 2.30.

$$P_{B\phi}(IP_H) = P_{B\phi}(IP_0)P(H) \quad (2.30)$$

- 6) Se encuentra el índice de presión IP_H .
Con el valor de $P_{B\phi}(IP_H)$ de una tabla de distribución normal se encuentra la variable estandarizada α_H . Luego mediante la siguiente ecuación se encuentra IP_H .

$$IP_H = \overline{IP} + \alpha_H \overline{SIP} \quad (2.31)$$

- 7) Se calcula el radio de máximo viento y el índice de energía máxima del ciclón.
Se emplean las ecuaciones 2.25 y 2.26.
- 8) Se calcula la altura de ola significativa y su periodo en aguas profundas al final de la zona de generación del oleaje.
Se emplean las formulas 2.27 y 2.28.

2.2.3 Límite de la zona de aguas profundas.

La determinación del límite de la zona de aguas profundas, se puede hacer para cada oleaje que se desee estudiar, utilizando las tablas A.1 de la ref. [4]. La secuencia de cálculo sería la siguiente:

- 1) Conocido el periodo $T_{1/3}$ del oleaje, léase la celeridad C_0 en aguas profundas, en el último renglón.
- 2) Divídase este valor entre 1.01 y búsquese para ese periodo el valor de la celeridad "C" más próximo al cociente obtenido.
- 3) Léase el valor de la profundidad-batimétrica "d" correspondiente a esa celeridad "C", en la primera columna de la tabla A.1; este

valor define a la batimetría que marca el límite de la zona de aguas profundas.

2.2.4 Deformación del oleaje en la cercanía de la costa.

El oleaje al generarse mar adentro, por una parte, experimenta un cierto decaimiento al llegar a la costa, y por otra parte, sufre alteraciones importantes que ocasionan fenómenos que determinan el comportamiento del rompeolas. Por la presencia del fondo se produce el fenómeno de refracción del oleaje; por obstáculos (islas y estructuras marítimas) se produce una transferencia lateral de energía, es decir, el fenómeno de la difracción del oleaje; y finalmente por las características en la frontera reflejante una pérdida de energía, conocida como reflexión del oleaje. Fenómenos que deforman el oleaje en la cercanía de la costa, principalmente en la altura, celeridad y longitud de onda.

Tomando en cuenta lo anterior, la altura H del oleaje en un punto cercano a la costa puede obtenerse de:

$$H = K_n K_r K_d (1+K_R) H_0 \quad (2.32)$$

con ayuda de la *fig.* 2.30 es posible estimar el valor del coeficiente de propagación en aguas someras, K_n , en función de d/L ó d/L_0 . El coeficiente K_r , se obtiene a partir de los rayos de oleaje, al medir la equidistancia de los rayos de oleaje en aguas profundas (b_0) y en el sitio donde se desea conocer la altura del oleaje (b); es decir

$$K_r = \left[\frac{b_0}{b} \right]^{0.5} \quad (2.33)$$

La magnitud de K_R podrá variar de 1.0 para una reflexión total ó pura, a 0.0 para un perfecto amortiguamiento. En la *tabla* 2.8 se indican los valores de K_R obtenidos experimentalmente.

La distribución de la energía detrás de una barrera, es tomada en cuenta a través del coeficiente de difracción K_d , por ejemplo, en el

extremo de un rompeolas, a la entrada de un recinto o por la presencia de una isla, *fig.* 2.31. La difracción del oleaje en el extremo de un rompeolas, con un ángulo de incidencia normal al rompeolas, se muestra en la *fig.* 2.32; para otros ángulos de incidencia se utilizan los diagramas de difracción de la ref. [2], obtenidos para fondo plano, es decir, uniforme. Cuando el fondo detrás del rompeolas no es uniforme, aparecen actuando en forma conjunta la difracción y la refracción, en la ref. [2] se muestra el método para determinar los coeficientes de refracción-difracción combinados.

2.2.5 Alcance de la ola.

Si fuere el caso, el de no permitir que el oleaje se transmita a la playa, es decir, que la energía del oleaje se disipe en el rompeolas, se hace necesario el determinar el alcance del oleaje por roci6n, para definir la altura del rompeolas sobre el nivel medio del mar.

Para determinar de manera aproximada los valores del alcance de la ola, ref. [8] y *fig.* 2.33 en estructuras rugosas como rompeolas, hechas con piedra y elementos prefabricados, para una protección moderada (el 10% de las olas sobrepasará el alcance considerado), se utiliza.

$$R_u = 1.1 H_{1/3} \quad (2.34)$$

Para el caso en que se desee dar una protección grande (el 1% de las olas sobrepasará el avance considerado) se usará.

$$R_u = 1.5 H_{1/3} \quad (2.35)$$

En el caso de estructuras lisas, como muros de concreto, los coeficientes de las expresiones anteriores serán, 1.75 para protección moderada y 2.5 para protección grande. Los valores asignados corresponden a estructuras "profundas", en las cuales d_s es la profundidad al pie de las mismas, que deberá ser:

$$d_b \approx 1.88 H_b^{1/3}$$

(2.36)

2.2.6 Características del oleaje en la rompiente.

La profundidad d_b , y la altura de oleaje en la rompiente H_b , se calculan en función de las características del oleaje en aguas profundas H_o/L_o ; y de la pendiente de la playa, utilizando para la profundidad d_b la $\mu g.$ 2.34, y para la altura del oleaje H_b la $\mu g.$ 2.35, propuesta por Goda, ref. [4]; o las expresiones siguientes:

Cálculo de las condiciones en rompiente ref. [10].

$$H_b = H_o s^{1/5} \left[\frac{H_o}{L_o} \right]^{-1/4} \quad (2.37)$$

$$d_b = H_b / 1.1 s^{1/8} \left[\frac{H_o}{L_o} \right]^{-1/12} \quad (2.38)$$

2.2.7 Características del oleaje después de la rompiente.

Horikawa y Kuo, ref. [4], presentan un diagrama, $\mu g.$ 2.36, que permite obtener la altura del oleaje después de la rompiente en función de la profundidad d_b y altura de la ola rompiente H_b .

2.2.8 Ubicación y orientación del rompeolas.

La ubicación y orientación están estrechamente vinculados al objetivo del rompeolas y a las características del oleaje ya descritas.

2.2.9 Pendiente de la playa (media).

La pendiente media de la playa en una zona determinada se puede calcular midiendo la distancia entre la batimétrica 0 y la batimétrica que corresponde al límite de aguas profundas, medida sobre una recta

sensiblemente normal a las curvas batimétricas. El proceso se debe repetir para varias rectas en la zona en estudio, obteniendo la distancia promedio \bar{x} , para cada estimación. La pendiente media de la playa se podrá calcular con:

$$s = \frac{d_o}{\bar{x}} \quad (2.39)$$

2.2.10 Amplitud de la marea.

a. Marea astronómica.

El conocimiento de la amplitud de las mareas astronómicas y el efecto de las mismas, permitirá definir el nivel de operación de la estructura que se sitúa por encima del máximo nivel alcanzado por el mar.

En México existe un Servicio Mareográfico Nacional, el que es operado por el Instituto de Geofísica, UNAM, desde 1952. Este servicio se encarga de la instalación, operación y mantenimiento de las estaciones mareográficas, así como de la interpretación de los mareogramas, la obtención de los planos de referencia y el pronóstico de los niveles esperados, para lo cual anualmente edita Tablas de Predicción de Mareas.

Las tablas contienen las horas a las que ocurren las pleamares y las bajamares, así como la altura de ellas en relación a un plano de referencia; de igual forma presentan la ubicación geográfica de las estaciones (13 en el Océano Pacífico y 7 en el Golfo de México), las principales armónicas utilizadas y los diferentes niveles o planos generados por las mareas.

Dependiendo del tipo de marea (diurna, semidiurna o mixta) los planos de marea que se generan son:

Altura máxima registrada: Nivel más alto registrado en la estación debido al efecto de un ciclón combinado, probablemente, con el de la

marea astronómica.

Pleamar máxima registrada (PMR o HHW). Nivel más alto registrado debido a las fuerzas de marea periódica, o también a que tengan influencia sobre las mismas los factores meteorológicos.

Nivel de pleamar media superior (NPMS o NHHW). Promedio de la más alta de las dos pleamars diarias, durante el periodo considerado en la estación (mareas semidiurna y mixta).

Nivel de pleamar media (NPM o MHW). Promedio de todas las pleamars durante el periodo considerado en cada estación.

Nivel medio del mar (NMM o MSL). Promedio de las alturas horarias durante el periodo registrado en la estación.

Nivel de media marea (MM o MTL). Plano equidistante entre la pleamar media y la bajamar media; es decir se obtiene promediando éstos dos valores.

Nivel de bajamar media (NBM o MLW). Promedio de todas las bajamars durante el periodo considerado en la estación.

Nivel de bajamar media inferior (NBMI o MLLW). Promedio de la más baja de las dos bajamars diarias, durante el periodo considerado en la estación (mareas semidiurna y mixta).

Bajamar mínima registrada (BMR o LLW). Nivel más bajo registrado debido a las fuerzas de marea periódica, o también a que tengan influencia sobre las mismas los factores meteorológicos.

Altura mínima registrada. Nivel más bajo registrado en la estación debido al efecto de un ciclón combinado, probablemente, con el de la marea astronómica.

b. Marea de tormenta.

Se define a la marea de tormenta como el aumento o disminución del

nivel del agua arriba o abajo del nivel esperado, debido a la acción de la fuerza del viento sobre la superficie del agua.

La marea de tormenta suele ser muy importante en áreas costeras sujetas a vientos ciclónicos o huracanados, ya que puede causar aumento o disminución de los niveles del agua debidos a las mareas astronómicas.

Para el cálculo de dicho ascenso, a continuación se presenta una breve descripción de la metodología presentada en la ref. [1].

1) Empleando el índice de presión \bar{P}_o de la ec.:

$$\bar{P}_o = 1028.14 - 1.695 \phi \quad (2.40)$$

2) Se determina el valor de la depresión (Δ_p) como:

$$\Delta_p = (1013.25 - \bar{P}_o) \quad (2.41)$$

3) Se calcula el radio de máximo viento con:

$$R = 0.0006574 e^{0.01155\bar{P}_o} \quad (2.42)$$

4) Expresando R en millas náuticas y con el valor de Δ_p , se usa la gráfica de la *fig. 2.37* para determinar el índice de ascenso S_I (en pies).

5) Se calcula la velocidad del viento formativo U (nudos) con la ec.:

$$U = 7.26 (\bar{H}_{1/3})^{0.4} \quad (2.43)$$

6) Se determina el ángulo ψ que forma la dirección del oleaje con la playa y, con el valor de U (en millas/hr) y de ψ empleando la *fig. 2.38*, se determina el factor F_M .

7) El ascenso de la marea por viento S_p (pies) se determina con:

$$S_p = S_I (F_M) \quad (2.44)$$

2.2.11 Transmisión del oleaje.

La función principal de un rompeolas es proteger determinada zona de la acción directa del oleaje. La protección que ofrece un rompeolas puede ser completa o parcial, según se proyecte dicha estructura. Así, por ejemplo, la seguridad de muchas instalaciones marítimas exige rompeolas altos para evitar que estos sean rebasados por las olas; sin embargo la construcción de tales rompeolas, que siempre emergen varios metros, requiere grandes volúmenes de material, lo cual incrementa mucho su costo. En situaciones en que solo se necesita una defensa parcial contra el oleaje, los rompeolas ya no tienen que emerger o sobresalir tanto del agua; por ello, para estos casos, los denominados rompeolas sumergidos pueden ser una solución adecuada, ya que su construcción es menos costosa.

Este tipo de rompeolas disipa o absorbe parte de la energía del oleaje que llega a él, ocasionando así que éste se rompa prematuramente; de la energía que no alcanza a mitigarse, una porción se refleja y el resto se transmite en la dirección de avance del oleaje. Puesto que la energía transmitida es menor que la incidente, la altura del oleaje que se forma después del rompeolas suele ser también menor.

El coeficiente de transmisión del oleaje, $K_T = H_T/H_I$, para rompeolas, según Dattari et al, ref. [9], *fig.* 2.39, es función del ancho de cresta relativo, W/L_I y de la sumersión relativa de la corona de la estructura d/d , *fig.* 2.40.

2.2.12 Características del oleaje en el área protegida por el rompeolas.

Para evaluar la altura del oleaje entre el rompeolas y la línea de costa, se utiliza el criterio Horikawa K. ref. [4], *fig.* 2.36, para obtener la altura del oleaje después de la rompiente; utilizando para ello la profundidad del mar en el sitio de ubicación del rompeolas y la altura del oleaje transmitido.

2.2.13 Transporte litoral.

El transporte de sedimentos en el mar o acarreo litoral es el fenómeno que se lleva a cabo en una playa, por medio del cual las partículas sólidas de que está compuesta se transportan a lo largo de ella; se sabe que el arrastre de sólidos se produce principalmente entre la línea de costa y la zona de rompientes, aunque también fuera de ésta existe transporte.

El estudio del transporte de sedimentos es importante por diferentes aspectos, pero el que aquí nos interesa es el que se refiere a la predicción del acarreo litoral para el diseño de protecciones costeras y puertos.

Por otra parte, es importante destacar que el principal objetivo del estudio de transporte litoral es predecir si se tendrá una condición de equilibrio o existirá erosión o depósito, y las cantidades involucradas.

Existen diferentes criterios para el cálculo del transporte litoral. En este trabajo se presentan cuatro de ellos: el Criterio de Larras, el del Shore Protection y dos más propuestos por CFE.

a. *Criterio de Larras, ref. [21].*

J. Larras y R. Bonefille realizaron estudios de laboratorio en el año de 1965, utilizando para ello arenas de 0.16 a 4 mm de diámetro, con alturas de olas de 2.6 a 14 cm, y periodos de 0.8 a 1.76 s. De estos estudios obtuvieron:

$$Q = f(\gamma_o, D_m) \frac{H}{T} \operatorname{sen} \left[\frac{7}{4} \alpha \right] \quad (2.45)$$

La función de la relación de esbeltez de la ola y del diámetro medio de los granos se calcula con:

$$f(\gamma_o, D_m) = 0.00175 \left[3500 \frac{D_m}{D_m^4 + 2} \right] \left[\frac{11 - \gamma_o}{10} \right] \quad (2.46)$$

A esta ecuación se le conocen algunas fórmulas que son variaciones o que parten de lo propuesto por Larras.

La ecuación propuesta es:

$$Q_s = 1.56 K_s^2 K_r^2 \frac{H_o T_o^3}{\sqrt{D_s}} \text{ sen } \left(\frac{7}{4} \alpha \right) \quad (2.47)$$

b. *Método del Shore Protection, ref. [10].*

Este método se basa en la hipótesis de que el transporte promedio de acarreo litoral Q depende de la componente a lo largo de la costa y del flujo de energía en la zona de rezaca.

El Shore Protection presenta cuatro formulas, una de ellas es la siguiente:

$$Q_{sp} = 1290 * 0.0884 \rho_o g^{3/2} H_b^{5/2} \text{ sen } (2\alpha_b) \quad (2.48)$$

c. *Métodos de la CFE, ref. [8].*

Las fórmulas consideran que el arrastre litoral es el arrastre integral de material costero producido entre la batimétrica cero y la rompiente para un oleaje dado.

Se indica además que en general las fórmulas dan resultados aproximados; por tal motivo no es recomendable usarlas para calcular "arrastre promedio" en un año o lapsos parecidos.

La CFE propone las siguientes ecuaciones para calcular el transporte litoral.

$$Q_{L1} = \frac{6930}{S_s - 1} (H_b)^2 \sqrt{gd_b} \text{ sen } (2\alpha_b) \quad (2.49)$$

$$Q_{L2} = \left[10000 \log \left(\frac{0.00146}{D_{50}} \right) \right] (H_b)^2 T \text{ sen}(\alpha_b) \cos(\alpha_b) \quad (2.50)$$

si $0.0001 \text{ m} < D_{50} < 0.001 \text{ m}$

d. *Método de Sunamura (Transporte on-off shore), ref. [22].*

El método se basa en los trabajos de Sunamura y en la teoría de los perfiles de equilibrio, en la que se presenta una relación entre el parámetro de Ursell (U_r) y la intensidad de flujo ψ' para pruebas en canales de laboratorio con fondo plano.

$$U_r = \frac{HL^2}{d^3} \quad (2.51)$$

$$\psi' = \frac{(d_0\sigma)^2}{\gamma_{s_0} g D_{50}} \quad (2.52)$$

$$d_0 = H (\sinh (2\pi d/L)) \quad (2.53)$$

Para la condición crítica se tiene que:

$$\frac{\psi'_c}{(U_r)_b^{0.9}} = \frac{c_s^{1.5}}{22.5 \gamma_{s_0} s^{0.16}} \quad (2.54)$$

La ecuación para calcular el transporte on-of shore es:

$$\frac{q}{\omega_0 D_{50}} = (-1.15 \times 10^{-7}) U_r^{0.2} \psi' (\psi' - \psi'_c) \quad (2.55)$$

Si $D_{50} < 0.0006$ m y $H_0/L_0 < 0.01$

$$K = \frac{3.39}{\gamma_{s_0} s^{0.16}} \quad (2.56)$$

Si $D_{50} \geq 0.0006$ m y $H_0/L_0 \geq 0.01$

$$K = \frac{1}{\gamma_{s_0} s^{0.16}} \quad (2.57)$$

Los datos para calcular ψ' y U_r deben determinarse en la zona de rompiente.

2.2.14 Dimensionamiento de los elementos prefabricados del rompeolas.

Entre los factores a tomar en cuenta en el dimensionamiento del rompeolas, ref. [2], están las características del oleaje de diseño en aguas profundas y cerca de la estructura; si la ola frente a la estructura es rompiente o no rompiente; forma y colocación de los elementos prefabricados, peso específico del concreto y del agua en que la estructura estará sumergida; geometría del rompeolas, etc.

a. Elementos de la coraza.

Para calcular el peso de los elementos de la coraza, números investigadores en el mundo han realizado ensayos en laboratorio con oleaje perpendicular a la dirección del rompeolas, muchas de las expresiones son conservadoras y otras no lo son.

Bringas M. L. ref. [20], presenta un análisis de ellas, al variar la altura del oleaje entre 1 y 7 m y al considerar constantes las densidades y el talud del rompeolas. De los resultados presentados, fig. 2.41, se tiene por ejemplo para $H_d = 4.60$ m, que el peso de los elementos varían entre 2 y 20 Ton.; lo que hace necesario hacer pruebas en modelos hidráulicos para un caso específico.

Para la selección de los elementos que formarán la coraza se puede emplear el siguiente procedimiento.

