

13  
2y



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ACATLAN"

EVOLUCION PLAYERA EN LAS COSTAS  
DE YUCALTEPEN, PROGRESO Y  
CHUBURNA YUCATAN

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
REYES LOPEZ VIVEROS

Asesor de Tests: Ing. Raúl Antonio Correa Arenas

MEXICO, D. F.

TESIS CON  
FALSA FE CRDEN

1891



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.

## P R E F A C I O

El presente estudio, tiene por objeto el realizar un análisis de las condiciones costeras que existían en el frente marítimo comprendido entre el Puerto de Progreso y la localidad de Chelem en el Estado de Yucatán; así como el desarrollar una solución posible a los procesos erosivos tan marcados, que en la zona se presentan. Esta tesis, considera las condiciones que existían en este frente playero hasta antes del Huracán Gilberto, el cual, como es sabido, tuvo lugar dentro del mes de septiembre de 1988.

A falta de estudios y levantamientos posteriores al Huracán Gilberto, no fue posible analizar las condiciones que prevalecen actualmente, las cuales son completamente diferentes a las que existían hasta antes del fenómeno natural mencionado.

En este trabajo se estudian, analizan y proponen las alternativas y soluciones para el problema que existía en todo el tramo costero mencionado y cabe poner en claro que este trabajo servirá como base de apoyo para hacer análisis comparativos con estudios posteriores y poder así, establecer las condiciones prevalecientes a la fecha, del tramo costero en estudio con un panorama mucho más amplio.

Aunque es cierto que el estudio no pudo ser actualizado hasta la fecha por las razones mencionadas, no sucedió así con el marco teórico del mismo; el cual está actualizado y enriquecido con material completamente nuevo que data hasta finales de 1989 y fue traído de diferentes partes del mundo.

## C O N T E N I D O

PAG.

### INTRODUCCION

### CAPITULO I

EL OLEAJE	7
1.1.) Definición del Oleaje y sus partes.	8
1.2.) Clasificación del Oleaje.	10
1.2.1.) Conforme a su período y la causa de su generación.	11
1.2.2.) Conforme a la altura de onda.	15
1.2.3.) Conforme al desplazamiento de la cresta.	15
1.2.4.) Conforme a la profundidad relativa.	16
1.2.5.) Conforme al desplazamiento de las partículas.	16
1.2.6.) Conforme al tiempo de aplicación de la fuerza o acción perturbadora.	18
1.2.7.) Otras clasificaciones.	18
1.3.) Generación de Oleaje.	19
1.4.) Métodos de Registro, Medición y Predicción del Oleaje.	24
1.4.1.) Tres Grandes Grupos de Métodos de Registro y Medición del Oleaje.	24
1.4.1.1.) Métodos de observación Directa.	25
1.4.1.2.) Método de Observación Indirecta.	26

1.4.1.3.) Registros Estadísticos	27
1.4.1.4.) Método de Extrapolación de Oleaje.	31
1.4.2) Métodos de Predicción de Oleaje.	32
1.5.) Fenómenos de Oleaje.	37
1.5.1.) Refracción del Oleaje.	37
1.5.2.) Reflexión del Oleaje.	39
1.5.3.) Difracción del Oleaje.	39

## CAPITULO II

EL TRANSPORTE LITORAL.	41
II.1.) El Transporte Litoral como un Concepto.	42
II.2.) Zona de Influencia del Transporte Litoral.	43
II.3.) Principales Factores que Intervienen en la Formación y Configuración de una Playa.	45
II.3.1.) La Geomorfología.	46
II.3.2.) El Tipo de Material.	47
II.3.3.) La Cantidad del Material.	48
II.4.) Cuantificación del Transporte Litoral.	49
II.4.1.) Métodos Prácticos o de Campo.	50
II.4.2.) Métodos Teóricos o Empíricos.	54
II.5.) Efectos del Transporte Litoral (en el per- fil de una Playa).	60
II.6.) Formaciones Litorales.	65
II.7.) Problemática Provocada en la zona de Influen- cia Portuaria por el Transporte Litoral.	69

## CAPITULO III

OBRAS DE PROTECCION PLAYERA.	73
III.1.) Clasificación de las Obras de Protección.	74
III.1.1.) Por su Sección Geométrica.	74
III.1.2.) Por el Tipo de su Estructura.	76

III.1.3.)	Por el Tipo de Material de su Construcción.	77
III.1.4.)	Clasificación de las Obras de Protección de Acuerdo a la Función que Desempeñan.	86
III.1.5.)	Clasificación de las Obras de Protección de Acuerdo a su Disposición.	89
III.1.6.)	Clasificación de las Obras de Protección de Acuerdo a la Forma de Disipar la Energía del Oleaje.	89
III.2.)	Factores que Intervienen en el Diseño y Construcción de las Obras de Protección Playera.	94
III.2.1.)	Factores que Intervienen en el Diseño de Muros Verticales.	97
III.2.2.)	Factores que Intervienen en el Diseño de Rompeolas y Escolleras a Talúd.	102
III.2.3.)	Factores que Intervienen en el Diseño de Espigones a Talúd.	107
III.2.4.)	Factores que intervienen en la Construcción de las Obras de Protección a Talúd.	109

#### CAPITULO IV

	PROBLEMATICA DE LA EROSION PLAYERA EN PROGRESO, YUKAL PETEN, CHELEM Y CHUBURNA YUCATAN.	113
IV.1.)	Características Generales de la Zona de Estudio.	114
IV.1.1.)	De la Topohidrografía.	114
IV.1.2.)	Del Viento y los Ciclones.	119
IV.1.3.)	De las Corrientes Litorales y del Oleaje.	122
IV.1.4.)	Del Transporte Litoral.	124

IV.1.4.1.) Muestreo de Material Playero	124
IV.1.4.2.) Verificación del Trans porte Litoral.	129
IV.1.4.3.) Estudio de Perfiles Playeros.	135
IV.1.4.4.) Pronóstico de Areas de Acumulación o Zonas de Erosión.	138
IV.2.) Alternativas de Solución.	140
IV.3.) Evaluación y Selección.	142
IV.3.1.) Evaluación	142
IV.3.2.) Selección	142

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### BIBLIOGRAFIA

#### ANEXOS

## I N T R O D U C C I O N

Este tema se encuentra justificado debido a la petición de -- los pobladores situados en la costa del lugar donde se construye -- el nuevo puerto de altura de Progreso, de explicar técnicamente -- los probables efectos que se originarán en la playa y si estos -- efectos no provocarán una reducción de la berma, así como explicar la problemática que se espera por la construcción de esta obra.

Para esto, la Dirección General de Obras Marítimas de la S.C.T. realizó los estudios necesarios para el caso, tanto en el lugar como en estudios realizados en el Laboratorio de Hidráulica Marítima mediante los cuales se trata de definir los posibles cambios de la estabilidad de la playa y de la variación de los diferentes fenómenos que en esto intervienen.

En este tratado se enuncia primeramente los diferentes conceptos de estudios que involucra la estabilidad playera; desde el oleaje, el transporte litoral, el diseño de las obras de protección portuaria, así como sus métodos de estudio. Consecuentemente se da a conocer con base a los estudios realizados, las condiciones existentes y los probables cambios que se esperan por la realización de la nueva obra.

En la última parte se da a conocer las diferentes alternativas de solución para el caso y la selección en base a lo anteriormente estudiado de la solución más adecuada.

## CAPITULO I

### EL OLEAJE

El estudio de los movimientos en el mar se inicia a finales - del Siglo XVIII y principios del XIX cuando una serie de notabilísimos investigadores sustentan varias teorías acerca de la forma y relación de las características del oleaje.

Los principales iniciadores son Laplace (1779) que publicó -- una teoría muy semejante a la hoy admitida, pero poco conocida de los especialistas y Newton que formó su propia teoría, aunque presenta la dificultad de ser aplicable únicamente en casos muy particulares.

A pesar de sus brillantes antecesores, se considera como iniciador a Franz Von Gerstner (1802), que es el primero en dar un estudio teórico bastante cercano a la realidad, pues consideró en sus estudios una masa líquida de profundidad infinita, que no es sino un caso particular de las ecuaciones generales para una profundidad cualquiera.

En épocas posteriores se inician y aparecen muchos y variados estudios al respecto: Krummel (1911); Cornich (1912-1934); Patton y Marmel (1932); Defant (1929); Lamb (1932) y en particular Thola de, que en 1931 da una revisión a los estudios teóricos de las - - olas y ha compilado literatura que cubre de 1687 hasta 1930.

La comprensión de las olas oceánicas, cómo se forman y cómo - viajan hasta el momento es incompleta, debido a que en primer lugar; las observaciones de las olas en el mar presentan grandes dificultades para determinar sus características. En segundo lugar, a que las teorías de que se hace uso están basadas en la hidrodinámica

mica clásica que las supone en un fluido ideal.

Hay diferentes tipos de olas, existiendo algunas simultáneamente, diferenciándose unas de otras por su origen.

El problema científico consiste en estudiar el origen de todo espectro del oleaje y como meta final; tal espectro predecirlo. - Conociendo su energía, el problema del ingeniero se reduce a evaluar sus efectos sobre las estructuras portuarias, acarreos litorales, erosión o depósito de material, etcétera.

Es necesario realizar un análisis del oleaje para obtener su amplitud, longitud, dirección, período, probabilidad de ocurrencia, etcétera, y así definir los programas de trabajo según las condiciones marinas bajo las cuales pueden trabajar los diferentes tipos de equipo o estructuras.

### 1.1.) DEFINICION DEL OLAJE Y SUS PARTES.

**Ola:** Se define a la ola como una ondulación de la superficie libre de un líquido. En este caso del agua del mar.

**Oleaje:** Tomando como base que una ola es también una ondulación, se puede definir al oleaje como la formación de ondas sobre la superficie libre del agua del mar provocada por diferentes factores importantes como son: los cuerpos celestes (sol y lunar) y principalmente el viento. Las ondas se producen en la interfaz entre dos fluidos, debido al movimiento de uno de ellos, por ello en la superficie del mar, la acción del viento produce el oleaje, a este tipo de ondas es al que se tratará principalmente en este estudio. Las partes que conforman una ola se ven gráficamente en la figura 1.1.

**Cresta de la Onda:** Punto donde el perfil de la onda tiene la mayor altura. También se entiende como la zona del perfil arriba del nivel medio de la onda.

**Valle de la Onda:** Punto donde el perfil de la onda tiene el nivel más bajo. También se entiende como la zona del perfil bajo el nivel medio de la onda.

**Altura de la Onda (H):** Distancia vertical medida entre la -- cresta y el valle de la onda.

**Altura del Perfil ( $\eta$ ):** Desnivel entre cualquier punto de la superficie de la onda y el nivel de reposo.

**Amplitud de la Onda (A):** Se toma como la distancia entre la cresta y el nivel medio de la onda.

**Longitud de la Onda (L):** Distancia horizontal entre dos crestas o valles consecutivos.

**Período de la Onda (T):** Tiempo que transcurre para que pasen dos crestas o valles consecutivos por la misma sección.

**Frecuencia de la Onda (f):** Es el recíproco de su período.

**Celeridad o Velocidad de la Onda (c):** Velocidad con la que -- se traslada la onda a través de la superficie del líquido ( $c = \frac{L}{T}$ ).

**Tren de Ondas:** Es un conjunto de ondas cuyo período es constante, no así su altura.

**Propagación:** Es el término utilizado para describir el paso de una onda a través de la superficie del líquido.

**Nivel Medio de la Onda:** Es el nivel que establece que el área de la cresta arriba de él será igual al área del valle bajo ese mismo nivel (en la teoría de Airy "Onda senosoidal, amplitud pequeña" coincide con el nivel de reposo).

**Nivel Estático o de Reposo:** Nivel de la superficie del agua antes de que pase la onda, es decir, es el nivel de la superficie sin ondas. A la distancia entre este nivel y el medio de la onda se designa como  $\Delta y$ .

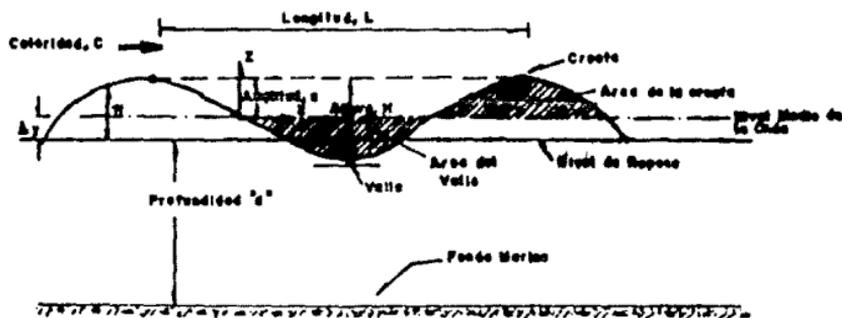


FIG. 1.1. ILUSTRACION DEL PERFIL DE UNA OLA Y LAS PARTES QUE LA CONFORMAN.

## 1.2.) CLASIFICACION DE OLAJE.

Existen diferentes criterios para clasificar al oleaje. A -- continuación se mencionan los de más importancia y también se describen los tipos en que se subdividen cada una de estas clasificaciones.

### 1.2.1.) CONFORME A SU PERIODO Y LA CAUSA DE SU GENERACION.

Es factible clasificar las ondas según el valor de su periodo, ya que pueden, aunque no necesariamente, tener comportamientos diferentes. La clasificación que se acepta y que se mencionará es la Kinsman representada en la tabla 1.1. y Fig. 1.2.

### 1.2.1.1) COFORME A SU PERIODO Y LA CAUSA DE SU GENERACION.

Es factible clasificar las ondas según el valor de su período, ya que pueden, aunque no necesariamente, tener comportamientos diferentes. La clasificación que se acepta y que se mencionará es la Kinsman representada en la tabla 1.1. y Fig. 1.2.

NOMBRE DE LA ONDA	PERIODO	FUERZA MAS IMPORTANTE QUE LA GENERA	FUERZA MAS IMPORTANTE QUE LA AMORTIGUA
Capilar	0 - 0.1 seg.	Viento	Tensión Superficial, Gravedad
De Ultragravedad	0.1 - 1 seg.	Viento	Tensión Superficial
De Gravedad	10 - 30 seg.	Viento	Gravedad
De Infragravedad	30 seg - 5 min.	Viento	Gravedad, Coriolis
De Período Largo Incluidas Ondas de Marea	5 min - 24 hrs.	Viento, Tormenta, Mareas, Atracción del Sol y de la Luna	Coriolis, Gravedad
De Transmarea	> 24 hrs.	Atracción del Sol y de la Luna	Coriolis

TABLA 1.1.1 CLASIFICACION DE LAS ONDAS  
SEGUN KINSMAN 1965.

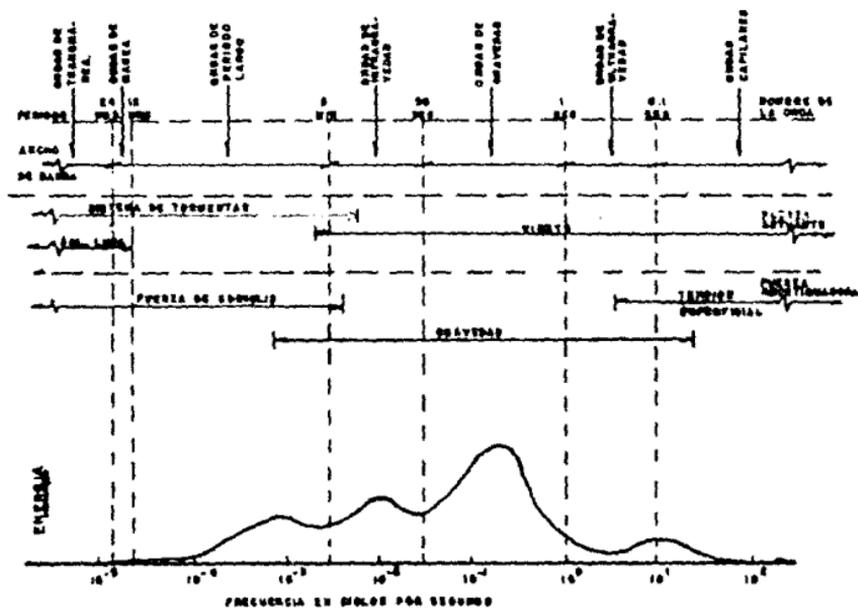


FIG. I.2.) CLASIFICACION DE LAS ONDAS, CONFORME AL PERIODO, QUE PUEDEN GENERARSE SOBRE LA SUPERFICIE DEL MAR, SEGUN KINSMAN (1965).

**Ondas Capilares:** Se presentan en forma de pequeñas ondulaciones sobre la superficie del mar, producidas por vientos cuya velocidad esté comprendida entre 0.25 y 1 m/seg. Su desarrollo está controlado por la tensión superficial y la gravedad. Su periodo es menor de 0.1 segundos y su longitud no excede de 1.75 cm. por lo que el límite superior de su celeridad es 17.3 cm/seg.

**Ondas de Gravedad:** Son ondas controladas por las fuerzas gravitacionales y su longitud de onda es mayor de 1.73 mts.

**Ondas de Ultragravedad:** Son generadas por viento cuya velocidad varía entre 1 y 5 mts./seg. Se observan con frecuencia en pequeños lagos.

**Ondas de Gravedad propiamente dichas:** Son generadas por vientos con velocidades mayores de 6.5 a 7 mts./seg. y son las de mayor interés en hidráulica marítima. Su periodo oscila entre 1 y 30 segundos y son las ondas generalmente observadas en la superficie del mar.

**Ondas de Infragravedad:** Son ondas de gravedad, con periodo entre 30 segundos y 5 minutos, que causan oscilaciones notorias en la superficie del mar y se producen en grandes tormentas y huracanes.

**Ondas de Período Largo:** Es aquella en la cual su longitud es mucho mayor que la profundidad; es decir, se cumple que  $(d/L) \ll 1$ . Cuando ello ocurre, la curvatura de la superficie libre es muy pequeña y nunca se aprecia a simple vista, y por tanto las aceleraciones verticales de las partículas se pueden despreciar. Además las componentes verticales del movimiento no afectan la distribución de presión, la cual a cualquier punto, es igual a la hidrostática.

En la naturaleza se pueden distinguir dos tipos comunes de ondas de período largo. El primero es generado por deslizamientos de tierra submarinos, debidos a movimientos terrestres, y reciben el nombre de Tsunamis; aunque en aguas profundas pueden tener una altura pequeña, al acercarse a la costa y disminuir la celeridad primero en el frente de la onda, se llega a formar una ola, con una altura de  $v$  a  $m$  i o s metros. El segundo tipo común de onda de período largo son las mareas con períodos aproximados de 12 y 24 horas y que son generadas principalmente por la atracción del sol y de la luna.

**Ondas de Transmarea:** También las generan las atracciones del sol y de la luna sobre la masa de agua de los océanos y sus períodos son mayores de 24 horas por su comportamiento, son ondas también de período largo.

#### 1.2.2.) CONFORME A LA ALTURA DE ONDA.

Según su altura, las ondas se pueden clasificar en ondas de amplitud pequeña y amplitud finita. Las ondas de amplitud pequeña se caracterizan porque su altura es pequeña en comparación a su longitud. Dichas ondas se estudian en la teoría del mismo nombre (también se les denomina teoría lineal). La que considera despreciables los desplazamientos que sufre la superficie libre (frontera superior). Por lo contrario, la teoría para las ondas de amplitud finita, no desprecia dichos desplazamientos y, por tanto, permite calcular algunas propiedades de las ondas con una mayor precisión que la dada por la teoría de las ondas de amplitud pequeña.

#### 1.2.3.) CONFORME AL DESPLAZAMIENTO DE LA CRESTA.

Según el desplazamiento de la cresta, las ondas pueden clasificarse como progresivas y estacionarias. Las primeras son aque-

llas en las cuales la cresta se desplaza horizontalmente y en las otras la cresta tiene un desplazamiento vertical aparente, y nulo horizontalmente.

Una onda estacionaria se produce cuando se superponen dos ondas progresivas idénticas que se desplazan en sentido contrario, - por ejemplo debido a la reflexión pura de onda progresiva.

Entre ambos tipos de onda existe una gama completa de ondas - que se pueden llamar parcialmente estacionarias.

#### 1.2.4.) CONFORME A LA PROFUNDIDAD RELATIVA.

Esta clasificación es una de las más importantes tanto desde el punto de vista teórico como práctico. Según la relación que haya entre la profundidad,  $d$ , y la longitud de la onda,  $L$ , las ondas se pueden dividir en ondas en aguas profundas, intermedias y someras (poco profundas).

Desde el punto de vista teórico e ingenieril para clasificar a las ondas con este criterio se pueden aceptar los siguientes valores Ver la tabla 1.2.

#### 1.2.5.) CONFORME AL DESPLAZAMIENTO DE LAS PARTICULAS.

Si se toma en cuenta el desplazamiento de las partículas producido al paso de las ondas, éstas se pueden subdividir en ondas - de traslación y ondas de oscilación. Las de traslación pura son - aquéllas en las cuales los desplazamientos de las partículas en -- cualquier instante se producen en la dirección del movimiento de - la onda; dichos desplazamientos pueden ser casi iguales en toda la vertical. Las ondas de oscilación pura se caracterizan en que los desplazamientos de las partículas siguen trayectorias cerradas o -

TIPO DE ONDA	VALORES	
	TEORICO	PRÁCTICO O INGENIERIL
DE ONDAS PROFUNDAS	$4/L > 1$	$4/L > 0.5$
DE ONDAS INTERMEDIAS	$1 > 4/L > 0.005$	$0.5 > 4/L > 0.05$
DE ONDAS SUPERFICIALES	$4/L \leq 0.005$	$4/L \leq 0.05$

TABLA 1.2.1 CLASIFICACION DEL OLAJE CONFORME A SU PROFUNDIDAD RELATIVA.

casi cerradas, de tal forma que durante un tiempo su componente horizontal sigue la dirección del movimiento de la onda y en otro -- tiempo igual tiene sentido contrario. Por otra parte la componente horizontal de la velocidad de las partículas disminuye de la su superficie hacia el fondo.

#### 1.2.6.) CONFORME AL TIEMPO DE APLICACION DE LA FUERZA O ACCION PERTURBADORA.

Dependiendo del tiempo en que actúa la fuerza o acción que genera una onda, estas pueden ser ondas libres o forzadas.

Ondas libres, son las que se generan por la aplicación instantánea de una fuerza, la cual cesa inmediatamente de actuar. La onda así generada es libre de desplazarse y su traslación no depende de la fuerza aplicada, sino de la profundidad en que se propaga o del período con que se generó.

Las ondas forzadas son producidas por una fuerza que se aplica continuamente. Estas ondas dependen de la fuerza actuante, con modificaciones impuestas por el líquido y la profundidad.

#### 1.2.7.) OTRAS CLASIFICACIONES

Las ondas, pueden ser de amplitud pequeña o finita como se ha dicho. Al tomar en cuenta el nombre de la teoría con que son estudiadas sus propiedades y características, la onda de amplitud finita se denomina onda trocoidal (estudiada por la teoría Trocoidal o de Gerstner). Onda senoidal y onda solitaria.

Las ondas de gravedad en el mar se pueden dividir en olas en la zona de generación (SEA), que son las que se forman en el lugar donde sopla el viento y éste les trasmite energía, y olas en la

zona de decaimiento (Swell) que son aquellas que han salido de la zona de generación y al trasladarse libremente no reciben energía del viento. Las ondas estacionarias, formadas por oleaje de gravedad, se denominan también Clapotis y las formadas por ondas de período largo, Seiches.

### 1.3.) GENERACION DE OLAJE

Para conocer el posible oleaje que se presenta en una zona se necesita determinar el área de generación y posteriormente, como el viento es el que genera el oleaje, se calculan la velocidad y duración del viento que está actuando en esa área, para hacerlo -- utiliza la información suministrada en cartas o mapas de superficie que indican la ubicación de las isobaras, la velocidad del viento en los puntos y la dirección de los frentes de aire.

En una superficie de agua sobre la cual el viento está soplando y originando olas, conocida como un fetch o área de fetch, el crecimiento de las olas está afectado por lo menos por tres factores:

- La velocidad del viento "U",
- La longitud del tiempo en que el viento ha estado soplando, con duración " $t_d$ ",
- La longitud del fetch "F" en la dirección en que el viento está soplando.

En casos (tales como algunos embalses y bahías) donde el área del fetch es relativamente angosta comparada con su longitud, la generación de las ondas puede ser también afectada por la amplitud del fetch y una longitud efectiva del mismo puede ser calculada -- promediando el efecto de varios segmentos direccionales. En el caso de almacenamiento de aguas en otras áreas en las cuales el viento está soplando desde tierra, será necesario considerar la dife-

rencia de efectos por fricción de tierra y agua, para indicar las velocidades del viento afectadas por estas causas.

Las alturas y períodos promedio del oleaje se incrementan a lo largo del fetch desde su arranque, donde el viento empieza a tener un valor significativo, hasta el frente del mismo, excepto - cuando la altura y el período máximos, para un viento y su duración se han alcanzado.

En zonas de aguas relativamente reducidas además de estos factores la profundidad del agua en la zona de generación de oleaje puede limitar el aumento de la ola.

Gráficamente el crecimiento de la ola es como se muestra en la figura I.3. Considerando que un viento de velocidad constante se origina en cualquier etapa inicial del desarrollo del oleaje, las alturas y períodos de onda cambiarán considerablemente desde el arranque del fetch hasta el frente como se indica en la línea punteada de la parte baja de la figura I.3. Cuando el viento empieza a soplar se desarrollan pequeñas olas a lo largo del fetch y se desplazan en dirección del viento, creciendo conforme a su desplazamiento. No entran olas en la parte posterior del fetch por lo tanto en este punto la altura y el período de ola deben ser cero. En esta etapa el viento ha estado soplando solamente lo suficiente para generar la altura y período máximos dados por la línea punteada horizontal de la figura I.3. Las olas están limitadas con su altura por la dirección del viento. Cualquier longitud del fetch mayor de 0 a  $F_m$  en la figura I.3. no podrá ser acompañada por mayores períodos o alturas de ola. La distancia desde "0" a  $F_m$ , correspondiente a la mínima duración del viento denominada,  $T_m$ , la cual producirá las condiciones de crecimiento del oleaje que se indican en la línea punteada.

Una etapa posterior en el desarrollo del oleaje, está indicada por la línea llena de la figura 1.3. El viento ha estado soplando con suficiente duración para generar las alturas y períodos máximos dados por la intersección de la curva llena con la ordenada que representa el frente del fetch. Después de alcanzada esta etapa, un incremento en la duración del viento no produce un aumento proporcional en altura de ola o período. Las olas empiezan en corno en el arranque del fetch y se incrementan debido a la influencia del viento hasta el frente del mismo, y ahí salen del área de generación. En otras palabras el crecimiento del oleaje está limitado por el fetch disponible. De ahí que la longitud mínima de tiempo en que necesita soplar un viento sobre una longitud determinada de fetch, para producir tal condición de "estado constante", se denomina duración mínima, " $t_m$ ". La longitud de fetch abarcada, en este caso en el total disponible de fetch, se sigue considerando como el fetch mínimo correspondiente a la duración mínima.

Debe observarse particularmente que para la etapa inicial -- mostrada en la figura 1.3., la longitud de fetch  $F$ , es mayor que el fetch mínimo, correspondiente a la duración mínima como se muestra en la figura mencionada.

En la etapa posterior la duración puede ser mayor que la mínima correspondiendo con la total longitud de fetch,  $F$ .

Las distribuciones mostradas en la figura 1.3. son simplificadas; puesto que la distribución de alturas y períodos de onda es generado en un fetch. Estas distribuciones simplificadas se refieren a lo que se conoce como significantes, en término estadístico, el cual es usado para denominar la altura y período promedio que pertenecen al tercio superior de un grupo de olas dado.

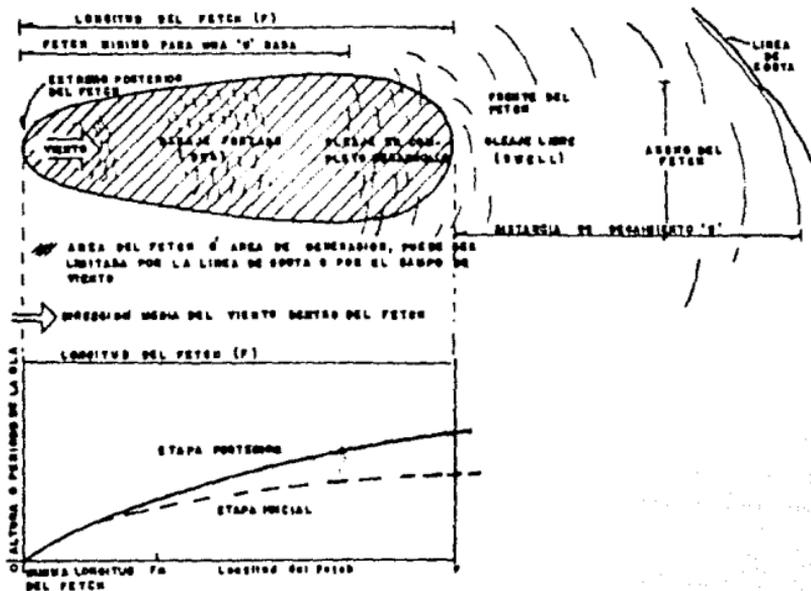


Fig. 1.3.) DESARROLLO DEL OLEAJE DENTRO DE UN FETCH.