- 1) Conocidas las características de la ola de diseño $H_{1/3}$ y $T_{1/3}$ para las condiciones de oleaje normal y extraordinario, se procederá a determinar, en función de la pendiente de la playa, la zona en donde se presentan las rompientes para esos oleajes.
- 2) Se escogerá el coeficiente K_D , tomando en cuenta si la ola rompe o no, la sección del rompeolas que se este diseñando (morro o cuerpo), y el talud de la estructura θ .
- 3) Con el peso volumétrico de los elementos a usar (γ_m) y el peso o densidad específicos, se calcula el peso de los elementos W_D [T].

Para fines de prediseño la expresión más utilizada para calcular el

peso de los elementos es la propuesta por Hudson y está basada en la de Iribarren.

$$W_D = \frac{\gamma_s H_D^3}{K_D (S_s - 1)^3 \cot \theta} \quad (2.58)$$

En la *tabla* 2.9, se indican los valores recomendados por el CERC para el coeficiente de estabilidad K_D .

En la práctica ocurre que en la mayoría de las veces no se dispone de piedras lo suficientemente grandes como para alcanzar el peso de diseño, por lo que se deberá recurrir al empleo de elementos prefabricados, mismos que ya se tienen estandarizados. La selección se hará de acuerdo con los pesos de los elementos disponibles. En caso de que el peso del elemento con que se cuente resulte un poco inferior al peso de diseño, se podrá utilizar éste, siempre y cuando el daño que sufra la estructura sea del 5% al 10% para el caso de oleajes normales y del 20% al 30% para el caso de oleajes extraordinarios, aunque la tolerancia se fijara de acuerdo al costo y facilidad de reparación. Es importante comprobar en cada caso si se trata de oleaje rompiente o no rompiente.

El daño que sufra una estructura al estar sometida a la acción del oleaje se podrá conocer a través de la relación H_D/H_E y utilizando la *tabla* 2.10, ref. [7], donde :

$$H_E = (S_s - 1) \left[\frac{K_D \cot \theta W_{EE}}{\gamma_s} \right]^{1/3} \quad (2.59)$$

La expresión anterior se obtiene de hacer $H_D = H_E$ y $W_D = W_{EE}$, despejando H_E de la ec. 2.58 y nos relaciona el peso del elemento disponible W_{EE} con la altura de la ola que es capaz de soportar H_E .

b. Elementos de la capa secundaria y/o núcleo.

En las *figs.* 2.42 y 2.43 se presentan las relaciones de peso que deberán guardar tanto la capa secundaria como el núcleo, con respecto

a los elementos de la coraza, para condiciones de oleaje rompiente y oleaje no rompiente; según el CERC (Shore Protection).

3. APLICACION NUMERICA.

La ejemplificación de los criterios y métodos expuestos, que consideran los distintos factores que intervienen en el diseño de rompeolas fuera de costa para la preservación de playas, se presenta para el caso particular de las playas de Cancún, Quintana Roo, ubicadas al noreste de la Península de Yucatán, frente al Mar Caribe.

En septiembre de 1988, el huracán Gilberto produjo daños considerables en las playas entre Punta Nizuc y Punta Cancún, arrastrando la arena que las conformaban hacia mar adentro, reduciendo su ancho, y dañando las construcciones hoteleras ubicadas abajo de la duna.

Por su situación geográfica privilegiada, al constituirse Cancún como una zona de atracción para el turista nacional y extranjero, es necesario entre otros aspectos preservar las playas y proteger las construcciones hoteleras; de ahí la necesidad de realizar estudios y

diseños hidráulico-marítimos que tomen en cuenta la longitud del rompeolas-distancia de la línea de costa, el oleaje en exceso, la permeabilidad del rompeolas y su posición con respecto a la zona de rompiente entre otros; así como las características del oleaje, marea y transporte litoral.

Para efecto de cálculo, la playa entre Punta Nizuc y Punta Cancún se dividió en cuatro zonas longitudinales, las cuales están limitadas por los siguientes cadenamientos, *Fig. 3.1*:

Zona	Cadenamiento (km)	Longitud (m)
I	10+850 al 12+850	2000
II	12+850 al 15+650	2700
III	15+550 al 18+650	3100
IV	18+650 al 21+950	3000

Características del Oleaje en Aguas Profundas, inciso 2.2.2

La determinación de las características del oleaje se realizó para las condiciones de oleaje normal y oleaje extraordinario.

a. Oleaje normal.

Para condiciones normales, se recurrió a las observaciones realizadas por el Ocean Waves Statistics, ref. [23], y el Sea and Swell, ref. [24], que permiten conocer, mes a mes, los porcentajes de oleaje provenientes de las distintas direcciones, con determinadas alturas y periodos de ola, y que afectan el sitio en estudio. Del resumen anual y por estaciones correspondiente al Ocean Waves Statistics y del Sea and Swell, *tablas 3.1 y 3.2*, el oleaje predominante corresponde a las direcciones SE, E y NE.

Para fines de diseño se considerarán las observaciones del Ocean Waves Statistics, con tiempos anuales de acción de 56.25, 115.61 y 63.98 días para una altura de $H_0 = 0.75$ m, con periodos menores a $T_0 = 5$ s.

b. Oleaje extraordinario.

Para el oleaje extraordinario se analizaron las cartas isobáricas de los huracanes Gilberto (sep. 1988), Allen (ago. 1980) y Beluah (sep. 1967), proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional, para definir la zona de generación (fetch), decaimiento, la duración y velocidad del viento.

Definidas las características de cada huracán, se obtuvieron las características del oleaje, altura y periodo significantes con los métodos SMB, Huracán Estandar y Estadístico.

Para fines de diseño se utilizan los resultados obtenidos del Método Estadístico, *tabla* 3.3. El huracán Gilberto tiene un periodo de ocurrencia de 80 años, una altura y periodo significantes de 10.06 m y 12.66 s respectivamente.

Límite de la Zona de Aguas Profundas, inciso 2.2.3

La determinación se puede hacer para el oleaje que se desee estudiar. Para oleaje ordinario el límite de aguas profundas es de $d = 16$ m; mientras que para el oleaje extraordinario $d = 90$ m.

Por ejemplo, para oleaje extraordinario el límite de aguas profundas se obtiene como a continuación se indica:

- 1) Con el periodo de oleaje $T_{1/3} = 12$ s, se lee en el último renglón el valor de la celeridad en aguas profundas $C_0 = 18.72$ m/s.
- 2) Dividiendo este valor entre 1.01, $C = C_0/1.01 = 18.53$ m/s, y para el periodo de 12 s tenemos que el valor más próximo al cociente obtenido es 18.49 m/s.
- 3) De esta manera, el valor de la profundidad correspondiente a ese valor de celeridad es de 90 m, leído en la primera columna de la *tabla* A.1.

Para un $T_{1/3}$ de 10 s, la batimétrica 60 marcará el límite de aguas profundas.

Deformación del Oleaje en la Cercanía de la Costa, inciso 2.2.4

De los planos de oleaje para las direcciones SE, E y NE, con periodos de 6 s (planos 5, 9 y 13), obtenidos con la batimetría levantada después de la ocurrencia del ciclón Gilberto, se obtienen, por una parte, los coeficientes de propagación en aguas someras K_d , entre las batimétricas 1 y 20, *tabla 3.4*, y por otra, los coeficientes de refracción K_r , de cada uno de los canales de oleaje 4 a 23, para las batimétricas 1 a 5, *tabla 3.5*. En la parte inferior de la misma tabla se han determinado los coeficientes de refracción medios para cada una de las zonas longitudinales en que se ha dividido la costa.

La altura del oleaje para un punto cercano a la costa, por ejemplo en la zona II y para la batimétrica 2, son de 0.746, 0.754 y 0.374 m, asociados a las direcciones SE, E y NE, al considerar en la ec. 2.32 $K_d = 1$ y $K_r = 0$.

Alcance de la Ola, inciso 2.2.5

De la ec. 2.34, el alcance de la ola para una estructura rugosa, hecha con piedra y elementos prefabricados, y para una protección moderada, es de:

$$R_u = 1.1 H_o = 1.1(0.75) = 0.825 \text{ m}$$

Características del Oleaje en la Rompiente, inciso 2.2.6

Las características del oleaje rompiente, profundidad d_b y altura de ola H_b , *tabla 3.6*, obtenidas en función de las características del oleaje en aguas profundas H_o/L_o y la pendiente de la playa s , *figs. 2.34 y 2.35*, para las distintas zonas son prácticamente las mismas, es decir, la rompiente se produce en la batimétrica 1.25 m, con una altura de ola de 0.91 m. La profundidad de la rompiente, se localiza a una distancia mar adentro de 57 a 78 m.

Características del Oleaje después de la Rompiente, inciso 2.2.7

La altura del oleaje después de la rompiente, por ejemplo para la

zona II y la batimétrica 0.50, es de 0.27 m, obtenida en función de $d/d_b = 0.50/1.25 = 0.40$ y la pendiente de la playa 0.022, *fig.* 2.36; $h/H_b = 0.30$ por lo que:

$$h = 0.30(0.91) = 0.27 \text{ m}$$

Ubicación y Orientación del Rompeolas, incisos 2.1 y 2.2.8

En la disposición de los rompeolas se considerarán dos alternativas, rompeolas aislado y rompeolas segmentado.

Rompeolas Aislado.

Para el caso del rompeolas aislado se adoptó una longitud de rompeolas $l = 200 \text{ m}$ y una separación de la costa $y = 100 \text{ m}$, por lo que la estructura quedaría ubicada, por ejemplo para la zona II cuya pendiente es de 0.022, en la batimétrica 2.20 m. La longitud del oleaje para esta profundidad, se obtendría a partir de:

$$L = L_o \tan h \frac{2\pi d}{L}$$

para $d/L_o = 2.20/39$, la $\tan h \frac{2\pi d}{L} = 0.5582$. Al sustituir valores en la ecuación anterior, un valor aproximado de la longitud del oleaje es:

$$L = 39(0.5582) = 21.76 \text{ m}$$

A continuación se presenta la justificación de la geometría adoptada $ly = 2$, con los criterios expuestos en el inciso 2.1.

a. Del CERC, ref. [10].

Cuando $l > y$ ($200 > 100$), se forman salientes, con la posibilidad de formarse tómbolos, en vista de que $l < 2y$.

b. De Perlin Marc, ref. [11].

De acuerdo con la *fig.* 2.10, para una relación de $U/y = 2$, la saliente en la playa es el 50% de la distancia que hay entre la línea de costa y el rompeolas, es decir de 50 m; si la relación de esbeltez del oleaje H/L_0 y la pendiente de la playa s , fueren 0.0304 y 0.067 respectivamente. Al cambiar la relación de esbeltez a $H/L_0 = 0.0152$ o $H/L_0 = 0.0076$ *figs.* 2.9 y 2.11, las salientes serían de 20 y 10 m respectivamente. Para nuestro caso particular, al tomar en cuenta la pendiente de la playa de 0.022 (zona II) y las relaciones de esbeltez del oleaje para las direcciones provenientes de SE, E y NE de 0.0192, 0.0192 y 0.0095 respectivamente, es de esperarse que la saliente alcance una longitud entre 28 y 12 m.

c. De Suh y Dalryple, ref. [13].

El parámetro adimensional $y_b^* = y_b/y$, que toma en cuenta el ancho de la zona de rezaca (surf zone), para la playa en estudio, varía de 0.57 a 0.78, al tomar en cuenta la posición de la rompiente. Con estos valores la amplitud de la saliente se obtiene de la ec. 2.3.

$$y_s^* = y_s/y = 0.317(200/100) = 0.317$$

y es de esperarse que la saliente alcance una longitud de 31.70 m (0.317x100).

d. De la difracción del oleaje.

La posición de la formación "saliente", en la zona II, es función de la dispersión de la amplitud del oleaje por efecto de la difracción, y se aprecia en las *figs.* 3.3 a 3.5, para las direcciones del oleaje SE, E y NE. Las longitudes de la "saliente" por la presencia del rompeolas aislado de 200 m de longitud, ubicado paralelo a la playa a una distancia de 100 m, y para los oleajes anteriores son de 80, 76 y 37 m. En la *tabla* 3.7 se indican las características de la saliente, del oleaje y volumen de material depositado en la formación saliente. Los volúmenes han sido obtenidos con la *fig.* 2.14, presentada por Herbich J. B., ref. [15], para estimar el depósito de material, cuya

correlación es:

$$\frac{V_d}{y \ell_B} = e^{[0.31481 - 1.92187y/\ell]}$$

aplicable cuando se tiene la formación tómbolo. Al sustituir valores, se obtiene $V_d = 23059.2 \text{ m}^3$, para un valor de $y_B = 100 \text{ m}$.

Para oleajes provenientes de las direcciones SE, E y NE, la longitud de las salientes, *figs* 3.2 a 3.4, tienen un valor de 80, 76 y 37 m respectivamente; proporcionalmente tendrían volúmenes de depósito de material de 18447, 17525 y 8521 m^3 respectivamente para las direcciones antes indicadas. En la *tabla* 3.7, se resumen las características de la formación "saliente" para un rompeolas aislado de la zona II.

Los valores obtenidos con el criterio de Herbich J. B., ref. [15], son muy altos, motivo por el cual, para fines de diseño, se considera solo el 50% de ellos, es decir, de 9233, 8762 y 4265 m^3 , para los oleajes provenientes del SE, E y NE.

Rompeolas Segmentado.

Al adoptar una longitud de rompeolas $\ell = 200 \text{ m}$, una separación de la costa de 100 m y una abertura entre rompeolas $B=50 \text{ m}$, las estructuras quedarán ubicadas, por ejemplo, para la zona II cuya pendiente es de 0.022, en la batimétrica 2.20 m.

A continuación se presenta la justificación de la geometría adoptada.

a. Del CERC, ref. [10].

Al tomar en cuenta la longitud del oleaje $L = 21.76 \text{ m}$, la abertura será $B = 2L = 2(21.76) = 43.52 \text{ m}$, ligeramente inferior a la abertura adoptada de 50 m. La longitud mínima de la estructura, ℓ , debe tener como mínimo la distancia que hay entre la línea de costa y la estructura, es decir, $\ell_{\min} = 100 \text{ m}$.

b. De Pope J. y Dean J., ref. [12].

Del análisis adimensional del tipo de formación playera, *fig. 2.16*, obtenido de rompeolas segmentados, para una relación de $L/B = 200/50 = 4$ y para $y/d_b = 100/2.20 = 45.54$, se formarían tómbolos, si la estructura fuera emergida. De ser sumergida el oleaje se transmitiría por arriba del rompeolas, lo que daría lugar a que el tómbolo se reduzca a una formación "saliente".

c. De Suh y Dalrymple, ref. [13].

De la expresión de diseño, ec. 2.5, la longitud de la formación saliente, para rompeolas segmentados, en función del parámetro $G_b^*/L_b^2 = (50/100)/(200/100)^2 = 0.125$, se tendría que el valor de $y_b = 0.682$. Lo que implica que la formación "saliente" tendría una longitud $y_s = y_b y = 0.682(100) = 68.20\text{m}$.

d. De Hideaki-Noda, ref. [16].

No es aplicable al caso en estudio, al ubicar el rompeolas segmentado fuera de la zona de rezaca.

e. De Toyoshima Osamu, ref. [17].

Para rompeolas ubicados a profundidades de 2 a 4 m, la longitud de la estructura l , deberá estar comprendida entre 100 y 300 m; el ancho de la abertura B, de 20 a 50 m; y la distancia de la línea de costa "y", de 30 a 100 m. Los valores adoptados para el rompeolas segmentado, $l = 200$ m, $B = 50$ m y $y = 100$ m, están dentro de los rangos recomendados por el autor.

f. De la difracción del oleaje.

En las *figs. 3.6 a 3.8*, se muestra la posición de la formación "saliente", de la zona II, en función de la dispersión de la amplitud del oleaje por efecto de la difracción; para las tres direcciones del oleaje SE, E y NE. Teóricamente, para las tres direcciones analizadas, se forman tómbolos. Para el caso de rompeolas emergidos, el volumen de

material depositado es del orden de 2305.9 m³. Para la condición de rompeolas sumergido, la formación cambia a "saliente", y su amplitud será función del oleaje transmitido por el rompeolas.

Amplitud de la Marea, inciso 2.2.10

Para oleaje normal, se utilizan los registros de Puerto Juárez, Q. Roo, ref. [6], indicados en el inciso 2.2.10; mientras que para el oleaje de tormenta, se toma en cuenta la sobreelevación de marea por viento, indicada en el mismo inciso.

a. Marea astronómica.

En el sitio más cercano al de las playas de Cancún, el de Puerto Juárez, Quintana Roo, ref. [6], se tienen los registros de marea siguientes:

Pleamar Máxima	0.236 m
Nivel de Pleamar Media Superior	0.100 m
Nivel de Pleamar Media	0.070 m
Nivel Medio del Mar	0.000 m
Nivel de Media Marea	- 0.001 m
Nivel de Bajamar Media	- 0.072 m
Nivel de Bajamar Media Inferior	- 0.090 m
Bajamar Mínimo	- 0.204 m

b. Marea de tormenta.

La sobreelevación de marea por viento calculada para Cancún, es de 3.60, 3.23, 2.07 y 1.45 m, para periodos de retorno de 80, 40, 10 y 5 años, *tabla 3.8*.

Transmisión del Oleaje, inciso 2.2.11

De prevalecer como factor de decisión el de tipo estético, por tratarse de una zona turística, el rompeolas que se recomiende, aislado o segmentado, será sumergido; por lo cual se tendría que para todos los casos de oleaje, este sobrepase la estructura,

transmitiéndose hacia la línea de costa.

El análisis se hará para oleajes normal y extraordinario, en un rompeolas de ancho de corona de 5 m, taludes 2:1 y formado por elementos prefabricados.

a. Oleaje normal, $T < 5$ s

De la *fig.* 2.39, para una relación $W/L_1 = 5/21.76 = 0.23$ y $d_0/d' = 0$, se tiene $K_T = 0.14$. Para oleajes que provienen de las direcciones SE, E y NE, las alturas del oleaje transmitido son de 0.10, 0.10 y 0.05 m, en la zona II.

$$H_T = K_T H_i = 0.14(0.746) = 0.10 \text{ m}$$

b. Oleaje extraordinario, $T > 12$ s.

Las características del oleaje generadas por el huracán Gilberto con periodo de retorno de 80 años, son de 10.06 m y 12.66 s de altura de ola y periodo significantes respectivamente. Después de la rompiente se tiene una altura de ola de 3.44 m, asociada a la batimétrica 3 m, *tabla* 3.9.

La longitud del oleaje, sería de:

$$L = (gd')^{0.5} T = [9.81(3+3.60)]^{0.5}(12.66) = 101.87 \text{ m}$$

De la *fig.* 2.39, para una relación $W/L_1 = 5/101.87 = 0.05$ y un valor de $d_0/d' = 1.60/6.60$, se tiene $K_T = 1.00$; ello significa que el oleaje no se reduce por la presencia del rompeolas, la altura del oleaje es de 3.44 m.

Características del Oleaje en el Area Protegida por el Rompeolas, inciso 2.2.12

El cálculo de la altura de ola entre el rompeolas y la línea de costa se realizó para una estructura ubicada en la batimétrica 3, *tabla* 3.10. Por ejemplo, para un huracán con periodo de retorno de 80 años,

altura y periodo significantes de 10.06 m y 12.66 s, la altura de oleaje en el área protegida por el rompeolas es $H_T = 2.58$ m.

Transporte Litoral, Inciso 2.2.13

El estudio de transporte litoral se realizó para las condiciones de oleaje ordinario y extraordinario, en cada una de las zonas en que se dividió la playa, ref. [19].

- a. Transporte litoral del oleaje ordinario, *tablas* 3.11, obtenido con diversos criterios de cálculo.

Al analizar por ejemplo, los resultados obtenidos con la fórmula del Shore Protection Manual, se concluye que el arrastre de material predominante es hacia el sur de verano a otoño, mientras que hacia el norte en primavera. Por ejemplo, para la zona II, la aportación máxima se produce en primavera con un valor de 78356 m^3 , y la menor en otoño con -54598 m^3 ; mientras que la aportación anual neta es hacia el norte con un valor de 28529 m^3 .

- b. Transporte litoral neto del oleaje ordinario, *tablas* 3.12, obtenido con diversos criterios de cálculo.

Al analizar, por ejemplo, los resultados obtenidos con la fórmula de Larras el transporte es considerable para cada una de las estaciones, para la zona II, en las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno, el transporte sería de 31344, 17316 21348 y 20037 m^3 , y el anual de 90046 m^3 .

Los resultados obtenidos en los incisos a y b indican solo la capacidad de transporte litoral que existe en la cuenca cerrada, del material que se mueve de una zona a otra.

- c. Transporte on-off shore con oleaje ordinario y extraordinario, *tabla* 3.13.

El material que se mueve normal a la playa, puede ser captado por los rompeolas aislados o segmentados que se construyan, para condiciones

ordinarias y extraordinarias. Por ejemplo en la zona II, para condiciones ordinarias, el transporte normal hacia mar adentro de $-162 \text{ m}^3/\text{Trimestre}$ sería captado por el o los rompeolas que se construyan, para la formación de las salientes o tómbolos; cuando se presente el oleaje extraordinario hay el riesgo que el material que haya sido captado por los rompeolas emigre hacia mar adentro, el valor anual sería de -434700 m^3 .

Dimensionamiento de los Elementos Prefabricados del Rompeolas, Incls 2.2.14

a. Elementos de la coraza.

En la definición del peso de los elementos de la coraza, se utiliza el criterio de Hudson, de la forma siguiente:

1) Características del oleaje, huracán Gilberto.

De la *tabla* 3.9, la altura del oleaje después de la rompiente es de 3.44 m, asociada a la batimétrica -3 m.

2) La geometría del rompeolas se muestra en la *fig.* 3.2.

3) Para el rompeolas constituido por tetrápodos, se considera un $\gamma_s = 2242.6 \text{ kgf/m}^3$ y $S_s = 2.17$. Un coeficiente de estabilidad $K_d = 8.3$ y 6.1, para tetrápodos colocados al azar en dos capas y para la condición de oleaje no rompiente; para el cuerpo y morro del rompeolas.

4) Peso de los elementos.

Utilizando la ec. 2.58, se encuentra que:

$$W = \frac{2242.6}{8.3(2)} \left[\frac{3.44}{2.17-1} \right]^3 = 3433.28 \text{ kg}$$

5) Selección del elemento disponible.

De la *tabla* 3.14, para un $\gamma_s = 2242.6 \text{ kgf/m}^3$, existe un elemento de peso $W_E = 5.0 \text{ Ton}$.

6) Altura de la ola resistente.

Al sustituir valores en la ec. 2.59, se tiene:

$$H_E = (2.17-1) \left[\frac{8.3(2)(5000)}{2242.6} \right]^{1/3} = 3.90 \text{ m}$$

Para el cuerpo de la escollera la relación:

$$H_D/H_E = 3.44/4.91 = 0.88$$

y para el morro de la escollera la relación:

$$H_D/H_E = 3.44/3.51 = 0.98$$

los elementos están ligeramente sobrados.

7) Espesor medio de la coraza.

De acuerdo con la *tabla* 3.14, el espesor medio es de 2.63 m, al colocar dos elementos prefabricados, tetrápodos, al azar.

8) Número de elementos.

De la misma *tabla* 3.14, el número de elementos por cada 100 m² de área de capa, una capa con dos elementos colocados al azar, es de 65.04; ocupando casi toda la sección transversal del rompeolas.

b. Elementos de la capa secundaria y/o núcleo.

Para definir el peso de los elementos de la capa secundaria y núcleo se utiliza la *fig.* 2.43, que nos relaciona el peso de estos con el peso de los elementos de la coraza, para la condición de oleaje no rompiente.

Por ejemplo, para el peso de los elementos de la capa secundaria tenemos $W/10 = 5/10 = 0.5 \text{ Ton.}$, mientras que para los elementos del núcleo $W/200 = 5/200 = 0.025 \text{ Ton.}$

4. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se ha desarrollado una alternativa para la preservación de playas con rompeolas paralelos a la línea de costa, que tienen por objeto capturar el material que se mueve en la costa por transporte litoral longitudinal y normal a la misma.

Los rompeolas paralelos a la línea de costa presentan diversas ventajas y desventajas. Al ubicarlos fuera de la línea de costa, se da lugar a una zona de relativa calma que favorece la captación de material proveniente del arrastre de litoral y de mar adentro, pero se eleva su costo y dificultad de construcción y mantenimiento, hecho por el cual no son tan populares como los rompeolas en la línea de costa o los espigones.

Los rompeolas fuera de costa pueden ser de dos tipos, aislados o segmentados. Los primeros se utilizan para proteger tramos cortos de

playa, mientras que los segundos se emplean cuando se desea proteger porciones más largas de costa. Con los rompeolas paralelos a la línea de costa y dependiendo de las características del oleaje, se desarrollan una serie de sinuosidades en la playa llamadas salientes, que al alcanzar el rompeolas se denominan tómbolos.

Dentro de las consideraciones de planeación para el diseño de los rompeolas fuera de costa se utilizan diversos criterios, basados principalmente en ensayos realizados con modelos de laboratorio y/o en prototipo.

Criterios como el del CERC o el de Suh y Dalrymple fundamentados en ensayos de laboratorio y prototipo para rompeolas aislados y segmentados, consideran que el tipo de formación producida en la costa por la presencia de los rompeolas es función de la longitud de la estructura y de la distancia que separa a la misma de la costa.

El criterio de Toyoshima Osamu, basado en resultados obtenidos donde se utilizaron rompeolas segmentados, propone que el tipo de formación que se produce depende de la posición de la estructura con respecto a la zona de rompiente. Hideaki-Noda considera además que la formación resultante esta relacionada de manera importante con el transporte de sedimento a través del rompeolas y por la abertura entre rompeolas segmentados.

Para el caso particular de las playas de Cancún, Q. Roo, tomado para ejemplificar el diseño hidráulico-marítimo de los rompeolas fuera de costa, las características geométricas e hidráulicas de los rompeolas aislados o segmentados, se obtuvieron con el oleaje normal y el diseño estructural de los mismos se obtuvo con el oleaje de tormenta.

A continuación se presentan los aspectos más relevantes relacionados al diseño de los rompeolas.

a. Diseño hidráulico-marítimo.

El oleaje normal asociado a las direcciones SE, E y NE, con una altura de ola de 0.75 m y periodos menores de 5 s, conforme se acerca a la

línea de costa disipa su energía en la zona de rompiente, que se localiza en la batimétrica 1.25, a una distancia mar adentro de 57 a 78 m; con una amplitud de marea de 0.440 m, pleamar máxima de 0.236 m y bajamar mínima de -0.204 m.

En el diseño de los rompeolas, se utilizaron diversos criterios, para conocer la posible formación de las salientes o tómbolos producidos por corrientes inducidas por el oleaje en el área resguardada por los rompeolas.

Para los rompeolas aislados.

Al adoptar una longitud $l = 200$ m y una separación de la línea de costa $y = 100$ m; con el criterio del CERC, ref. [10], es posible la formación de salientes. Con el de Perlin Marc, ref. [11], el alcance de las salientes y_s varía de 12 a 28 m al tomar en cuenta la pendiente de la playa de 0.022 (zona II) y las relaciones de esbeltez del oleaje para las direcciones provenientes del SE, E y NE de 0.0192, 0.0192 y 0.0095 respectivamente. Con el de Suh y Dalrymple, ref. [13], que toma en cuenta el ancho de la rezaca (*surf zone*), es de esperarse que la saliente alcance una longitud y_s de 31.70 m. La posición de la formación "saliente" en función de la difracción del oleaje, para las direcciones SE, E y NE es de 80, 76 y 37 m respectivamente.

Para los rompeolas segmentados.

Al adoptar una longitud $l = 200$ m, una separación de la línea de costa $y = 100$ m y una abertura entre rompeolas $B = 50$ m; con el criterio del CERC, ref. [9], es posible la formación de salientes. Del análisis adimensional de Pope y Dean, ref. [12], para una relación de $l/B = 200/50 = 4$ y para $y/d_s = 100/2.20 = 45.45$, se formarían tómbolos, si la estructura fuere emergida, y salientes, si la estructura fuere sumergida. Con el de Suh y Dalrymple, ref. [13], la formación saliente tendría una longitud de 68.20 m. Los valores adoptados para los rompeolas segmentados cumplen con los rangos recomendados por Toyoshima Osamu, ref. [17], para que sea posible la formación de salientes. La posición de la formación "saliente" en función de la difracción del oleaje, para las direcciones SE, E y NE,

teóricamente se forman tómbolos, para el caso de rompeolas emergidos, para la condición de rompeolas sumergidos, la formación cambia a saliente, su amplitud será función del oleaje transmitido.

De prevalecer como factor de decisión el de tipo estético, por tratarse de una zona turística, el rompeolas aislado o segmentado será sumergido, *Fig. 3.24*, transmitiéndose el oleaje hacia la línea de costa. Para oleaje normal, $T < 5$ s, la altura del oleaje transmitido sería de 0.10 m; mientras que para el oleaje de tormenta, $T > 12$ s, la altura sería de 3.44 m.

Del estudio del comportamiento de la arena de las playas de Cancún, ref. [19], realizado para cada una de las zonas longitudinales en que se ha dividido la costa, entre Punta Cancún y Punta Nizuc, se indica que el transporte litoral del oleaje normal, se produce de una zona a otra, por tratarse de una cuenca cerrada. Para el transporte on-off shore que se produce hacia la línea de costa en condiciones de oleaje normal, existe el riesgo que cuando se presente el oleaje extraordinario emigre hacia mar adentro; por lo que se hace necesario realizar artificialmente la reposición de material de la playa, del orden de 70000 m^3 , el cual deberá ser colocado independientemente de la protección playera.

Para que la captura de material se produzca en las playas de Cancún con oleaje ordinario, se recomienda ubicar rompeolas segmentados de 200 m de longitud, ubicados a 100 m de la línea de costa; con una abertura de 50 m entre segmentos de rompeolas, *Fig. 4.1*. De emerger el rompeolas en 2 m, ubicado en la batimetría 2.20 m, la altura del oleaje para las condiciones normal y extraordinario es de 0.10 y 1.69 m respectivamente en la línea de playa (batimétrica uno). De no emerger el rompeolas, por ejemplo, la corona de la estructura a la altura del nivel medio del mar, para oleaje extraordinario su altura alcanzaría un valor de 3.44 m, que provocaría que el material emigre hacia mar adentro.

b. Diseño estructural.

Las características del oleaje de tormenta utilizadas en el diseño de

los rompeolas son las asociadas al huracán Gilberto, con periodo de ocurrencia de 80 años, altura y periodo significantes de 10.06 m y 12.66 s respectivamente; con una sobreelevación de marea por viento calculada de 3.60 m.

Para las características de oleaje antes mencionadas el rompeolas que se construya se ubicará en la batimétrica 2.20, con un ancho de corona de 5 m, taludes 2:1, utilizando como elementos de coraza tetrápodos de 5 ton, colocados en dos capas al azar (espesor 2.63 m) y roca para la capa secundaria de 0.5 ton cada elemento, con un espesor de 1.27 m. El rompeolas se cimentará sobre una plantilla de roca de 25 kg, con un espesor mínimo de 0.30 m.

Para construir una longitud unitaria de rompeolas, se requieren 12 tetrápodos de 5 ton. cada elemento y 17 m^3 de roca, para formar el núcleo y filtro de la estructura, *fig. 4.1*. Al considerar un costo de la coraza de \$700000 el m^3 de concreto, y el costo de la roca para formar núcleo y filtro de \$30000 la tonelada, se tendría un costo por metro lineal de un rompeolas de 22.2 millones de pesos para construirlo.

Por lo mencionado en párrafos anteriores, los resultados aquí presentados deberán comprobarse en un modelo físico y/o matemático con el fin de tener mayor certeza del comportamiento hidráulico-marítimo de los rompeolas fuera de costa.

RECONOCIMIENTO.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo, y en especial a:

**M. en I. Jaime E. Camargo Hdez.
M. en I. Victor Franco**

por su amable apoyo e interés.

A mis amigos y compañeros que de una u otra forma colaboraron en la elaboración de esta tesis.

BIBLIOGRAFIA

1. Gracia J., et al, "Determinación de las Características del Oleaje para las Playas de Cancún, Q. Roo" (primer informe); Instituto de Ingeniería, UNAM, México; proyecto 9306, C.F.E., Agosto 1989.
2. Maza J., et al, "Hidráulica Marítima", fascículo A.2.13, Manual de Diseño de Obras Civiles, México 1982.
3. Osnaya R., et al, "Cálculo de Refracción del Oleaje de Cancún, Q. Roo"; Instituto de Ingeniería, UNAM, México; proyecto 9318, Marzo de 1990.
4. Horikawa Kiyoshi "Coastal Engineering "; John Wiley & Sons, 1978.
5. Camargo J., et al, "Evolución de las Playas de Cancún, Q. Roo, de Abril a Septiembre de 1989"; Instituto de Ingeniería, UNAM, México; proyecto 9318, Abril de 1990.
6. "Tablas de Predicción de Mareas 1989. Puertos del Golfo de México y Mar Caribe"; Instituto de Geofísica, UNAM, México 1988.
7. Fuentes O., et al, "Compendio de Hidráulica Marítima"; Instituto de Ingeniería, UNAM, México; proyecto 4314, Enero de 1986.
8. Sánchez J., "Manual de Hidráulica Marítima Elemental"; Comisión Federal de Electricidad, México, 1987.
9. García M., "Rompeolas Sumergidos, Estudio Experimental"; Instituto de Ingeniería, UNAM, México; publicación 511, Junio de 1988.
10. U. S. Army Coastal Engineering Research Center, "Shore Protection Manual" (Vol. 1,2 y 3), U.S.A., 1984.
11. Perlin M., "Predicting Beach Planforms in the Lee of a Breakwater", Coastal Structures Vol. II, A.S.C.E., 1979.
12. Pope Joan y Dean Julie, "Development of Desing Criteria for Segmented Breakwaters", Coastal Structures, Chapter 158, A.S.C.E., 1986.

13. Suh K. y Dalrymple, "Offshore Breakwater in Laboratory and Field", Coastal Structures, A.S.C.E., March 1987.
14. Gourlay M., "Discussion On-offshore Breakwater in Laboratory and Field", Coastal Structures, A.S.C.E., 1988.
15. Herbich, J., "Discussion On-off shore Breakwater in Laboratory and Field", Coastal Structures, A.S.C.E., 1988.
16. Hideaki Noda, "Depositional Effect Offshore Breakwater due to Onshore-offshore Sediment Movement", Coastal Engineering, A.S.C.E., 1984.
17. Toyoshima O., "Design of a Detached Breakwater System", Coastal Engineering, Proceedings VII, A.S.C.E., 1974.
18. Wiegel R., "Oceanographical Engineering", Prentice Hall International, Inc.; London, 1964.
19. Gracia J., et al, "Estudio del Comportamiento de la Arena en las Playas de Cancún, Q. Roo.", Instituto de Ingeniería, UNAM, México; Proyecto 9335, Junio de 1990.
20. Bringas L., "Construcción de Rompeolas de Enrocamiento", Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM; México 1979.
21. Frías A., et al, "Ingeniería de Costas", Limusa, México 1988.
22. Jiménez M., "Estudio de la Remoción de Arena en Playas por Oleaje", Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM; México 1990.
23. Ministerio de Tecnología de la Gran Bretaña, "Ocean Wave Statistics", Laboratorio Nacional de Física, 1967.
24. U.S. Naval Oceanographic Office, "Oceanographic Atlas of the North Atlantic Ocean", Section IV, Sea and Swell, Pub. 700, 1965.

A P E N D I C E A

Indice de Variables.

b	Equidistancia de los rayos de oleaje donde se desea conocer la altura del oleaje, en m.
b_0	Equidistancia de los rayos de oleaje en aguas profundas, en m.
B, B'	Abertura entre rompeolas segmentados, <i>fig.</i> 2.13, en m.
c_n	Coefficiente que vale entre 4 y 8 para pruebas de laboratorio y 18 para playas naturales.
C	Celeridad, en m/s.
C_0	Celeridad en aguas profundas, en m/s.
d	Profundidad batimétrica, en m.
d'	Profundidad del agua, <i>fig.</i> 2.40, en m.
d_b	Profundidad en la rompiente, <i>fig.</i> 2.34, en m.
d_B	Profundidad asociada a la ubicación del rompeolas, en m.
d_n	Sumersión de la corona del rompeolas, <i>fig.</i> 2.40, en m.
d_u	Altura de roci6n; $d_u = R_u + SM - \text{Elev. Corona del Rompeolas}$.
D	Longitud de la zona de decaimiento, en km.
D_n	Diámetro medio del material, en mm.
D_{50}	Diámetro representativo del material, en mm.
$f(\gamma_0, D_n)$	Funci6n de la relaci6n de esbeltez de la ola y del diámetro medio de los granos.
F	Longitud de fetch, en km.
g	Aceleraci6n de la gravedad, en m/s^2 .
g, D	Subindices que indican los valores al final de la zona de generaci6n y decaimiento, respectivamente (<i>ec's</i> 2.20 y 2.21).
G_B^0	Parámetro adimensional que toma en cuenta el ancho de la abertura entre dos segmentos de rompeolas; $G_B^0 = B/y$.
h	Altura del oleaje después de la rompiente, en m.
h_0	Altura del rompeolas, <i>fig.</i> 2.40, en m.
H	Altura del oleaje, en m.
H_b	Altura del oleaje en la rompiente, <i>fig.</i> 2.35, en m.
H_D	Altura del oleaje de diseño del rompeolas, en m.
H_E	Altura del oleaje resistente, por los elementos que forman el rompeolas, en m.
H_I	Altura de la ola incidente, en m.
H_T	Altura de la ola transmitida, en m.
H_0	Altura del oleaje en aguas profundas, en m.
$H_{1/3}$	Altura de la ola significativa, en m.