Después de salir del fetch, las olas viajan hacia algún punto distante (una costa por ejemplo) con velocidades proporcionales a sus períodos,  $C^2 = \frac{gL}{2\pi} \tan \frac{2\pi\sigma}{L}$ ,  $C_0 = \frac{gT}{2\pi} = 3.12T$ ,  $C^2 = g\lambda$ . En esta "distancia de decaimiento",  $D$ , las olas de mayor período se desplazan más rápidamente y por consecuencia alcanzan su punto de arribo antes que las de períodos cortos. Un observador puede ver que al final de la "distancia de decaimiento", el período significativo del oleaje,  $T_0$ , es mayor que el período significativo  $T_p$  en el frente del fetch. Por lo tanto, el período significativo de las olas, parece incrementarse después de que ésta ha salido del fetch.

Las alturas de las olas realmente disminuyen después de que han salido de la influencia de un fetch, y al final de la distancia ( $T$  está en segundos y  $C_0$  en pies/segundo) de decaimiento, la altura de la ola significativa observada,  $H_0$ , será menor que la altura de ola significativa en el frente del fetch,  $H_f$ .

El tiempo requerido por un grupo de olas para viajar a través de la distancia de decaimiento se obtiene aproximadamente dividiendo la distancia de decaimiento entre la velocidad de las olas en aguas profundas con un período  $T_0$ , y se conoce como "tiempo de recorrido",  $t_D$ , donde  $t_D = \frac{D}{C_0} = \frac{D}{3T_0/4\pi}$ .

La mayoría de las zonas costeras en los Estados Unidos están situadas de tal manera que gran parte del oleaje que llega a ellas ha sido generado en aguas profundas, ésto es en aguas con tal profundidad que el oleaje no sufre en su generación el efecto del fondo. En muchas de estas zonas, sobre todo en las Costas del Pacífico, Atlántico Sur y los grandes lagos, las características del oleaje pueden ser determinadas analizando inicialmente los datos meteorológicos para encontrar características en aguas profundas.

Después, mediante el análisis de refracción (ver sección 1.5.1,

se expondrán las modificaciones que sufren las características del oleaje conforme la onda se desplaza desde la zona de aguas reducidas hasta llegar a la línea de playa. En otras zonas en particular a lo largo de las costas del Atlántico Norte, debido a la complejidad de la batimetría, los fenómenos debidos a la refracción son frecuentemente difíciles de cuantificar y por lo tanto, la modificación que sufre el oleaje en su recorrido de aguas profundas a aguas reducidas hasta alcanzar la línea de playa es muy laborioso, y los resultados son poco confiables.

A lo largo de la costa y en muchos lagos interiores, la generación del oleaje debida al viento es afectada sensiblemente por la reducida profundidad. Además de la forma así como la extensión de las zonas de aguas de transición y reducidas complica el análisis normal de refracción introduciendo un factor de fricción de fondo.

#### I.4.) METODOS DE REGISTRO, MEDICION Y PREDICCIÓN DEL OLEAJE.

I.4.1.) Cuatro Grandes Grupos de Métodos de Registro y Medición del Oleaje.

Métodos de Registro  
y Medición de Oleaje

De observación  
Directa

Método Sumergido.  
Método Superficial.  
Método Aéreo.  
Método de la Baliza.  
Método de Medidores  
de resistencia calibrado.

Métodos de Observación Indirecta

Registros Estadísticos { Ocean wave Statistics  
Sea and Swell Charts

Método de Extrapolación de Oleaje.

#### 1.4.1.1.) METODOS DE OBSERVACION DIRECTA.

Estos métodos se clasifican de acuerdo con el tipo de instrumentación que se utilice:

a) **Método Sumergido:** Este método como su nombre lo indica - mediante un sensor que se coloca bajo el agua que descansa en el - fondo a una elevación conocida y emite señales de ultrasonido que suben a la superficie y se reflejan únicamente hacia el fondo donde son captados por el sensor. En esta forma se conoce el tirante de agua sobre el sensor. Con estos registros este método permite posteriormente encontrar el espectro del oleaje y obtener sus - frecuencias o períodos de alturas representativas del oleaje.

b) **Método Superficial:** Este método consiste en medir el - tiempo que tarda en cambiar la elevación de la superficie del agua en cualquier punto con instrumentos colocados en estructuras marítimas. En el punto de interés se instala una baliza o una regla - graduada siguiendo en ella la variación de la elevación de la superficie, mediante un tránsito, o filmando con ayuda de una cámara situada en tierra firme.

c) **Método Aéreo:** Este método también llamado estereofotográfico aplica la fotografía a la observación de las olas. Un par - de fotografías de la superficie del mar tomado por dos cámaras permite conocer el contorno del oleaje y con ello obtener la distribución de las alturas y longitudes de las olas. Este método es muy útil para conocer la dirección del oleaje, observar dos o tres - oleajes superpuestos provenientes de diferentes direcciones y para visualizar la refracción y difracción que sufre el oleaje al desplazarse hacia tierra.

d) **Método de la Baliza:** Es el método más simple de observa-

ción visual. Se erige en el punto de interés una pila o un tubo de fierro o acero, y se coloca una varilla marcada a intervalos de 1 centímetro a 5 centímetros. La elevación de la superficie del agua a lo largo de la varilla se sigue con un tránsito. Para apreciar las olas por medio de la baliza, el observador del tránsito y la persona que anota deben leer y registrar continuamente durante 10 minutos las sucesivas crestas y depresiones.

Cuando no es posible dictar las sucesivas elevaciones y anotar el tiempo en que ocurren, a partir de una observación visual se aprecian las elevaciones promedio altas y bajas. La diferencia entre ellas es aproximadamente igual a la altura significativa  $H_{1/3}$  del tren de ondas observadas.

e) **Método de medidores de resistencia calibrada:** Este método se diseñó para grabar automáticamente el movimiento de la superficie del agua a lo largo de la baliza. La lectura de los resultados dibujados de las alturas y los períodos del oleaje se hace de igual forma que el método de la baliza. Solo que en este caso, el perfil del oleaje es gravado de una manera más completa, ya que también las olas pequeñas y las irregulares se pueden leer correctamente.

#### 1.4.1.2.) METODO DE OBSERVACION INDIRECTA.

En ocasiones no es posible efectuar la medición del oleaje -- por métodos de observación directa, ya que no siempre se cuenta -- con una estructura donde apoyar los instrumentos de medición, en tales situaciones se recurre a métodos de observación indirecta, -- por ejemplo sensores de presión, que permiten registrar las fluctuaciones de presión debajo del agua, causadas por el oleaje. Las fluctuaciones de presión como función de la altura y período del oleaje y de la profundidad del agua, permiten obtener las caracte-

rísticas del oleaje, al conocer la relación entre las presiones -- producidas por el oleaje a cualquier profundidad.

#### 1.4.1.3.) REGISTROS ESTADISTICOS.

La manera más confiable que existe para conocer las caracte-- rísticas del oleaje para un sitio determinado, sería realizar medi-- ciones directas durante un lapso que se recomienda no sea menor de 1 año, para lo cual en la actualidad existen diferentes aparatos -- que permiten llevarlo a cabo. De esta forma podrían conocerse to-- das las variables que definirían al oleaje en el sitio en cuestión. Sin embargo, la medición directa casi nunca es posible, realizarla, bien sea por motivos de orden económico o por la necesidad de con-- tar con datos rápidamente, por lo que es común hacer uso de fuen-- tos de información que definen las variables de oleaje en cuanto a período y altura. De las cuales se definen las dos fuentes más im-- portantes a continuación.

a) **Ocean Wave Statics:** Esta fuente de información fue edi-- tada 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 varios voluntarios que nave-- garon en las rutas establecidas en todo el mundo durante los años de 1953 a 1961.

Los datos obtenidos por los observadores son: dirección, pe-- ríodo y altura de ola, no haciéndose ningún tipo de distinción en-- tre el oleaje local (SEA) y el distante (SWELL). De acuerdo a la -- castación de datos que realizaron, la información se presenta agru-- pada en diferentes zonas.

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

- Régimen (anual; invierno, primavera, verano, otoño)
- Dirección (azimut con variaciones de  $10^\circ$  y datos agrupados en sectores de  $30^\circ$ ).
- Períodos (se presentan en función de una codificación y el tiempo del período en segundos). Los períodos reportados corresponden al promedio de los observados en olas bien turnadas.
- Altura (de acuerdo a un código y el tiempo en horas).

Se presentan tablas y matrices que relacionan período-oleaje dirección por régimen, pudiéndose transformar en matrices frecuenciales de esas mismas variables o deducir los tiempos de acción de ellas.

b) **Sea and Swell:** 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., mismas que fueron procesadas por el Departamento de Estudios y Laboratorios, Dirección General de Obras Marítimas, Secretaría - de Comunicaciones y Transportes.

Los datos presentados por esta fuente, obedecen a observaciones visuales del estado del mar, realizadas desde embarcaciones durante un período de 10 años. Para su presentación del oleaje se agrupa en dos tipos:

**Oleaje Local (Sea).** - Olas generadas por vientos locales, mismas que son generalmente de períodos cortos, superficie irregular, rápidamente cambiante que se desplaza en la misma dirección que el viento genera.

**Oleaje Distante (Swell);** Olas que han avanzado más allá de la influencia de los vientos generadores. Son más largas en período, 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 son para el Pacífico y 6 para el Golfo de México y Mar Caribe.

Una rosa de oleaje es una representación gráfica de la frecuencia mensual resultante de la acumulación de datos durante el periodo de observación. Ver la figura 1.4.

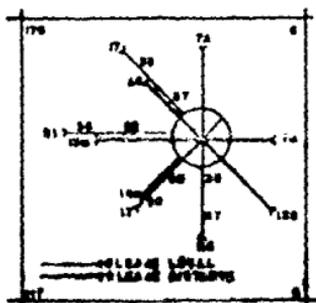


Figura 1.4.1 REPRESENTACIÓN GRÁFICA MENSUAL DEL SEA AND SWELL

Tanto el oleaje local como el distante, se dividen en tres rangos de alturas de olas, las cuales aparecen en la Tabla 1.3.

TIPO DE OLAJE	RANGO (m)		
	BAJO	MEDIO	ALTO
LOCAL	0.30 - 0.90	0.90 - 1.40	1.40 - 1.90
DISTANTE	0.30 - 1.00	1.00 - 2.00	2.00 - 3.00

Tabla 1.3.1 RANGOS DE ALTURA LOCAL Y DISTANTE Nota. En ambos tipos de oleaje se considera altas las alturas menores de 0.30 m.

Los datos expresados en las rosas del oleaje (Fig. I.4) son - los siguientes:

a) El número total de observaciones del oleaje local para todos los rangos y direcciones, aparece en la parte superior izquierda (178); el porcentaje de calmas con respecto al total de observaciones aparece en la parte superior derecha (8).

b) El número total de observaciones del oleaje distante para todos los rangos y direcciones, aparece en la parte inferior izquierda (117); el porcentaje de calmas con respecto al total de observaciones aparece en la parte inferior derecha (8).

c) El oleaje local se representa por las líneas más delgadas sobre las cuales se anotan los porcentajes de observación de cada rango de altura de ola en la dirección respectiva, en relación al porcentaje total de la dirección que aparece en el extremo de la línea. Los porcentajes de los rangos se dan de bajo a medio en el sentido del centro de la rosa hacia el exterior, siendo el porcentaje del rango alto el complemento al 100% de la sumatoria de los otros dos.

d) En forma semejante aparecen los porcentajes por dirección y rango para el oleaje distante, pero las líneas correspondientes a este tipo dentro de la rosa son las más gruesas.

e) Cuando el porcentaje total de observaciones por dirección es inferior al 15% pero mayor que el 5%, éste se indica para un solo rango, acompañándose por la letra B, M o A, significando respectivamente la presencia exclusiva de oleaje bajo, medio o alto. Los porcentajes totales por dirección iguales o inferiores a 5% no son anotados en la rosa de oleaje.

Dado que como se mencionó, los datos se presentan mensualmente, para obtener la altura de ola significativa para un trimestre o estación, se hará el promedio pesado de los tres meses considerados, tomando sus tiempos de acción como peso para cada uno de ellos. Lo mismo puede hacerse si se desea obtener la ola significativa anual. Esta ola significativa será tratada más adelante.

#### 1.4.1.4.) METODO DE EXTRAPOLACION DE OLEAJE.

Para el estudio de ciertas estructuras de los puertos sujetas a la acción del oleaje, muchas veces es necesario conocer las alturas de la ola en relación a un período de retorno determinado.

Para ello es necesario extrapolar los datos estadísticos con que se cuenta y asociarlos con una función de probabilidad. Uno de los métodos conocidos por tal efecto es el de M. Larras, cuya expresión es:

$$H_n = A \log P$$

en donde:

$H_n$  = Es la altura de ola esperada (m), para un período de retorno de "n" años.

A = Es una constante (pendiente de la recta de regresión)

P = Es la probabilidad de ocurrencia (%), -- igual  $1/N^a$  de años, expresado en días.

Para la aplicación del método, es necesario graficar en papel semilogarítmico los valores de las frecuencias acumuladas de las alturas de ola, y obtener la recta de regresión correspondiente y por extrapolación logarítmica se encuentran las alturas de ola para diferentes probabilidades.

#### 1.4.2.) METODOS DE PREDICCIÓN DE OLEAJE.

Los métodos de predicción permiten obtener la altura y período del oleaje a partir de las características del viento que lo genera. Además el oleaje puede pasar por dos zonas; una llamada zona de **generación**, la cual está acotada por el fetch, y la otra denominada de **decaimiento**, que está limitada entre la terminación -- del fetch y el límite de aguas profundas, frente al sitio en estudio. A continuación se mencionan los métodos que se recomiendan -- utilizar para calcular las características del oleaje en dichas zonas.

Los métodos de predicción se pueden clasificar en tres grupos que son:

a) **De fórmulas empíricas.** -- que relacionan directamente la altura y período del oleaje con la velocidad del viento y/o la longitud del fetch; estos métodos son poco confiables.

b) **Métodos de ola significativa.** -- este método relaciona la altura de la ola significativa ( $H_{1/3}$ ) y el período significativo -- ( $T_{1/3}$ ) con la velocidad y duración del viento y la longitud del fetch. Un ejemplo de estos métodos es el propuesto por Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB). Se aplica a la condición de aguas profundas.

c) **Método de espectro de energía.** -- este método predice las características del oleaje utilizando la teoría del espectro. Un ejemplo de este método es el propuesto por Pierson-Newman-James -- (PNJ).

Este método utiliza el concepto de espectro que se define -- como una relación de la distribución de la energía de las ondas -- con respecto a sus frecuencias. El área bajo la curva del espec--

tro es función de la energía desarrollada por el oleaje, y como ésta se puede expresar en función de la altura del oleaje al cuadrado, se llega a relacionar la altura del oleaje con la  $\sqrt{E}$ . A partir del espectro se calcula el espectro coacumulativo del oleaje, que es la gráfica que se obtiene al dibujar la  $E_i$  parciales -- contra la frecuencia, la cual permite relacionar para una frecuencia conocida la altura de ola. Pierson, Newman y James obtuvieron un espectro y su espectro coacumulativo del oleaje generado por -- vientos con velocidad constante  $V$ , tomando en cuenta además el -- fetch en que ese viento actuaría y su dirección.

De los métodos anteriormente mencionados se describirá por -- completo el método de Ola Significante de Sverdrup-Munk-Bretsch -- neider (SMB), ya que este método es el más utilizado en problemas de ingeniería, y el de más confiabilidad en sus resultados.

Estos autores elaboraron una teoría que sirve para predecir -- el oleaje en aguas profundas y suponen que el viento sopla con una velocidad constante. Los autores consideran que los principales -- parámetros para la generación de olas en esta zona son: velocidad del viento formativo ( $V$ ) y su duración ( $t$ ), Fetch ( $F$ ), y aceleración de la gravedad ( $g$ ) con este método se obtiene una altura --  $H_{1/3}$  y período  $T_{1/3}$  llamados significantes que representan al oleaje real.

Estas características son las que únicamente se toman en cuenta, ya que en aguas profundas, la longitud y la celeridad de la onda dependen del período ( $L_0 = 1.56 T^2$  y  $C_0 = 1.56 T$ ).

De lo anterior se puede escribir

$$\begin{aligned} (H_{1/3})_G &= f_1 (V, F, t, g) \dots\dots\dots 1 \\ (T_{1/3})_G &= f_2 (V, F, t, g) \dots\dots\dots 2 \end{aligned}$$

donde el subíndice G indica que las características del oleaje son para la zona de generación.

Si a las ecuaciones 1 y 2 se les aplica un análisis dimensional se llega a:

$$\frac{g (H_{1/3})_G}{U^2} = f'_1 \left( \frac{g F}{U^2}, \frac{g t}{U} \right) \dots\dots\dots 3$$

$$\frac{g (T_{1/3})_G}{U} = f'_2 \left( \frac{g F}{U^2}, \frac{g t}{U} \right) \dots\dots\dots 4$$

Las relaciones  $f'_1$  y  $f'_2$  se obtuvieron a partir de mediciones en el mar y el resultado se muestra en las figuras I.5 y I.6 que permiten calcular  $(H_{1/3})_G$  y  $(T_{1/3})_G$  en función de  $(g F/U^2)$  y  $(g t/U)$ . Por otra parte, en cada una de estas figuras aparecen dos curvas, las cuales se obtuvieron al ajustar los valores observados. Los ajustes fueron realizados en el Instituto de Ingeniería y las expresiones obtenidas son:

a) Para la altura de ola significativa

$$\frac{g (H_{1/3})_G}{U^2} = 0.2525 \operatorname{tgh} \left[ 0.01 \left( \frac{g F}{U^2} \right)^{0.49} \right] \dots\dots\dots 5$$

$$\frac{g (H_{1/3})_G}{U^2} = 12.3174 \operatorname{tgh} \left[ 0.0004345 \left( \frac{g t}{U} \right)^{0.33} \right] \dots\dots\dots 6$$

La ecuación 5 corresponde al ajuste de la figura I.5 y la ecuación 6 a la figura I.6.

b) Para el período significativa

$$\frac{g (T_{1/3})_G}{U} = 0.358 \left( \frac{g F}{U^2} \right)^{0.28} \dots\dots\dots 7$$

$$\frac{g (T_{1/3})_G}{U} = 50.721 \operatorname{tgh} \left[ 0.015 \left( \frac{g}{U} \right)^{0.20} \right] \dots\dots 8$$

La manera de utilizar estas ecuaciones es:

- Se determinan los parámetros  $(g F/U^2)$  y  $(gt/U)$
- Empleando las ecuaciones 5 y 6 se calcula  $g(H_{1/3})_G/U^2$  para cada parámetro determinado en a) y se escoge el de menor valor, que además indica si el oleaje está limitado por el fetch o por la duración.
- Se utiliza la ecuación 7 u 8 para obtener el período  $(T_{1/3})_G$ ; para ello se emplea el parámetro que haya dado el menor valor de  $g(H_{1/3})_G/U^2$ , es decir a la ecuación 7 le corresponde la ecuación 5.

Sobre el método hay que indicar:

I. La altura de la ola determinada por él se llama altura de ola significativa y se presentan como  $H_{1/3}$ . La ola significativa se define como la altura de ola promedio del tercio de las olas más altas que hay en una observación y al promedio de los períodos comprendidos en el mismo tercio se le denomina período significativo  $T_{1/3}$ .

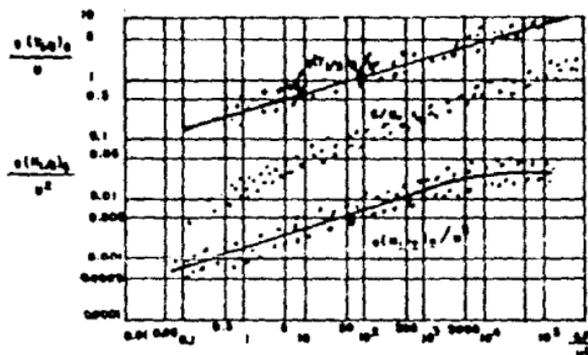


Fig. I.5) RELACION ENTRE LA LONGITUD DEL FETCH, LA VELOCIDAD DEL VIENTO CON ALTURA Y PERIODO DE LA OLA SIGNIFICANTE, SEGUN WIEGEL (1961).

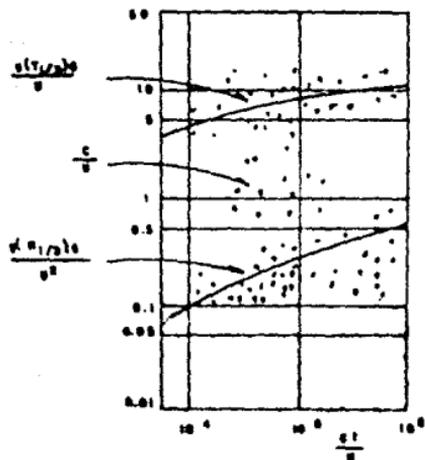


FIG. I.6.) RELACION ENTRE LA VELOCIDAD Y DURACION DEL VIENTO CON LA ALTURA Y PERIODO DE LA OLA SIGNIFICANTE, SEGUN WIEGEL (1961).

Otro método diferente a los antes mencionados pero que es de suma importancia para el cálculo de altura de ola significativa y - periodo de ola significativa es el Método de Huracán Estándar, del cual se mencionan las ecuaciones que lo conforman y que es cada -- uno de sus subíndices.

Las ecuaciones fundamentales son:

$$T_s = 9.6 E^{RAp/12541} \left( 1 + \frac{0.076 \left( \frac{V_f}{\sqrt{U_R}} \right)}{\sqrt{U_R}} \right)$$

$$H_s = 10.36 E^{RAp/6270} \left( 1 + \frac{0.0153 \left( \frac{V_f}{\sqrt{U_R}} \right)}{\sqrt{U_R}} \right)$$

en donde:

$H_s = H_{1/3}$ , altura de ola significativa a la salida de la perturbación (m).

$T_s = T_{1/3}$ , período de ola significativa a la salida de la perturbación (seg.).

$R$ , Radio del máximo viento (Km.)

$R = 1.853 \text{ antilog } (0.0056 P_o - 3.45)$

$\Delta p$ , Diferencia de presiones (mb).

$\Delta p = P_n - P_o$

$P_n$ , Presión Normal, igual a 1.013 mb

$P_o$ , Presión Central del huracán o ciclón (mb)

$V_f$ , Velocidad de avance del huracán o ciclón, es decir con la cual se desplaza la perturbación entera (Km/h).

$U_R$ , Velocidad Máxima sostenida del viento dentro de la perturbación (Km/h); debe de ser la calculada a 30 pies por encima de la superficie libre del mar a una distancia  $R$ .

$$U_R = 0.865 U_{\text{máx}} + 0.5V_f$$

$U_{\text{máx}}$ , Velocidad máxima del viento por gradiente (Km/h).

$\alpha$ , Coeficiente que para huracanes en movimiento es igual a 1.0.

Adicionalmente:

$$F_R = 22.168 \left( \frac{H_s}{U_R} \right)^2$$

$F_e$ , = Fetch efectivo (Km).

## 1.5.) FENOMENOS DE OLEAJE.

### 1.5.1.) REFRACCION DEL OLEAJE.

Conforme el oleaje se traslada a aguas someras, el cambio de

profundidad causa una disminución en la celeridad y como consecuencia su longitud disminuye y su altura aumenta y el frente de ese oleaje se reorienta conforme a los contornos del fondo, también -- llamados líneas batimétricas. Ese efecto se llama refracción del oleaje, el cual depende de la relación entre la profundidad y la longitud de onda ( $d/L$ ). Ver figura 1.8.

En el estudio de la refracción se supone que cuando una onda avanza hacia la playa, no existe dispersión lateral de energía a lo largo de su frente, es decir la energía transmitida permanece constante entre dos líneas ortogonales (trazadas perpendicularmente al frente de las ondas)<sup>1</sup>.

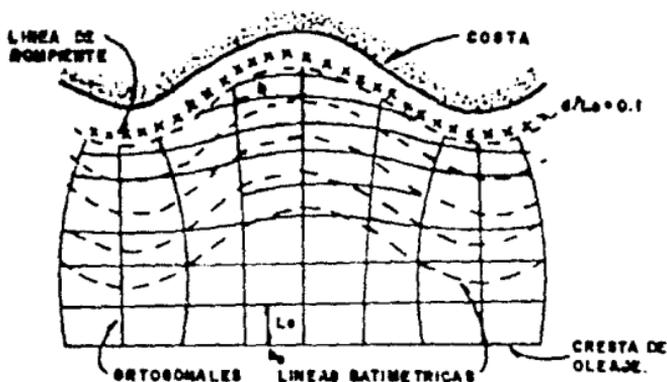


FIG. 1.7.1. REFRACCION DEL OLAJE

<sup>1</sup> Ver Manual de Diseño de Obras Civiles A.2.13. Hidráulica Marítima. Primera Parte y Ayudas de Diseño.

### 1.5.2.1 REFLEXION DE OLEAJE.

Cuando un oleaje no rompiente incide sobre una estructura o acantilado no hay impacto y por ello una parte de la energía es reflejada y la otra se transmite al interior de la estructura, si ésta es permeable. En caso de que el frente de la onda sea paralelo a la frontera y ésta sea plana y lisa se producirá una reflexión perfecta que se manifiesta por la presencia de ondas estacionarias (clapotis), ver parte 3.2.1. y figura 3.14 y 3.15. Entre más vertical, rígida y lisa sea la frontera, mayor es la reflexión y por el contrario, si la frontera tiene una pendiente gradual, con pared rugosa, accidentada o permeable, menor es la reflexión.

La reflexión del oleaje es importante en el diseño del recinto protegido de un puerto, ya que por su entrada pueden penetrar ondas que aunque estén difractadas (ver punto siguiente), son reflejadas por las paredes verticales de los muelles y muros.

Si por la relación entre la longitud del oleaje y las dimensiones del puerto se produce resonancia, hay posible peligro de destrucción de las embarcaciones al chocar contra esas paredes. Eso se evita reduciendo la reflexión en algunas zonas o cambiando las dimensiones del puerto o de algún muelle o atracadero. Si el oleaje no incide normalmente a la pared es reflejado con un ángulo igual al de incidencia.

### 1.5.3.) DIFRACCION DEL OLEAJE.

El fenómeno que afecta la distribución de la energía detrás de una barrera es la difracción. Ello puede ocurrir, por ejemplo en el extremo de un rompeolas o a la entrada de un recinto formado por dos rompeolas o por la presencia de una isla ver figura 1.8.

Cuando el oleaje pasa por el extremo de una barrera, por ejemplo en rompeolas, (Ver parte III.1.), la energía del oleaje se reduce al dispersarse dentro de una zona llamada de penumbra, en forma circular\*. En caso de una barrera discontinua como es la entrada a un puerto, el proceso de difracción se produce en ambos extremos de los rompeolas que la forman, y a diferencia de la situación anterior, la energía del oleaje decrece más rápidamente, hacia el interior.

El fenómeno de la difracción puede analizarse analíticamente utilizando la teoría del potencial, pero se requieren cálculos elaborados. Por ello la difracción se estudia ya sea con computadoras electrónicas, o con diagramas de difracción obtenidos experimentalmente, para profundidad constante<sup>1</sup>.

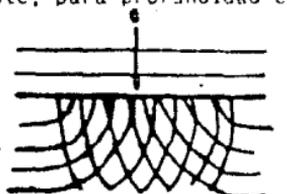


DIAGRAMA DE DIFRACCION  
ALREDEDOR DE UN OBSTACULO

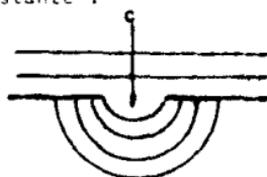


DIAGRAMA DE DIFRACCION EN  
LA ENTRADA ENTRE DOS ROMPEOLAS



DIAGRAMA DE DIFRACCION EN EL  
EXTREMO DE UN ROMPEOLAS.

FIG. 1.8.) DIFRACCION DEL OLAJE.

\* Ver Yoshimi Goda "Random Seas and Design", of Maritime Structures University of Tokio Press.

<sup>1</sup> Ver U.S., Army "Shore Protection Manual" (Vol. I, II, III), U.S. Corps of Engineers, OERC., 1977.

## CAPITULO I I

### EL TRANSPORTE LITORAL

El estudio del transporte litoral es de suma importancia para la Ingeniería de Costas, puesto que sirve para predecir el acarreo litoral, diseño de protecciones costeras y obras marítimas en general.

Por otra parte, es importante asentar que el principal objetivo en el estudio del transporte es predecir si se tendrá una condición de equilibrio, o existirá erosión o depósito y estimar las cantidades involucradas. La cantidad de transporte de sedimentos, expresada como masa, peso o volumen por unidad de tiempo, puede ser determinada por medio de mediciones en campo o por métodos analíticos; ambas formas arrojan un bajo grado de precisión, por lo que son posibles, variaciones en las cantidades de transporte calculados y tendrán que ser consideradas para fines de diseño.