$H_{1/3max}$	Altura máxima de la ola significativa en aguas profundas, en m.
H_{10}	Altura del oleaje asociado a la batimétrica -10 m, en m.
k_1	Constante que vale aproximadamente 0.4.
K_d	Coefficiente de difracción.
K_D	Coefficiente de estabilidad.
K_r	Coefficiente de refracción.
K_R	Coefficiente de reflexión.
K_{\square}	Coefficiente de propagación en aguas someras.
K_T	Coefficiente de transmisión del oleaje.
l	Longitud del rompeolas, en m.
L	Longitud del oleaje, en m.
L_B°	Parámetro adimensional que toma en cuenta la longitud del rompeolas; $L_B^{\circ} = l/y$.
L_I	Longitud del oleaje incidente, en m.
L_o	Longitud del oleaje en aguas profundas, en m.
p_n	Presión atmosférica normal al nivel del mar e igual a 760 mm de Hg.
p_o	Presión que se tiene en el centro del huracán, expresada en mm de Hg.
q	Transporte unitario "on (+)" u "off shore (-)" en la zona de rompiente, en unidades de volumen.
Q_s	Gasto sólido, en $m^3/día$.
Q_{sp}	Transporte litoral, en $m^3/año$.
Q_{L1} y Q_{L2}	Transporte litoral, en $m^3/día$.
R	Radio del viento máximo, en km. Se mide desde el centro del huracán al lugar donde la velocidad del viento es máxima y varía entre 9 y 90 km.
R_u	Alcance del oleaje por roción, en m.
s	Pendiente de la playa, ($s = \tan \beta$).
SM	Sobreelevación del mar por viento, en m.
S_I	Índice de ascenso de marea.
S_P	Ascenso de marea por viento, en pies.
S_{\square}	Densidad específica del material $(\gamma_{\square} - \gamma)/\gamma$.
t	Tiempo, en s.
T	Periodo del oleaje, en s.
Tr	Periodo de retorno, en años.
$T_{1/3}$	Periodo de la ola significativa, en s.

$T_{1/3max}$	Periodo de la ola significante correspondiente a $H_{1/3max}$ en s.
U_{max}	Velocidad máxima del viento gradiente, en m/s; debe ser calculada a 10 m de la superficie del mar.
U_R	Velocidad máxima del viento, en m/s; debe ser calculada a 10 m de la superficie del mar y corresponde al punto donde el radio sea igual a R.
v_d	Volumen de material captado por el rompeolas, por la formación saliente o tómbolo.
v_d^*	Parámetro adimensional que toma en cuenta el volumen depositado, captado por el rompeolas $v_d^* = v_d / v_s$.
v_f	Velocidad de formación de la saliente.
v_F	Velocidad de desplazamiento del huaracán, en m/s.
v_g	Velocidad de viento geostrófico, en m/s.
v_G	Volumen total de arena depositado por unidad de ancho de abertura entre dos segmentos de rompeolas, transportado a través de la abertura.
v_R	Volumen total de arena depositado por unidad de longitud del rompeolas, como resultado de la intrusión de arena a través del rompeolas permeable.
v_s	Volumen teórico total de material captado por el rompeolas, $v_s = y l d_s / 2$.
w	Ancho de cresta del rompeolas, en m.
W_D	Peso de diseño de los elementos que forman el rompeolas, en Ton.
W_E	Peso resistente de los elementos que forman el rompeolas, en Ton.
x, y	Abscisa y ordenada, respectivamente.
y	Separación entre la línea de costa y el rompeolas, en m.
y_b	Ancho de la rezaca, en m.
y_b^*	Parámetro adimensional que toma en cuenta el ancho de la rezaca (surf zone); $y_b^* = y_b / y$.
y_s	Amplitud de la saliente, <i>fig.</i> 2.1.
y_s^*	Parámetro adimensional que toma en cuenta la amplitud de las salientes; $y_s^* = y_s / y$.
z	Talud del rompeolas.
α	Angulo de incidencia del oleaje, en grados.
α_b	Angulo de incidencia del frente de ola con la línea de

	romplente, en grados.
α_v	Coefficiente que depende de la velocidad de avance del huracán y del incremento en la longitud del fetch al desplazarse el huracán. Para huracanes que se desplazan lentamente o moderadamente, $\alpha = 1$.
Δp	Diferencia de presión, en mm de Hg. Esta dado por $(p_n - p_o)$.
$\Delta p / \Delta n$	Gradiente de presiones.
ϕ	Latitud del lugar, en grados.
γ_o	Relación de esbeltez de la ola, en %.
γ_u	Peso específico del elemento prefabricado, en kgf/m^3 .
γ_{so}	Peso específico sumergido de la arena.
ψ'	Intensidad de flujo.
ψ_c'	$\psi_c' = K U_r^{0.9}$
θ	Angulo que forma el talud del terraplén con la horizontal.
ρ	Densidad del aire, en kgfs^2/m^4 .
ρ_o	Densidad del agua, en kg/m^3 .
σ	$\sigma = 2\pi T$.
ω	Velocidad angular de la tierra, en rad/h, igual a $2\pi/24\text{rad/hr}$.
ω_o	Velocidad de caída de las partículas de diámetro representativo.
Ω	Velocidad angular de la tierra, en rad/s.

A P E N D I C E B

Tablas.

Tabla 2.1 Condiciones de oleaje para evaluar el transporte a través del rompeolas, ref. [16].

Oleaje	T (s)	L_o (cm)	H_o (cm)	H_o/L_o	H_o/D_m
B	1.20	225	6.90	0.03	400
S	1.28	256	2.74	0.01	150

Tabla 2.2 Condiciones de oleaje para el transporte a través de rompeolas segmentados, ref. [16].

Oleaje	T (s)	L_o (cm)	H_o (cm)	H_o/L_o	H_o/D_m
A	1.19	221	5.70	0.026	335
C	0.73	83	7.20	0.086	424

Tabla 2.3 Dimensiones y posición de los rompeolas segmentados fuera de costa, ref. [16].

Disposición		y/y_b	y/l	l/L_o	B/L_o
A	1	0.50	0.44	0.724	0.23
	2	0.75	0.66	0.724	0.23
	3	1.00	0.88	0.724	0.23
C	1	0.39	0.44	1.930	0.60
	2	0.56	0.63	1.930	0.60
	3	0.78	0.94	1.930	0.60
	4	0.78	0.63	2.900	0.60

Tabla 2.4 Código de periodos de ola para el OWS, ref. [21].

Código	Periodo (s)	Código	Periodo (s)
2	≤ 5	8	16 ó 17
3	6 ó 7	9	18 ó 19
4	8 ó 9	0	20 ó 21
5	10 ó 11	1	> 21
6	12 ó 13	x	Calma o no determinado
7	14 ó 15		

Tabla 2.5 Código de alturas de ola para el OWS, ref. [21].

Código	Altura (m)	Código	Altura (m)	Código	Altura (m)
00	0.25	10	5.00	90	10
01	0.50	11	5.50	91	11
02	1.00	12	6.00	92	12
03	1.50	13	6.50	93	13
04	2.00	14	7.00	94	14
05	2.50	15	7.50	95	15
06	3.00	16	8.00	96	16
07	3.50	17	8.50	97	17
08	4.00	18	9.00	98	18
09	4.50	19	9.50	99	19

Tabla 2.6 Rangos de altura de oleaje local y distante (Sea and Swell), ref. [21].

Tipo de Oleaje	Rango (m)		
	Bajo	Medio	Alto
Local	0.30-0.90	0.90-2.40	>2.40
Distante	0.30-1.82	1.82-3.65	>3.65

Nota: En ambos tipos de oleaje se considera calma a las alturas menores de 0.30 m.

Tabla 2.7 Duración asignada a los mapas de superficie en función del cambio de dirección del fetch, ref. [2].

Caso	Cambio de la Dirección del Fetch con Respecto a la Rosa de los Vientos	Duración Asignada a Cada Mapa (hr)
1	360° (1/16)	5
2	360° (2/16)	4
3	360° (3/16)	3
4	360° (4/16)	2
5	360° (5/16) o más	1

Tabla 2.8 Valores del coeficiente de reflexión, K_R , ref. [2].

Tipo de Estructura	K_R
Muros verticales o casi verticales.	0.8 - 1.0
Estructuras con taludes entre 2 y 3.	0.4 - 0.8
Estructuras con bloques de concreto.	0.2 - 0.4
Terrapienes.	0.3 - 0.5
Playa natural.	0.1 - 0.2

Tabla 2.9 Valores recomendados para determinar el peso de las unidades de coraza (criterio sin daño y mínima roci6n, seg6n CERC), ref. [2].

Tipo de elementos en la coraza	n(1)	Colocaci6n	Cuerpo (tronco) de la escollera K_D (4)		Morro de la escollera K_D		Talud cot 6
			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 (5)
Lisa y redondeada	> 3	Azar	2.8	3.2	2.1	2.3	
Rugosa y angulosa	1	Azar(2)	(2)	2.9	(2)	2.3	
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) (5)
	2	Especial(3)	4.8	5.5	3.5	4.5	
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) Colocaci6n especial con el eje longitudinal de la roca puesto en direcci6n perpendicular al paramento de la escollera
- (4) Aplicable en taludes comprendidos entre 1.5:1 y 5:1
- (5) Hasta no tener más informaci6n disponible acerca de la variaci6n 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 2.10 $H/H_{d=0}$ y K_D como función del daño en la coraza y del tipo de elementos que la forman, ref. [7].

Unidad		Daño (d) en porciento						
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50
Piedra lisa	$H/H_{d=0}$	1.00	1.08	1.14	1.20	1.29	1.41	1.54
	K_D	2.40	3.00	3.60	4.10	5.10	6.70	8.70
Piedra rugosa	$H/H_{d=0}$	1.00	1.08	1.19	1.27	1.37	1.47	1.56
	K_D	4.00	4.90	6.60	8.00	10.00	12.40	15.00
Tetra. y Cuadr.	$H/H_{d=0}$	1.00	1.09	1.17	1.24	1.32	1.41	1.50
	K_D	8.30	10.08	13.40	15.90	19.20	23.40	27.80
Tribar	$H/H_{d=0}$	1.00	1.11	1.25	1.36	1.50	1.59	1.64
	K_D	10.40	14.20	19.40	26.20	35.20	41.80	45.90

Tabla 3.1 Características del oleaje normal para Cancún, Q. Roo; obtenidas de la publicación Ocean Waves Statistics, ref. [1].

Dirección	Resumen Anual y por Estaciones					
	Anual	Primavera	Verano	Otoño	Invierno	Suma
	Tiempo de Acción (días)					
N	29.53	5.64	2.26	11.18	11.60	30.68
NE	56.25	12.70	7.04	23.02	15.30	58.06
E	115.61	26.34	34.22	29.90	24.40	114.86
SE	63.98	23.89	16.60	10.00	12.50	62.99
S	24.71	8.09	8.17	3.01	4.80	24.07
SW	12.56	1.88	4.87	2.26	3.30	12.31
W	11.39	3.39	2.78	1.94	3.20	11.31
NW	18.25	3.85	1.82	3.88	9.10	18.65
Total	332.28	85.78	77.76	85.19	84.20	332.93
Calmas	32.96	6.21	14.26	5.82	5.79	32.08
Total	365.24	91.99	92.02	91.01	89.99	365.01

Tabla 3.2a Características del oleaje normal para Cancún, Q. Roo; obtenidas de la publicación del Sea and Swell, ref. [1].

Dirección	T (s)	H (m)								Total
		0.25	0.375	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	
		Anual (tiempo de acción en días)								
NE	< 5	5.31	12.16	14.09	5.69	0.48	0.39	0.10	0.10	38.32
	< 7	0.39	0.77	3.38	3.86	2.22	1.06	0.00	0.19	11.87
	< 9	0.29	0.10	0.48	0.58	1.06	0.48	0.58	0.00	3.57
	<11	0.29	0.68	0.20	0.20	0.29	0.29	0.48	0.00	2.43
	Total	6.28	13.71	18.15	10.33	4.05	2.22	1.16	0.29	56.19
E	< 5	12.35	27.41	29.91	8.30	1.54	0.77	0.19	0.00	80.47
	< 7	0.39	1.35	7.72	9.46	2.89	1.93	0.39	0.77	24.90
	< 9	0.00	0.19	0.96	2.89	2.32	0.39	0.19	0.19	7.13
	<11	0.38	0.39	0.58	0.38	0.58	0.19	0.19	0.39	3.08
	Total	13.12	29.34	39.17	21.03	7.33	3.28	0.96	1.35	115.58
SE	< 5	5.69	9.55	17.47	6.08	0.39	0.00	0.00	0.00	39.18
	< 7	0.39	1.16	3.86	6.95	2.70	1.06	0.39	0.10	16.61
	< 9	0.10	0.10	1.25	2.03	1.06	0.10	0.29	0.29	5.22
	<11	0.30	0.59	0.58	0.58	0.10	0.48	0.10	0.29	3.02
	Total	6.48	11.40	23.16	15.64	4.25	1.64	0.78	0.68	64.03
S	< 5	1.16	6.56	4.25	2.32	0.19	0.19	0.00	0.00	14.67
	< 7	0.19	0.77	2.70	1.35	0.19	0.19	0.00	0.00	5.39
	< 9	0.00	0.19	0.58	0.77	0.19	0.39	0.00	0.19	2.31
	<11	0.00	0.38	0.38	0.39	0.38	0.77	0.00	0.00	2.30
	Total	1.35	7.90	7.91	4.83	0.95	1.54	0.00	0.19	24.67

Calmas o Periodos Indeterminados: 32.96

Tabla 3.2b Características del oleaje normal para Cancún, Q. Roo; obtenidas de la publicación del Sea and Swell, ref. [1].

Dirección	T (s)	H (m)								Total
		0.25	0.375	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75	3.25	
		Anual (tiempo de acción en días)								
SW	< 5	1.16	2.90	3.19	0.97	0.19	0.10	0.00	0.00	8.51
	< 7	0.10	0.19	0.77	1.06	0.19	0.00	0.00	0.10	2.41
	< 9	0.00	0.10	0.58	0.48	0.00	0.10	0.00	0.00	1.26
	<11	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.10	0.00	0.10	0.40
Total		1.26	3.19	4.74	2.51	0.38	0.30	0.00	0.20	12.58
W	< 5	1.16	1.16	2.70	0.58	0.19	0.19	0.00	0.00	5.98
	< 7	0.19	0.19	0.19	2.32	0.58	0.77	0.00	0.19	4.43
	< 9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.39	0.19	0.39	0.00	0.97
	<11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total		1.35	1.35	2.89	2.90	1.16	1.15	0.39	0.19	11.38
NW	< 5	1.54	2.61	2.80	1.06	0.58	0.10	0.00	0.10	8.79
	< 7	0.00	0.29	1.35	2.03	1.35	0.19	0.10	0.00	5.31
	< 9	0.10	0.10	0.48	0.29	0.77	0.77	0.29	0.20	3.00
	<11	0.20	0.00	0.10	0.10	0.39	0.00	0.10	0.29	1.18
Total		1.84	3.00	4.73	3.48	3.09	1.06	0.49	0.59	18.28
N	< 5	1.54	5.79	5.60	1.35	0.39	0.00	0.19	0.00	14.86
	< 7	0.00	0.19	2.12	2.12	1.74	1.74	0.39	0.00	8.30
	< 9	0.00	0.19	0.19	1.16	1.35	0.19	0.19	0.00	3.27
	<11	0.39	0.19	0.78	0.39	0.00	1.35	0.00	0.00	3.10
Total		1.93	6.36	8.69	5.02	3.48	3.28	0.77	0.00	29.53

Calmas o Periodos Indeterminados: 32.96

Tabla 3.3 Características del oleaje para las playas de Cancún, Q.
Roo. Método Estadístico, ref. [1].

Tr (años)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)		Huracán
		Calculado	Ajustado*	
4	3.35	7.27		Beulah Allen
→ 5	4.52	9.36	10	
→ 10	8.01	11.28	12	
20	9.06	12.01		
→ 40	9.67	12.41	12	
50	9.81	12.50		
60	9.91	12.56		Gilberto
70	9.99	12.62		
→ 80	10.06	12.66	12	
90	10.12	12.70		
100	10.16	12.72		
150	10.32	12.82		

Tr : Periodo de retorno, en años.

$\bar{H}_{1/3}$: Altura de la ola significativa, en m.

$T_{1/3}$: Periodo de la ola significativa, en s.

→ : Características del oleaje para diseño de los rompeolas.

* : Para estimar el coeficiente de refracción, K_r .

Tabla 3.4 Coeficiente de propagación del oleaje normal en aguas someras, K_s .

d (m)	d/L _o	K _s
20	0.5128	0.9224
19	0.4871	0.9892
18	0.4615	0.9863
17	0.4358	0.9855
16	0.4102	0.9780
15	0.3846	0.9665
14	0.3589	0.9665
13	0.3333	0.9592
12	0.3076	0.9515
11	0.2820	0.9430
10	0.2564	0.9343
9	0.2307	0.9264
8	0.2051	0.9193
7	0.1794	0.9144
6	0.1538	0.9132
5	0.1282	0.9172
4	0.1025	0.9304
3	0.0769	0.9591
2	0.0512	1.0190
1	0.0256	1.1590

$$L_o = 1.56(5)^2 = (1.56)25 = 39 \text{ m}$$

Tabla 3.5 Coeficientes de refracción, oleaje normal, ref. [13].