El problema fundamental para el conocimiento del transporte litoral es la complejidad del proceso del transporte, la interacción de un flujo turbulento, cuyas características son solamente conocidas por empirismo, y la frontera consiste en la pérdida de sedimentos, difícilmente puede ser descrito por simples ecuaciones. Por lo tanto, la mayor parte del conocimiento está basado en experimentos y mediciones en campo y laboratorio.

El objetivo de este capítulo es proporcionar los elementos prácticos que permitan conocer el orden de la magnitud del movimiento de sedimentos, y no adelantarse en teorías complejas para el estudio del transporte litoral.

Para tal efecto se analizarán las principales propiedades físicas del agua y de las partículas sólidas, estudiando su comportamiento bajo la acción de las corrientes y del oleaje.

## II.1.) EL TRANSPORTE LITORAL COMO UN CONCEPTO.

El transporte litoral o transporte de sedimentos en el mar es el fenómeno que se lleva a cabo en las playas, por medio del cual, las partículas sólidas de que están compuestas, se transportan a lo largo de ellas; se sabe que el transporte litoral se produce principalmente entre la línea de playa y la zona de rompientes, aunque también fuera de ésta existe transporte, como se verá más adelante.

Los orígenes del transporte de sedimentos en las costas son básicamente las corrientes y el oleaje, provocan esfuerzos cortantes sobre los sedimentos sólidos y hacen que sean transportados en suspensión o por el fondo a distancias más o menos grandes y depositados en zonas tranquilas. Por ello, antes de emprender la realización de una obra es preciso tomar en cuenta las posibles interacciones entre el fluido en movimiento y los sedimentos del fondo sobre los que éste actúa.

La naturaleza de esta interacción es sumamente compleja y los movimientos de los sedimentos dependen de múltiples parámetros como gradientes de velocidades en el fluido, turbulencias, geometría del fondo, naturaleza de los materiales, espesor del sedimento en movimiento, porosidad y cohesión de los depósitos y características del fluido entre otras. Además, estos parámetros no son constantes en el tiempo y el equilibrio final de los sedimentos no será más que una resultante de acciones hidrodinámicas, en las que el fluido y sólido reaccionan uno sobre otro.

Las leyes que rigen estos fenómenos aún no se conocen a la perfección, por lo que resulta difícil, incluso imposible prever con precisión, la evolución de un fondo sometido a múltiples acciones hidrodinámicas mediante un simple enfoque teórico del movimien

to de los sedimentos. Utilizando en combinación algunas leyes teóricas y empíricas es posible comprender mejor el movimiento de los sedimentos. Las propiedades del sedimento más frecuentemente usadas para estudiar su traslado son: tamaño, forma, densidad y velocidad de caída.

Las olas y las corrientes proporcionan las fuerzas necesarias para mover el material litoral. La mecánica del transporte litoral aún no se conoce con precisión, pero debe establecerse en general que el material litoral se mueve por alguno de los tres tipos básicos de transporte: a) Material conocido como "material playero", a lo largo de la zona del estrán bajo un patrón en zig zag; - b) Material movido en suspensión en la zona de rompientes por corrientes a lo largo de la playa y la turbulencia que origina el rompimiento de las olas; c) Material conocido como "material del fondo" el cual es movido por el mismo; deslirándose, rodando o saltando por las corrientes oscilantes de las olas que pasan. Sin tomar en cuenta el tipo de transporte, la dirección y el valor del transporte litoral dependen principalmente de la dirección y energía de las olas que llegan a la playa. Existen excepciones en los estrechos de playa adjuntas a entradas de marea donde las corrientes por marea deben dominar.

## II.2.1) ZONA DE INFLUENCIA DEL TRANSPORTE LITORAL.

Para establecer esta zona de influencia es necesario definir primero qué son las playas y qué los litorales.

Playas: son acumulaciones de sedimentos no consolidados como arena, grava, boleros, etcétera, que se extienden desde el nivel de marea media baja hasta algún accidente fisiográfico como son: los acantilados y dunas o donde la vegetación es permanente.

Litoral: con este término se designa una porción mayor de la frontera entre el mar y la tierra. Abarca, la playa o costa defi-

nidas anteriormente y se extiende a la región cubierta permanentemente por las aguas hasta donde el transporte de sedimentos debido al oleaje, es menos activo, es decir, hasta una zona de aproximadamente 20 metros de profundidad.

Las playas son el mejor elemento para disipar la energía del oleaje; por tanto, la protección que puede tenerse a lo largo del litoral es su formación de ellas y/o su conservación. Independientemente de la utilidad que se tenga destinada a ellas.

En la figura II.1 se indican las regiones o zonas en que puede dividirse el litoral a lo largo de una sección transversal, entendiéndose como tal la que es perpendicular a la línea de costa o línea de playa.

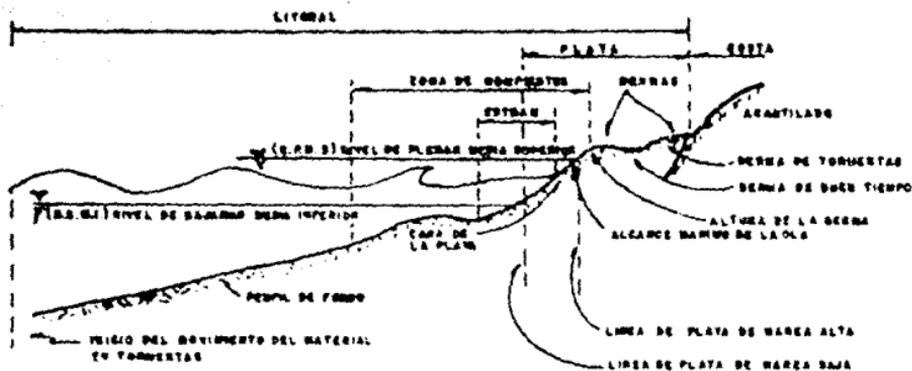


Fig. II.1) ESQUEMA DE UN PERFIL PLAYERO

Según sea la configuración de la sección transversal de la playa, se puede hablar de perfiles de calma y perfiles de tormenta.

El perfil de calma se caracteriza por tener una pendiente más o menos continua, o con cambios graduales. Se forma después de períodos prolongados con oleajes de poca altura. Debido al transporte de masa, los sedimentos son transportados del mar hacia la playa donde se acumulan formando y ampliando el ancho de la playa y como consecuencia de ello la línea de playa se corre hacia el mar.

El perfil de tormenta se forma con oleajes de gran altura, se caracteriza por la presencia de una barra longitudinal y paralela a la línea de costa que se forma en la línea de rompientes; este perfil se configura en muy poco tiempo, ya que el oleaje que lo produce tiene una gran energía, permanece hasta que se presenta el oleaje de menor altura pero con suficiente energía para formar el perfil de calma.

### 11.3.) PRINCIPALES FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA FORMACION Y CONFIGURACION DE UNA PLAYA.

Al tratar con procesos costeros se hace referencia a la estabilidad de las playas o bien a la de las costas o litoral. Si en una zona en particular la cantidad de sedimento que entra es igual a la que sale, dicha zona se encuentra en equilibrio. Si llega más sedimento del que sale se produce sedimentación y la playa avanza hacia el mar o disminuye la profundidad; si por el contrario sale más del que entra tendrá lugar un proceso de erosión y la playa retrocederá hacia tierra o aumentará la profundidad.

Los factores principales que controlan la formación y configu

ración de una playa son:

La geomorfología de la tierra, tipo y cantidad de material -- disponible y clas que se generan sobre la playa.

### II.3.1) LA GEOMORFOLOGIA.

Esta depende de las características geológicas. La forma de la costa depende de la estructura, litografía y resistencia de las rocas. En las playas, dicho efecto influye en el material, fuente de que son alimentadas, y determina el peso específico y composición mineralógica de los sedimentos.

Según su origen y en forma simplificada, las playas se pueden subdividir en:

- a) Formadas con material transportado por los ríos.
- b) Integradas con el material de rocas cercanas a la costa o acantilados vecinos.
- c) Formadas con microlava y vidrio volcánico, lo que ocurre -- si hay una fuerte actividad volcánica cercana.
- d) Construidas con fragmentos de conchas de organismos marinos, lo que se presenta en islas o zonas tropicales.
- e) Formadas por desechos derivados de actividades humanas.

La erosión de las formaciones costeras es una gran fuente de abastecimiento de material playero. Mientras que una berm de playa se mantiene entre la formación costera y la acción del oleaje, la formación contribuye en parte con el abastecimiento litoral. -- Puede no ser, pero el mar ataca las formaciones costeras, causando serias erosiones a la línea de costa. La cantidad de tales contribuciones de erosión puede ser estimada solamente a través de mediciones comparativas (seccionamientos comparativos). Las formaciones costeras frecuentemente contienen mucho material fino para permanecer sobre la playa.

La proporción del material playero abastecido, respecto al total del material erosionado puede determinarse por un análisis de mecánica de suelos de una muestra compuesta. Cada estrato deberá estar representado en proporción a su espesor. Las sobreelevaciones del nivel del agua permiten que las olas ataquen riscos que generalmente son de material muy erosionable, esto origina desplazamientos de la línea de playa y contribuye al abastecimiento del material playero. Se requerirá de un estudio geológico en aquellos lugares donde la erosión de formaciones costeras es de importancia.

La amplitud de los trabajos de campo e investigación dependerá de la importancia de la erosión sobre las formaciones costeras como una fuente de abastecimiento de material litoral.

#### II.3.2.1) EL TIPO DE MATERIAL.

El material no consolidado que forman las playas y que se encuentra en el litoral interviene directamente en todos los procesos litorales. Las propiedades de dichos materiales, que actúan más en su comportamiento cuando son sometidos a la acción del oleaje y corriente, son básicamente su tamaño, forma y peso específico. Estas tres propiedades se toman en cuenta en la velocidad de caída de las partículas.

Las playas expuestas al oleaje prácticamente no pueden estar formadas por limo y arcilla, ya que son materiales que fácilmente son puestos en suspensión y transportados por las corrientes.

Los sedimentos con mayor diámetro tienden a formar playas con mayor pendiente debido a su mayor permeabilidad. El batir de las olas mueve o arrastra sedimentos hacia la playa y las corrientes de retorno tratan de regresarlos al mar. Cuando hay material grueso y gran permeabilidad, el material fino es fácilmente arrastrado

hacia el mar y la pendiente que se forma es mayor por lo que las pendientes de las playas son menores.

A lo largo de una sección transversal cambia el tamaño y la distribución de los sedimentos. Las partículas de mayor tamaño tienden a acumularse en la parte superior de la primera bermá y en la parte más baja entre la playa y la barra. Los materiales más finos se encuentran en el fondo del mar a medida que se alejan de la línea de costa.

El peso específico,  $\gamma_s$ , del material de las playas está íntimamente relacionado con la composición mineralógica y el tamaño de las partículas que las forman. Si el material es arenoso, el peso específico dependerá de los minerales de las rocas que le dieron origen. En cambio, si tienen mayor tamaño podrá depender de la composición de algunos elementos de la roca o de la roca en sí.

### II.3.3.) LA CANTIDAD DEL MATERIAL.

La cantidad del material, depende de los ríos y corrientes que llevan sedimento al océano, así como la erosión de la tierra en contacto con el océano y con el subsecuente transporte de material.

La interacción de las olas y la playa ocasiona que la arena o material playero se mueva a lo largo de la costa y se deposite o erosione según el caso y a su vez el agua lleve el material arrastrado o en suspensión con el agua hasta lugares donde se tengan aguas tranquilas y ahí se deposite.

La cantidad de depósito dependerá del tipo de material de que estén constituidas las formaciones costeras, puede ser material muy erosionable o poco erosionable, además de las corrientes por

las que viaja éste, pudiendo ser rápidas, regulares o lentas.

La cantidad de material arrastrado por las corrientes fluviales que desembocan en el mar, es de suma importancia en la formación de ciertas estructuras naturales, producto de la interacción de la corriente del río con el oleaje, ya que la formación rápida, lenta o la dimensión dependerán únicamente del material arrastrado por la corriente fluvial a lo largo de su cauce hasta su depósito en el mar.

De la cantidad de material dependerá principalmente la erosión o crecimiento de las formaciones costeras. El material se erosionará o depositará según la dirección y fuerza con que el oleaje llegue a las zonas de que se trate, y a su vez de las propiedades de los materiales.

#### II.4.) CUANTIFICACION DEL TRANSPORTE LITORAL.

La cuantificación es un problema muy complejo y ha originado estudios teóricos y experimentales, habiéndose llegado a diversos resultados. Esta cuantificación también se debe a las diferencias numéricas que hay cuando se aplican las fórmulas empíricas a sitios en condiciones diferentes a aquellos en que fueron obtenidas.

Existen dos tipos de métodos de cuantificación del transporte litoral:

Métodos Prácticos (o de campo)

Métodos Teóricos (o de gabinete).

De estos métodos unos toman en cuenta la velocidad de la corriente y otros hacen partícipe a la energía del oleaje, siendo el tipo de fórmulas las siguientes:

$Q_s = c f(v)$  donde  $Q_s$  = Gasto Sólido.

$Q_s = k f(E)$        $c, k$  = Constantes relacionadas con las características del material.

$f(v)$  = Función de la velocidad.

$f(E)$  = Función de la energía.

Dentro de las características del material, las más importantes son: la granulometría y su densidad para fines de cuantificación del transporte litoral.

#### II.4.1.) METODOS PRACTICOS (O DE CAMPO).

Los métodos de campo para la evaluación del transporte litoral, consisten en mediciones directas que proporcionen la cantidad de material que es transportada por el fondo de la playa y la que es transportada en suspensión. Las mediciones directas son indispensables cuando se desea conocer mejor la forma como son arrastrados los granos, obtener datos para el desarrollo de ecuaciones de arrastre y cuando se desean mejorar o probar equipos de medición. Además en muchos sitios no hay datos de oleaje y corrientes que permitan evaluar cualitativamente el arrastre y por lo tanto, conviene hacer su medición directa.

Los métodos de campo para medir el arrastre litoral más utilizados son:

- a) Espigones de Prueba.
- b) Dragado de Prueba.
- c) Trampas de Arena.
- d) Trazadores      { Fluorescentes.  
                              Radiactivos.

#### a) Espigones de Prueba:

Este método de predicción consiste en construir una barrera artificial (perpendicular a la costa), que impide el paso del material y en obtener batimetrías periódicas, una antes de construirlo, varias durante su construcción y varias durante la vida útil del espigón, hasta que el material lo rebase.

Los espigones, aunque en el campo no se construyen completamente impermeables, se puede lograr que casi sean impermeables en un corto tiempo ya que los orificios del espigón se obstruyen con los primeros granos de arena que llegan. La altura debe ser tal, que garantice que el material no pase por arriba de él, aún en tormentas. La longitud comprende tanto de la línea de costa hacia el mar adentro, como hacia tierra; y con ella se debe garantizar que el material no pase por ninguno de sus extremos. La longitud hacia el mar debe abarcar toda la zona de rompientes y la longitud hacia tierra depende del tipo de costa.

La obtención de la batimetría se hace generalmente del lado del espigón donde se acumula material, aunque en ocasiones, se hace en ambos lados. Una vez obtenida la batimetría, por comparación del volumen, se tienen las cantidades de material acumulado de un lado y el erosionado del otro. Estas batimetrías se obtienen por meses, quincenas o días, dependiendo de la exactitud requerida y de la variación estacional del perfil (esto es, la intensidad del transporte litoral).

Este método es costoso y tiene la desventaja de que altera las condiciones naturales del equilibrio, y sólo es aplicable y económico si pasa a formar parte de una escollera (trapeolias) que se construirá en dicho lugar.

Con este método es posible conocer los volúmenes netos de material que son arrastrados en intervalos de tiempo grandes, como - un mes, seis meses o un año y difícilmente sirven para obtener fórmulas. Ver figura II.2.

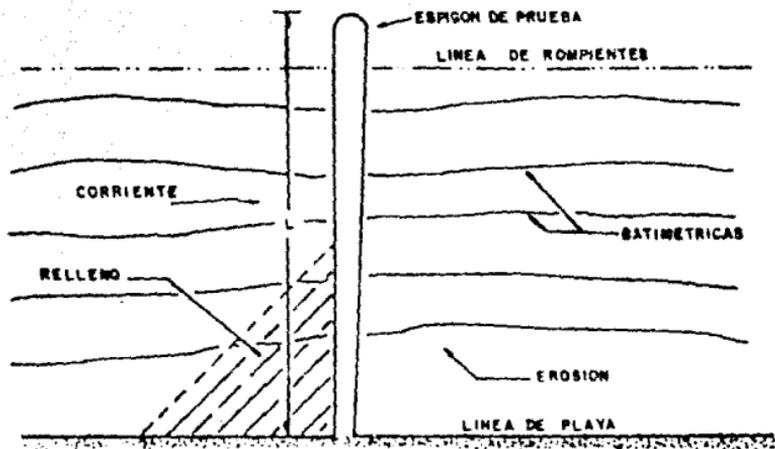


Fig. II.2. Espigón de Prueba.

b) Dragado de Prueba.

Este método es análogo al anterior, ya que la barrera artificial la constituye una fosa en el fondo. Este método tiene más -- desventajas que el anterior cuando se aplica en playas, pues a la fosa le llega arena de todas direcciones.

Además presenta serias dificultades durante la excavación y -- no siempre es un método económico. Se utiliza con ventaja en la -- entrada de puertos, de esteros o en canales de navegación, cuando -- hay una dirección principal de arrastre.

Se recomienda utilizarlo en obras ya construidas, ya que ayuda a definir criterios de dragado y sirve como comprobación de los resultados obtenidos en estudios previos.

c) Trampas de arena.

Las trampas de arena son dispositivos en los que se trata de obtener una muestra que represente las características del transporte litoral sin que este se vea afectado por la presencia de las mismas. Existen trampas para material en suspensión y para material del fondo, y su efectividad dependerá de la eficiencia de la captura, sin alterar las condiciones existentes. Las trampas para material de fondo consisten principalmente de un recipiente enterrado en el fondo, mientras que las trampas para material en suspensión se colocan entre el fondo y la superficie libre.

d) Trazadores.

Los trazadores son partículas de arena de la playa en estudio, a las cuales se les ha marcado para distinguirlas fácilmente, ya sea con pinturas o radioactivantes. La inyección del material marcado puede hacerse una sola vez o puede ser continua; ambas son de gran utilidad principalmente en:

La localización de las trayectorias que sigue la arena.  
Cuantificación del arrastre litoral.

En la localización de trayectorias ha dado magnífico resultado y se ha aplicado en bocas de lagunas costeras, en entradas de puertos, en desembocaduras de ríos y para conocer las trayectorias alrededor de la zona en estudio. En trabajos de este tipo, interesa saber, orígenes, trayectorias y depósitos.

En la cuantificación del volúmen arrastrado, se emplean dos técnicas principales que son:

- i) Trazadores Fluorescentes.
- ii) Trazadores Radioactivos.

Algunas ventajas y desventajas de los tipos de trazadores mencionados son:

1) Con los trazadores radioactivos se conoce de inmediato si se está muestreando en la zona donde se mueve el material marcado. En los fluorescentes el muestreo se efectúa a "ciegas".

2) A los fluorescentes se les quita algo del material marcado durante las operaciones de muestreo y manejo de la muestra; con los radioactivos no ocurre eso.

3) Es más fácil y menos peligroso producir trazadores fluorescentes, que los radioactivos, ya que estos últimos requieren -- instalaciones especiales y medidas extremas de seguridad.

4) Los trazadores fluorescentes son menos costosos que los radioactivos.

5) El transporte e inyección de los trazadores fluorescentes no presentan problemas en comparación con los radioactivos que requieren de muchas precauciones.

6) El análisis del muestreo es directo en los trazadores radioactivos. La parte más compleja en un estudio de trazadores -- fluorescentes es su conteo.

7) Los trazadores fluorescentes son mejores en áreas pequeñas, para grandes extensiones es conveniente usar trazadores radioactivos.

#### II.4.2.) METODOS TEORICOS O EMPIRICOS.

Numerosos métodos se han desarrollado para la cuantificación del transporte litoral a lo largo de la playa y varios de ellos -- sustentan que el gasto sólido es proporcional a la energía del --

oleaje regular y transmitido en la zona de rompientes, puesto en relación de su altura en aguas profundas, siendo tal proporcionalidad en muchos de los casos, función de la granulometría del sedimento, de la relación de esbeltez y del ángulo de incidencia del oleaje.

A continuación se describirán los métodos más frecuentemente usados en nuestro país.

a) Fórmulas del Laboratorio Nacional de Hidráulica de Francia (J. Larras y R. Bonafille). Está en función de la energía del oleaje y del material playero.

$$Q_s = K' g H^2 T \sin \frac{7}{4} \alpha$$

$$H = H_0 \cdot Kr$$

$$Q_s = K' g H_0^2 \cdot K_r^2 T \sin \frac{7}{4} \alpha$$

Donde:

$g$  = Gravedad en  $m/seg.^2$

$H_0$  = Altura de ola en aguas profundas.

$K_r$  = Coeficiente de Refracción.

$T$  = Período de la Ola en segundos

$\alpha$  = Ángulo de incidencia entre la cresta y la playa.

$K'$  = Coef. =  $1.18 \times 10^{-6} \sigma_{50}^{-3} \cdot \frac{L_0}{H_0}$

$\sigma_{50}$  = Diámetro del material en mm.

$L_0$  = Longitud de la ola en aguas profundas =  $1.56 T^2$

b) Fórmula del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia. Esta ecuación se expresa de la forma siguiente:

$$V_s = H^2 T f(\alpha) : \left(\frac{Kg}{\gamma}\right)$$

Siendo:

- = Peso del material arrastrado ( $M^3$ ).
- $V_s$  = Volumen de sedimento arrastrado ( $m^3$ ).
- $t$  = El tiempo de acción del oleaje. (seg.)
- $g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/seg^2$ ).
- $K$  =  $3 \times 10^{-6}$  para arenas de 0.2 mm de diámetro
- $K$  =  $4.5 \times 10^{-5} \cdot D^{-X}$  para arenas de diámetro de  
de 0.3 mm.
- $K$  =  $1.5 \times 10^{-6} \cdot D^{-Y}$  para arenas de diámetro mayor  
a 0.3 mm.
- $f(\alpha) = \text{sen } 2\alpha$

Las otras variables son conocidas.

c) Fórmula del C.E.R.C. (Coastal Engineering Research Center, U.S.A.)

Esta fórmula propuesta por el C.E.R.C., ha sido obtenida mediante estudios experimentales en modelos hidráulicos y en la naturaleza para diámetros comprendidos entre 0.2 y 0.5 mm y se expresa en la forma siguiente:

$$Q_s = K H^2 C_o \text{ Sen } \alpha b \text{ cos } \alpha b$$

Siendo:

- $Q_s$  = El gasto sólido ( $m^3/seg./m$ )
- $C_o$  = La celeridad de la ola en aguas profundas.
- $\alpha b$  = Angulo del frente de la ola rompiente con respecto a la playa.
- $K$  = Coeficiente de refracción igual a  $1.4 \times 10^{-2}$
- $H$  = Altura de ola significativa antes de la rompiente (m)

Cabe aclarar que esta fórmula relaciona el transporte litoral (acarreo) únicamente con la componente de la energía de la ola y un coeficiente de proporcionalidad, por tanto no toma la influencia de las características del sedimento, de igual manera no se considera el efecto de la pendiente de la playa.

## d) Fórmula de Cadwell

Basado en resultados obtenidos en la bahía de Anaheim, California, variando la dirección del oleaje entre  $9^\circ$  y  $21^\circ$  y los diámetros del material playero variaron entre 0.1 y 0.4 mm.

$$Q = K E_i 0.8.$$

Donde:

- Q = Volúmen aportado de sólidos en  $\text{ft}^3/\text{día}$ .  
 K = Factor de proporcionalidad (210)  
 $E_i$  = Componente a lo largo de la playa, de la energía del oleaje en millones de libras pie, por pie y por día  $E_i$  igual a:

$$E_i = E_p \sin \alpha \cos \alpha.$$

en que  $\alpha$  = ángulo en la zona de rompiente, - entre la cresta de la ola y la línea de playa.

$E_p$  = Energía del oleaje en libras/pie/pie de playa por día.

$$E_p = \frac{\gamma^2 H^2 L}{16}$$

H = Altura de ola en pies.

L = Longitud de la ola en pies.

$\gamma^2$  = Peso específico del agua del mar ( $64 \text{ lb/ft}^3$ )

e) Fórmulas para calcular el arrastre litoral en función de la velocidad de corriente litoral.

Conocida la velocidad de la corriente producida por el oleaje a lo largo de una playa, es posible cuantificar el arrastre producido por ella, obtenidas originalmente para ríos y canales y modificados para tomar en cuenta la turbulencia debida al oleaje.

La velocidad se puede obtener por:

Medición directa. - Con material fluorescente, se cuenta el tiempo que tarda en recorrer una partícula entre dos puntos fijos

en una conocida distancia.

Fórmulas que permiten valuar el transporte litoral. Tienen - el inconveniente de que no permiten conocer la velocidad real en - distintas zonas entre la rompiente y la línea de playa, sino única mente la velocidad media en toda la zona.

Fórmula de Eagleson:

$$V_c^2 = \frac{3}{8} g \frac{H_r^2 N_b}{d_r} \frac{\sin \theta \sin \alpha \sin 2\alpha}{f}$$

- Donde:  $V_c$  = Velocidad media de la corriente litoral.  
 $\theta$  = Pendiente de la playa.  
 $H_r$  = Altura de la ola en la rompiente.  
 $d_r$  = Profundidad media en la rompiente.  
 $\alpha$  = Angulo de incidencia del oleaje con respecto a la playa en la zona de rompiente.  
 $N_b$  = Relación de la celeridad de grupo a la celeridad de la onda en la rompiente

$$N_b = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2k d_r}{\text{Sen } h_{ip} \cdot 2k d_r} \right]$$

- Donde:  $K$  = Factor de proporcionalidad (210).  
 $f$  = Coeficiente de fricción de Darcy - Weisback

$$f = 2 \log \frac{d_r + 1.74}{D_{65}}$$

- $D_{65}$  = Tamaño de los granos en el que 65% de las partículas del conjunto es menor o igual que él.

Fórmula de Brunn:

$$V_L = C \cdot f \left[ H_r^{3/2} \theta \frac{(\sin 2\alpha)}{f} \right]^{1/2}$$

Donde:

- C'f = Constante que resultó igual a 0.25 (en laboratorio) y 0.13 en el campo, el coeficiente de Chezy generalmente se acepta C'f = 14.3.
- Hr = Altura de la ola en la rompiente (m).
- t = Período de la ola en la rompiente en seg.
- $\alpha$  = Angulo de incidencia del oleaje con respecto a la playa.
- $\theta$  = Pendiente de la playa.

Cálculo del arrastre litoral en función de la velocidad de la corriente.

Conocida ya la velocidad de la corriente, es posible utilizar expresiones matemáticas para cuantificar el arrastre litoral.

Uno de estos métodos es el que Einstein propone:

$$q_B = \gamma_s \cdot \theta_* \left[ \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right]^3 (g D_{65})$$

Donde:

- $q_B$  = Gasto sólido arrastrado en el fondo en Kg/seg/m.
- $\gamma_s$  = Peso específico del material del fondo
- $\gamma$  = Peso específico del agua de mar
- $\theta_*$  = Intensidad de transporte de fondo. Con Gráficas se obtiene este valor.

$$\theta_* = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{D_{65}}{R_b} E$$

- $R_b$  = Radio hidráulico que se puede considerar el tirante medio de cada franja en la que se divide la sección transversal de la playa.
- S = Pendiente hidráulica de la corriente litoral. Como se conoce la velocidad litoral media en función ella se calcula el valor de S.

$Z$  = Factor de corrección.

El valor de  $q_b$  se expresa en Kg/seg./m. de ancho.

El gasto en suspensión se calcula con la siguiente expresión:

$$q_s = q_b \left( 2.303 I_1 \log \frac{30.2 d_r}{D_{65}} - I_2 \right)$$

$I_1$  e  $I_2$  = son coeficientes que dependen de A y Z.

$$A = \frac{20}{Rb}$$

$$Z = \frac{2.5 W_s}{V^*} = \frac{2.5 W_s}{\sqrt{g R_b s}}$$

$$V^* = \sqrt{g R_b s}$$

$W_s$  = Velocidad de caída de los granos del fondo

$$W_s = 4.6 \sqrt{D}$$

D = Diámetro del material en mm.

$V^*$  = Velocidad al cortante.

## II.5.) EFECTOS DEL TRANSPORTE LITORAL (EN EL PERFIL DE UNA PLAYA).

Los efectos del transporte litoral en el perfil de una playa está fuertemente influenciado por la acción del oleaje; en general, los factores que determinan la forma de la playa son: las propiedades del material tales como son: densidad, resistencia a la erosión, tamaño y forma de la partícula; condiciones de oleaje y corrientes, así como la geografía y batimetría de la costa.