ZONA I		ZONA II		ZONA III		ZONA IV	
CPO	K_r	CPO	K_r	CPO	K_r	CPO	K_r
D i r e c c i ó n S E							
4	1.1314	8	0.9153	14	1.0165	18	1.0318
5	0.7416	9	1.0000	15	0.9832	19	1.0155
6	0.9520	10	0.9393	16	0.9701	20	1.0000
7	0.9411	11	1.0000	17	1.0000	21	0.9333
8	0.9153	12	1.0299	18	1.0318	22	1.0000
		13	0.9333			23	1.0801
		14	1.0165				
\bar{K}_r	0.9362	\bar{K}_r	0.9763	\bar{K}_r	1.0003	\bar{K}_r	1.0101
D i r e c c i ó n E							
5	1.0000	14	0.9293	23	0.9574	29	0.9381
6	1.0247	15	1.0445	24	0.9354	30	0.9798
7	0.9381	16	0.9555	25	0.8898	31	0.9354
8	0.9592	17	1.0954	26	0.9381	32	0.8771
9	1.0000	18	0.9770	27	0.8660	33	0.9592
10	1.0206	19	0.9770	28	0.8819		
11	0.8367	20	0.9770	29	0.9381		
12	0.9789	21	1.0000				
13	0.9790	22	0.9535				
14	0.9293	23	0.9574				
\bar{K}_r	0.9662	\bar{K}_r	0.9867	\bar{K}_r	0.9152	\bar{K}_r	0.9379
D i r e c c i ó n N E							
1b	0.5774	3c	0.5615	5a	0.4899	6a	0.6685
c	0.5498	d	0.6371	b	0.5684	b	0.7071
d	0.5578	e	0.6172	c	0.5375	7a	0.7049
2a	0.5898	4a	0.5292	d	0.5209	b	0.7229
b	0.5748	b	0.5748	e	0.5883		
c	0.5446	c	0.5517	6a	0.6685		
d	0.5954	d	0.5208				
3a	0.5407	e	0.6179				
b	0.5878	5a	0.4899				
c	0.5615						
\bar{K}_r	0.5679	\bar{K}_r	0.5666	\bar{K}_r	0.5622	\bar{K}_r	0.7008

Tabla 3.6 Características del oleaje en la rompiente, profundidad y altura del oleaje.

Zona	S	d_b/H_o	d_b (m)	H_b/H_o	H_b (m)
I	0.017	1.66	1.24	1.22	0.91
II	0.022	1.64	1.23	1.22	0.91
III	0.022	1.64	1.23	1.22	0.91
IV	0.016	1.67	1.25	1.22	0.91

$$H_o = 0.75 \text{ m}$$

$$L_o = 39 \text{ m}$$

$$H_o/L_o = 0.019$$

Tabla 3.7 Características de las salientes para un rompeolas aislado, de la zona II de Cancún, Q. Roo.

Dirección	β (°)	Ocurrencia Anual (%)	H (m)	Y_s (m)	V_{s3} (m ³)
SE	16.05 SE	24	0.75	80	18447
E	8.82 SE	52	0.75	76	17525
NE	16.10 SE	24	0.37	37	8531

$$T = 5.00 \text{ s}$$

$$S = 0.022$$

$$L_o = 39.00 \text{ m}$$

$$d_b = 2.20 \text{ m (batimetría)}$$

$$\beta = \text{Angulo de incidencia.}$$

Tabla 3.8 Sobre elevación de la marea por viento (S_p).

Tr (#)	P_o	Δp	R (mm)	S_I (ft)	$H_{1/3}$ (m)	U (m/s)	U (°)	ψ	F_H	S'_p (m)	S_p (m)
80	930.07	83.18	16.42	17.0	10.06	18.27	40.90	100°	1.4	7.26	3.60
40	940.59	72.66	18.54	15.2	9.67	18.00	40.30	100°	1.4	6.49	3.23
10	969.20	44.05	25.80	9.7	8.00	16.68	37.30	100°	1.4	4.14	2.07
5	992.87	20.38	33.91	7.3	5.52	14.38	32.20	100°	1.3	2.89	1.45

* : Periodo de retorno, en años.

• : Velocidad del viento formativo, en millas/h

Tabla 3.9 Altura del oleaje después de la rompiente; sin rompeolas.

•	Tr = 5 años			Tr = 10 años			Tr = 40 años			Tr = 80 años		
	d'/d_b	h/H_b	h (m)	d'/d_b	h/H_b	h (m)	d'/d_b	h/H_b	h (m)	d'/d_b	h/H_b	h (m)
12										0.9946	0.977	10.5
11										0.9264	0.833	8.96
10							0.9376	0.855	8.84	0.8583	0.710	7.64
9				0.9470	0.874	7.49	0.8668	0.724	7.49	0.7902	0.608	6.54
8				0.8614	0.715	6.13	0.7959	0.611	6.37	0.7221	0.523	5.63
7				0.7759	0.589	5.04	0.7250	0.526	5.44	0.6540	0.454	4.89
6				0.6903	0.497	4.18	0.6541	0.454	4.70	0.5858	0.399	4.29
5	0.9641	0.910	4.60	0.6048	0.459	3.93	0.5833	0.337	4.10	0.5177	0.354	3.81
4	0.8146	0.642	3.24	0.5192	0.355	3.04	0.5124	0.351	3.63	0.4496	0.320	3.44
3	0.6652	0.464	2.34	0.4337	0.313	2.68	0.4415	0.316	3.27	0.3815	0.285	3.07
2	0.5157	0.353	1.78	0.3482	0.280	2.40	0.3707	0.288	2.98	0.3134	0.269	2.90
1	0.3662	0.286	1.45	0.2626	0.254	2.18	0.2998	0.265	2.74			

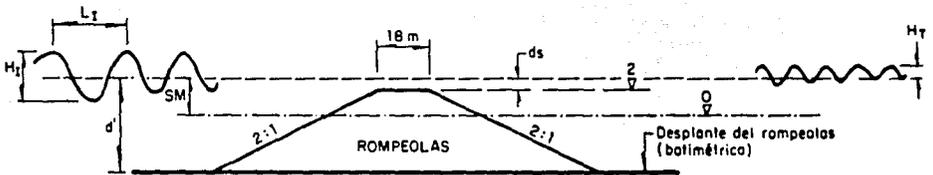
d_b^*	6.69	11.69	14.11	14.68
H_b^*	5.06	8.57	10.34	10.76
SM^*	1.45	2.07	3.23	3.60

* : Batimétrica, en m.

: Dimensiones, en m.

Tabla 3.10 Características del oleaje transmitido.

Tr (años)	$T_{1/3}$ (s)	SM (m)	d' (m)	d_{\bullet} (m)	d_{\bullet}/d'	H_I (m)	L_I (m)	W/L_I	H_T/H_I	H_T (m)
Desplante del Rompeolas, Batimétrica 3										
5	9.36	1.45	4.45	-0.55	-0.12	2.34	61.84	0.2910	0.11	0.26
10	11.28	2.07	5.07	0.07	0.01	2.68	79.55	0.2262	0.13	0.35
40	12.41	3.23	6.23	1.23	0.20	3.27	97.01	0.1855	0.70	2.28
80	12.66	3.60	6.60	1.60	0.24	3.44	101.86	0.1767	0.75	2.58



$$H_I = H_5 \text{ (Tabla 2.7)}$$

$$L_I = (gd')^{1/2} T_{1/3}$$

Tabla 3.11 Transporte litoral del oleaje ordinario, ref. [19].
(en m³, + Dirección Norte, - Dirección Sur)

Estación	Sur		Norte	
	Zona			
	IV	III	II	I
Primera Fórmula de la C. F. E.				
Primavera	57120	98843	145342	86903
Verano	12121	4373	37302	244
Otoño	-63506	-101885	-122539	-171399
Invierno	-18896	-47502	22977	75608
Anual	-12896	-46171	37129	-159859
Segunda Fórmula de la C. F. E.				
Primavera	89239	172203	224364	173650
Verano	22738	21158	57473	12919
Otoño	-96124	-150176	-201268	-292735
Invierno	-20411	-51252	-29074	-107218
Anual	-4558	-8067	51496	-213385
Fórmula de Larras.				
Primavera	7349	15996	13390	11950
Verano	2607	5332	4640	3413
Otoño	-6108	-7596	-9064	-11397
Invierno	37	423	1196	-1586
Anual	3886	14155	10063	2380
Fórmula del Shore Protection Manual.				
Primavera	31653	50147	78356	33243
Verano	3039	-9012	21220	-6163
Otoño	-39033	-78627	-54598	-94625
Invierno	-20447	-54943	-16449	-55168
Anual	-24787	-92433	28529	-122713

Tabla 3.12 Transporte litoral neto del oleaje ordinario, en m³, ref. [19].

Estación	Sur		Norte	
	Zona			
	IV	III	II	I
Primera Fórmula de la C. F. E.				
Primavera	196061	323582	405582	384477
Verano	113606	165981	207719	202463
Otoño	172406	257709	354936	343906
Invierno	146428	217264	290033	274069
Anual	628501	964537	1258586	1204915
Segunda Fórmula de la C. F. E.				
Primavera	261332	469672	592236	639317
Verano	147528	231361	294241	327971
Otoño	223060	352367	490693	544674
Invierno	189779	298867	407738	434459
Anual	821779	1352268	1784907	1946420
Fórmula de Larras.				
Primavera	17620	33341	31344	32327
Verano	10690	18060	17316	18383
Otoño	13054	20243	21348	22638
Invierno	11813	19016	20037	19566
Anual	53177	90660	90046	92913
Fórmula del Shore Protection Manual.				
Primavera	160565	259945	244356	234606
Verano	96453	143374	131800	128893
Otoño	144418	224816	229507	221531
Invierno	123838	190755	184251	177323
Anual	525273	818889	790270	762353

Tabla 3.13 Transporte on-off shore en condiciones ordinarias y extraordinarias (m³/Trimestre), ref. [19].

Estación	Sur Norte			
	Zona			
	IV	III	II	I
Oleaje Ordinario.				
Primavera	-6	-22	-59	-74
Verano	16	5	-12	-24
Otoño	-10	-19	-50	-61
Invierno	-3	-13	-40	-52
Anual	-2	-49	-162	-211
Oleaje Extraordinario.				
Primavera	-19800	68200	-159300	-148000
Verano	52800	15500	-32400	-48000
Otoño	-33000	-58900	-135000	-122000
Invierno	-9900	-40300	-108000	-104000
Anual	-9900	-151900	-434700	-422000

Tabla 3.14. Dimensiones de tetrápodos, según el CERC, ref. [2].

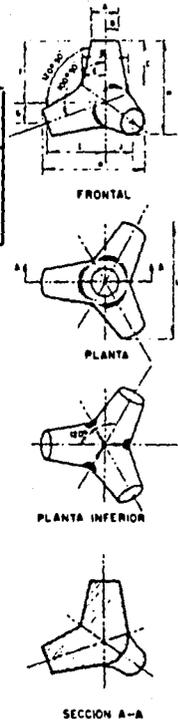
Volumen de un elemento, en m ³											
0.202	0.405	0.809	2.033	4.065	6.098	8.090	10.133	12.136	14.158	16.181	

Peso específico de concreto en kg/cm ³	Peso de un elemento, en ton										
	2747.600	0.60	1.00	2.00	5.00	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00
2396.012	0.53	1.07	2.14	5.36	10.68	16.02	21.36	26.70	32.04	37.38	42.71
2501.126	0.56	1.11	2.23	5.57	11.14	16.71	22.29	27.86	33.43	39.00	44.57
2597.323	0.58	1.16	2.31	5.79	11.57	17.36	23.14	28.93	34.71	40.50	46.29

Espesor medio de una capa con dos elementos colocados al azar, en m											
1.222	1.539	1.939	2.630	3.313	3.794	4.176	4.499	4.779	5.032	5.261	

Número de elementos por cada 100 m ² (una capa con dos elementos colocados al azar)											
301.61	190.00	119.88	65.04	40.86	31.24	25.96	22.28	19.81	17.80	16.34	

Variable	Dimensiones del elemento, en m										
A	0.271	0.341	0.430	0.532	0.735	0.841	0.926	0.997	1.060	1.116	1.167
B	0.134	0.171	0.213	0.289	0.366	0.421	0.463	0.497	0.530	0.558	0.587
C	0.427	0.529	0.679	0.920	1.163	1.329	1.463	1.576	1.676	1.765	1.844
D	0.421	0.530	0.671	0.902	1.146	1.310	1.442	1.554	1.652	1.737	1.817
E	0.210	0.265	0.335	0.454	0.573	0.655	0.727	0.777	0.826	0.869	0.908
F	0.576	0.725	0.914	1.243	1.567	1.792	1.972	2.124	2.259	2.377	2.487
G	0.192	0.241	0.305	0.415	0.521	0.597	0.658	0.707	0.753	0.792	0.829
H	0.896	1.131	1.423	1.932	2.435	2.786	3.069	3.304	3.511	3.697	3.865
I	0.543	0.688	0.963	1.170	1.475	1.689	1.859	2.003	2.128	2.240	2.346
J	0.271	0.341	0.429	0.585	0.738	0.844	0.930	1.000	1.064	1.119	1.170
K	0.978	1.231	1.551	2.106	2.655	3.039	3.344	3.603	3.828	4.032	4.215
L	1.079	1.356	1.710	2.323	2.926	3.341	3.685	3.969	4.218	4.441	4.642



Nota: Datos obtenidos de tetrápodos utilizados en modelos del Waterways Experiment Station

Volumen de un elemento = 0.28 m³

donde: A = 0.302 m B = 0.215 m
 B = 0.151 m H = dimensión base
 C = 0.477 m I = 0.604 m

D = 0.410 m J = 0.303 m
 E = 0.735 m K = 1.091 m
 F = 0.644 m L = 1.201 m

Espesor de una capa (2 elementos) = 1.361 m

APENDICE C

Figuras.

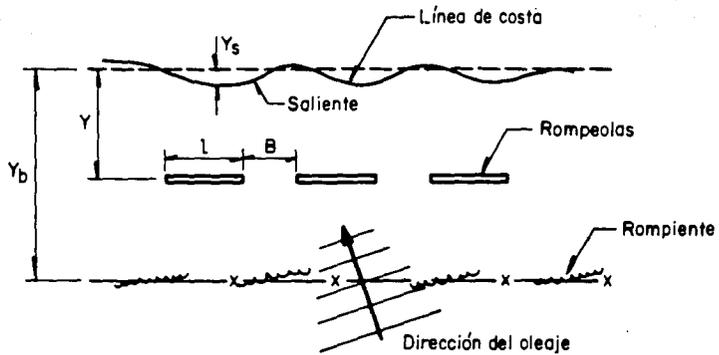


Fig 2.1 Disposición general de los rompeolas fuera de costa

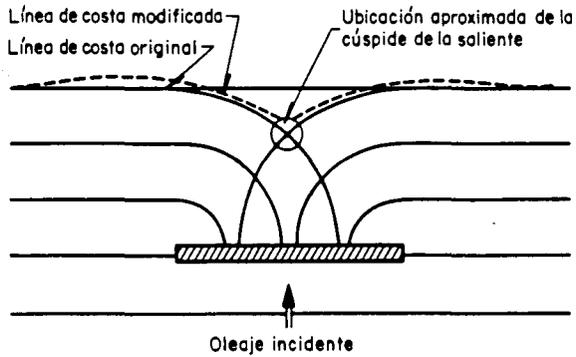


Fig 2.2 Ubicación de la cúspide de la saliente [9]

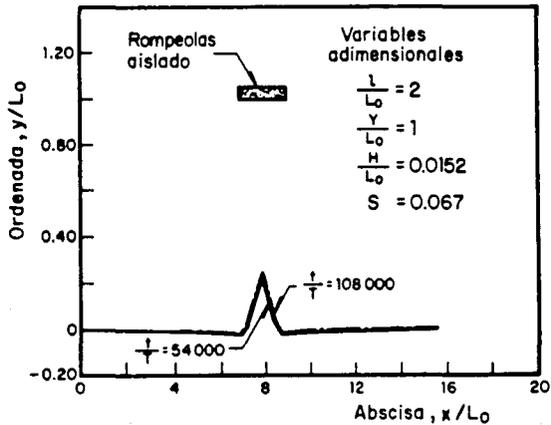


Fig 2.3 Amplitud de la línea de playa, para $l/Y=2$ [11]

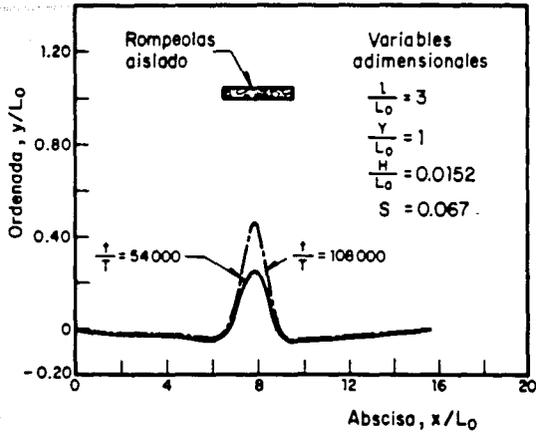


Fig 2.4 Amplitud de la línea de playa, para $l/Y=3$ [11]

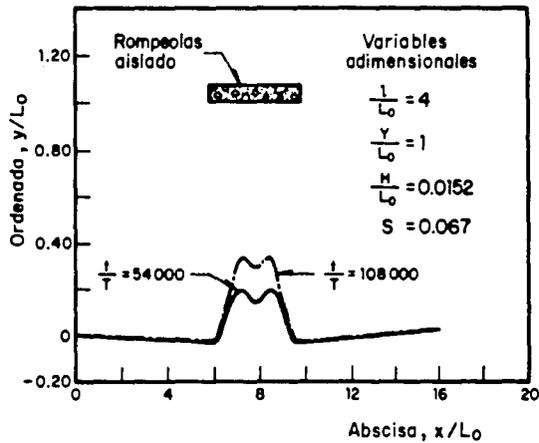


Fig 2.5 Amplitud de la línea de playa, para $l/Y=4$ [11]

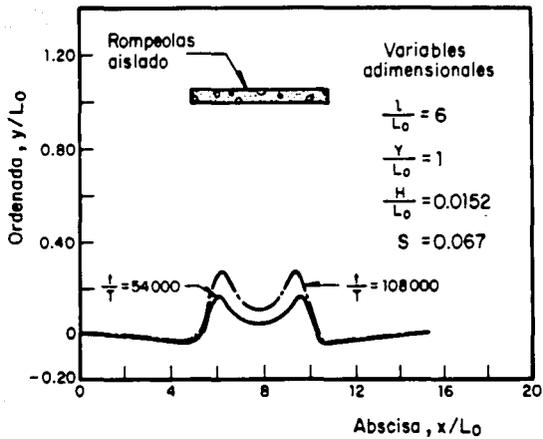


Fig 2.6 Amplitud de la línea de playa , para $l/Y=6$ [11]

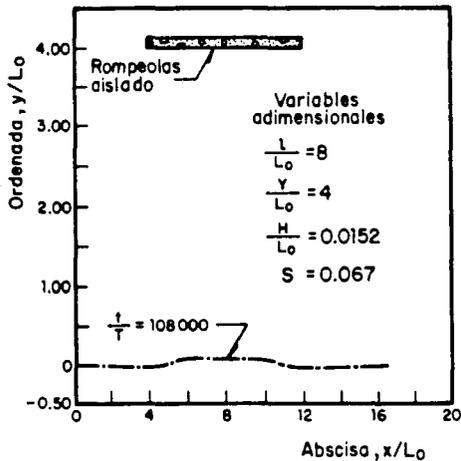


Fig 2.7 Amplitud de la línea de playa , para $l/Y=8L_0/4L_0$ [11]

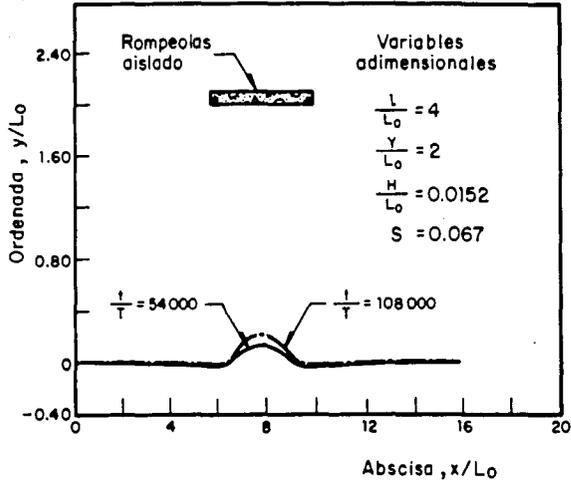


Fig 2.8 Amplitud de la línea de playa, para $L/Y=4L_0/2L_0$ [11]

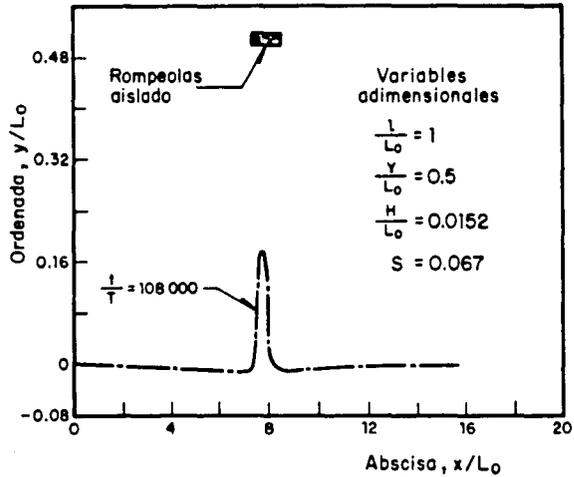


Fig 2.9 Desplazamiento de la línea de playa, para $L/Y=L_0/0.5L_0$ [11]

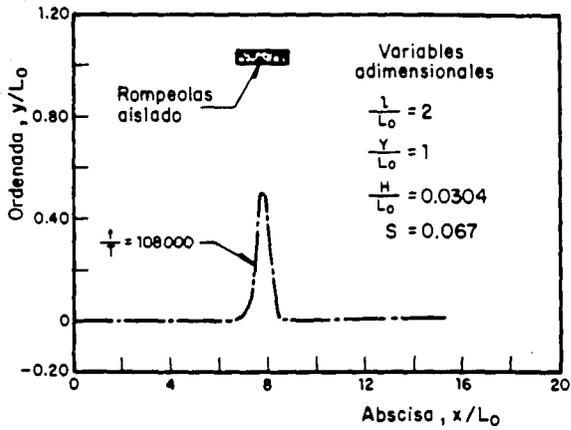


Fig 2.10 Desplazamiento de la línea de playa, para $H_b/L_0 = 0.0304$ [11]

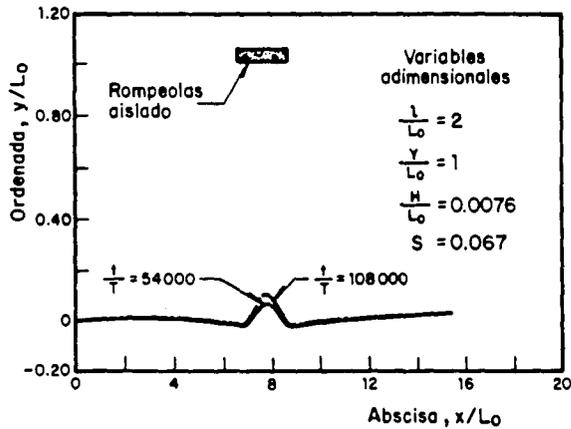


Fig 2.11 Amplitud de la línea de playa, para $H_b/L_0 = 0.0076$ [11]

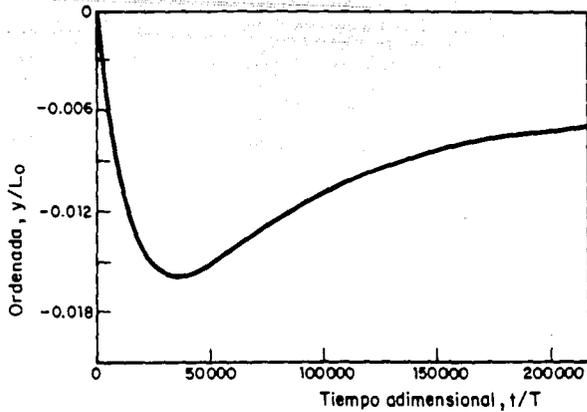


Fig 2.12 Variación de la amplitud de la línea de playa en el tiempo, para $Y = L_0$ [11]

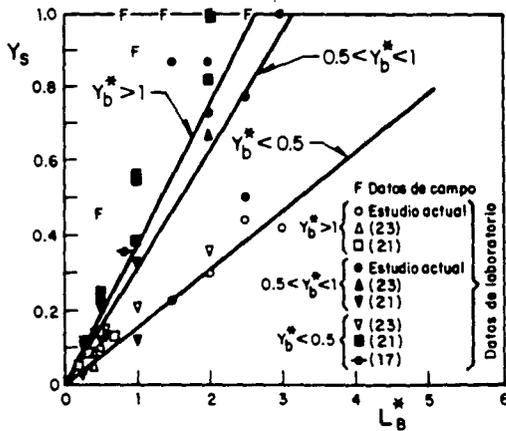


Fig 2.13 Relación entre L_B^* y Y_S^* , para un rompeolas aislado [13]

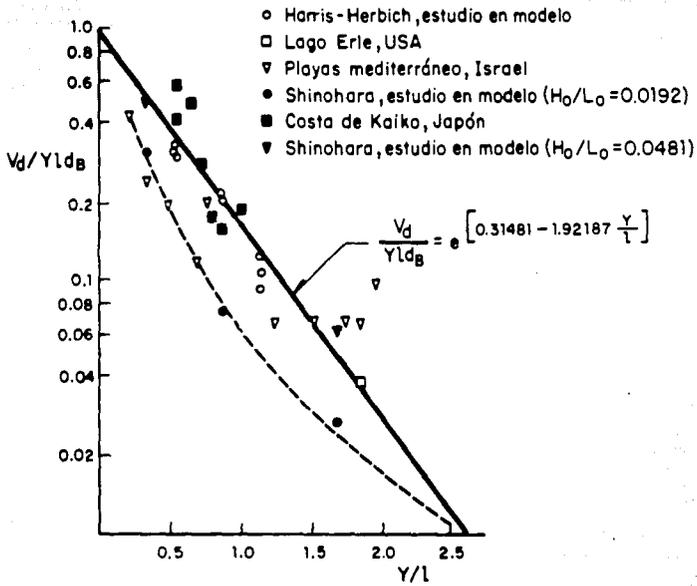


Fig 2.14 Comparación de campo y de laboratorio ,al correlacionar $V_d/Y l d_B$ y Y/l [15]

	Playa Colonial (castle wood)	Playa Colonial (central)	Playa Winthrop (marea alta)	Playa Holly	Parque Lakeshore
Proyectos prototipo		Playa Winthrop (marea baja)	Isla Pesque (sumergido)	Isla Pesque (emergido) Parque Lakeviou	Puerto East
Impactos sobre la costa	Bloques de sedimento Pérdidas gdes.	Fuera de costa	Reducido // Sedimentos suelos periodica- mente	Balancedado // Transporte continuo hacia el sotavento del rompeolas	Fuente de sedimentos Erosión de la playa
Tipo de formación	Tómbolos permanentes	Formación de tómbolos periódicos	Buen desarrollo de salientes	Salientes tenues	No sinuoso
Energía del oleaje en el sotavento de la estructura	Bajo				Alto

Fig 2.15 Esquema de clasificación propuesta para rompeolas segmentados, basado en los efectos observados en las playas [12]

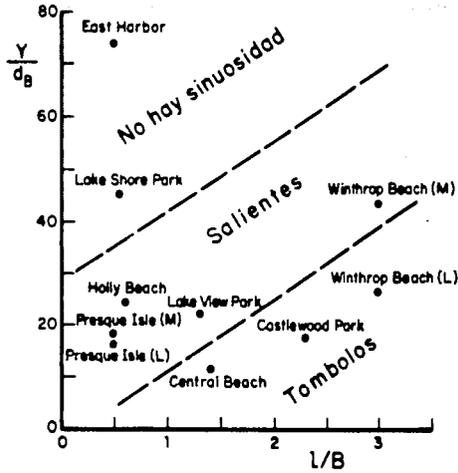


Fig 2.16 Análisis adimensional del tipo de formación playera obtenido de rompeolas segmentados en USA [12]

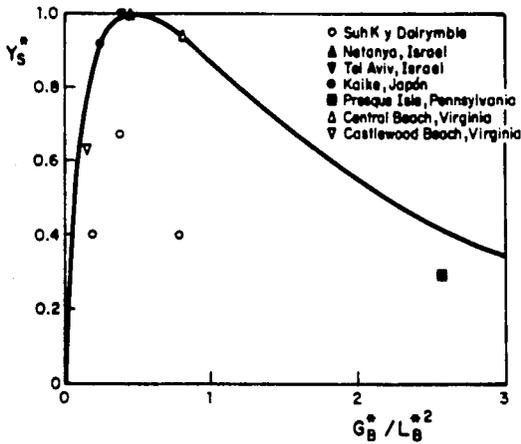


Fig 2.17 Relación entre G_B^*/L_B^{*2} y Y_S^* , para rompeolas segmentados [13]

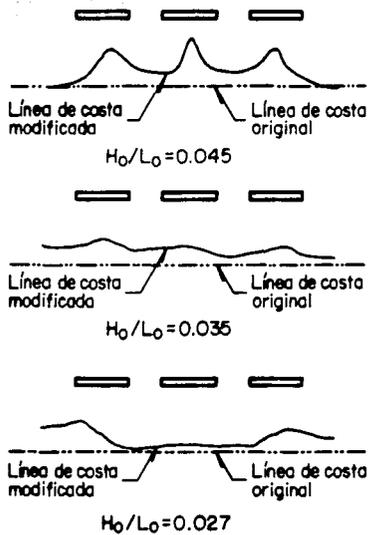


Fig 2.18 Efecto de la esbeltez del oleaje utilizando rompeolas segmentados, $Y/l=0.5$ y $B/l=0.6$ [15]

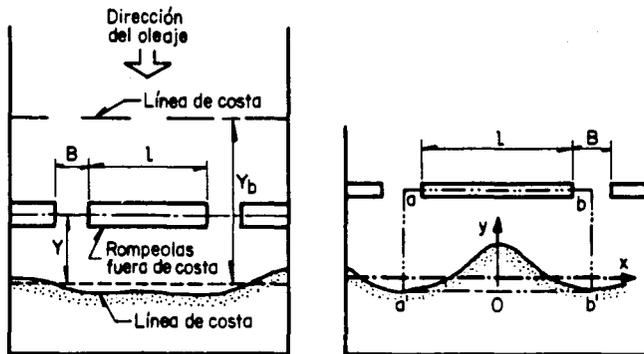


Fig 2.19 Esquema del rompeolas segmentado, utilizado por Hideaki Noda [16]

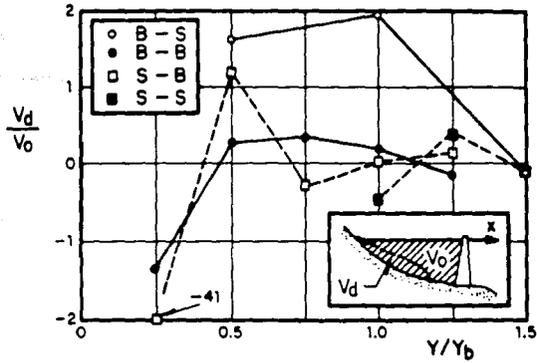


Fig 2.20 Relación entre V_d/V_0 y Y/Y_b , obtenida por Hideaki Noda [16]



Fig 2.21 Cambio de la línea de costa y configuración de la playa para diversas posiciones del rompeolas segmentado [16]

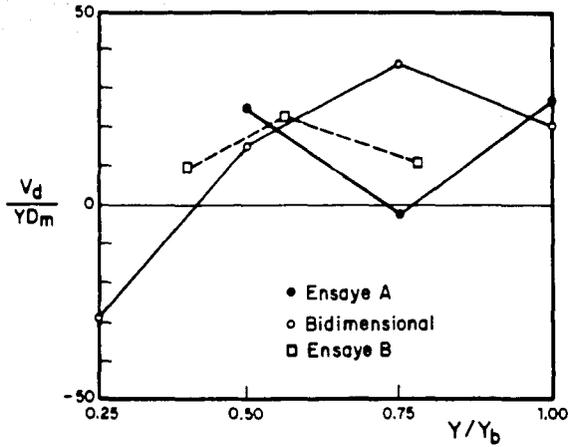


Fig 2.22 Relación entre V_d/YD_m y Y/Y_b , obtenida por Hideaki Noda [16]

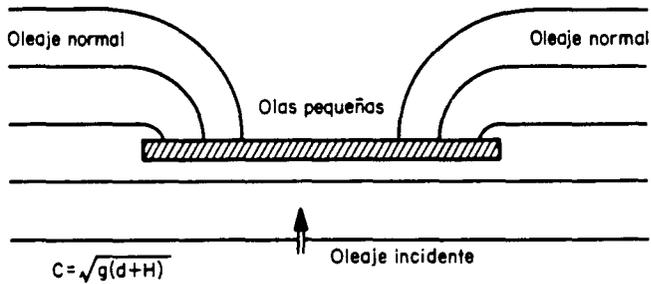


Fig 2.23 Difracción de un rompeolas, incluyendo el efecto de la dispersión de la amplitud del oleaje [9]

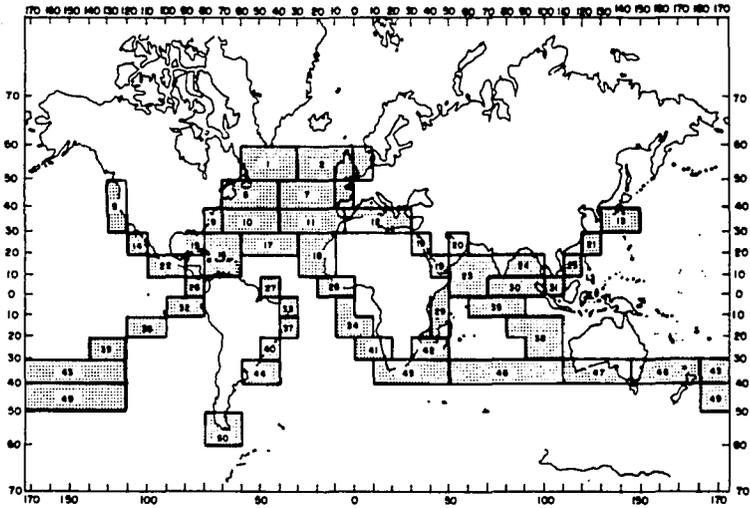


Fig. 2.24 Zonificación del Ocean Wave Statistics, ref. [21]

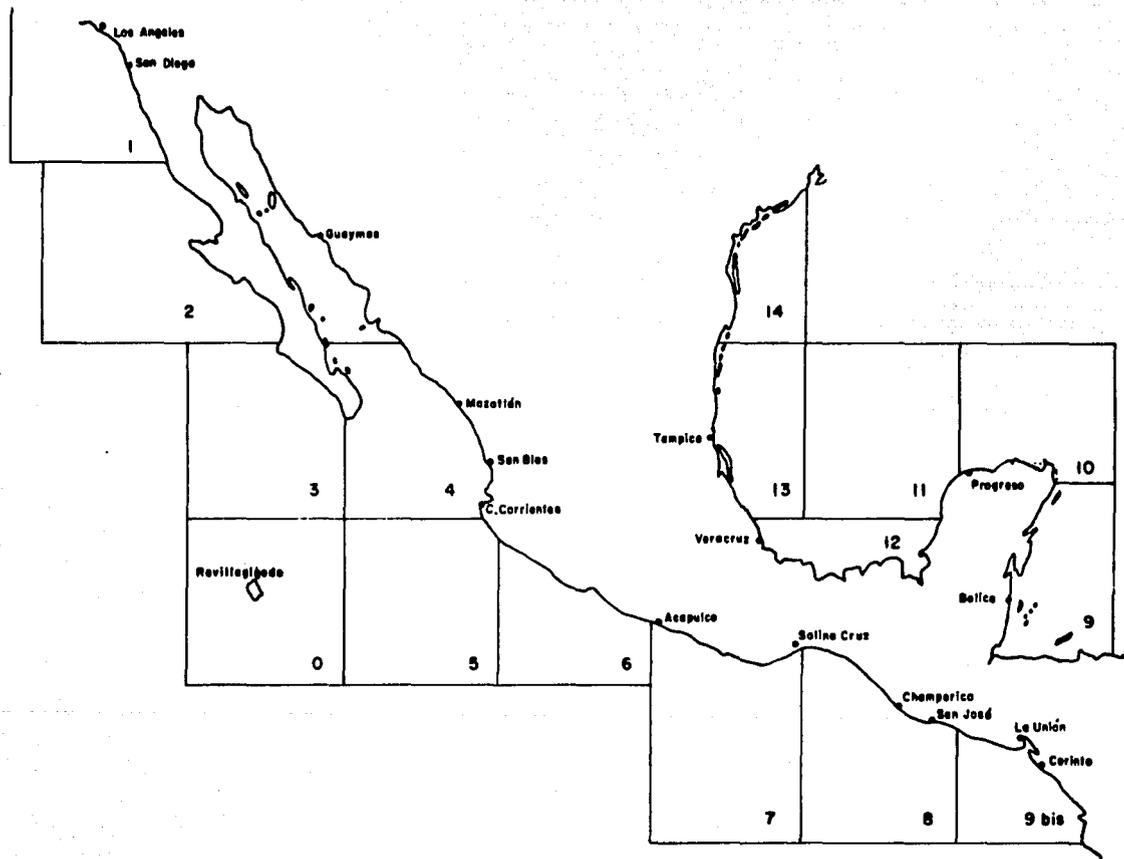


Fig. 2.25 Zonas de información del Sea and Swell para la República Mexicana.