Fuera de la zona de rompientes, la acción del oleaje usualmen

te causa un efecto menor en el transporte de arena; este pequeño suministro de material a la barra compensa al depositado en la anteplaya; de esta manera se mantiene el equilibrio de la barra - - (Fig. II.3). La erosión más allá de la barra es un proceso lento y disperso, de tal forma que la pérdida de material en esta zona no tiene mayores consecuencias para la estabilidad de una playa.



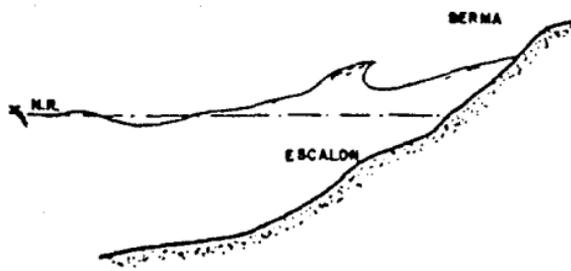
Fig. II.3. Movimiento de Arena y Agua Durante Condiciones de Calma en la Zona de Rompientes.

Generalmente se distinguen dos tipos clásicos de perfiles de equilibrio que son:

#### Pefil de Buen Tiempo y de Tormenta

Para su definición es determinante la relación de esbeltez de la ola. Así, por ejemplo, el perfil de buen tiempo se presenta para relaciones de esbeltez  $\gamma' = \frac{H_0}{L_0} < 0.025$  y el de tormentas para

$$\gamma' = \frac{H_0}{L_0} > 0.025 \quad \text{Ver figuras II.4 y II.5.}$$



PERFIL DE BUEN TIEMPO  $\gamma = H_0/L_0 < 0.025$



PERFIL DE TORMENTAS  $\gamma = H_0/L_0 > 0.025$

Fig. II.4 Perfiles de Equilibrio de una Playa

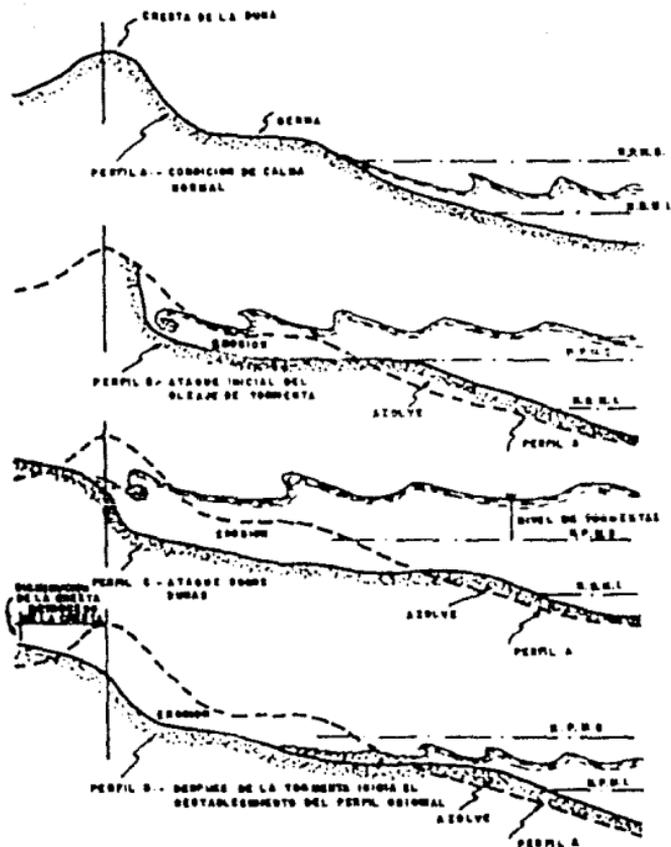


Fig. II. 5 Desarrollo de una Playa Durante una Tormenta.

Por definición, una playa puede referirse a toda área costera que tenga un fondo consistente en partículas cuyo rango puede variar desde arena hasta grava. De acuerdo a la definición técnica, una playa se extiende desde la línea de baja marea hasta el lugar donde se de vegetación permanente, como se muestra en la figura -- II.1, esta figura muestra un perfil típico de una playa arenosa, - estando subdividida en playas posterior y anterior.

La frontera entre esas zonas es la berma (punto de máximo alcance de la ola bajo condiciones normales); el lamido de la ola alcanza la frontera entre playa y costa solamente durante tormentas más severas.

La pendiente promedio de una playa está ampliamente ligada a la forma y tamaño del grano del material playero. Partículas gruesas y de forma irregular forman pendientes más fuertes. Playas -- a base de grava o guijarros pueden ser estables con pendientes - - hasta de 4:1; playas arenosas usualmente tienen pendientes entre - 25:1 a 150:1, playas a base de limo o lodo son usualmente más tendidas, teniendo pendientes tan bajas hasta de 5000:1.

#### Equilibrio Dinámico Transversal de una Playa.

Quando las olas rompen, ya sea en rompiente progresiva o de colapso (los dos tipos de rompiente más comúnmente encontrados), - su energía es disipada en gran parte por turbulencia; los granos - de arena son arrancados del fondo y puestos en suspensión temporalmente por esta turbulencia. Una porción de la masa de agua de la cresta de la ola se derrama enfrente de la costa en las capas superiores de la zona de rompiente, transportando arena con ella, esta agua disipa su energía restante por efecto del lamido sobre la playa. Parte de esta agua, producto del lamido, regresa al mar por - filtración, pero la mayoría lo hace por la superficie. Aparte; --

debido a que el regreso del agua es menos turbulento, una menor cantidad de arena se regresa hacia el exterior de la playa en comparación con la que fue transportada hacia el interior; la anteplaya por tanto, crece ligeramente durante estas condiciones de calma. El flujo de regreso del agua y la arena continua a lo largo del fondo hacia la barra en la zona exterior de la zona de rompientes completando de esta manera el circuito.

Las pérdidas de los materiales litorales se deben principalmente a los siguientes factores:

- a) Movimientos laterales de material fuera del área.
- b) Movimientos de material hacia el mar, a profundidades mayores.
- c) Pérdida de material por la presencia de cañones submarinos.
- d) Pérdida de material que se transporta tierra adentro por efecto del viento.

## II.6.) FORMACIONES LITORALES.

Una vez que los sedimentos llegan al litoral, se depositan ya sea en zonas bajas o frente a las formaciones rocosas. Dependiendo de las características de esos materiales, de la energía y dirección del oleaje, y de las corrientes producidas por el oleaje y las mareas (incluidas las corrientes oceánicas), se pueden presentar las siguientes formaciones litorales: Playas, Flechas, Barreras, Tómbolos, Cúspates o playas Triangulares, Barras y Bancos.

Las cinco primeras pueden observarse a simple vista ya que los depósitos de material quedan permanentemente sobre la superficie del agua, ver la Fig. II.6. Las dos últimas siempre están bajo el agua. A continuación se describen cada una de las formaciones litorales mencionadas anteriormente.

**Playas:** Estas formaciones fueron ya descritas, únicamente puede adicionarse que generalmente son rectas o tienen una curvatura cóncava hacia el mar. Esa geometría depende del oleaje, principalmente de la dirección de que procede, de la refracción que sufre al acercarse a la costa y de las corrientes que genera cuando no incide normal a la línea de costa.

**Flechas:** Son depósitos que se forman en puntos extremos de playas o discontinuidades de la costa cuando existe un gran transporte litoral y las aguas son someras y poco profundas. La dirección de avance de la flecha indica la dirección neta del transporte litoral.

**Barreras:** Son depósitos de sedimentos muy semejantes a las flechas que se presentan frente a lagunas costeras, pero que no están unidos a tierra firme; es decir, en ambos extremos se tiene una boca de comunicación entre la laguna y el mar. La franja sobre el agua o descubierta de las flechas y barreras, se denomina cordón litoral.

**Tómbolos:** Es un istmo formado del material granular transportado por el oleaje que se desarrolla desde la costa y se dirige a una isla u obstáculo frente a ella, al cual generalmente se llega a unir.

**Playas Triangulares o Cuspate:** Son depósitos de forma triangular con el vértice dentro del mar más o menos redondeado. Se parecen a los tómbolos en su fase inicial aunque nunca llega a desarrollar la flecha, que es en su parte final y cerca del obstáculo que lo forma, es característica de un tómbolo largo.

**Barras:** Se trata de depósitos de sedimentos localizados en el litoral que siguen una dirección casi paralela a la costa. Se

forman en la zona de rompientes cuando el oleaje es muy intenso - y a lo largo de ellas puede ocurrir un transporte intenso de sedimentos. En la figura II.60 y II.7 se puede apreciar la forma que pueden adquirir esos depósitos, los cuales siempre quedan por debajo del nivel de bajamar mínima.

**Bancos:** Son acumulaciones de arena generalmente alejadas de la costa y bajo la superficie del agua. Se forman por condiciones locales de oleaje y corrientes que transportan material hacia esas zonas pero que no lo pueden mover fácilmente.

**Berma :** Son formaciones de sedimentos casi horizontales que se presentan al ir disminuyendo un oleaje de gran altura (al término de una tormenta) pueden formarse una o varias bermas escalonadas. Durante las tormentas pueden ser destruidas y remodeladas, por lo que no se debe construir en ellas. Ver Fig. II.1 y II.4.

**Rompiente:** Es la zona a lo largo del litoral donde las olas rompen por primera vez. Pueden estar señaladas o definidas por la presencia de barras o cambios de pendiente. Cuando la pendiente de la playa es muy grande, lo anterior no existe y las olas -- rompen prácticamente sobre la playa. Ver Fig. II.1.

Estudios en modelos hidráulicos indican que los perfiles de calma o tormenta están relacionados con la pendiente de la ola - ( $H_o/L_o$ ), no obstante el tamaño del sedimento también es un factor importante. Un parámetro para predecir cuál es el perfil de la playa, es el propuesto por Dean (1973), y está dado por:

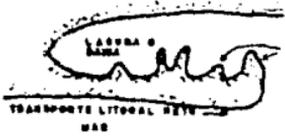
$$F = \frac{H_o}{W_m T}$$

Donde:

F = Parámetro que define el perfil playero.  
 $W_m$  = Velocidad de caída de la partícula que corresponde a la mediana de los diámetros de la muestra.  
 T = Período  
 $H_0$  = Altura del Oleaje.



b) - PLAYAS



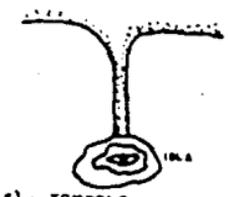
DEPOSITOS FORMADOS DESDE EL CAMBIO DE DIRECCION DEL OLEAJE



b).- FLECHAS FRENTE A UNA LAGUNA Y EN LA DESERVOCADURA DE UN RIO



c) - FLECHA Y BARRA



d).- TOMBOLO



e).- PLAYA TRIANGULAR O CUSPATE

Fig. II.6.1 Formaciones Litorales

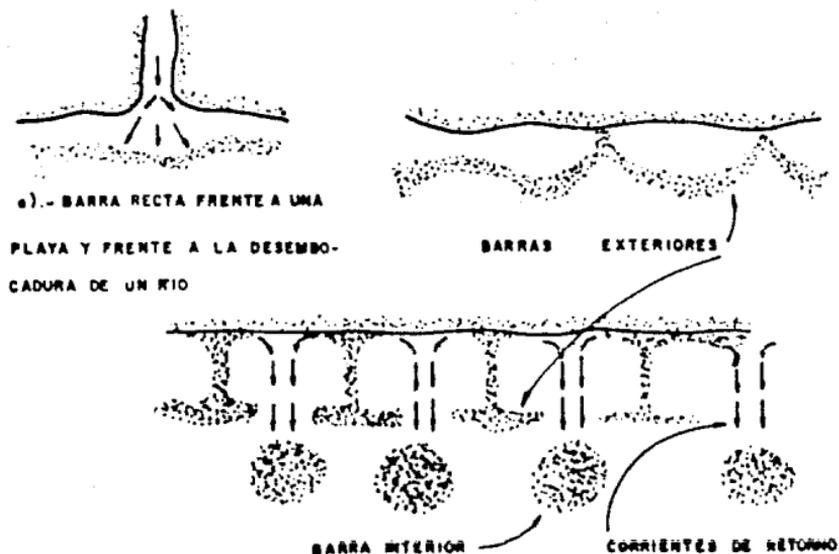


Fig. II.7.1) Representación Esquemática de las Barras

#### II.7.1) PROBLEMÁTICA PROVOCADA EN LA ZONA DE INFLUENCIA PORTUARIA POR EL TRANSPORTE LITORAL.

A lo largo de la costa existe una corriente litoral producida por el oleaje cuya principal acción es el transporte de sedimentos. Al construir obras costeras, el equilibrio playero es alterado cuando no se toman las medidas adecuadas para reestablecerlo. A continuación se describe esta acción y se citan algunos ejemplos en los que se ha tomado en cuenta la estabilidad --

costera y las consecuencias que ha ocasionado en algunas obras al no considerar dicho fenómeno.

Debido a las corrientes producidas por las mareas y el oleaje, las costas evolucionan y continuamente cambian de forma, o están en equilibrio durante un cierto tiempo.

Las corrientes generadas por el oleaje son las más importantes en la mayoría de las costas y son el principal agente del arrastre litoral a lo largo de ellas. Las corrientes producidas por las mareas son generalmente menos intensas en la mayoría de las costas; aunque hay lugares en donde son el factor definitivo que acarrea la arena y conforma la costa. Esto ocurre por ejemplo en la Isla Tiburón y la costa del Estado de Sonora.

El oleaje puede producir transporte de material arenoso en una dirección perpendicular a la costa. Así, por lo general los oleajes de pequeña altura transportan material del fondo hacia la playa, mientras los de gran altura o tormenta toman arena de las playas y la depositan en el fondo del mar, en la zona de rompiente. Este fenómeno modifica los perfiles de las playas dando como resultado los perfiles de buen tiempo y tormenta respectivamente. Lo que se expone a continuación es de sobra conocido; sin embargo, el no tenerlo en mente durante el diseño, construcción y operación de obras marítimas exteriores ha ocasionado en nuestro país la erosión de las playas corriente abajo y la destrucción de casas y calles situadas en la orilla del mar.

Todas las costas se encuentran bajo un proceso de erosión, sedimentación o equilibrio dinámico.

Cuando se construyen obras en la costa, como puertos, comunicaciones a lagunas costeras, escolleras para garantizar la navega-

ción a la entrada de ríos y protecciones para las obras de toma de agua de enfriamiento de centrales termoeléctricas, se tiene la necesidad de construir estructuras que interrumpan el transporte litoral. Ya que con ellas se evita que la arena llegue a obstruir la entrada de las obras o de los canales de comunicación o navegación. Dependiendo de la magnitud de esas estructuras, también será la interrupción del transporte litoral, siendo por lo general mayor cuando se trata de puertos o de canales de navegación, ya que los rompeolas penetran a mayor distancia dentro del mar y sus extremos alcanzan mayores profundidades.

La interrupción del transporte litoral trae como consecuencia una modificación en el equilibrio de las playas adyacentes a las estructuras mencionadas. En la costa situada corriente arriba de dichas estructuras, se inicia un proceso de sedimentación, con el consiguiente avance hacia el mar de la línea de costa. Lo contrario ocurre en la costa situada corriente abajo, donde se inicia un proceso erosivo, ya que el oleaje tiene capacidad para transportar material que no llega del tramo corriente arriba. Dicho proceso ocasiona que la línea de costa se recorra hacia tierra adentro.

Este equilibrio provocado por las obras que el hombre construye para su beneficio es inocuo o ligeramente benéfico en la playa corriente arriba, la cual tiende a aumentar en ancho, pero sumamente dañino en la costa sujeta a erosión, sobre todo si a lo largo de ella, se han construido casas, hoteles, caminos y otras obras de infraestructura (drenaje, agua potable, líneas de energía eléctrica, etcétera).

Para evitar este posible daño y aminorar o evitar totalmente el efecto dañino mencionado, se recurre a pasar mecánicamente la arena depositada en la playa corriente arriba, hacia la playa co-

corriente abajo. Esto se logra mediante dragas, generalmente estacionarias ubicadas adecuadamente y que bombean agua con sedimento utilizando tuberías que comúnmente son colocadas bajo el fondo marino entre las dos escolleras o rompeolas. La arena dragada se descarga en la playa corriente abajo, donde la acción del oleaje se encarga de distribuir y acomodar dicho material.

En nuestro medio esta práctica no se lleva a cabo y por consiguiente después de unos años ocurren fallas cuantiosas en las construcciones localizadas frente a la costa sujeta a erosión, -- tal es el caso de la playa ubicada al Sur de Puerto Madero y la situada al poniente de la entrada del puerto de Yukalpeten. En estos ejemplos frente a esas playas existían casas de veraneo que fueron destruidas.

Ejemplo de una obra en la que la arena es transportada mecánicamente hacia la playa corriente abajo es la de la termoeléctrica Tijuana en Rosarito, B.C.N.

## C A P I T U L O   I I I

### OBRAS DE PROTECCION PLAYERA.

El movimiento de los sedimentos da lugar a estados de déficit, equilibrio o superávit respecto al volúmen de los mismos, existentes en las distintas zonas. En lugares donde se produzca una prolongada situación deficitaria, aparecerán erosiones en la línea de costa con efectos indeseables.

Desde el punto de vista ingenieril los problemas costeros se pueden agrupar en cuatro categorías:

- Estabilización o regeneración de la línea de costa;
- Protección de las zonas costeras interiores;
- Estabilización de desembocaduras;
- Protección de puertos o dársenas.

Las técnicas empleadas en la resolución de estos problemas -- han evolucionado con el transcurso del tiempo. En los últimos -- años el campo de la Ingeniería Costera se ha enriquecido notablemente con el intercambio de conocimientos y prácticas utilizadas -- en los distintos países. Las condiciones particulares de cada lugar han ido guiando a la técnica desarrollada en el mismo, hacia -- aspectos concretos cuya validez está circunscrita a los tipos de -- problemas presentados.

Ante el análisis de estos problemas costeros, el ingeniero de -- be tener en cuenta los siguientes conceptos:

a) La protección de la costa no implica necesariamente la de -- fensa de la misma, ya que a veces es conveniente tomar la iniciati -- va a la acción del oleaje mediante regeneraciones o mejoras del -- estado actual.

b) Es preferible acometer la resolución de problemas generales que hacerlo con los locales. Conviene tener una visión amplia que contemple zonas extensas de litoral.

c) Antes de tomar medida alguna es necesario analizar los efectos que su puesta en práctica puede causar en las zonas de mar adentro, tierra adentro y a un lado y otro de la orilla. Hay que evitar por todos los medios que la corrección de un problema en una zona genere con el tiempo situaciones negativas en zonas próximas.

d) Las costas y las playas representan un bien público de alto valor social y estético. Cualquier obra o actuación que se efectúe sobre ellas ha de tener una calidad con el ámbito que lo rodea, así como en lo ecológico (ecosistema).

### III.1.) CLASIFICACION DE LAS OBRAS DE PROTECCION.

Las obras de protección son aquellas que están destinadas a asegurar, estabilizar o proteger una costa, puerto, dársena o ganar el terreno al mar. A continuación se hace una clasificación detallada de estas obras de protección.

#### III.1.1.1) POR SU SECCION GEOMETRICA.

En este punto se hace referencia a la sección geométrica de las estructuras. Estas estructuras se pueden subdividir en obras de protección verticales, de talud y mixtas como se ve en la figura III.1.

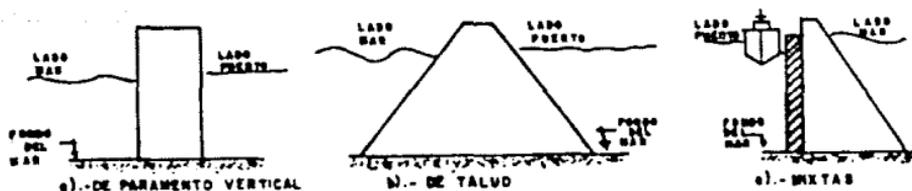


FIG. III.1.: EJEMPLOS DE LAS SECCIONES GEOMETRICAS DE LAS OBRAS DE PROTECCION.

Las obras de protección de paramento vertical son estructuras que sirven como muros de contención para proteger terrenos con problemas de erosión, no tienen la característica de disipar la energía del oleaje sino solamente reflejarla; también se utilizan estas construcciones para proteger terrenos ganados al mar en el caso de ser utilizados como rompeolas, son recomendables para grandes profundidades, Figura III.1.a.

Las obras de protección construidas a talud son paramentos básicamente disipadores de la energía del oleaje, ya que por su geometría son estructuras que rompen con facilidad esa energía. Estas tienen primordialmente el objetivo de abrigar las zonas portuarias a fin de permitir las maniobras y trabajos dentro de la zona protegida. Suelen ser estructuras también utilizadas para ganarle terrenos al mar o estabilizar la línea de playa, Figura III.1.b.

Este tipo de estructuras es el más utilizado en todo el mundo, dado que sus resultados son muy buenos y su construcción es menos

complicada que las otras secciones geométricas, sus talúdes serán menos o más tendidos, según sean las necesidades que se tengan en el sitio de su construcción.

Las obras de protección mixtas son estructuras que cumplen varias funciones como en el caso de estructuras que sirven para proteger una playa o zona portuaria de la energía del oleaje y además sirven para carga y descarga de embarcaciones. Son apropiadas para zonas de mar con poca profundidad, ya que los costos de construcción para grandes profundidades es muy elevado. Ver fig. III.1.6.

### III.1.2.) POR EL TIPO DE SU ESTRUCTURA.

En este sentido podemos clasificar a las obras de protección en tres grupos importantes que son: las de tipo rígido, las flexibles y las mixtas.

Las obras de protección rígidas son aquellas que se construyen con materiales de flexibilidad baja como concreto armado unido mediante juntas constructivas ya que sus volúmenes, en el caso de este tipo de construcciones, son bastante considerables; o en otros de los casos son construidas de concreto simple; estas tienen la desventaja de requerir para su construcción la zona de trabajo completamente seca libre de agua. Son obras que tienen como principal objetivo reflejar el oleaje y también por característica general son muros verticales. Estas estructuras también pueden utilizarse para proteger terrenos posteriores a estas, de la acción erosiva del oleaje o las corrientes. Se utilizan también para la protección de vías de comunicación y edificaciones cercanas al mar.

Las obras de protección flexibles son construidas generalmente de rocas o elementos artificiales (de concreto u otros). Estas construcciones tienen la ventaja de poder tolerar consolidaciones

Otro ejemplo de estas estructuras son como la que se muestra en la figura III.2.b. en la que la obra de protección cubre las funciones de disipar la energía del oleaje por medio del enrocamiento a talúd y en el otro lado hace la función de carga y descarga de embarcaciones utilizando un muro vertical rígido.

III.1.3.) POR EL TIPO DE MATERIAL DE CONSTRUCCION SE PUEDEN CLASIFICAR LAS OBRAS DE PROTECCION EN CONSTRUIDAS DE MADERA, CONCRETO, TABLA-ESTACAS, ENRUACALADO - DE ROCA O ARENA, DE ENROCAMIENTO, DE ELEMENTOS ARTIFICIALES, DE BOLSACRETO O BOLSA ROCA y MIXTAS.

El uso de un material en especial o la combinación de estos dependerá de la existencia en la zona aledaña a la obra, de los materiales requeridos, de los cuales dependerá el diseño de la misma, el costo de la obtención de los materiales o fabricación de los mismos será otro factor de suma importancia a tomarse en cuenta para la selección de los materiales de construcción ya que se tendrá que seleccionar el de costo más óptimo.

**Las estructuras de madera:** son regularmente utilizadas en las construcciones de pequeños murales y hacen el papel de muros de contención a fin de ganarle terreno al mar para alcanzar la profundidad deseada de diseño, a esta madera se le da un tratamiento previo a su uso a base de resinas a fin de darle una mayor vida útil y evitar su desgaste por la salinidad del agua y otros factores que afectan a este tipo de estructuras.

**Las estructuras de concreto armado o simple:** son ampliamente utilizadas ya que son estructuras que dan una gran duración, algunos usos de este tipo de estructuras son: en la estabilización de la línea de playa mediante malecones los cuales son un revestimiento de la playa a base de una cortina de concreto colado in-situ

o movimientos diferenciales sin pérdida de su solidez y de absorber las subpresiones hidrostáticas generadas por la acción del oleaje, además de que su principal objetivo es disipar la energía del oleaje, a diferencia de las estructuras rígidas. En el diseño de estas es necesario disponer de un sistema de filtro que evite la pérdida de material suelto sobre el que se asienta y la probable ruina de la obra. Estas estructuras se regularmente construidas con una sección transversal a talud.

Las obras de protección mixtas son una combinación de las mencionadas anteriormente y pueden consistir en una muralla vertical (o casi vertical) que reposa directamente, bien sobre el fondo del mar cuando la profundidad es poca y el terreno resistente o, más usual, sobre un enrocamiento cuya corona se encuentra cuando mucho al nivel de baja mar. La característica fundamental de estas estructuras es que las olas se reflejan sobre ellas en condición de pleamar y rompen contra ellas o contra el talud en condición de bajamar. Cuando el enrocamiento llegue hasta por arriba de la pleamar, dejará de tratarse de una estructura mixta para ser una estructura a talud con espaldón. Figura III.2.a.

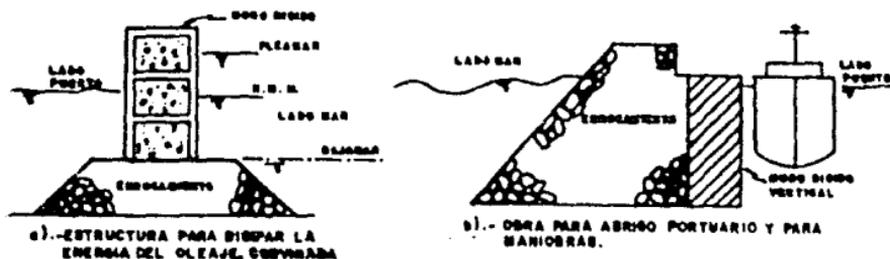


Fig. III.2.a) ROMPEOLAS MIXTOS.

como se ve en la figura III.3. Las obras de protección rígidas - son construidas básicamente a base de concreto también coladas in-situ.

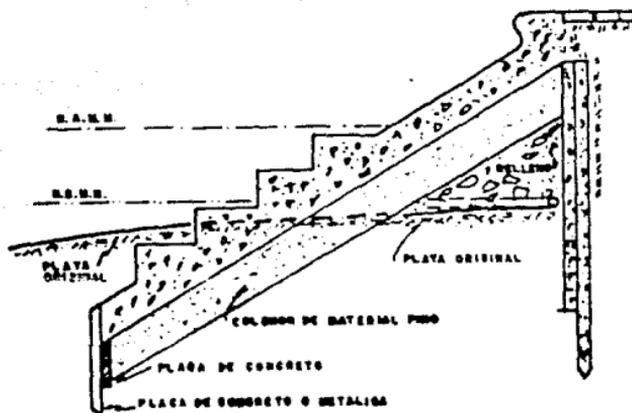


Fig. III.3.1 REVESTIMIENTO DE CONCRETO  
(Sección Transversal de un Malecón)

Las estructuras a base de tabla-estacas: son construcciones - básicamente utilizadas para ganarle terreno al mar y pueden ser estas ya sea de madera, concreto o acero, sirven como muros de contención para muelles paralelos a la línea de playa, etcétera, ver Figura III.4.

Las estructuras de protección a base de enhuacalado de rocas o arena: son construidas mediante un cajón hecho a base de concreto o madera y se llena con rocas o arena si es un muro vertical, - tendrá la función de reflejar la energía del oleaje o si es a tablas dispersará la energía del mismo suelen utilizarse para estabilizar la línea de playa o cuantificación del transporte litoral que

por ésta pasa, también tienen la función en algunos casos de evitar la erosión de las playas regularmente son construidas perpendiculares a la línea de playa. Ver Figura III.5.

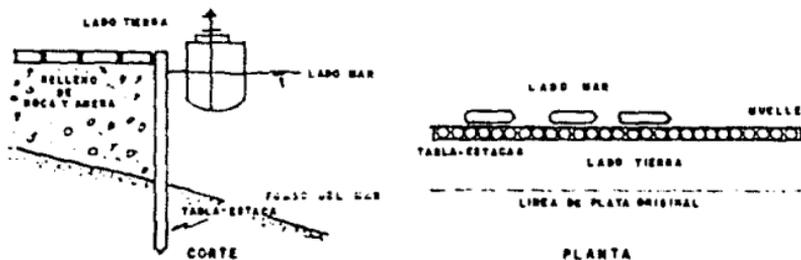


FIG. III.4.1 ROMPEOLAS DEL TIPO DE TABLA-ESTACAS

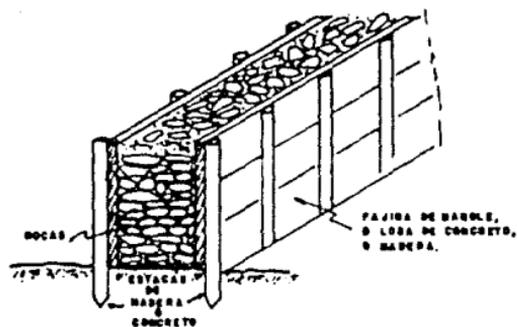


FIG. III.5.1 ENROCADADO DE ROCA.