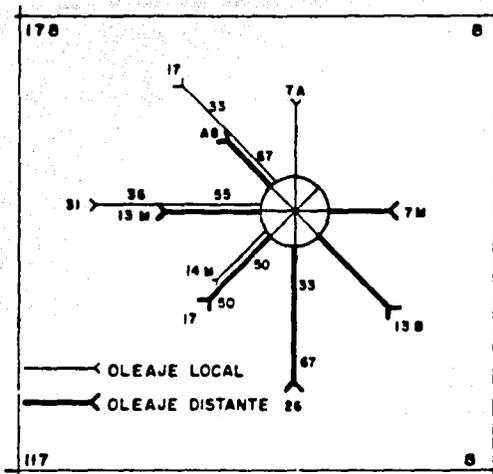


Fig. 2.26 Representación gráfica mensual del Sea and Swell, ref [21]

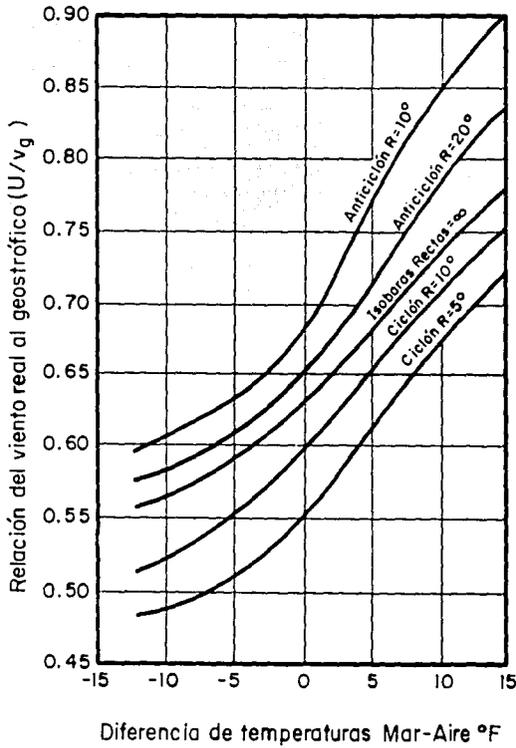


Fig 2.27 Determinación del viento real U, a partir de la relación (U/v_g)

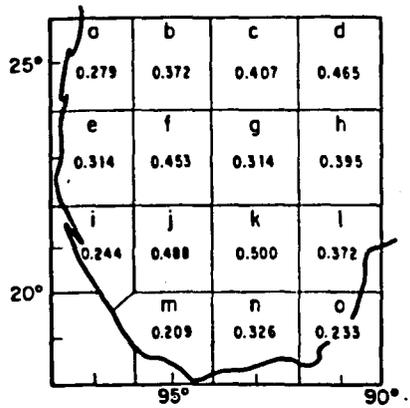


Fig. 2.28 Número de ciclones por año, ref. [7]

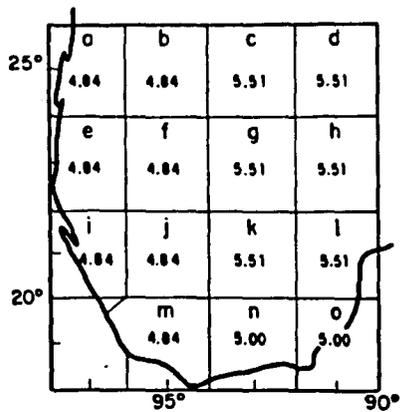


Fig. 2.29 Velocidad de desplazamiento del ciclón, en m/s, ref. [7]

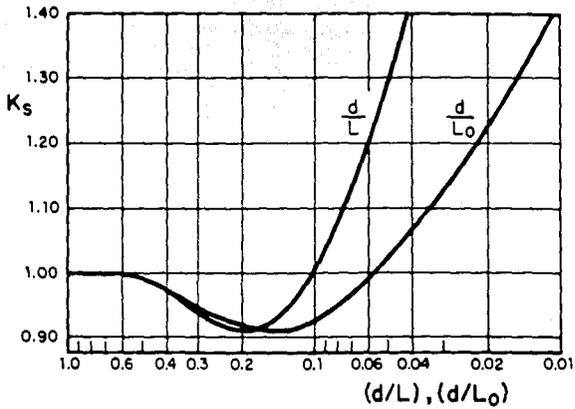


Fig 2.30 Coeficiente de propagación K_s [2]

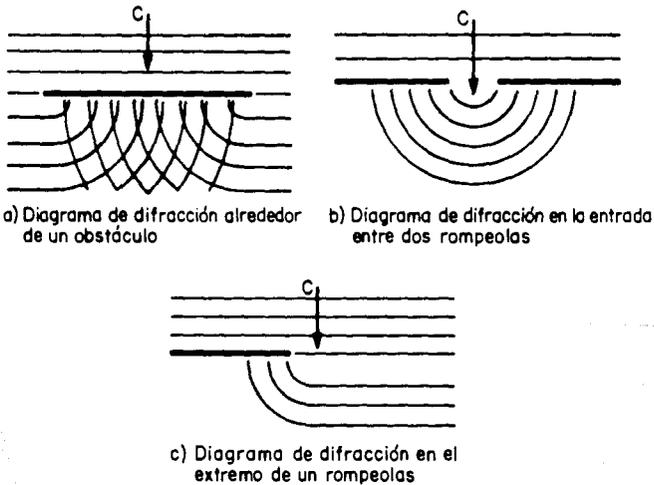


Fig 2.31 Diagramas de difracción [2]

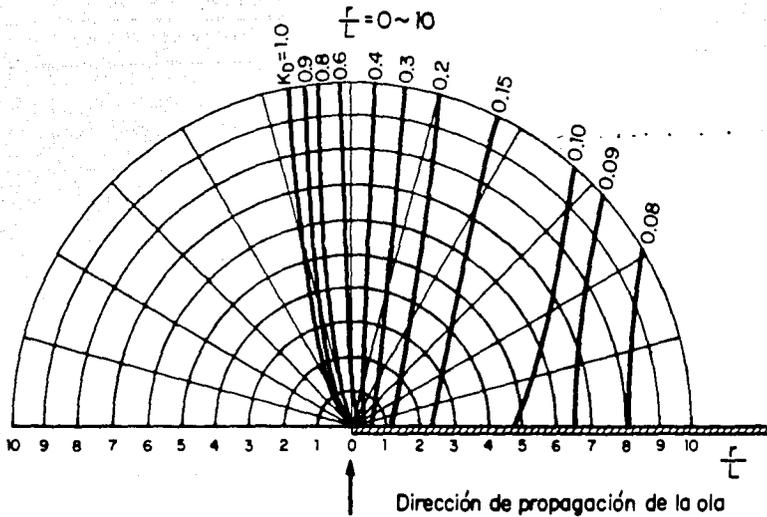


Fig 2.32 Diagrama de difracción en el extremo de un rompeolas [2]

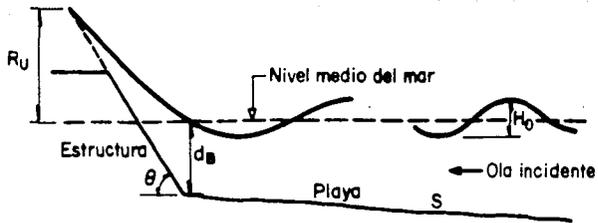


Fig 2.33 Alcance de la ola por rotación [8]

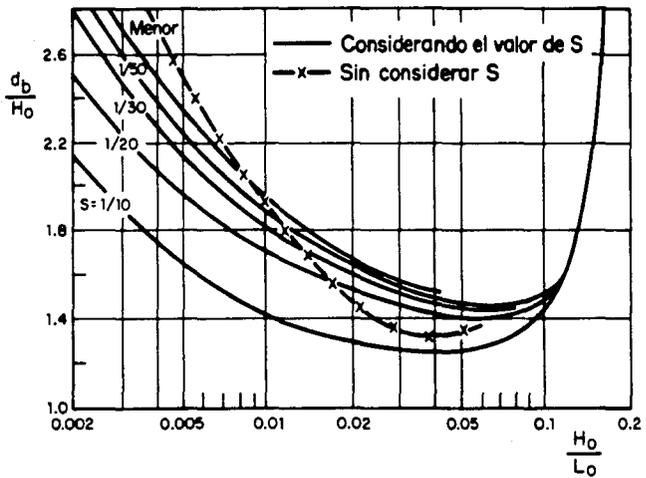


Fig 2.34 Profundidad en la rompiente [4]

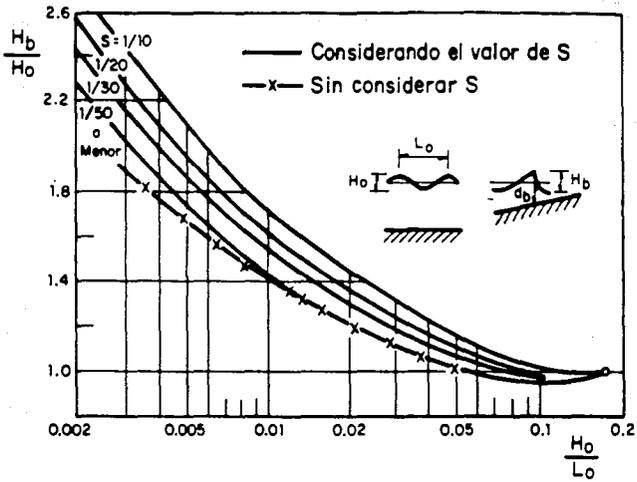


Fig.2.35 Altura del oleaje en la rompiente [4]

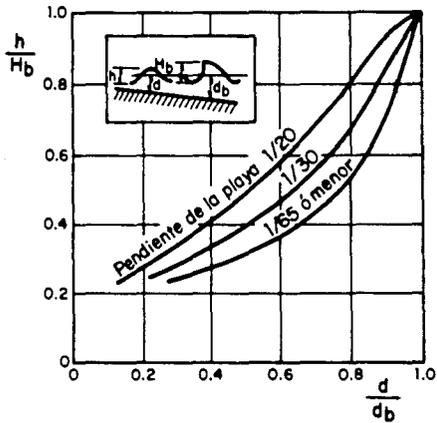


Fig.2.36 Altura del oleaje después de la rompiente [4]

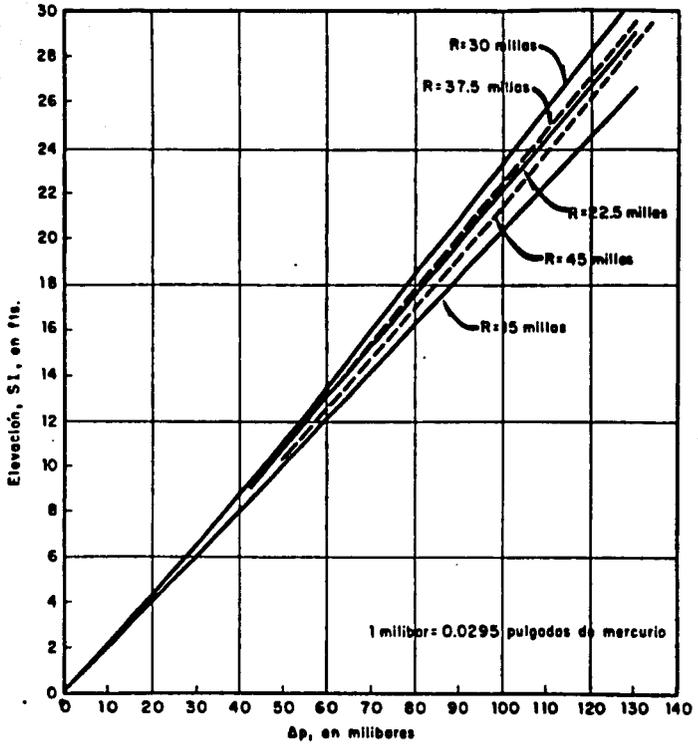


Fig. 2.37 Estimación preliminar del ascenso por marea de viento, ref. [7]

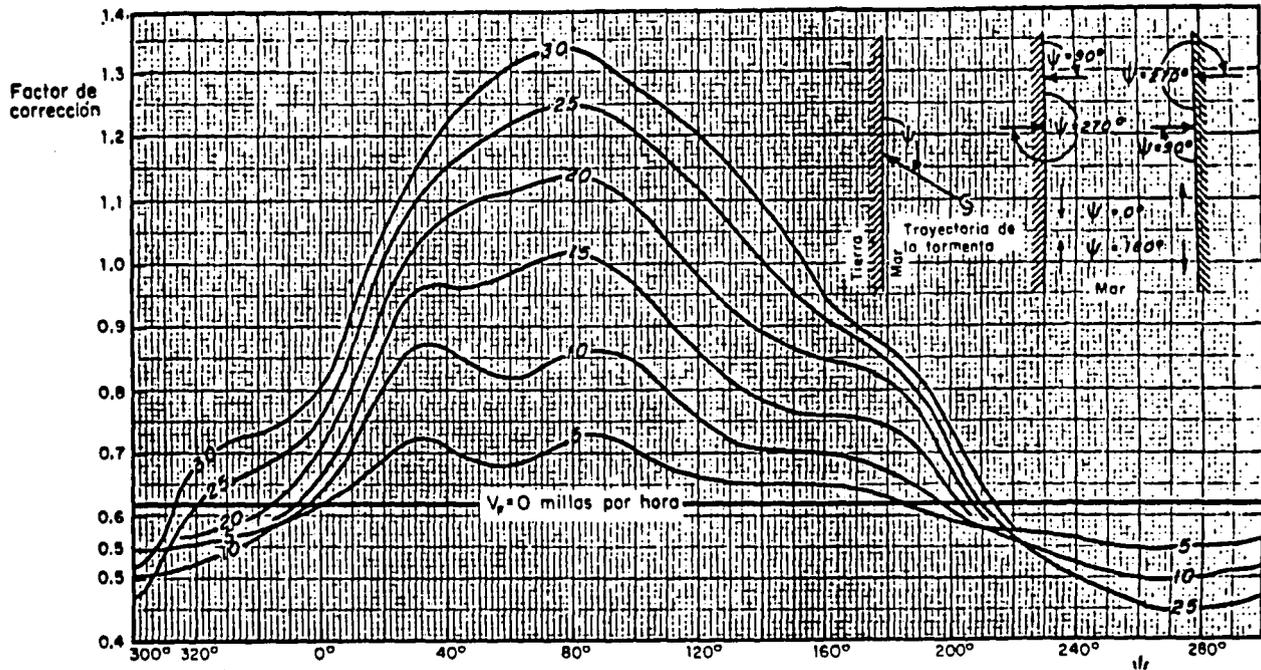


Fig. 2.38 Factor correctivo para el cálculo de ascenso por marea de viento.

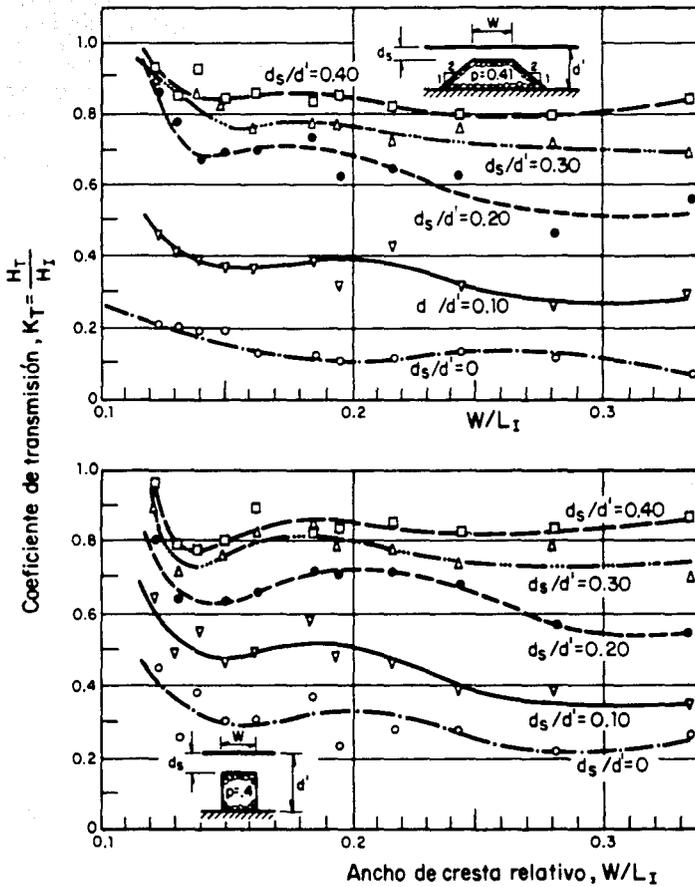
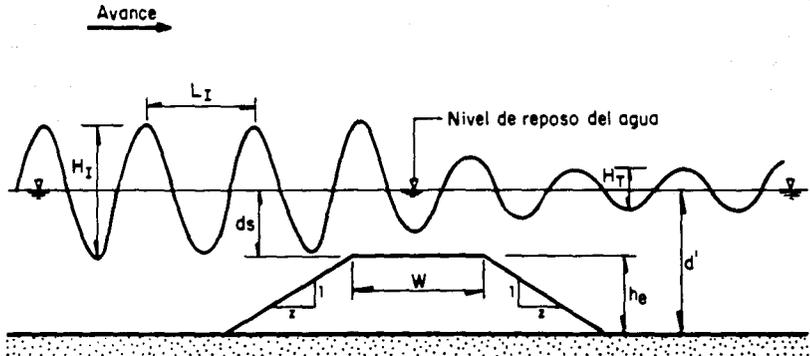


Fig2.39 Coeficiente de transmisión para rompeolas permeables, según Dattari [9]



- ds - Sumersión de la corona de la estructura
- d' - Profundidad de agua
- W - Ancho de la corona de la estructura
- z - Talud de la estructura
- h_e - Altura de la estructura ($h_e = d - ds$)
- H_I - Altura de la ola incidente
- L_I - Longitud de la ola incidente
- H_T - Altura de la ola transmitida
- K_T - Coeficiente de transmisión ($K_T = \frac{H_T}{H_I}$)
- ds/d' - Sumersión relativa del rompeolas

Fig 2.40 Esquema de un rompeolas sumergido [9]