Las obras de protección playera a base de roca: son una de -- las más importantes en su ramo, estas estructuras se disponen dentro del mar en forma de talud regularmente y se construyen en capas diferentes como se puede observar en la Figura III.6. A fin de no permitir el paso de material a través de la estructura, son utilizadas principalmente para disipar la energía del oleaje así como también son ampliamente utilizadas para la estabilización de la línea de playa o también para la cuantificación del arrastre litoral. Este tipo de estructuras será utilizado si en la zona existen yacimientos suficientes para dar la cantidad necesaria de roca y con el peso de diseño necesario y otras características, de lo contrario se deberá utilizar otro tipo de estructura como las que se mencionan a continuación.

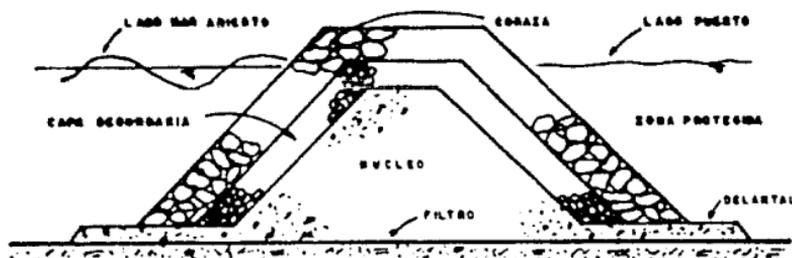
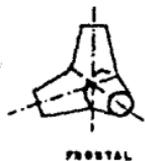


FIG. III.6.) SECCION TRANSVERSAL A TALUD DE UNA OBRA DE PROTECCION A BASE DE ROCAS.

Estructuras de elementos Artificiales: estos elementos son --



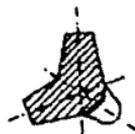
FRONTAL



PLANTA



PLANTA INFERIOR



SECCION A-A

## TETRAPODOS



PLANTA

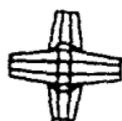


FRONTAL

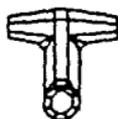


PLANTA INFERIOR

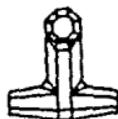
## CUBO MODIFICADO



PLANTA



FRONTAL



PERFIL

## DOLOS



PLANTA



SECCION A-A



ELEVACION

## TRIBARS

FIG. III.7.) ELEMENTOS ARTIFICIALES USADOS PARA LA CONSTRUCCION DE ESTRUCTURAS DE PROTECCION.

construidos a base de concreto simple y sus dimensiones responden a manuales ya establecidos por los fabricantes; su peso será de -- acuerdo a la necesidad que se requiera. Estas estructuras dan un índice de trabazón superior a las de roca y son utilizadas cuando se carece de rocas óptimas para la obra o que estas rocas no cumplen con las especificaciones del proyecto, como son el índice de trabazón, peso, cantidad, etcétera. Los elementos artificiales más comunes son: cubos modificados, tetrapodos, dolos y tribars. Como se muestra en la Figura III.7.

Estos tipos de elementos también son utilizados muy comunmente como parte de la capa superior de estructuras mixtas como se verá más adelante.

Otro tipo de obras de protección que cabe mencionar son las -- que se construyen a base de bolsacreto o bolsa roca Ver Figura -- III.8. Usado para obras provisionales por su poca duración en -- comparación con las construidas a base de roca o elementos artificiales, son obras que se realizan solamente para profundidades no muy grandes por su proceso constructivo y duración no son recomendables para grandes profundidades. La bolsacreto y la bolsa roca son elementos formados con una bolsa provista de válvulas especiales que permiten su llenado interior con mortero cemento arena y arena respectivamente una vez depositadas en el sitio. La bolsa -- está fabricada a base de filamentos de poliolefina, orientados técnicamente, soldados mediante un proceso especial a base de lámina de poliolefino extruida, del espesor y resistencia a la ruptura indicados y con la capacidad de metros cúbicos especificados en proyecto. -- La bolsa se reforzará con cintas de poliéster con un ancho y espesor indicados en proyecto, a todo lo largo de los extremos y al -- centro, adheriendo la cinta a la bolsa con un material específico y contará con bocas de cierre manual.

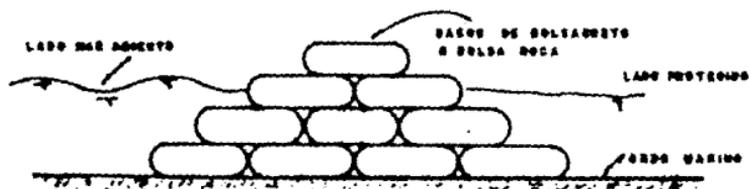


FIG III.8.) SECCION TRANSVERSAL DE UNA OBRA DE PROTECCION  
A BASE DE SOLBACRETO O BOLSA ROCA

Por último cabe mencionar a las obras de protección mixtas: - Que pueden ser combinaciones de las anteriormente mencionadas. En este tipo existe una gran variedad de estructuras de protección y con diferentes usos; un ejemplo de estas obras es la que se muestra en la figura III.9.

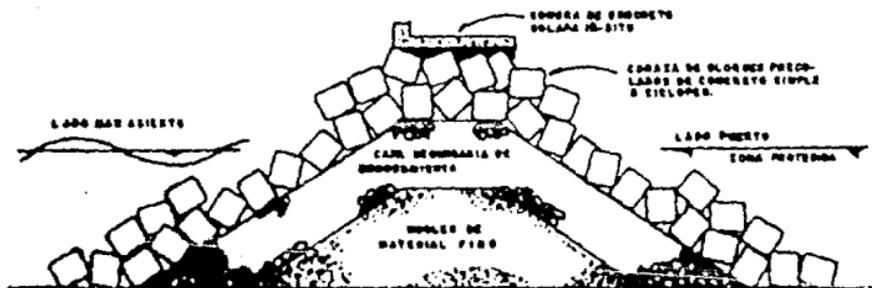


FIG. III.9.) SECCION TRANSVERSAL DE UNA OBRA DE PROTECCION MIXTA.

#### III.1.4.1 CLASIFICACION DE LAS OBRAS DE PROTECCION DE AGUERDO A LA FUNCION QUE DESEMPEÑAN.

En esta clasificación se mencionarán las más importantes y -- sus funciones, como son: las que disipan la energía del oleaje para protección de las zonas costeras, puertos o darsenas conocidas con el nombre de ROMPEOLAS; las de encausamiento y estabilización de desembocaduras fluviales conocidas como ESCOLLERAS y las de estabilización de la línea de playa y recuperación de las dunas lla-

## madras ESPIGONES.

**ROMPEOLAS:** Son obras que se oponen a la dirección del oleaje, y su función es crear al otro lado de la estructura, el área marítima abrigada óptima, que es el puerto, bahía o un atracadero; al mismo tiempo que el rompeolas impide el paso de las olas, también es posible que detenga el acarreo litoral, evitando azolvamiento en la entrada del puerto. Para propósitos de navegación se construyen para crear la calma suficiente en el área del puerto y por lo tanto proporcionan protección para lograr seguridad de atraque, operación y manejo de los barcos. Un rompeolas interpone una barrera litoral total en la parte de la zona litoral que se encuentra entre el extremo mar adentro del rompeolas y el límite de rotación del oleaje, durante el tiempo en que alcanza la capacidad de almacenamiento de la estructura y el material litoral empieza a parsarla naturalmente.

**ESCOLLERAS:** Una escollera es una estructura generalmente perpendicular a la costa que se prolonga dentro de un cuerpo de agua, para encausar y confinar una corriente o flujo de marea hacia un canal escogido, y prevenir o reducir azolves en el canal debido a los materiales litorales. Las escolleras generalmente deben disponerse de tal forma que el canal sea controlado en la posición y dirección correspondiente con el flujo natural de la marea. Su separación deberá ser lo suficientemente grande como para que las escolleras no vayan a estar sujetas a socavaciones y puedan admitir libremente el acceso de las mareas sin originar una reducción en el prisma de marea. Una escollera interpone una barrera litoral total entre aquella parte de la zona litoral que se encuentra al extremo mar adentro de la estructura y el límite de rotación del oleaje. Las escolleras generalmente terminan en una profundidad igual a la correspondiente del proyecto del canal. Tomando en consideración lo anterior, se presenta un acrecentamiento de la playa aca--

erreo arriba de la estructura con un valor igual al del transporte litoral, y una erosión acarreo abajo del mismo volúmen. La cantidad acumulada depende de la longitud de la escollera y del ángulo con el cual la resultante del oleaje actúa sobre la playa.

**ESPIGONES:** Un espigón es una estructura de protección costera diseñada para dar lugar o conservar una playa protegida deteniendo el acarreo litoral o evitando la erosión en una playa existente. Los espigones son generalmente perpendiculares a la costa y se prolongan desde un punto tierra adentro de posible regresión de la línea de playa, hasta el agua con una longitud suficiente para estabilizar la playa. Son relativamente angostos y pueden variar en longitud desde menos de 100 pies hasta varios cientos. Estos espigones pueden clasificarse como permeables o impermeables, altos, bajos y fijos o ajustables.

Los espigones difieren de las escolleras estructural y funcionalmente. En general, las escolleras son de mayor longitud con elementos más pesados, y principalmente se emplean para dirigir y confinar una corriente o flujo de marea en la desembocadura de un río o un acceso de marea a una bahía y evitar que el acarreo litoral azolve el canal.

Un espigón interpone una barrera total o parcial al acarreo litoral que se encuentra en movimiento entre el extremo mar adentro del espigón y el límite de roción de oleaje. La extensión hasta la cual el transporte litoral es modificado depende de la altura, longitud y permeabilidad del espigón. La forma en que un espigón altera el transporte litoral es aproximadamente igual, cuando opera, individualmente que cuando opera dentro de un sistema de espigones, siempre y cuando el espaciamento entre éstos sea el adecuado.

**MIXTAS:** Las estructuras mixtas son una combinación de las mencionadas en este inciso, o son estructuras de un tipo para realizar funciones diferentes, de acuerdo a como las necesidades de diseño lo requieran y los alcances de presupuesto lo permitan, así como también los procesos constructivos se adecuen.

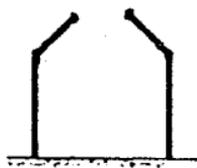
### III.1.5.1) CLASIFICACION DE LAS OBRAS DE PROTECCION DE ACUERDO A SU DISPOSICION.

La disposición de las obras de protección es básicamente de acuerdo a las necesidades de diseño de las estructuras, ya que las condiciones del mar son sumamente complejas, razón por la cual cada obra se proyecta de acuerdo a las condiciones óptimas de trabajo y de acuerdo a las condiciones marinas y/o pluviales que así lo permitan. De acuerdo a lo anterior se podrá concluir que existe una infinidad de disposiciones de las obras de protección en el mar, en la figura III.10. se pueden ver algunas formas de la disposición de estas obras que en general son; paralelas a la costa, ligadas a la costa y mixtas.

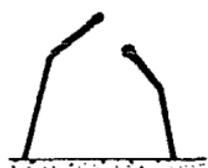
### III.1.6.1) CLASIFICACION DE LAS OBRAS DE PROTECCION DE ACUERDO A LA FORMA DE DISIPAR LA ENERGIA DEL OLEAJE.

Actualmente se han creado diferentes estructuras para disipar la energía del oleaje y en una gran variedad; algunas que producen una disminución parcial en la altura de ola incidente mediante una reflexión parcial y otras que se oponen completamente al paso del oleaje mediante paramentos emergidos, verticales a talud o mixtos.

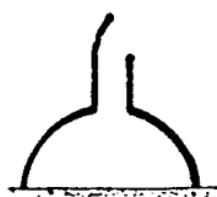
Dentro de esta clasificación las más usuales son: las estructuras emergidas, las flotantes, las neumáticas e hidráulicas y las sumergidas.



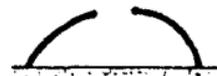
SIMETRICO PARALELO



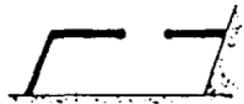
TRAPEZOIDAL SIMETRICO



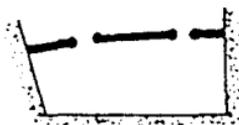
CIRCULAR ELIPTICO SIMETRICO



CIRCULAR O ELIPTICO SIMETRICO



PARALELO A LA COSTA EN PROLONGACION.



SIMETRICO CON DOBLE ENTRADA



PARALELO A LA COSTA

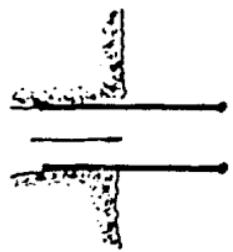


OCULARES EN SIMETRICO

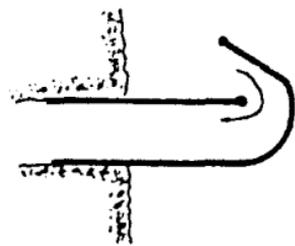


SIMETRICO PARALELO

A.3 DISPOSICIONES EN PLANTA MAS COMUNES DE LOS ROMPEOLAS.



ESCALLERA PERPENDICULAR A LA COSTA

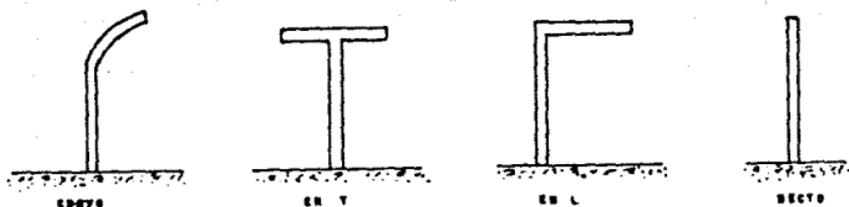


ESCALLERA TIPO PARA OBRA DE TOMA DE UNA PLANTA GENERADORA DE ENERGIA ELECTRICA



ESCALLERA TIPO SIMETRICA A LA COSTA

B.1 DISPOSICION EN PLANTA DE LAS ESCALLERAS MAS COMUNES.



C.) DISPOSICION EN PLANTA DE LOS ESPIGONES MAS USUALES.

FIG. III.10.) ALGUNOS EJEMPLOS DE LA DISPOSICION DE LOS ESPIGONES.

Las estructuras emergidas pueden ser; como se dijo anteriormente, de paramento vertical que se encargan de reflejar totalmente la energía del oleaje, las de talud que impiden por completo el paso de la energía del oleaje pero además disipan gran parte de esta energía mediante el lamido de las olas con la pared a talud expuesta al rozamiento del agua.

Las flotantes son estructuras que producen una disminución parcial de la altura de la ola pero que además permiten el flujo de agua por su parte inferior como se ve en la figura III.11.

Las neumáticas e hidráulicas son obras en las que el amortiguamiento del oleaje se logra mediante dispositivos especiales que inyectan agua o aire a presión originando una gran turbulencia que disipa en parte la energía del oleaje Ver figura III.12.

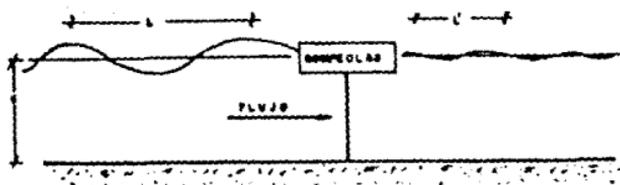


FIG. III.11.1 ROMPEOLAS FLOTANTE



FIG. III.12.1 ROMPEOLAS PNEUMÁTICO E HIDRÁULICO.

Por último se hace mención de aquellas obras que se construyen **SUMERGIDAS** las cuales cumplen la misma función que las estructuras flotantes o hidráulicas y neumáticas pero además funcionan como trampas de arena en playas en las que presentan problemas de erosión, no siendo muy recomendables en zonas para navegación por los daños que podrían provocar a las embarcaciones por choque con estas. Estas pueden ser de tipo rígido o a talud como se muestra en la Fig. III.13.

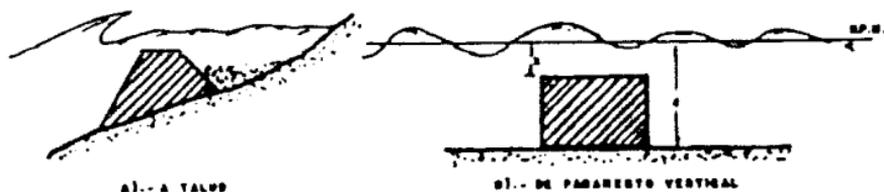


Fig. III.13.) ROMPEOLAS SUMERGIDO

### III.2.) FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LAS OBRAS DE PROTECCION PLAYERA.

En este punto se tratarán en términos generales los diferentes factores que intervienen en el diseño y construcción de las obras de protección playera.

El propósito de este tipo de protecciones es defender la línea de costa o los recintos portuarios contra los daños ocasionados por el oleaje y el transporte litoral. El tipo y forma dependerá de las condiciones locales y de los materiales aprovechables en el lugar. Los muros pueden ser verticales o inclinados, hechos de mampostería, concreto, tablaestacas, enrocamiento, etcétera. Ver inciso III.1. En cada caso es necesario la ubicación, longitud y altura de las obras.

En general, cuando se trata de proteger una playa, se construye la obra en la parte seca si hay necesidad de corregir el alineamiento de la costa ganando terrenos al mar es necesario construir las obras de protección en la zona cubierta por el agua.

Las obras de protección marginales defienden sólo la zona que cubren, por lo que su longitud será igual a la zona por defender. En los extremos de la obra es necesario proteger adicionalmente hacia el interior. La altura será de acuerdo a la necesidad existente ya sea una obra sumergida o una obra con altura que no permita el paso de las olas.

Para determinar el valor conveniente para cada caso habrá que tomar en cuenta la forma de la estructura (vertical o de talud), la rugosidad, la profundidad en el pie de la obra y las características de las olas. En la actualidad no se conocen en forma precisa las relaciones entre los factores que intervienen.

En las obras longitudinales de defensa de costas hay que evitar que el pie de la obra sea erosionado y esto dependerá del tipo de estructura utilizado, de las características de la ola incidente y de la resistencia del material playero en que se cimenta la obra.

Si la obra es de enrocamiento habrá que determinar el peso de las rocas que formen la parte de la protección en contacto con el oleaje y conocer el talud de equilibrio; como se presentan acorados y asentamientos, es conveniente colocar más roca de la necesaria para absorber esos movimientos.

Si la obra es un muro vertical, se puede defender al pie de la obra colocando roca suelta de tamaño adecuado.

Si la defensa es un muro de gravedad, deberá cimentarse a una profundidad tal, abajo de la línea de playa, igual a la máxima altura de ola no rota que pueda alcanzar el muro.

Un proceso de conservar las playas en caso de erosión o estabilización consiste en construir espigones que retengan a las arenas, dispuestos en forma adecuada. Este procedimiento debe tomarse con ciertas reservas y utilizarlo sólo cuando se tenga un conocimiento más o menos aproximado del régimen de la costa, ya que al formarse una barrera al paso de las arenas, el abastecimiento de material del lado opuesto a la marcha de los acarreos se suspende, originando fuertes erosiones, que en ocasiones son muy perjudiciales. Cuando se tienen playas angostas, pobres en material, es más peligroso el uso de espigones. Esto no quiere decir que en múltiples casos la construcción de espigones no sea la solución adecuada para resolver problemas de regularización de playas.

Un factor importante que debe tomarse en consideración es el

costo de los materiales aprovechables para la construcción, ya que en último término lo que decide su empleo es el costo de las obras de protección, comparado con los desperfectos que se ocasionarían si no se construyen.

Para desarrollar el estudio general y definir las obras necesarias para mejorar una playa es necesario conocer:

- a) La dirección predominante del transporte litoral.
- b) El régimen de la costa en un ciclo anual, conociendo la energía de la ola incidente y de su componente tangencial en cada mes, para determinar y estimar las zona de depósito y de erosión, cuantificando, en forma relativa respecto a diversos puntos de la playa en estudio.
- c) Observaciones comparativas de las playas para épocas diversas (varios años) por medio de fotografías aéreas y si es posible, en las mismas épocas disponer de levantamientos hidrográficos de la zona.
- d) La granulometría y densidad del material playero, ya que si hay necesidad de nutrir la playa con material, éste deberá ser de características semejantes al existente. Si se coloca material más fino se va hacia el mar hasta la zona que le corresponde por su tamaño. Si es material más grueso la playa cambiará dependiente, alterando su régimen general.
- e) Las mareas existentes en la zona; ya que la variación del nivel del agua afecta al régimen de la costa.

A continuación se mencionan los factores más importantes que intervienen en el diseño de las obras de protección rígidas y flexibles, que en general son: muros verticales, rompeolas, escollos y espigones.

### III.2.1.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE MUROS VERTICALES.

Los muros se pueden considerar de dos tipos: diques y muros de contención. En general, un dique es una estructura masiva diseñada para resistir la fuerza total de una ola, además de servir como una obra de defensa para reducir la erosión y retroceso de una playa; un muro de contención es de menor tamaño que el dique y sirve para proteger un terraplén. Las fuerzas que produce el oleaje sobre ellas son idénticas y su valor depende de dos condiciones, - una es si la ola no es rompiente o rompiente sobre la estructura y la otra si parte de la ola pasa o no sobre el muro.

#### Empuje sobre muros.

Si la profundidad  $d$  del agua al pie de la estructura es mayor que  $1.3H$ , la ola incidente forma un sistema de ondas estacionarias, que provoca fluctuaciones de presión. Si por el contrario la profundidad es menor de  $1.3H$  el oleaje rompe sobre la estructura o -- mar adentro ( $H$  es la altura de la ola incidente).

El empuje ejercido sobre un muro por la ola no rompiente es - generalmente de tipo hidrostático con una ligera modificación de - caracter dinámico adicional que resulta mucho más grande que el -- hidrostático\*.

#### Fuerza sobre un muro vertical provocada por oleaje no rompiente.

Uno de los métodos para determinar la distribución de presiones a lo alto de un muro vertical fue propuesto por Saintflow quien partió de la teoría de la onda trocoidal. Los resultados de este método coinciden con valores experimentales cuando se cumple que -

\* Ver "Manual de Hidráulica Marítima Elemental" SEMEX, México, 1962.

$$0.1 < d/L < 0.2.$$

Quando hay una pared o muro con el mar de un lado y agua tranquila del otro hay que restar del empuje total de la onda, el empuje hidrostático del agua en reposo que está del lado protegido. - Como distribución de presiones que muestra la zona sombreada de la fig. 3.14. Las presiones  $P_{cf}$  y  $P_{cs}$  indicadas en la misma figura, cuando la cresta está frente al muro son:

$$P_{cs} = \gamma \left( \frac{H}{\cosh(Kd)} + d \right) \left( \frac{H + \Delta y}{\gamma_c} \right) \dots\dots\dots 1$$

$$P_{cf} = \frac{\gamma H}{\cosh(Kd)} \dots\dots\dots 2$$

$$\eta_c = H + y + d \dots\dots\dots 3$$

Donde:  $Kd$  = Factor de refracción del oleaje.

$P_{cs}$  = Presión de la cresta al nivel de reposo del mar.

$P_{cf}$  = Presión de la cresta en el fondo.

$\gamma$  = Peso específico del agua del mar.

$H$  = Altura de la ola incidente.

$\Delta y$  = Sobreelevación del nivel medio de la onda estacionaria sobre el nivel medio del mar en reposo, se calcula con la ecuación:

$$d_T = \frac{M_T}{F_T} \dots\dots\dots 4$$

Por otra parte cuando el valle está frente al muro se cumple:

$$P_{vs} = \gamma (H - \Delta y) \dots\dots\dots 5$$

$$P_{vf} = \frac{\gamma H}{\cosh(Kd)} \dots\dots\dots 6$$

Donde:

$P_{vs}$  = Presión del valle al nivel de reposo del mar.

$P_{vf}$  = Presión del valle en el fondo.

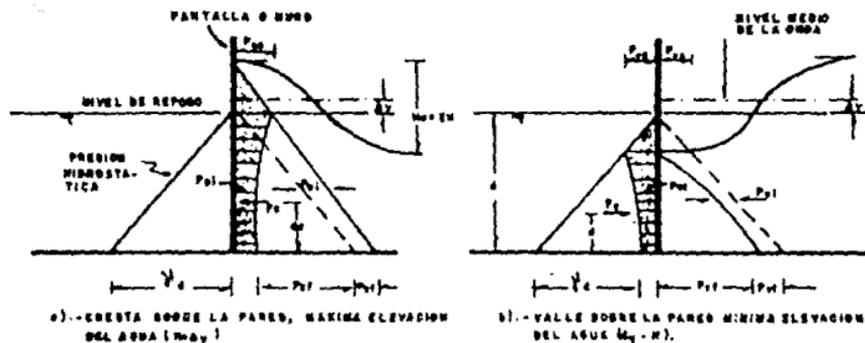


FIG. 3.14.) DISTRIBUCION DE PRESION a) MAXIMA Y b) MINIMA EJERCIDA POR UNA ONDA SOBRE UN MURO VERTICAL.

Para aplicar las ecuaciones anteriores se supone que el muro está desplantado sobre el fondo del terreno, aunque en ocasiones no ocurre así y el muro está sobre un terraplén de piedra cuya presencia afecta la acción de la ola (Figura 3.15.). Para considerar esta última colocación del muro, Sainflou propone:

a) Para un terraplén con fuerte pendiente que eleva el muro por encima del fondo del terreno, en el cálculo de la fuerza y el momento se debe utilizar el mayor tirante de agua medido con respecto al fondo del terreno; es decir  $d$  (Figura 3.15a).

b) Para un terraplén con pendiente suave que protege al muro conviene emplear el tirante del agua que se mide hasta la base del muro  $d_m$ . (Figura 3.15b).

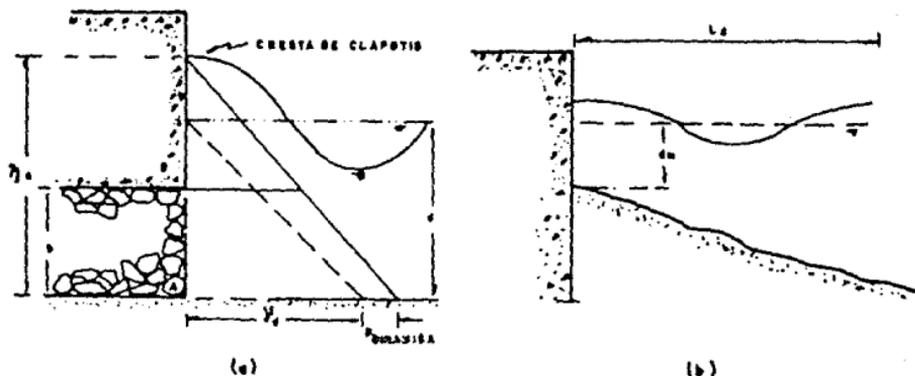


FIG.3.15.) MUROS VERTICALES MONTADOS SOBRE UN TERRAPLEN DE PIEDRA O ENTERRADO DENTRO DEL FONDO.

Fuerza sobre un muro vertical de baja altura provocada por oleaje no rompiente.

Al reducir la altura del muro se reduce el costo de la obra - pero existe el paso del agua del mar hacia la zona protegida. Esto último se puede permitir cuando el muro no sirve para atraque - de embarcaciones, ni llega a estar seco el lado interior.

Fuerza provocada por oleaje rompiente sobre un muro vertical.

El oleaje al romper sobre un muro, provoca una presión de choque sobre él y el tiempo que actúa sobre ésta es muy pequeño. Numerosas investigaciones en laboratorio y mediciones de campo sobre la magnitud de las presiones indican una gran variedad de valores,

los cuales dependen generalmente de la sensibilidad y respuesta de los instrumentos de medición empleados.

La ecuación propuesta por Miniken (ec.7) fue originalmente derivada para una estructura compuesta de concreto y soportada por una estructura de piedra y el valor máximo de la presión ocurre en el nivel de reposo. Generalmente esta ecuación da valores conservadores de la presión dinámica pero sigue siendo muy utilizada en problemas de ingeniería del mar.

$$P_m = 101 \sqrt{\frac{H_r}{L_D} \frac{d}{D}} (D + d) \quad \dots\dots\dots 7$$

$H_r$  = Altura de la ola rompiente

$D$  = Profundidad del fondo a una distancia de una longitud de la ola medida desde la pared.

$L_D$  = Longitud de la onda a la profundidad  $D$ .

$d$  = Profundidad entre el nivel medio del mar y el desplante del muro.

Denny hizo un análisis estadístico con datos de la presión de choque sobre muros, y propuso para calcular ésta, las expresiones:

$$\frac{P'_{\text{máx}}}{\gamma H_o} = 26 \quad \dots\dots\dots 8$$

$$\frac{P''_{\text{máx}}}{\gamma H_o} = 110 \quad \dots\dots\dots 9$$

Donde:

$P'_{\text{máx}}$  = Presión máxima de choque que más frecuentemente ocurre.

$H_o$  = Altura de la ola en aguas profundas.

$P''_{\text{máx}}$  = Presión máxima de choque que puede esperarse.

Fuerza sobre un muro de baja altura provocada por oleaje rompiente.

Se deben obtener los empujes sobre el muro combinando diferentes alturas de marea y oleaje, y diseñar la estructura para la condición más desfavorable.

### III.2.2.) FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE ROMPEOLAS Y ESCOLLERAS A TALUD.

La función de una escollera o rompeolas, de rocas o elementos prefabricados (Ver parte III.1.3.); es disipar la energía de la ola al incidir sobre la pendiente de la estructura, o bien reflejar esa onda impidiendo que continúe con esa misma dirección de avance.

La sección transversal está constituida por un núcleo interno de material fino protegido por una capa secundaria y por la coraza (Ver figura 3.6.); la capa secundaria está constituida por roca y la coraza por elementos de roca o elementos prefabricados (Ver figura 3.7. y 3.9.). Estas estructuras requieren gran cantidad de material y en caso de daños generalmente pueden ser fácilmente reparadas.

Cuando el oleaje llega a la estructura y rompe sobre el talud del lado expuesto, una parte de la masa de agua cae sobre él y provoca una fuerza negativa sobre los elementos que forman la sección; esta fuerza hace que se reduzca el peso efectivo de los elementos que resisten la acción del oleaje. En la figura 3.15. se muestra un esquema que indica lo anterior y en ella  $F$ , es la fuerza que provoca que el elemento se deslice de su lugar y es igual a:

$$F = k' \gamma A H$$

..... 10

Donde:

A = Área del elemento proyectado en la Dirección que actúa y se puede considerar igual a:

$$A = \left( \frac{W}{\gamma_s} \right)^{2/3} \dots\dots\dots 11$$

W = Peso del elemento

k = Constante

$\gamma_s$  = Peso específico

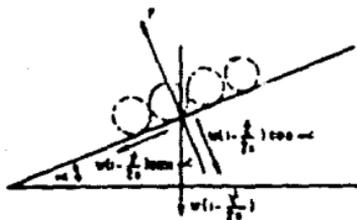


FIG. 3.16.) CONDICIONES DE ESTABILIDAD PARA DETERMINAR EL PESO DE UN ELEMENTO SOBRE UN ROMPEOLAS O UNA ESCOLLERA, SEGUN HORIKAWA.

Sustituyendo el valor de la ecuación 10 en la 11 se obtiene:

$$F = k' \gamma H \left( \frac{W}{\gamma_s} \right)^{2/3} \dots\dots\dots 12$$

Donde:  $k'$  es otra constante

La condición de estabilidad en la dirección de deslizamiento del elemento (figura 3.16.) está dada por:

$$W \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s} \right) \sin \alpha = \mu \left[ W \left( 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s} \right) \cos \alpha - k' \gamma H \left( \frac{W}{\gamma_s} \right)^{2/3} \right] \dots\dots\dots 13$$

Donde:

$\alpha$  = Angulo que forma la pared inclinada de la sección con la horizontal (fig. 3.16) en grados.

$\mu$  = Coeficiente de fricción.

El segundo término de la ecuación 13 se debe a la fuerza de fricción, que es igual a  $(\mu N)$  y  $N$  se obtiene en función de los componentes de peso y de  $F$  en la dirección de  $F$ . Despejando el valor de  $w$  de la ecuación 13 se tiene:

$$w = \frac{K (\mu)^3 \gamma_s (H)^3}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)^3 (\mu \cos \alpha - \text{sen} \alpha)} \quad \dots\dots\dots 14$$

Donde  $K$  es igual a  $(k')^3$  y es una constante que se determina experimentalmente.

De pruebas realizadas en laboratorio, Hudson encontró que la ecuación 14 da resultados satisfactorios para ángulos pequeños y rocas colocadas a volteo, aunque debe tomarse con reservas para ángulos grandes generalmente se usan cuando se utilizan elementos prefabricados como es el caso de la pared inclinada de la estructura y de la forma del elemento con que es construida; los valores aproximados para el coeficiente  $\mu$  son muy difíciles de obtener.

Hudson propone una fórmula de estabilidad para el peso de los elementos aplicable a la condición de no dañes en la estructura y que la ola no pase sobre ella y está dada por la ecuación 15. Dicha ecuación ha sido probada a través de múltiples ensayos en laboratorio y da un valor razonable del peso de los elementos. El parámetro  $K_0$  se obtiene de tablas<sup>1</sup> y es seleccionado en función del tipo de elemento, pendiente del talud, forma de colocación, tipo de oleaje rompiente o no rompiente, grado de daño aceptado.

<sup>1</sup> Selección del coeficiente de estabilidad  $K_0$ . Ver el Manual de Diseño de Obras Civiles Tomo A-2.13. Hidráulica Marítima Primera Parte, pp.162.

$$w = \frac{\gamma_s H^3}{K_D (Ss - 1)^3 \cot. \theta} \dots\dots\dots 15$$

Donde:

- w = Peso del elemento de una capa primaria o --  
coraza, en Kgf.
- $\gamma_s$  = Peso específico del elemento que va a for--  
mar la coraza, en Kgf/m<sup>3</sup>.
- Ss = Densidad de sólidos, igual a  $\gamma_s/\gamma$ , donde  $\gamma$   
es el peso específico del agua en el cual --  
constará inmersa la escollera, adimensional
- H = Altura de la ola de diseño frente a una sec--  
ción o tramo de escollera, en m. Se traba--  
ja con la ola significativa.
- $\theta$  = Angulo de talud de la estructura con respec--  
to a la horizontal, en grados.
- $K_D$  = Coeficiente de estabilidad adimensional.

Para el oleaje real se ha encontrado que la altura de la ola significativa ( $H_{1/3}$ ) es el valor que debe utilizarse en la ecuación 15. En esta ecuación se observa que el peso del elemento, se incrementa rápidamente al cambiar el valor de H ya que esta elevado a la tercera potencia.

En la ecuación 15 la influencia del período o longitud de la ola no se ha incluido, ya que experimentalmente se ha visto que los daños sobre la estructura son principalmente función de la altura de la ola.

#### ESTABILIDAD

La estabilidad de los elementos está tomada en cuenta al calcular el peso de ellos con la ecuación 15 y es función del peso específico del que estén hechos<sup>2</sup> (Ver figura 3.7.)

<sup>2</sup> Ver U.S. Army "Shore Protection Manual (Vol. 1, 11, III)", U.S. Corps. of Engineers, Coastal Engineering Research Center (CERC), 1977.

También depende de su ubicación en la estructura ya que los que están colocados en el morro tienen un peso mayor que los que están en el tronco, debido a que el morro es la parte de la estructura que recibe el oleaje más fuerte y por ambos lados (zona protegida y mar abierto).

La resistencia a la fuerza hidrodinámica es desarrollada por la trabazón entre los elementos, la cual depende de la forma, tamaño y colocación de ellos.

En el diseño de una escollera y una vez que se ha definido -- una sección, es necesario analizar la estabilidad del conjunto estructura-cimentación tomando en cuenta las propiedades mecánicas de la arena o material en que se apoya la obra.

La porosidad en la coraza y en la capa secundaria, construida por rocas varía entre el 33 y 35% y depende de la forma y colocación de los elementos. Si la porosidad es baja se incrementan la reflexión y el alcance de la ola (run-up). Cuando se utilizan elementos prefabricados, la porosidad llega a alcanzar valores hasta de 63%.

La pendiente usual de los taludes de la estructura varía entre 1.5:1 y 3:1; una pendiente muy tendida aumenta la estabilidad de los elementos pero se incrementan los costos ya que se necesita una mayor cantidad de elementos.

El grado de daños usualmente se define como un porcentaje calculado a partir del número de elementos desplazados entre la corona de la estructura hasta un tirante de agua, medido a partir del nivel de reposo del mar, igual a la vez de la altura de la ola. Si se acepta, por ejemplo, entre 30 y 40% de daños para la ola de diseño, se disminuye el peso de los elementos de la coraza. No obstante -

debe tenerse cuidado de que el daño no pase a las otras capas y que ellas no puedan resistir el oleaje de diseño. También el porcentaje de daños depende del costo inicial contra los costos de mantenimiento y de riesgo permisible en las zonas protegidas por la estructura.

### III.2.3.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL DISEÑO DE ESPIGONES A TALUD.

Los espigones sirven para proteger playas contra la acción erosiva de las corrientes litorales y del oleaje. Con ellos se pueden estabilizar playas, ya sea para protección de la costa o para atractivo turístico (Ver parte III.1.4.).

Los espigones son pequeñas barreras que se construyen por lo general perpendiculares a la costa y van desde el pie de las dunas hasta una batimétrica entre -2.0 y -4.0 m. Otros se construyen formando un ángulo con la línea de costa, cuando el oleaje reinante y dominante generalmente llega de una sola dirección. También se construyen separados de la costa y paralelos a ella desplantándolos a una profundidad entre -2.0 y -4.0 m. con lo que se tiende a formar un tómbolo.

Los espigones perpendiculares a la línea de costa no protegen en forma definitiva a una playa contra la erosión, ya que un fuerte oleaje paralelo a la costa puede mover la arena de la playa contra la erosión, ya que un fuerte oleaje paralelo a la costa puede mover la arena de la playa y ponerla en la zona de rompiente. Una protección más permanente la producen los espigones separados y paralelos a la costa; sin embargo éstos últimos son mucho más costosos y su reparación y mantenimiento es más difícil. La línea de playa entre espigones tiende a alinearse con los frentes de onda. En la figura 3.17 se muestra la configuración general esperada de

la línea de playa para un sistema de dos o más espigones. Esto es considerando un transporte litoral y un oleaje permanente de una sola dirección en la figura 3.17.  $\alpha$  es el ángulo que forman las ortogonales con respecto a la dirección de los espigones.

Las dimensiones de los espigones dependen de las fuerzas del oleaje que van a resistir, tipo de espigón, materiales con los cuales se construirá y de los métodos de construcción que se empleen; todos estos factores quedan bajo la consideración del diseño estructural. Por otra parte la longitud, perfil y espaciamiento entre espigones se obtienen del análisis del funcionamiento del conjunto tomando en cuenta, direcciones, volúmenes del transporte litoral a lo largo del año.

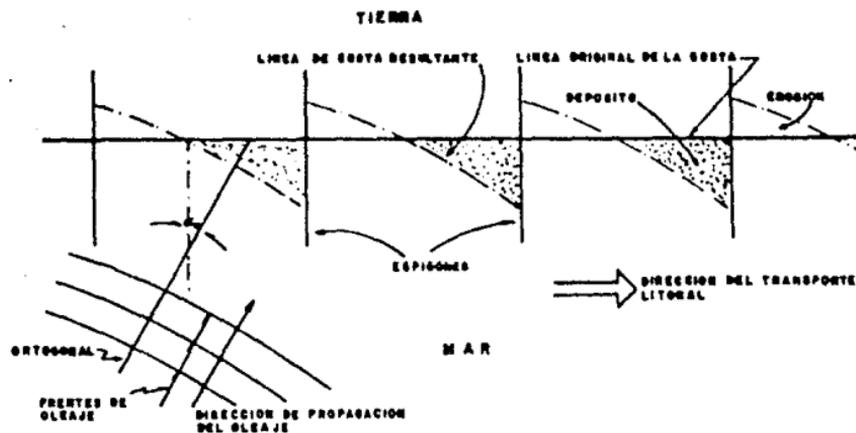


FIG. 3.17.) MODIFICACIONES QUE SUFRE LA LÍNEA DE COSTA POR LA PRESENCIA DE UN SISTEMA DE ESPIGONES.

Algunas recomendaciones importantes para el diseño de espigones son las que se mencionan a continuación:

**a) Perfil-Altura y Longitud del espigón.**

Para propósitos de diseño funcional, se deben considerar tres secciones o partes i) tramo horizontal en la costa (berma), ii) tramo intermedio con pendiente y iii) tramo exterior en el mar, figura III.18.

**b) Espaciamiento entre espigones.**

El espaciamiento entre espigones es función de su longitud -- dentro del mar (longitud de trabajo) y se mide desde la línea de costa para el nivel de pleamar media superior hasta el extremo o morro del espigón, figura III.18.

**c) Tamaño de los elementos que forman el espigón.**

En este punto solo se tratan los espigones construidos a base de una coraza de roca o de elementos prefabricados. El criterio de diseño es enteramente similar al indicado para las escolleras y rompeolas.

**d) Erosión.**

En una protección con espigones se presentan varias erosiones que conviene observar para evitarlas o dar mantenimiento oportuno a los espigones.

**III.2.4.) FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA CONSTRUCCION DE LAS OBRAS DE PROTECCION A TALUD.**

La forma de construcción de una obra de protección implica el transporte de los materiales para su vertido al mar; en este procedimiento siempre será muy importante tener un buen control topográfico sobre la colocación de acuerdo a las líneas de proyecto, sien-

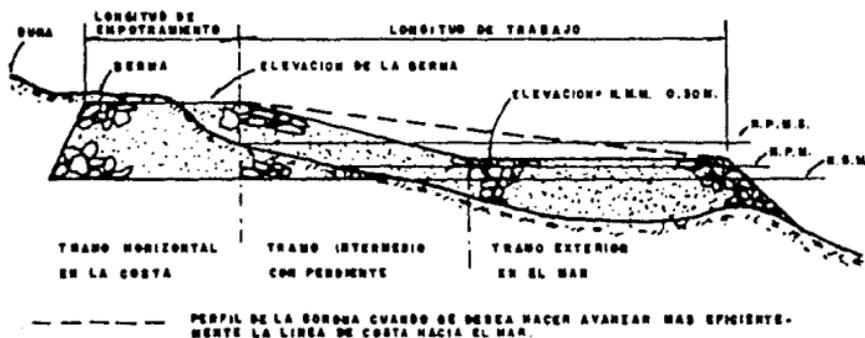


FIG. III.18.) PERFIL DE UN ESPIGON FORMADO CON ENROCAMIENTO.

pre que existan impresiones esta debe de ser parada.

Se puede decir que en general 3 son las formas de construcción de obras de protección a talud.

- Con equipo rodante.
- Con equipo flotante
- Con una combinación de ambos.

a) Con equipo rodante.

Todo el material es transportado sobre la corona de la obra - por medio de camión de volteo, yucle o tren. (La corona no es su- mergida). El material es vertido directamente (núcleo) o colocado por medio de una grúa (coraza). Si se coloca una grúa sobre la -- cresta del rompeolas, su seguridad debe ser garantizada, aún duran- te tormentas repentinas.

Algunas veces, el núcleo y la parte inferior de la coraza se construyen primero ya que el transporte es más fácil sobre el material relativamente fino del núcleo. Finalmente es colocada la coraza cuando la grúa es movida al final de los trabajos.

**b) Con equipo flotante.**

El transporte de grandes cantidades de material puede ser hecho económicamente con equipo flotante, para lo cual son utilizados diferentes tipos de barcazas, difiriendo solo por el método de vertido:

vertido por el fondo

vertido por inclinación de la barcaza

vertido lateral.

Los problemas mayores del transporte con equipo flotante son:

- Condiciones del tiempo (oleaje, niebla, etcétera).
- Posicionamiento.
- Calado.

En general, debido a su calado, las barcazas pueden ser usadas únicamente para las partes de la obra de protección que estén a más de 4 metros de profundidad.

La parte superior puede ser construida con la ayuda de grúas sobre barcazas. A menudo la parte superior del rompeolas es construida con equipo rodante. Se deberá poner especial atención a la posibilidad de usar plataformas sobre zancos y sobre los cuales -- van montadas las grúas.

**c) Con la combinación de ambos.**

En el caso de que equipos rodante y flotante sean usados, generalmente las capas filtro y las partes bajas en el núcleo son -- construidas con equipo flotante.

Para la capa superior se puede combinar:

- Transporte flotante más grúa sobre el rompeolas.
- Transporte rodante más grúa flotante o grúa sobre zancos.
- Transporte rodante más grúa sobre el rompeolas.

Cuando el núcleo del rompeolas es sumergido, algunas veces -- son usados elementos prefabricados para la corona con el objeto de crear una superficie de rodamiento segura.

## C A P I T U L O   I V

### PROBLEMATICA DE LA EFOSION PLAYERA EN PROGRESO, YUKALPETEN, CHELEM Y CHUBURNA YUCATAN

El Estado de Yucatán cuenta con una gran plataforma continental con playas extendidas y escasa profundidad, estas características contribuyen a generar una rica y variada fauna marina, en la cual destacan las especies de escama, a consecuencia de esto la pesca en el estado es una de las actividades mayormente ejercidas por gente de la costa, representando una actividad económicamente importante.

Debido al gran potencial pesquero, con que cuentan las costas Yucatecas, se hace necesario aprovechar al máximo estos recursos en el estado, ya que con esto se elevará considerablemente el consumo de productos pesqueros y se generarán exportaciones importantes por los mismos, obteniendo con esto una importante generación de divisas para la región.

El Estado de Yucatán, tiene siete puertos pesqueros de los cuales Yukalpetén, Celestún, Telchac, Dzilam de Bravo y El Cuyo se consideran puertos pesqueros industriales y San Felipe y Río Lagartos son considerados simplemente como puertos pesqueros, se tienen además siete comunidades pesqueras localizadas en Sisal, Chuburná, Chelem, Chicxulub, Santa Clara, San Crisanto y Chibihau y el Puerto de Altura de Progreso.

La zona playera comprendida entre el Puerto de Progreso y Chelem, ha presentado variaciones que afectan algunas propiedades localizadas sobre la playa y se han expresado inquietudes en el sentido de que con la construcción de las obras del Puerto de Altura de Progreso, estas modificaciones se incrementen, razón por la cual,

se consideró conveniente realizar estudios en forma integral a lo largo de los 10 kilómetros de costa al oeste del muelle de Progreso, a fin de establecer las condiciones actuales, prever las posibles variaciones y definir un programa de acciones a fin de evitar los problemas de las variaciones de la configuración litoral en la zona de estudio.

Para lograr lo anterior se han programado una serie de actividades de las que se espera sean la base para establecer un proyecto de protección playera y que sean recomendables para construirse en la zona comprendida entre Yukalpetén y Chelem, con el fin de -- evitar el retroceso de la línea de costa sin afectar las instalaciones en las propiedades existentes. A raíz del Huracán Gilberto las características de esta zona han experimentado cambios bastante considerables razón por la cual el presente estudio solo abarca las características que prevalecían hasta antes de Gilberto, además de que hasta la fecha no se han realizado estudios que sirvan de -- comparación con los estudios realizados anteriormente al Gilberto, para así determinar el estado actual que guarda la zona a la que -- se hace referencia.

#### IV. 1.) CARACTERISTICAS GENERALES DE LA ZONA EN ESTUDIO.

Las características generales que prevalecen en esta zona son amplias y variadas, y ya que el conocimiento de cada una de las características requiere de estudios muy amplios y que necesitan, -- además, bastante tiempo para su conocimiento real, en este trabajo se trata de una forma práctica clara y precisa, el estudio de la evolución playera en el lugar mencionado.

##### IV.1.1.) DE LA TOPOHIDROGRAFIA.

A fin de tener documentos lo más objetivos y precisos posi-

bles sobre la línea de costa, comprendida entre Progreso y Chelem, se efectuó un levantamiento aerofotogramétrico que pudiera, en un momento dado, mostrar la situación de la línea de playa con respecto a las propiedades existentes a lo largo de la costa y evitar en el futuro problemas derivados de una posible evolución playera, -- originada por las obras del Puerto de altura de Progreso.

Durante el mes de noviembre de 1985 se efectuó un vuelo para obtener fotografías con eje de cámara vertical, cubriendo la línea de costa en los 10 kilómetros de estudio comprendidos, con fotografías de 230 x 230 mm. que sirvieron para formar todo un mosaico de la zona de estudio.

Tomando como base el vuelo aerofotogramétrico y el levantamiento topográfico general de la zona, que se realizó para servir de base al levantamiento batimétrico, se procedió a la elaboración de las ortofotos, que permitieron obtener sobre un papel traslucido el estado actual que guarda la línea de costa, las obras de protección y las construcciones privadas.

Lo anterior permite tener una idea clara de la situación que guarda actualmente la línea de costa en la cual se detectaron 123 espigones entre Chelem y Yukalpetén; 9 espigones entre Yukalpetén y el Muelle de Progreso, fue igualmente evidente que en el tramo Progreso-Yukalpetén se encuentran 10 propiedades sobre la zona de playa, ocupando parte de la Zona Federal Marítima Terrestre considerada esta como distancia de 20 metros después del nivel de más altas mareas registradas, y en el tramo entre Yukalpetén y Chelem se determinó que prácticamente la mayoría de las propiedades se encuentran sobre la Zona Federal Marítima Terrestre, y que la multitud de espigones construidos en esa zona ha sido con el objeto de tratar de consolidar una línea de playa que llegue cuando menos a unos cuantos metros después del límite de la construcción. (Ver -

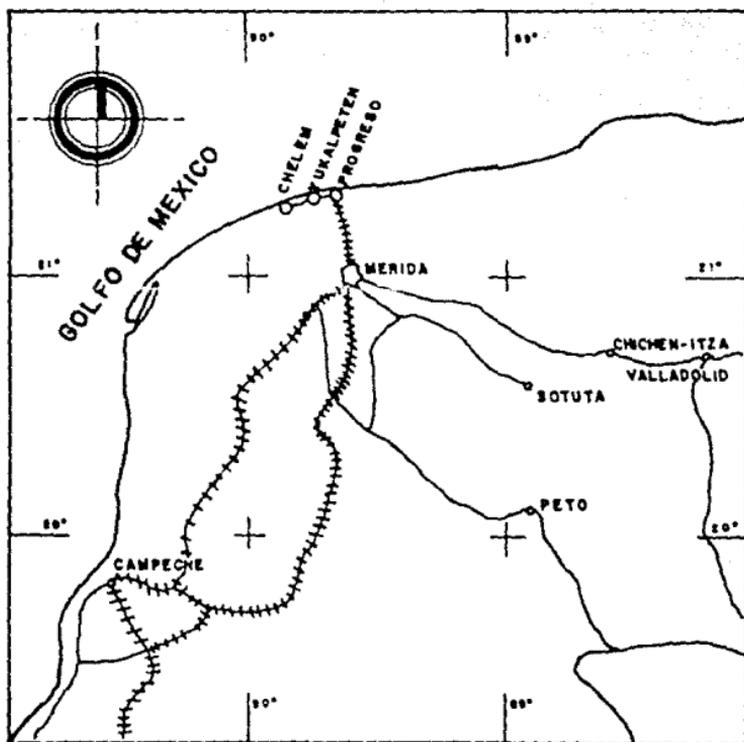


FIG. IV.1.) LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

plano No. 1 en los anexos).

Esto hizo que en promedio exista prácticamente un espigón cada 40 metros con longitudes entre 20 y 30 metros tratando de retener el transporte que se mueve por lo alto de la playa.

Las ortofotos así establecidas en papel traslúcido, fueron -- igualmente la base para llevar un control a lo largo de 6 meses de la evolución de la línea de playa.

Como un elemento fundamental para el estudio de la evolución de línea de playa entre Progreso y Chelém se consideró necesario -- realizar un levantamiento topobatiométrico a lo largo de los 10 kilómetros y hasta llegar a la profundidad de -3.0 mts. (ver plano 1 en los anexos).

Se desarrolló una poligonal de apoyo a lo largo del frente -- costero con una longitud de 10 kilómetros y para contar con alta -- precisión según lo demandó la restitución de las ortofotografías, se -- cerró la poligonal con vértices colocados por detrás de las edifi-- caciones playeras, creándose de esta forma la poligonal al oriente de Yukalpetén y la poligonal al poniente, unidos por un cuadrilátero que define las escolleras de la entrada al puerto pesquero.

Los ejes coordenados utilizados para su representación fueron arbitrarios eligiendo el vértice del Morro de la Escollera oriente de Yukalpetén con coordenadas  $x=5000$  y  $y=5000$  y la orientación de -- los mismos según la orientación astronómica del lado M-E Morro E, del cuadrilátero. (Ver plano 1 en los anexos)

Con apoyo en el banco de nivel No. 4 ubicado al inicio del -- muelle de Progreso con cota de 3.064 referido al nivel medio del -- mar y proporcionado por la superintendencia de las obras del puer-

to, se corrió la nivelación en los vértices de la poligonal en su porción playera en ambos sentidos para comprobación, con lo cual - quedaron definidas las cotas base de las secciones transversales - playeras referidas al nivel de bajamar media (N.B.M.) con el coeficiente de corrección entre ambos planos de referencia de 0.308 m. (Ver plano 1 en anexos).

Siguiendo los procedimientos establecidos en levantamientos - batimétricos con un apoyo terrestre a base de intersecciones de -- dos tránsitos se definieron las fijas obtenidas en campo mediante sus coordenadas, indicándoles su profundidad correspondiente referidas al N.B.M.

Para lograr las correcciones por marea, se instaló en un pilote del muelle de cabotaje en Yukalpetén una regla de marea referida al vértice M-E de la poligonal Este.

Con lo anterior se formaron planos de detalles que contienen la ubicación de detalle de las fijas en escala y con las que se dibuja con interpolaciones, las curvas de igual profundidad (isobatas) mismas que fueron transportadas al plano No. 1 de los anexos para contar con toda la información de la que constituye el levantamiento general topobatimétrico.

Para cubrir los diez kilómetros de frente playero bajo estudio, se levantaron 100 secciones transversales de control playero con equidistancia media de 100 metros y una periodicidad mensual a lo largo de un semestre: El apoyo planimétrico y altimétrico se - tasa en la poligonal playera ya descrita anteriormente, la localización de conjunto se muestra en el plano 1 de los anexos, en donde también se detecta la existencia tan numerosa de espigones (más de 130), por lo que resultó imposible contar con una sección entre cada dos espigones. (\* Información proporcionada por la S.C.T.)

De las observaciones de estas secciones fue posible detectar los cambios que producen alrededor del nivel de bajamar media del momento donde algunos casos llegaron a presentarse corrimientos de la línea de playa del orden de 10.0 metros y variaciones en las zonas de rompientes del orden de 1 metro de profundidad con formaciones de barra y fosa en algunos casos.

Las variaciones más importantes se detectaron en las secciones: 1, 4, 5, 8, 14, 15, 22, 24, 26, 28, 29, 40, 45, 47, 52, 55, 57, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 81, 82, 83, 84, 85, 94, 95, 96, 97, 99, correspondiendo como ya se mencionó a la ubicación de la línea del nivel de bajamar media, -- destrucción y formación de berma, así como presencia de fosa o barra sobre la que se realiza la rompiente de oleaje.

Los sitios señalados de las secciones corresponden pues, a -- las zonas de mayor actividad playera que se considera se deben fundamentalmente al efecto de los oleajes que provenientes del norte y en combinación con los incrementos del N.M.M. por efecto de marea y viento producen los retrocesos en la línea de playa que fueron observados durante el período de estudio (de diciembre de 1985 a mayo de 1986 con mediciones mensuales).

#### IV.1.2.) DEL VIENTO Y LOS CICLONES.

El papel que juega la meteorología en el estudio y predicción de diferentes parámetros oceanográficos es importante. Más aún la meteorología aparte de intervenir en el aspecto oceanográfico, participa también en aspectos del diseño y construcción de sistemas -- portuarios.

Los parámetros más importantes que es conveniente conocer para el diseño y estudio de sistemas portuarios son el viento y los ciclones.

a) **Viento.** De los parámetros mencionados el principal y más estudiado puede ser el viento debido a su función generadora de oleaje. Y también a los efectos que tiene sobre las estructuras y barcos.

La velocidad de diseño de viento debe ser seleccionada en base a una evaluación estadística de varios años de registro.

La forma más común de presentar los resultados en un plano es por medio de los llamados diagramas de Lenz de los cuales se obtienen los siguientes datos:

- Gráfica de frecuencia "n" representa el número de veces que se presentó el viento en cada dirección. Lo que nos ayuda a distinguir el viento reinante en la zona estudiada según una dirección dada.

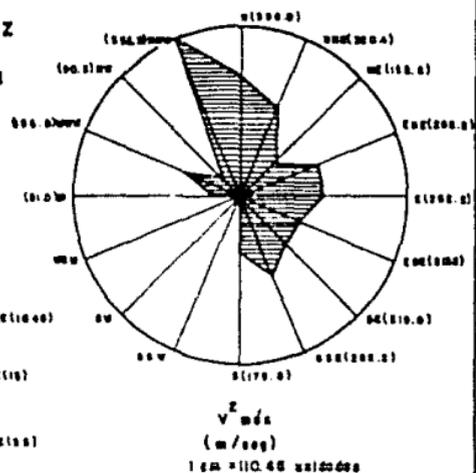
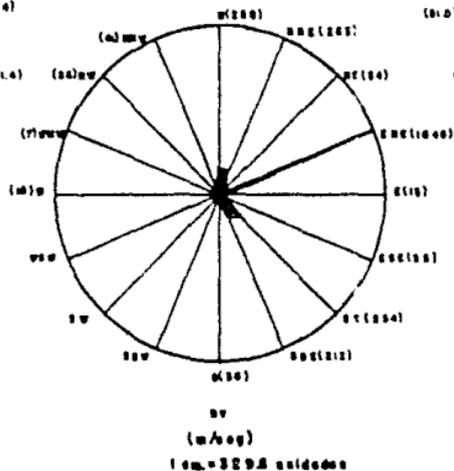
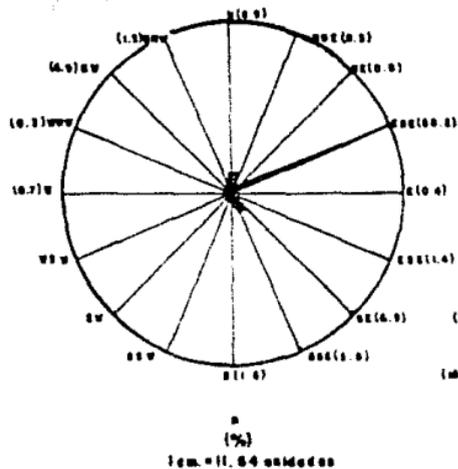
- Gráfica de velocidades "v" representa el valor de las velocidades que ocurren en cada dirección. Esta gráfica nos determina el viento dominante que es el más intenso independientemente de su frecuencia.