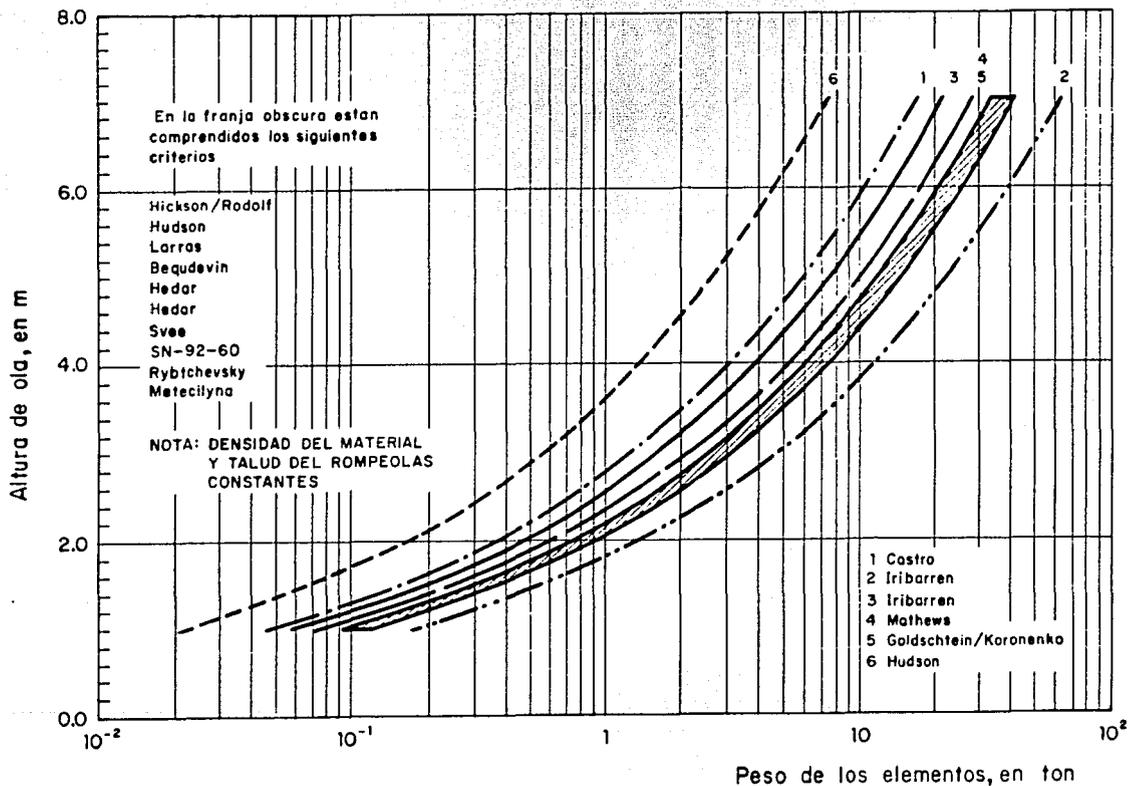
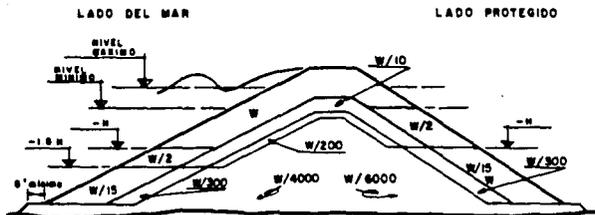
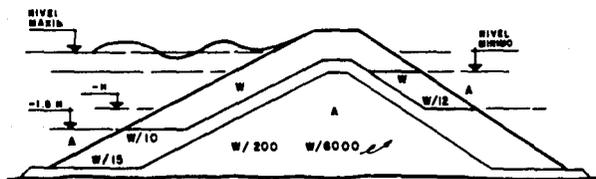


Fig 2.41 Comparación de criterios altura del oleaje–peso del enrocamiento del rompeolas [20]

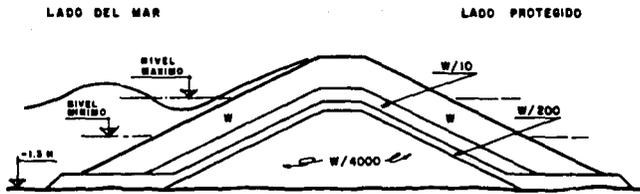


SECCION DE CAPAS MULTIPLES

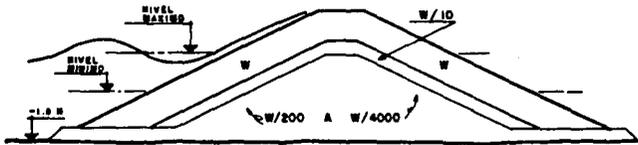


SECCION DE TRES CAPAS

Fig. 2.42 Secciones tipo de rompeolas de enrocamiento para condiciones de oleaje no rompiente. Para rebase de cero a moderado (CERC).

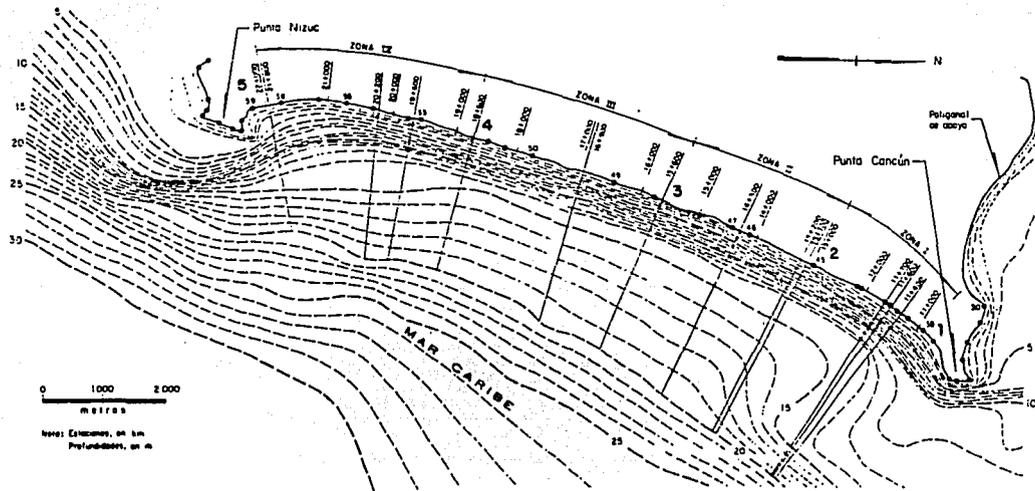


SECCION DE CAPAS MULTIPLES



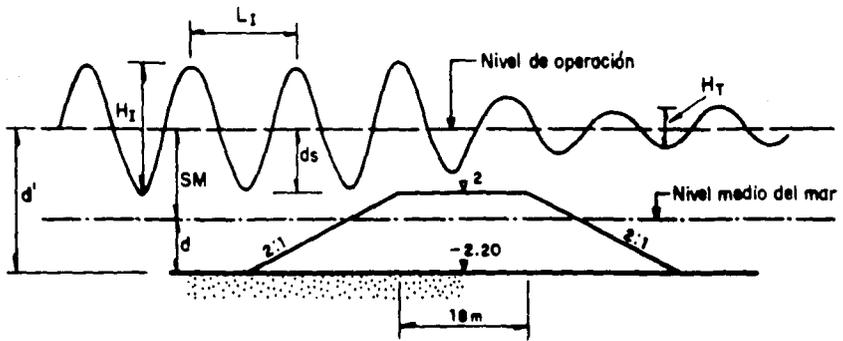
SECCION DE TRES CAPAS

Fig. 2.43 Secciones tipo de rompeolas de enrocamiento para condiciones de oleaje rompiente. Para rebase moderado (CERC).



- | | | |
|---------------------------|--------------------|----------------|
| 1 Condesa Playa Sol | 3 Playa Ballenas | 5 Mediterraneo |
| 2 Bacara Zona Residencial | 4 Fiesta Americana | |

Fig. 3.1 Planta de la playa de Cancún, entre Punta Nizuc y Punta Cancún.



$$d' = d + SM$$

$$d = 2.20 \text{ m}$$

T_r (años)	SM (m)
5	1.45
10	2.07
40	2.23
80	3.60

Fig 3.2 Geometría del rompeolas sumergido

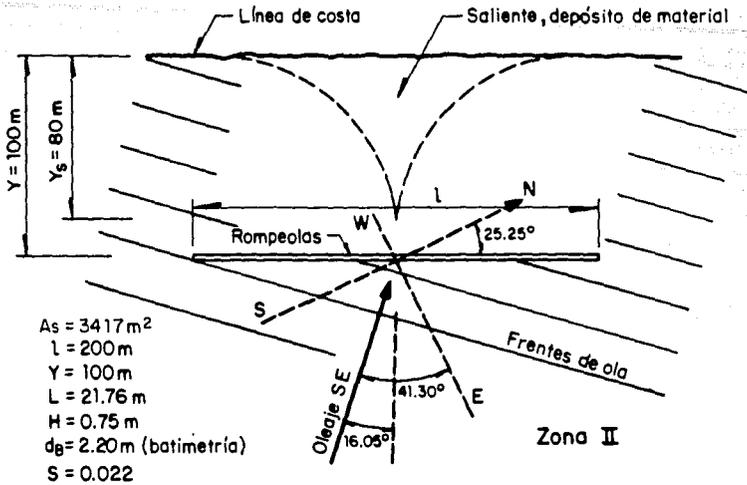


Fig 3.3 Configuración de la saliente , dirección del oleaje SE

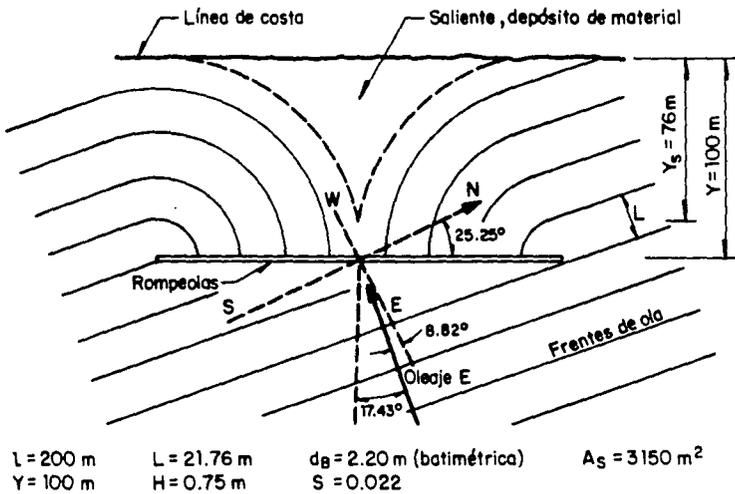
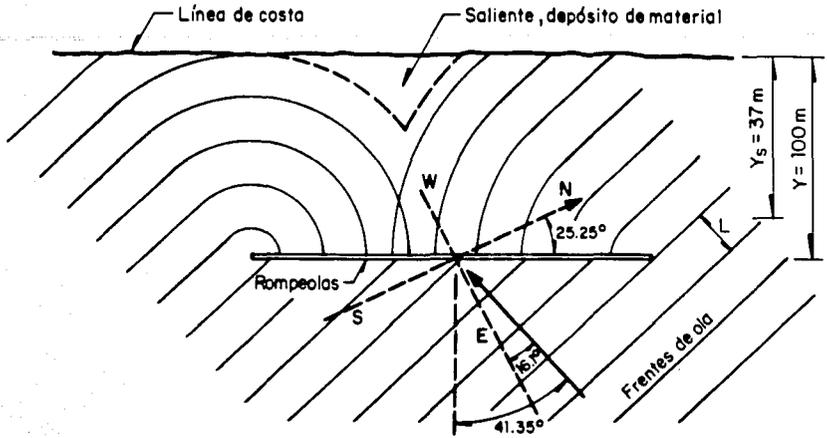
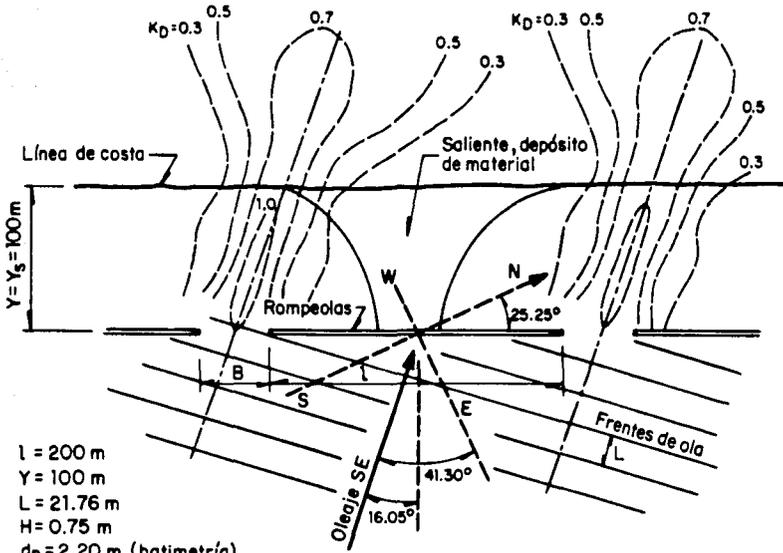


Fig 3.4 Configuración de la saliente , dirección del oleaje E



$l = 200 \text{ m}$ $L = 21.76 \text{ m}$ $d_B = 2.20 \text{ m}$ (batimétrica) $A_S = 1083.22 \text{ m}^2$
 $Y = 100 \text{ m}$ $H = 0.37 \text{ m}$ $S = 0.022$

Fig 3.5 Configuración de la saliente , dirección del oleaje NE



$l = 200 \text{ m}$
 $Y = 100 \text{ m}$
 $L = 21.76 \text{ m}$
 $H = 0.75 \text{ m}$
 $d_B = 2.20 \text{ m}$ (batimétrica)
 $S = 0.022$

Diagrama de difracción $B'/L = 2.2$

Fig 3.6 Configuración de la saliente , dirección del oleaje SE

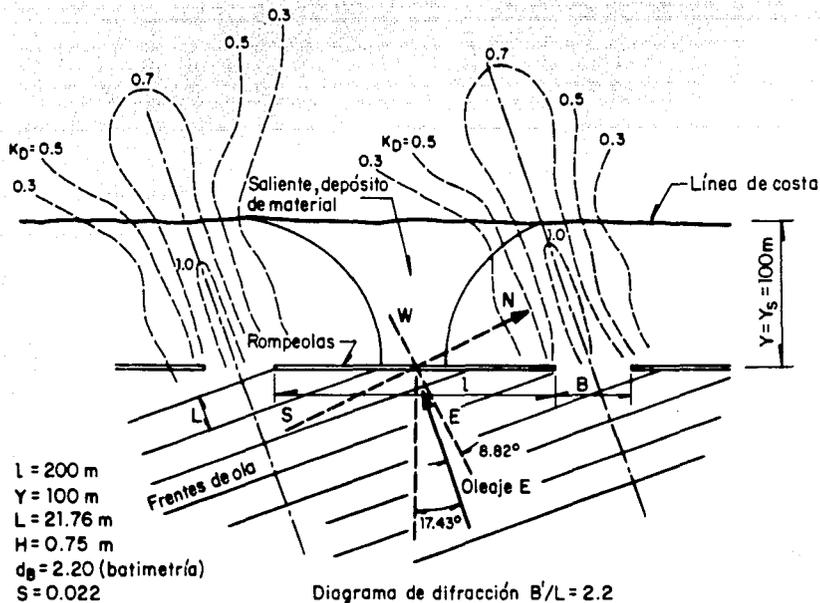
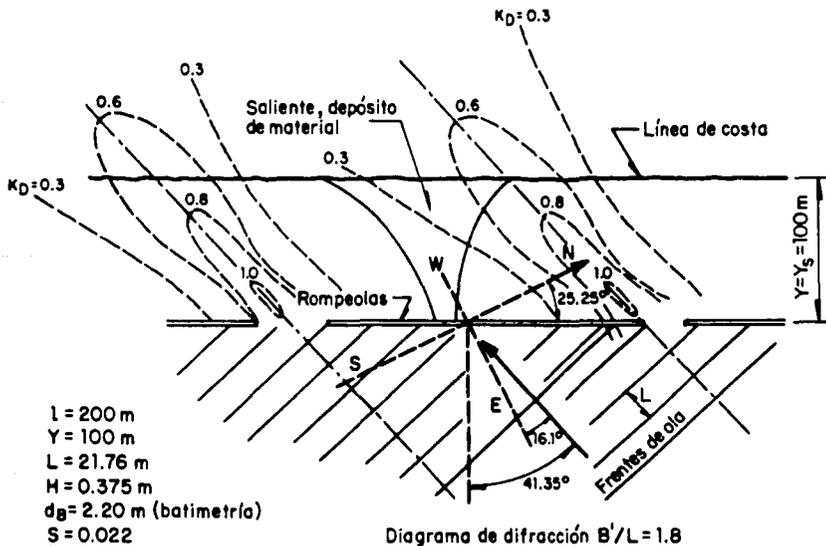
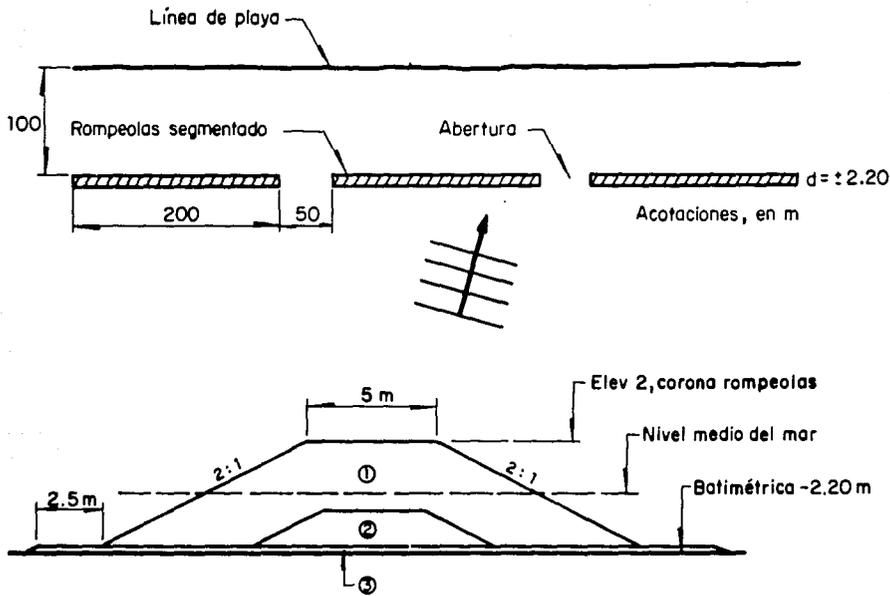


Fig 3.7 Configuración de la saliente, dirección del oleaje E





- ① Coraza, formada con tetrápodos de 5 ton, cada elemento, colocados en dos capas al azar, espesor 2.63 m
- ② Capa secundaria (filtro, formado por roca de 0.5 ton cada elemento, espesor 1.27 m
- ③ Plantilla, formada con roca de 25 kg, espesor mínimo 0.30 m

Fig 4.1 Disposición geométrica de los rompeolas emergidos, alternativa preservación de la playa