- Gráfica de Agitación o de Lenz "nv" dado que la acción del viento no depende solamente de su frecuencia, sino también de su velocidad, en esta gráfica se muestra la dirección en que se presentan las velocidades y sus ocurrencias máximas. El diagrama de Lenz obtenido para Progreso-Chelem se presenta en la figura IV.2. Para interpretar los resultados obtenidos de las observaciones sobre la intensidad de los vientos se empleó la escala de Beaufort.

Las fuentes de información fueron el Servicio Meteorológico Nacional y el Departamento de Hidrometrías de la SARH.

b) **Ciclones.** Se realizó un análisis ciclónico para definir las características del oleaje generado por huracanes, para lo cual se tomaron los tres ciclones más frecuentes cuya trayectoria

FIG. IV.2) DIAGRAMAS DE LENZ  
PARA EL TRAMO  
PROGRESO - CHELEM



## NOTAS

No. TOTAL DE OBSERVACIONES = 1015  
 No. DE CALMAS = 127  
 FUENTE DE INFORMACION: SERVICIO  
 METEOROLOGICO NACIONAL.

LAS OBSERVACIONES FUERON HECHAS CON  
 ANEMOMETRO  
 SE CONSIDERO LA DIRECCION Y LA VELOCIDAD  
 MEDIA DIARIA DEL VIENTO SEGUNTE DE LAS  
 24 OBSERVACIONES DIARIAS  
 ESCALA DE VELOCIDADES EMPLEA BEAUFORT  
 LA "V" ES LA OBSERVADA.

DATOS DE VIENTO PERIODO 1977-1981

	N	NEE	NE	E	ESE	SE	SEZ	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
n	123	131	14	108	9	26	109	97	90	-	-	-	19	8	17	25
v	250	262	34	1040	13	59	234	212	56	-	-	-	10	7	25	41
Vmed	2.07	1.74	2.40	1.55	1.08	2.11	2.00	2.10	1.88	-	-	-	1.5	1.15	1.90	1.70
Vmax	15.0	17.9	12.0	16.0	16.0	14.0	14.0	16.0	15.0	-	-	-	9.0	10.0	9.0	13.0
Vmin	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0

ha incidido sobre la Península de Yucatán en los últimos 20 años, los cuales se muestran en la Tabla IV.1. que a continuación se observa:

AÑO	NOMBRE	VEL. MAX.	(KM/H)	FECHA	COORDENADAS
1967	BEULAH	WNW 15	180	SEPT. DEL 9-23	21.9N, 90.2W
1973	BRENDA	SW 18	100	AGOS. DEL 18-22	21.1N, 89.0W
1975	ELOISA	W 8	85	SEPT. DEL 14-25	21.0N, 88.0W

TABLA IV.1.) CICLONES INCIDENTES EN LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS.

NOTA: El método que se utilizó para dicho análisis fue el propuesto por Sverdrup-Munk-Bretschneider (S.M.B.)

#### IV.1.3.) DE LAS CORRIENTES LITORALES Y DEL OLEAJE.

A fin de tener un esquema de las corrientes litorales existentes para diferentes condiciones de agitación del mar, se planteó realizar dos campañas de mediciones de corrientes en cuatro secciones establecidas en:

- a) Antes del muelle fiscal.
- b) Después del muelle fiscal.
- c) Antes de Yukalpetén.
- d) Entre Yukalpetén y Chelém.

Determinando durante el período de mediciones las características del oleaje con el fin de poder sacar conclusiones pertinentes.

Estas mediciones se llevaron a cabo en las cuatro secciones - indicadas, a lo largo de dos campañas dentro de los seis meses del estudio de control, (enero 1986 y mayo 1986), haciendo uso de un - corrientómetro magneto-digital y la intensidad de la corriente en el punto preseleccionado.

La dirección se obtiene mediante el azimut medido y referido al eje de embarcación que provoca el estilete unido a una línea so porte de una pantalla de estabilidad magnética, con brújula de cam po, del eje de embarcación para obtener finalmente el azimut magné tico de la dirección buscada.

La intensidad se obtiene mediante un flujómetro digital de -- propela que suspendido de la pantalla de estabilidad dinámica nos proporciona las revoluciones por minuto que le provoca la corriente y mediante el uso de una gráfica de calibración la velocidad me dida.

En cada uno de los puntos donde se hicieron mediciones, se op tó por realizar varias observaciones en promedio desde las 9:00 ho ras a las 14:00 horas y con ello generar la información necesaria: la hora de observación, la dirección y la intensidad en forma grá fica y numérica agrupada por sección y profundidad.

En la tabla IV.2. se resumen los valores de las velocidades - obtenidas para cada una de las secciones a diferentes profundida-- des donde se destaca el necho de las velocidades máximas, correspon den a la zona de la fosa para las secciones cercanas al muelle fis cal, donde se obtuvieron velocidades promedio de 30cm/seg.; a -1.0 metros las velocidades resultaron alrededor de los 20 cm/seg. Pa ra el caso de las mediciones realizadas durante el mes de mayo que corresponde a diferencia de la primera campaña efectuada en el mes de enero, a condiciones de mar que pueden considerarse como tran- quilas, las velocidades en la fosa tuvieron un valor promedio del

orden de 15 cm/seg. y siempre en dirección este-oeste, las mediciones a -1.0 metros variaron de 14 a 21 cm/seg. y las velocidades a -2.0 metros fueron de 17 a 22 cm/seg. (Ver tabla IV.3.)

Lo anterior es indicativo que durante la época de fuerte agitación con oleajes que provienen del norte y noreste, como indican las direcciones de las corrientes a -2.00 y a -1.0 metros; se tiene un transporte litoral con su máxima concentración y velocidad en la zona de la fosa donde se llegan a tener las corrientes suficientemente altas para arrastrar el material sólido, sin embargo en los períodos en que las condiciones de agitación del mar son más benignos, los valores del transporte litoral en la zona de la fosa se disminuyen considerablemente presentándose sobre todo un transporte en masa desde la zona de -2.00 metros en la cual se detectaron las velocidades más altas que acumulan material antes de la fosa.

#### IV.1.4.) DEL TRANSPORTE LITORAL.

Para conocer el estado prevaleciente del transporte litoral fue necesario llevar a cabo estudios que reflejaran las condiciones reales de este transporte; para lo cual fue necesario hacer campañas de muestreo en diferentes secciones de la línea de estudio así como también, una verificación en laboratorio para determinar las características propias del material, y la cantidad del mismo, también se hicieron estudios mediante fórmulas teóricas para establecer los volúmenes del transporte litoral que aquí existen y se establecieron las direcciones de este transporte y su volumen en cada dirección para posteriormente establecer el perfil playero prevaleciente para finalmente establecer un pronóstico de arenas de acumulación o zonas de erosión; como a continuación se menciona

##### IV.1.4.1.) MUESTREO DE MATERIAL PLAYERO.

SECCION	PROFUNDIDAD (m)	DIRECCION (AZIMUT)	VELOCIDAD (cm/seg)
ANTES DEL MUELLE FISCAL -0+156.65	-2.00	214	19.66
	-1.00	2,220	17.81
	FOSA	OESTE	15.33
DESPUES DEL MUELLE FISCAL 0+167.50	-2.00	206	17.10
	-1.00	200	14.73
	FOSA	OESTE	12.62
MOJONERA "x" (YUKALPETEN)	-2.00	245	20.20
	-1.00	234	20.22
	FOSA	OESTE	17.62
ENTRE YUKALPETEN Y CHELEM V-10.0+723.00	-2.00	212	22.61
	-1.00	233	21.32
	FOSA	OESTE	13.28

TABLA 4.3.1 MEDICION DE CORRIENTES PROGRESO-CHELEM, MAYO 1986.  
(RESUMEN DE PROMEDIOS)

SECCION	PROFUNDIDAD (m)	DIRECCION (AZIMUT)	VELOCIDAD (m/seg)
ANTES DEL MUELLE FISCAL -0+156.65	-2.00	226	0.1498
	-1.00	237	0.2043
	FOSA	OESTE	0.3250
DESPUES DEL MUELLE FISCAL 0+167.50	-2.00	231	0.1351
	-1.00	212	0.1570
	FOSA	OESTE	0.2971
MOJONERA "x" (YUKALPETEN)	-2.00	242	0.2038
	-1.00	247	0.2268
	FOSA	OESTE	0.2396
ENTRE YUKALPETEN Y CHELEM V-10.0+723.00	-2.00	230	0.2474
	-1.00	240	0.2496
	FOSA	OESTE	0.2153

TABLA 4.2.1 MEDICION DE CORRIENTES PROGRESO-CHELEM, ENERO 1986.  
(RESUMEN DE PROMEDIOS).

Con el objeto de conocer la granulometría del material playero de la zona de estudio se realizaron dos campañas de muestreo, en las que se tomaron las muestras de acuerdo a lo planeado, lo -- que quiere decir: en el estrám, fosa, rompiente y -2.00m. (ver -- perfil tipo en las tablas 4.4. y 4.5.), en cada una de las cuatro secciones, preestablecidas y coincidentes con las secciones en don de se hicieron mediciones de corrientes:

- I. Al este del Muelle de Progreso.
- II. Al oeste del Muelle de Progreso.
- III. Frente a Yukalpetén.
- IV. Entre Chelóm y Progreso

Dentro de cada una de las campañas se tomaron muestras de material en suspensión a media agua de la fosa, en la zona de rompien tes y a -2.00 m. de profundidad para cada una de las secciones antes enlistadas.

El procesamiento realizado en laboratorio de las muestras de fondo, consistió en obtener la distribución granulométrica a fin -- de establecer la gráfica correspondiente y de ésta el  $\bar{N}$  50, así co mo la densidad media de cada muestra; datos éstos que aparecen en las tablas 4.4 y 4.5 elaboradas estas para cada una de las campa-- ñas.

En la primera campaña se determinó que el diámetro de la zo-- na del estrám era de 0.23 mm, en la fosa de 0.2 mm, a -1.00m. - - 0.17 mm. y a -2.00 m. 0.15 mm.

Durante la segunda campaña de muestreo al  $\bar{N}$  50 del estrám va ría según la sección de 0.3 a 0.64 mm., en la fosa de 0.23 a 0.55 mm. y a -1.00 y -2.00 m. se encontró un valor muy uniforme de 0.173 mm.

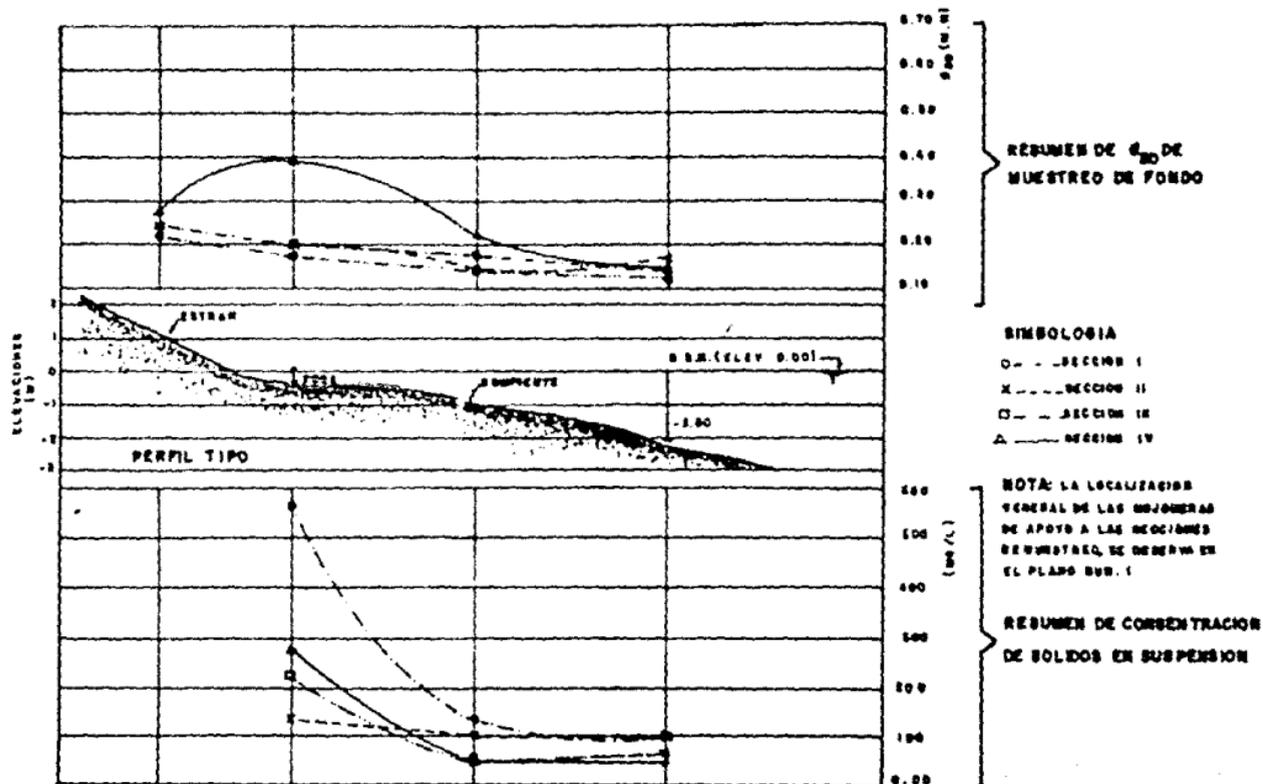


TABLA IV.4) MUESTREO DE MATERIAL PLAYERO (PRIMERA CAMPAÑA)

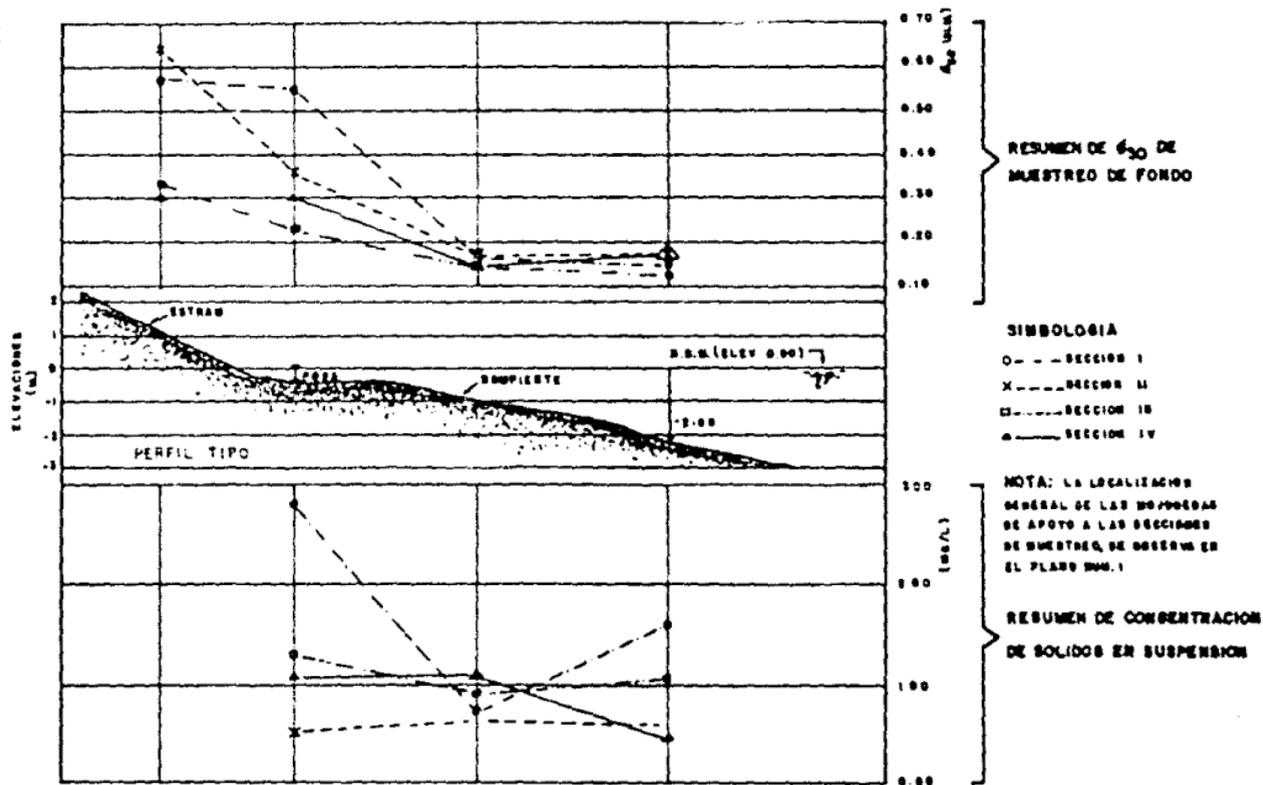


TABLA IV. 6) MUESTRO DE MATERIAL PLAYENO (SEGUNDA CAMPAÑA)

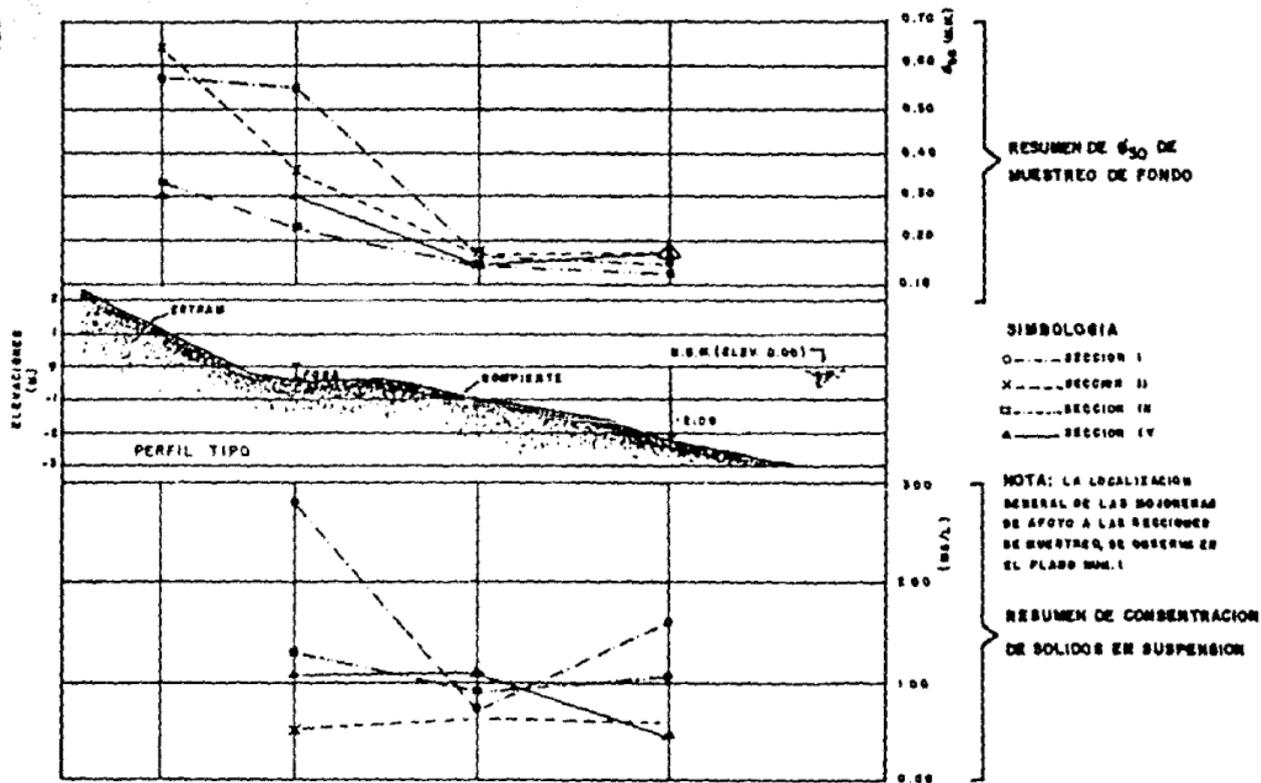


TABLA IV.5) MUESTREO DE MATERIAL PLATEO (SEGUNDA CAMPAÑA)

Las muestras de sólidos en suspensión, fueron tomadas con la "botella de muestreo Van-Dorn" con capacidad de 2 litros dada la característica de poder tomar instantáneamente el volúmen de agua en las condiciones reales en las que se encuentra y con ésto dejar confinado el sólido en suspensión, posteriormente en laboratorio, con el método de decantación se concentra el sólido en un volúmen reducido de agua, mismo que se hace pasar por papel filtro para retener el sólido buscado y mediante la balanza analítica con precisión de milésima de gramo obtener los miligramos, tenemos el parámetro buscado, de mg./lt., o partes por millón usualmente utilizado para el conocimiento de sólidos en suspensión.

Los valores obtenidos para la primera campaña mostraron que la máxima concentración 558 mg/lt, correspondió a la fosa de la -- sección localizada antes del Muelle Fiscal, la de menor concentración en la fosa 137 mg./lt., para la segunda sección. Las concentraciones a -1.00 y a -2.00 m. tienen el mismo orden de magnitud - cercana a los 100 mg/Lt.

Para la segunda campaña las concentraciones disminuyen hasta 279 mg/lt. Para la fosa de la primera sección, 52 mg/lt., en la fosa de las otras dos secciones. A -1.00 m., las concentraciones variaron de 65 a 109 mg/lt. y a -2.00 m. de 47 a 162 mg/Lt.

El  $\bar{V}$  varía para todo el tramo de estudio de 2.75 a 2.84 Ver Tabla 4.6.

#### IV.1.4.2.) VERIFICACION DEL TRANSPORTE LITORAL.

A lo largo de varios años y sobre todo a raíz de la construcción de las obras del puerto de abrigo de Yukalpetén, se han hecho evaluaciones tendientes a establecer el monto del transporte litoral que se presenta frente a la costa, habiéndose estimado cifras

SECCION	LUGAR DE MUESTREO	$\gamma$ gr/cm <sup>3</sup>
I	ESTRAM	2.79
	FOBA	2.76
	ROMPIENTE	2.81
	- 2.00	2.79
II	ESTRAM	2.79
	FOBA	2.75
	ROMPIENTE	2.84
	- 2.00	2.80
III	ESTRAM	2.80
	FOBA	2.77
	ROMPIENTE	2.79
	- 2.00	2.79
IV	ESTRAM	2.80
	FOBA	2.78
	ROMPIENTE	2.81
	- 2.00	2.78

TABLA 4.6.)  $\gamma$  EN gr/cm<sup>3</sup> PARA CADA SECCION DE ESTUDIO.

que varían de los 32,000 a los 50,000 m<sup>3</sup>/año, por lo que se consideró conveniente, tomando en cuenta las observaciones realizadas en la estación oceanográfica que se instaló frente al Muelle de -- progreso, hacer una nueva evaluación del transporte litoral por 3 métodos diferentes que fueron:

- a) Utilización de la expresión de Larras.\*
- b) Utilización del Criterio de Eagleson.\*
- c) Utilización del criterio de Bossen.\*

Para la determinación del transporte litoral se estableció como tiempo de acción del oleaje los siguientes parámetros:

Dirección Norte	Oleaje de 0.0 a 0.5 m	6',805,534 seg.
	Oleaje de 0.5 a 1.0 m	1',064,962 seg.
	Oleaje de 1.0 a 2.0 m.	256,136 seg.
	Oleaje mayor de 2.0 m.	31,766 seg.
Dirección Este	Oleaje de 0.0 a 0.5 m.	4',390,055 seg.
	Oleaje de 0.5 a 1.0 m.	1',320,417 seg.
	Oleaje de 1.0 a 2.0 m.	509,764 seg.
	Oleaje mayor de 2.0 m.	100,982 seg.
Dirección Noreste	Oleaje de 0.0 a 0.5 m	10',409,904 seg.
	Oleaje de 0.50 a 1.0 m.	3',029,581 seg.
	Oleaje de 1.0 a 2.0 m.	1',152,726 seg.
	Oleaje mayor de 2.0 m.	233,650 seg.
Dirección Noroeste	Oleaje de 0.0 a 0.5 m.	1',643,659 seg.
	Oleaje de 0.5 a 1.0 m.	420,940 seg.
	Oleaje de 1.0 a 2.0 m.	132,165 seg.
	Oleaje mayor de 2.0 m.	23,753 seg.

\* Estas expresiones se tratan en la Sección 11.4. de este estudio.

Con la información anterior se procedió a calcular el transporte en las zonas en las que podría existir una influencia por -- las obras del nuevo muelle de altura y que son:

- Zona I de Progreso al Este del Muelle Fiscal.
- Zona II entre Yukalpetén y Progreso.
- Zona III entre Yukalpetén y Chelém.

De acuerdo con los diagramas de refracción elaborados para -- cada una de las direcciones indicadas se calculó el coeficiente de refracción correspondiente para ser aplicado a la altura de la ola y de esa manera estimar la altura de la ola y de la misma manera -- estimar la altura actuante sobre la playa.

#### Criterio de Larrás.

Se conoce como criterio de Larrás para el cálculo del transporte litoral la utilización de la expresión:

$$Q_s = K_G t H^2 T \sin 2\alpha$$

Aplicando la expresión anterior para cada una de las zonas -- establecidas se obtuvo de acuerdo con la tabla 4.7 que el transporte litoral resultante es:

	Dirección E - W	Dirección W - E
Zona I	63,658	7,855
Zona II	42,960	7,855
Zona III	68,789	5,159

#### Criterio de Eagleson.

El criterio de Eagleson involucra el cálculo de la corriente litoral que se establece por efecto de los oleajes actuantes y una función del transporte que puede ser la función de Kalinske en la que establece que:

## CALCULO DEL TRANSPORTE LITORAL CRITERIO DE LARRAS

DIREC.	RANGO	TIEMPO DE AC CION C (seg)	H <sup>2</sup>	T	K <sub>L</sub> T <sup>1/4</sup> H	ZONA I			ZONA II			ZONA III		
						Kr2	Sen 20°	Qa	Kr2	Sen 20°	Qa	Kr2	Sen 20°	Qa
E	0.00 - 0.50	2'818,320	0.06	3	1'432.98	0.06	0.9848	88	0.06	0.9377	84	0.06	0.8660	78
E	0.50 - 1.00	1'092,557	0.56	3	5'401.86	0.06	0.9848	319	0.06	0.9397	304	0.06	0.8660	281
E	1.00 - 2.00	429,417	2.25	3	8'530.48	0.06	0.9848	504	0.06	0.9397	480	0.06	0.8660	443
E	2.00	76,995	6.25	3	4,247.03	0.06	0.9848	251	0.06	0.9397	239	0.06	0.8660	221
E	0.00 - 0.50	1'291,975	0.06	8	1,825.10	0.06	0.9848	108	0.06	0.9397	103	0.06	0.8660	95
E	0.50 - 1.00	198,567	0.56	8	2,618.03	0.06	0.9848	155	0.06	0.9397	147	0.06	0.8660	136
E	1.00 - 1.50	71,816	2.25	8	3,804.38	0.06	0.9848	225	0.06	0.9397	214	0.06	0.8660	198
E	2.00	8,004	6.25	8	1,266.08	0.06	0.9848	75	0.06	0.9397	71	0.06	0.8660	66
E	0.00 - 0.50	279,760	0.06	12	592.80	0.06	0.9848	35	0.06	0.9397	34	0.06	0.8660	31
E	0.50 - 1.00	35,293	0.56	12	777.10	0.06	0.9848	46	0.06	0.9397	48	0.06	0.8660	41
E	1.00 - 2.00	6,531	2.25	12	677.88	0.06	0.9848	40	0.06	0.9397	38	0.06	0.8660	35
E	2.00	15,413	6.25	12	3,402.03	0.06	0.9848	201	0.06	0.9397	192	0.06	0.8660	177
SUMA								2,047		1,954			1,807	
NW	0.00 - 0.50	1'087,673	0.06	3	576.18	0.941	0.8480	460	0.956	0.9703	535	0.994	0.5878	337
NW	0.50 - 1.00	334,455	0.56	3	1,653.63	0.941	0.8480	1,320	0.956	0.9703	1324	0.994	0.5878	966
NW	1.00 - 2.00	110,355	2.25	3	2,192.23	0.941	0.8480	1,749	0.956	0.9703	2034	0.994	0.5878	1,281
NW	2.00	19,799	6.25	3	1,092.53	0.941	0.8480	872	0.956	0.9703	1014	0.994	0.5878	638
NW	0.00 - 0.50	479,767	0.06	8	667.74	1.067	0.7880	570	0.927	0.7193	452	1.004	0.4695	320
NW	0.50 - 1.00	71,551	0.56	8	943.37	1.067	0.7880	791	0.927	0.7193	629	1.004	0.4695	445
NW	1.00 - 2.00	18,719	2.25	8	991.62	1.067	0.7880	834	0.927	0.7193	661	1.004	0.4695	448
NW	2.00	1,123	6.25	8	165.25	1.067	0.7880	139	0.927	0.7193	110	1.004	0.4695	78
NW	0.00 - 0.50	76,219	0.06	12	161.51	1.067	0.7880	136	0.927	0.7193	108	1.004	0.4695	76
NW	0.50 - 1.00	14,940	0.56	12	225.47	1.067	0.7880	249	0.927	0.7193	197	1.004	0.4695	139
NW	0.50 - 2.00	3,091	2.25	12	245.61	1.067	0.7880	207	0.927	0.7193	164	1.004	0.4695	116
NW	2.00	2,831	6.25	12	624.87	1.067	0.7880	526	0.927	0.7193	417	1.004	0.4695	295
SUMA								7,855		7,855			5,159	
N	0.00 - 0.50	4'618,367	0.06	3	2,446.53	1.006	0.1392	343	0.942	0.3420	789	1.011	0.2419	598
N	0.50 - 1.00	851,067	0.56	3	4,207.88	1.006	0.1392	589	0.942	0.3420	1356	1.011	0.2419	1,079
N	1.00 - 2.00	210,418	2.25	3	4,180.01	1.006	0.1392	585	0.942	0.3420	1347	1.011	0.2419	1,022
N	2.00	26,776	6.25	3	1,587.90	1.006	0.1392	222	0.942	0.3420	512	1.011	0.2419	188
N	0.00 - 0.50	1'960,829	0.06	8	2,769.95	1.006	0.1392	388	0.942	0.3420	892	1.011	0.2419	677
N	0.50 - 1.00	177,322	0.56	8	2,337.93	1.006	0.1392	327	0.942	0.3420	753	1.011	0.2419	572
N	1.00 - 2.00	39,293	2.25	8	2,081.51	1.006	0.1392	292	0.942	0.3420	671	1.011	0.2419	579
N	2.00	1,926	6.25	8	283.41	1.006	0.1392	40	0.942	0.3420	91	1.011	0.2419	69
N	0.00 - 2.00	226,453	0.06	14	479.61	1.006	0.1392	67	0.942	0.3420	155	1.011	0.2419	117
N	0.50 - 1.00	39,293	0.56	14	225.70	1.006	0.1392	101	0.942	0.3420	113	1.011	0.2419	177
N	1.00 - 2.00	6,425	2.25	12	510.54	1.006	0.1392	72	0.942	0.3420	165	1.011	0.2419	125
N	2.00	1,064	6.25	12	234.85	1.006	0.1392	33	0.942	0.3420	76	1.011	0.2419	58
SUMA								3,059		7,039			5,141	
NE	0.00 - 0.50	6'752,974	0.06	3	3,577.32	0.906	0.8660	2,807	0.632	0.8090	2829	0.772	0.9848	2,720
NE	0.50 - 1.00	2'494,237	0.56	3	12,332.11	0.906	0.8660	9,676	0.632	0.8090	5305	0.772	0.9848	7,376
NE	1.00 - 2.00	963,419	2.25	3	19,138.56	0.906	0.8660	15,016	0.632	0.8090	9785	0.772	0.9848	14,550
NE	2.00	180,887	6.25	3	9,981.57	0.906	0.8660	7,832	0.632	0.8090	5104	0.772	0.9848	7,589
NE	0.00 - 0.50	3'052,651	0.06	8	4,312.30	0.856	0.8290	3,050	0.741	0.4695	1500	0.837	0.9613	1,470
NE	0.50 - 1.00	450,566	0.56	8	5,940.55	0.856	0.8290	4,216	0.741	0.4695	2067	0.837	0.9613	4,780
NE	1.00 - 2.00	162,870	2.25	8	8,627.88	0.856	0.8290	6,123	0.741	0.4695	3002	0.837	0.9613	6,762
NE	2.00	22,284	6.25	8	3,279.09	0.856	0.8290	2,327	0.741	0.4695	1141	0.837	0.9613	2,638
NE	0.00 - 0.50	606,279	0.06	12	1,280.44	0.812	0.7880	773	0.807	0.3420	334	0.882	0.9272	988
NE	0.50 - 1.00	86,478	0.56	12	1,676.65	0.812	0.7880	1,073	0.807	0.3420	463	0.882	0.9272	1,371
NE	1.00 - 2.00	26,437	2.25	12	2,100.71	0.812	0.7880	1,344	0.807	0.3420	580	0.882	0.9272	1,718
NE	2.00	30,479	6.25	12	6,727.48	0.812	0.7880	4,305	0.807	0.3420	1857	0.882	0.9272	5,502
SUMA								58,552		33,967			61,644	

TABLA 4.7.

$$Q_s = 10 \sqrt{\frac{V^2}{P}} \times \frac{V^2}{V^2 (S_s - 1)^2 D}$$

$$Z = V \frac{V_L^2}{C^2}$$

C = Coeficiente de Chazy =  $30 + 5 \log. A.$

$$V_L^2 = \frac{3}{8} \frac{G H_B^2 N_B}{D_B} \frac{\text{Sen } \theta \text{ Sen } \alpha B \text{ Cos } \alpha B}{F}$$

$$N_B = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{4 \pi D}{L}}{\text{Sen } H \frac{4 \pi D}{L}} \right] \quad \text{Factor de Grupo.}$$

$$F = \left[ 2 \log \left( \frac{D_B}{K_E} \right) + 1.74 \right]^2 \quad \text{Coef. de Fricción}$$

Tomando en cuenta las características del tipo de material y la zona en que se establece el transporte litoral, que para el caso es desde la primera zona rompiente hasta la línea de playa, se pudo calcular utilizando los mismos parámetros de acción del oleaje para cada una de las zonas en estudio obteniéndose los siguientes valores:

	Dirección E - W	Dirección W - E
Zona I	43,652	11,972
Zona II	35,182	8,752
Zona III	70,500	9,051

#### Criterio de Bossen.

El criterio de Bossen normalmente permite establecer, conociendo el transporte litoral, el avance de la línea de playa ante la presencia de una obra que lo para, por lo que en este caso se utilizará en forma indirecta para el avance en la línea de playa que ha dado por efecto de las obras de protección al canal de acceso del puerto pesquero de Yukalpetén, determinar el transporte litoral.

En términos generales se considera que:

$$T = \frac{Z^2 \pi D \alpha}{4 \operatorname{tg}^2 \alpha Q} \quad \text{en la cual:}$$

- T = Tiempo de avance de la línea de playa con respecto a la playa original.  
 Z = Es el avance de la línea de playa en el tiempo T.  
 D = Es la profundidad en el extremo de la obra de retención del material.  
 $\alpha$  = Es el ángulo de incidencia del oleaje en radianes.  
 Q = Es el transporte litoral existente.

Conociendo la fecha de iniciación de las obras del Puerto Yulpetén a partir de 1986 y tomando en cuenta que la playa original se ha desplazado sobre la escollera en 400 metros en ese período, se puede establecer que el transporte litoral es:

$$Q = \frac{(400)^2 (3.14) (3) (0.523)}{18 \times 4 \times 0.323} = 32,877 \text{ m}^3$$

La estimación anterior permite establecer que los órdenes del transporte litoral calculados por los diferentes métodos tienen -- una cierta congruencia y que consecuentemente es factible que la cifra establecida para la cuantificación de los diversos efectos -- sobre la zona costera entre Chelém y Progreso de 40,000 m<sup>3</sup> por año sea tomada como base en las diferentes evaluaciones para la zona -- II y para las zonas I y III sea del orden de 60,000 m<sup>3</sup>/año.

#### IV.1.4.3.) ESTUDIO DE PERFILES PLAYEROS.

Con el objeto de visualizar el comportamiento de la línea de playa con respecto a las características del oleaje, se procedió a establecer el perfil de equilibrio de la playa, tomando como base

los seccionamientos realizados y la batimetría frente a la playa. (Ver plano No. 1 en los anexos).

Para elaborar estos perfiles se escogieron a lo largo de los 10 km. del frente analizado un total de 20 puntos de análisis para tenerlos espaciados a cada 500 m. Una vez seleccionadas estas zonas se escogía la sección playera y de control ya levantada, más cercana y se prolongaba mar afuera hasta alcanzar la batimétrica -3.00 m. obtenida en la batimetría general.

Este proceso de conjugar las secciones de control con la batimetría general se llevó a cabo en tres levantamientos como representativos de los correspondientes perfiles de tormenta más otros tres levantamientos representativos a los perfiles de buen tiempo, obteniéndose de esta forma planos representativos para cada tipo de perfil.

Lo anterior permite establecer la evolución del perfil playero en dos períodos bien definidos en función del oleaje preva- - lciente para los dos períodos, de tormenta y de buen tiempo correspondiendo desde luego las condiciones de oleaje más fuerte y las condiciones más someras respectivamente.

La acción combinada del oleaje a lo largo del año, na permiti- do definir un equilibrio de la playa que es posible asimilar a una parábola del tipo  $X = AY^2$  por lo que se buscó para cada perfil ya dibujado su similitud a alguna de las ecuaciones particulares de esta familia de curvas y con ésto se superpusieron a cada perfil le- vantado un perfil teórico, indicando el valor de la constante (A) para cada caso.

Adicionalmente se determinó el valor de  $X_0$  que corresponde a la distancia del eje de la parábola a la línea de playa, lo que --

permitió detectar para cada una de las secciones, las variaciones de la línea de rompientes a la línea de playa para cada uno de los diferentes perfiles analizados.

En forma complementaria se establecieron las profundidades en la zona de rompientes, que corresponde al eje de la parábola y la profundidad de la fosa que se forma después de la línea de rompientes.

El análisis de los perfiles playeros, su evolución y los perfiles teóricos establecidos permitió explicar las variaciones, observándose en los perfiles de playa para las diferentes condiciones de oleaje y las variaciones adicionales del (N.M.M.), por efecto de las sobre elevaciones debidas a los vientos del norte, ya que se puede detectar que en la etapa de invierno existió un corrimiento del perfil playero hacia la costa, debido como se indicó, a las características más severas del oleaje y la sobre elevación del nivel del mar por efecto de los vientos del norte, que puede apreciarse como un corrimiento hacia tierra de la línea de playa y disminución de la berma que se ha formado durante los períodos de oleaje somero, igualmente se pudo establecer que estas variaciones tuvieron en el período de estudio, un promedio de 20 mts.

Las profundidades de rompientes se establecieron entre el - - 1.0 y 1.5 m en los 20 perfiles analizados.

Del análisis de los perfiles en función de su ubicación, se pueden apreciar las diferencias entre las dos zonas bien establecidas, la zona entre Chelem y Yukalpetón y la zona entre Yukalpetón y Progreso, donde el alejamiento de la batimétrica -3.00 hace que se tengan perfiles mucho más tendidos del tipo  $X = 27 Y^2$  y con valor de  $X_0$  cercanos a los 50 m.

Lo anterior se traduce en bermas más desarrolladas y mayores elevaciones que corresponden a zonas de acumulación de material, mientras que en la zona correspondiente a Chelem-Yukalpetén por ser una zona en proceso de erosión, la berma es prácticamente inexistente.

#### IV.1.4.4.) PRONOSTICO DE AREAS DE ACUMULACION O ZONAS DE EROSION.

Para el análisis de la tendencia evolutiva de la línea cero - entre el 1º y 6º levantamiento con fines de detectar alguna tendencia generalizada o zonas francas de comportamiento similar, el resultado fue nulo ya que no detectó tendencia clara a lo largo de un frente prolongado, por ello se procedió a cuantificar en base a las secciones de control entre los mismos levantamientos.

El resultado de los volúmenes de azolve y erosión para cada área de influencia para las 100 secciones aparecen en el plano No. 2 de los anexos, se agruparon aquellas porciones colindantes que tienen el mismo signo de evolución anotando la suma de volúmenes - que correspondan a cada agrupación.

Al observar el conjunto de letra "E" de erosión y las letras "A" de azolve, se detecta una tendencia a la erosión en la porción entre Chelem y Yukalpetén y en la zona entre Yukalpetén y Progreso existe una ligera tendencia hacia el azolve.

Para detectar el resumen cuantitativo se optó por dividir la zona Chelem-Yukalpetén en dos porciones, la primera desde la sección 1 hasta la sección 28 y la segunda desde la sección 29 hasta la 56 con los siguientes resultados:

EROSION DE 3,244 m<sup>3</sup>  
1 - 28

EROSION DE 5,888 m<sup>3</sup>  
29 - 56

Con lo que en ambas porciones existió una tendencia de erosión y la suma de las dos porciones es de  $9,132 \text{ m}^3$ .

Al analizar cuantitativamente la porción entre Yukalpetén y Progreso se obtuvo de los azolves sumaron  $60,397 \text{ m}^3$  y que las erosiones sumaron  $19,129 \text{ m}^3$  con lo que la impresión cualitativa resulta cierta y cuantitativamente una tendencia de azolves de  $41,268 \text{ m}^3 - 9,132 \text{ m}^3 = 32,136 \text{ m}^3$ .

Para conocer las tendencias susceptibles de presentarse en el comportamiento de la línea de playa ante la presencia de la obra - del puerto de altura de Progreso, incluido el camino de acceso al muelle se siguió la metodología de elaboración de planos de agitación para los oleajes de las tres direcciones susceptibles de presentarse (NE, N y NW) oleajes éstos que al encontrarse con el obstáculo de la obra se analiza por el método de difracción las agitaciones que se presentan al pie de la playa. Al comparar las características de este oleaje con y sin obra, se detectan las tendencias que se presentarán en el futuro, al existir las obras proyectadas si no se hace ningún programa adicional de protección playera.

En términos generales se puede establecer que la zona entre Chelém y Yukalpetén no tendrá ninguna variación en sus condiciones por efecto del muelle de altura de Progreso, derivado fundamentalmente de una menor agitación que puede tenerse y de un cambio en la orientación del frente de oleaje incidente.

Los factores anteriores originarán sin lugar a dudas una disminución de la capacidad de transporte litoral que como ya se indicó para esta zona es el más reducido en las condiciones actuales, tendencia esta que se seguirá presentando y que hará que el transporte litoral que actualmente azolva parte del canal de acceso de

Yukalpetén se vea igualmente reducido.

La zona entre Yukalpetén-Chelem seguirá estando sujeta al mismo transporte litoral existente, que como ya se indicó igualmente en el orden los  $60,000 \text{ m}^3/\text{año}$ , y que al no existir una fuente de abastecimiento se traduce normalmente en un proceso erosivo.

#### IV.2.) ALTERNATIVAS DE SOLUCION.

Ya definida el área con mayores problemas de erosión actuales y que seguirán presentando en el futuro por efectos naturales independientemente de la construcción de la terminal remota del Puerto de altura de Progreso es necesario establecer un proyecto de obras de protección que permitirán a los propietarios de bienes inmuebles ubicados en la zona playera, proteger adecuadamente sus construcciones contra el proceso erosivo que en forma natural se presenta en esa área.

El presente estudio hace mención de los conceptos que involucra la estabilización de la línea de playa mediante obras de protección, desde los estudios básicos, el diseño, hasta su construcción y mantenimiento, sin considerar los costos de cada obra, que no es el objetivo de este estudio por ser un concepto sumamente amplio y queda fuera del alcance del presente.

Dentro del esquema de las alternativas de solución para evitar los procesos erosivos básicamente se pueden considerar las que a continuación se mencionan, y con posibilidades de ser aplicadas en el área. (Ver tabla 4.8)

Para cada una de las ocho alternativas se establecen las características de las obras o requerimientos necesarios para su ejecución, procediendo a su evaluación a fin de que sea seleccionada

la alternativa más adecuada, como se muestra en el siguiente punto que es la evaluación y selección de la alternativa más óptima.

ALTERNATIVA	TIPO DE OBRA	OBJETIVO
1	MURO MARGINAL A BASE DE MATERIALES LOCALES.	FIJACION DE LA LINEA DE PLAYA.
2	PANTALLA RIGIDA A BASE DE CONCRETO (MALECON).	FIJACION DE LA LINEA DE PLAYA.
3	PANTALLA FLEXIBLE A BASE DE DOVE LAS PREFABRICADAS (MALECON).	FIJACION DE LA LINEA DE PLAYA.
4	PROTECCION A BASE DE TOMBOLOS.	DISMINUCION DE LA ENERGIA EXISTENTE DEL CAJAJE Y LAS CORRIENTES LIT.
5	ROCKELAS EMERGED EN FORMA PIRAMIDA A LA PLAYA A BASE DE ENVOLUCIENTO A LA -3 M. DE PROFUNDEDAZ.	DISMINUCION DE LA ENERGIA EXISTENTE DEL CAJAJE Y LAS CORRIENTES LITOMILES.
6	PROTECCION A BASE DE ESPICONES.	REPOSICION DEL MATERIAL EROSIONADO.
7	RESTITUCION DEL MATERIAL PLAYERO A BASE DE EMPAQUE DEL MATERIAL EMPAQUE DEL CANAL DE ACCESO DEL PUERTO DE YUCAJITEN A LAS ZONAS AFECTADAS.	REPOSICION DEL MATERIAL EROSIONADO.
8	RESTITUCION DEL MATERIAL PLAYERO A BASE DE ACOMPAÑAMIENTO DEL MATERIAL EMPAQUE DEL CANAL DE ACCESO DEL PUERTO DE YUCAJITEN.	REPOSICION DEL MATERIAL EROSIONADO.

TABLA 4.8) ALTERNATIVAS DE SOLUCION CON MAS POSIBILIDAD DE SER APLICADAS EN EL AREA DE ESTUDIO.

NOTA: LA CLASIFICACION DE ESTAS OBRAS DE PROTECCION SE ENCUENTRAN EN EL CAPITULO III.

#### IV.3.) EVALUACION Y SELECCION.

Estas se manejaron como a continuación se observa:

##### IV.3.1.) EVALUACION

A continuación se presenta una evaluación de las alternativas de solución con más posibilidades de ser aplicadas para la solución del problema existente en la zona; mediante la muestra de los factores que involucra cada una de las alternativas, a fin de seleccionar la más factible y con menores problemas para ser aplicada.

En la tabla 4.9 se presenta a manera de matriz comparativa el panorama general de las ocho alternativas de solución que se mencionan en la tabla 4.8.

##### IV.3.2.) SELECCION

De la evaluación anterior, es de verse claramente que; la reposición de material playero mediante acarreo o bombeo, desde el canal de acceso del Puerto de Yukalpetón hasta la zona afectada es la solución más adecuada al problema; ya que para evitar problemas erosivos es el de reponer el material playero que está siendo erosionado en cantidades semejantes a la capacidad de transporte existente en la zona, para lo cual, se recurre a este tipo de trabajos que permiten restablecer las condiciones del transporte litoral, cuando este ha sido cortado por alguna obra o corriente existente.

En algunos casos se recurre igualmente a la reposición desde tierra del material erosionado, en un proceso de mantenimiento periódico en épocas del año bien establecidas.



Para el caso específico de la Zona de Chelém-Yukalpetén en la cual se obtuvo, de la comparación entre el perfil de equilibrio teórico y el perfil existente una falta de material del orden de  $72,000 \text{ m}^3/\text{año}$  cantidad ésta relativamente pequeña y cercana a los  $50,000 \text{ m}^3/\text{año}$  que se reportan que se dragan actualmente en el canal de acceso de Yukalpetén, se considera conveniente proponer -- que estos materiales producto del dragado de mantenimiento del canal de acceso sean depositados en forma sistemática frente a la línea de playa, comenzando su depósito frente a las zonas en las que la erosión es más intensa a manera de ir conformando una nueva línea de playa (Ver plano No. 3 en los anexos).

En caso necesario se podrá recurrir a la extracción de material que se acumule entre la zona del acceso a Yukalpetén y el Muelle de Progreso, para complementar el volumen requerido en la reposición del material a lo largo de los 6 km. de costa (Ver plano -- No. 3 en los anexos).

Si se considera que el dragado de mantenimiento se hace anualmente, como una necesidad para la operación del Puerto de Yukalpetén, los problemas de ejecución para esta alternativa son prácticamente nulos.

Si por otra parte se considera que la reposición del material tendrá que ser hecho especialmente sin tomar en cuenta los volúmenes producto del mantenimiento del canal de acceso de Yukalpetén, los problemas de dragado y colocación frente a la zona playera del orden de  $72,000 \text{ m}^3$  se agudizan considerablemente.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Del estudio de la evolución playera entre Chelem y Progreso, fue posible establecer dos zonas bien definidas en las que se presentan problemas diferentes; el primer tramo comprendido entre Progreso y el acceso de Yukalpetén en el que la tendencia general es el azolve y el segundo entre Yukalpetén y Chelém, en el que se tiene una tendencia a la erosión, que se ha venido incrementando ante la falta de material playero que se ha ido acumulando en el primer tramo por efecto del rompeolas Este del Puerto de Yukalpetén, principalmente.

El estudio muestra que el período de oleajes someros corresponde a la época de calmas, existe una tendencia a la formación de una berma que consolida una línea de playa a una distancia entre 20 y 30 m. de la línea de rompientes, que es destruida en la época de oleajes más severos, como los que se presentan en el período de tormenta, cuando se combinan los oleajes más fuertes con una sobre elevación del nivel del mar, por efectos de los vientos del norte que originan un retroceso de la línea de playa, que llega a poner en peligro las construcciones que se han realizado en una zona que se encuentra a estas variaciones del perfil playero.

De los estudios realizados se concluye igualmente que las obras en construcción del Muelle de Altura de Progreso, no tendrán una influencia determinante en el comportamiento de la línea de playa, ya que en la zona entre Yukalpetén y Chelém particularmente, no tendrán ninguna modificación en sus características naturales y que únicamente entre Yukalpetén y Progreso se sentirá una tendencia al acumulamiento de material derivado de la disminución de la energía del oleaje en esa zona.

Considerando que el proceso erosivo entre Yukalpetén y Chelém seguirá como hasta la fecha se ha presentado, se ha estimado conveniente analizar diferentes posibilidades de proteger la línea de playa para lo cual se plantearon básicamente ocho alternativas:

- 1.) Muro marginal a base de materiales locales.
- 2.) Pantalla rígida a base de concreto (Malecón).
- 3.) Pantalla flexible a base de dovelas prefabricadas (Malecón).
- 4.) Protección a base de tómbolos.
- 5.) Rompeolas sumergido a base de rocas.
- 6.) Protección a base de espigones.
- 7.) Restitución del material playero a base de bombeo del material dragado del canal de acceso del Puerto de Yukalpetén a las zonas afectadas.
- 8.) Restitución del material playero a base de acarreo del material producto del dragado del canal de acceso al Puerto de Yukalpetén hasta las zonas afectadas.

El análisis comparativo mostró que la alternativa más factible es la restitución de Material Playero, con el producto del mantenimiento anual que se realiza en el canal de acceso a Yukalpetén, por lo que se propone como acción a realizar con el fin de restituir las condiciones de la línea playera frente a esta zona de estudio.

Por lo que respecta a la zona entre Yukalpetén y Progreso se ha concluido que el proceso de acumulación que existe actualmente y que se verá incrementado con la presencia de las obras del Puerto de Altura de Progreso, permitirán un incremento en la zona costera y disminuirán posiblemente los volúmenes que actualmente se depositan en el canal de acceso de Yukalpetén.

## RECOMENDACIONES

En función de las conclusiones anteriores se recomienda:

A) Que los volúmenes de material producto del dragado de mantenimiento del canal de acceso al Puerto de Yukalpetén, se depositen frente a la línea de costa, lo más cerca posible de la línea de rompientes, en función de las características del equipo de dragado que se utiliza para realizar esos trabajos de mantenimiento.

B) Que se continúe con un control del comportamiento de la línea de playa a fin de detectar las zonas que se estima están más afectadas y consecuentemente realizar frente a ellas los depósitos del material producto del dragado.

C) Que en caso de que el material dragado en el canal de acceso sea inferior a los volúmenes del orden de  $70,000 \text{ m}^3/\text{año}$  que requiere esta playa para su estabilización, se tomen de la zona de acumulación comprendida entre Yukalpetén y Progreso.

D) Que en caso de que el proceso erosivo sea de consideración en algunas secciones bien determinadas se proceda a la construcción de una protección marginal, uniendo los espigones ya construidos que limiten la zona de erosión considerada.

E) Que los controles realizados en forma sistemática cuando menos, cada 6 meses, sean comparados con los estudios realizados, a fin de determinar en un plazo más amplio los problemas derivados de la evolución de la línea de playa en el litoral entre Chelém y Progreso.

## B I B L I O G R A F I A

- 1) SPRINGAL, R.  
Estudios y Análisis estadístico del Oleaje Generado por Huracanes en el Sureste del Golfo de México.  
Publicación 361  
Instituto de Ingeniería, UNAM México 1975.
- 2) SANCHEZ J.L.  
Manual de Hidráulica Marítima Elemental  
PEMEX  
México 1992.
- 3) INSTITUTO DE GEOFISICA.  
Tablas de Predicción de Mares en los Puertos del Golfo de México y Mar Caribe.  
UNAM, México.
- 4) IRIBARREN, R.  
Obras Marítimas, Oleaje y Diques.  
Editorial Dossat, S.A.  
Madrid, España 1964.
- 5) WIEGEL  
Oceanografía.  
Editorial Englewood, Prentice-Hall
- 6) U.S. ARMY.  
Shore Protection Manual Vol. I, II, III.  
Editorial U.S. Army, Coastal Engineering Research Center.

- 7) RANDOM SEAS AND DESIGN  
Of. Maritime Structures  
Yoshimi Goda  
University of Tokio Press.
- 8) COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD (INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
ELECTRICAS).  
Manual de Diseño de Obras Civiles.  
Hidrotecnia Tomo A.2.1.4. "Hidráulica Marítima".
- 9) FACULTAD DE INGENIERIA, DIVISION DE EDUCACION CONTINUA.  
Memorias del 1er. Curso Internacional de Desarrollo Marítimo,  
Portuario y Costero. Vol. I, II, III y IV.  
México, Junio de 1989.
- 10) ASOCIACION MEXICANA DE INGENIERIA PORTUARIA  
Memorias del 1er. Congreso Internacional de Ingeniería Marítima y Portuaria. Vol. I y II.  
México, Octubre de 1989.
- 11) FRIAS VALDEZ ARMANDO Y MORENO CERVANTES G.  
Ingeniería de Costas.  
Editorial AMIP  
I.P.N. México, D.F. 1986.
- 12) BUSTAMANTE AHUMADA, CORIA TREVIÑO M. Y OTROS.  
Ingeniería Marítima  
Ediciones Temas Marítimos, S. de R.L.  
México, 1976.
- 13) JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY  
Texto para el Proyecto del Centro Hidráulico Portuario.  
Vol. Núm. 9.

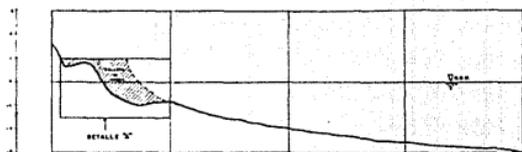
Erosión de la Costa y Azolvamiento del Puerto.  
Julio de 1987.

- 14) BENITEZ GARCIA GERMAN ANTONIO  
Obras de Protección Portuaria y Rompeolas en Puerto Progreso,  
Yucatán. (Tesis Profesional)  
UNAM ENEP ACATLAN. 1989.  
pp.147.
  
- 15) RODRIGUEZ PEREZ FERNANDO  
Dirección y Explotación de Puertos  
Puerto Autónomo de Bilbao España 1989.  
pp.488.

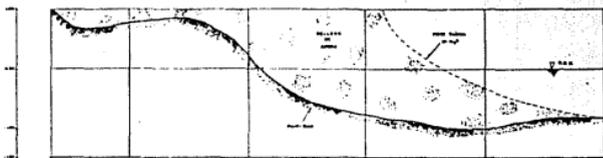
## A N E X O S







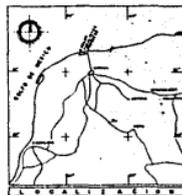
**BELLENO PARA PROTECCION PLAYERA**



**DETALLE 'A'**



**FRENTE PLAYERO POR PROTEGER**



**NOTAS**

1. Se han considerado los datos de campo.
2. Se han considerado los datos de campo.
3. Se han considerado los datos de campo.
4. Se han considerado los datos de campo.
5. Se han considerado los datos de campo.
6. Se han considerado los datos de campo.
7. Se han considerado los datos de campo.
8. Se han considerado los datos de campo.
9. Se han considerado los datos de campo.
10. Se han considerado los datos de campo.

<b>UNAM</b>	INGENIERIA CIVIL
	ESTRUCTURAS
<b>ENEP</b>	ACATLAN
ALTERNATIVA DE SOLUCION	3
CONFECCION DEL DISEÑO	3