



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN**

**“CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA LOS  
ESTUDIOS Y TRABAJOS DE LA INGENIERÍA  
DE RÍOS Y COSTAS”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A :  
NANCY ORTEGA SUÁREZ**



**ASESOR:  
ING. JESÚS IGNACIO HEREDIA DOMÍNGUEZ**

**MÉXICO 2014**



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 esta 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.



---

---

## Dedicatorias

### **A mi Madre:**

Que con su apoyo incondicional y comprensión me alentó a continuar y nunca darme por vencida. Por la confianza y amor que siempre me brindó, que con su ejemplo me enseñó a ser una mujer de bien.

### **A mi Padre:**

Que con sus consejos y ejemplos fue el motor que me impulsaba día con día a seguir luchando. Por la confianza y amor que siempre me brindó. Por esos desvelos y esos días en los que me hacía sentir mejor.

### **A mis Gemelitos:**

Por todos los momentos hermosos que hemos compartido, por esos maravillosos recuerdos, por ser unos excelentes hermanos a los que amo y quiero con todo mi corazón.



**A mi Abuelita Rica:**

Porque desde pequeña se ha convertido en mi segunda madre, por todos los consejos y cuidados que me ha brindado y por todo el amor y confianza que ha depositado en mí.

**A la Facultad de Estudios Superiores  
Aragón:**

Por abrirme las puertas, la oportunidad de crecer y brindarme las herramientas para mi formación académica.

**Al Ing. Juan Alfonso González  
Sakaguchi:**

Por todo el apoyo durante la carrera, por alentarme a seguir adelante con su confianza y fe en mí. Por brindarme su amistad incondicional.

**Al Ing. Jesús Ignacio Heredia  
Domínguez:**

Por la confianza en mí, por sus consejos y su apoyo incondicional para la realización de este trabajo.



## Consideraciones Básicas para los estudios y trabajos de la Ingeniería de Ríos y Costas



### **Al M. en I. Mario Sosa Rodríguez:**

Por el apoyo brindado en el transcurso de la carrera, porque gracias a ello me permitió seguir estudiando sin dejar mi trabajo.

A todos aquellos que me han apoyado a lo largo de este camino, amigos, compañeros de trabajo, académicos, profesores, familiares, y personas que motivaron la culminación de este trabajo.  
Gracias.



## Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I: Mareas.....</b>	<b>6</b>
I.1 Mareas.....	7
I.2 Marea astronómica.....	7
I.3 Equipo de medición.....	13
I.4 Corrientes de marea.....	15
I.5 Medición de las corrientes.....	17
I.6 Mareas de tormenta.....	18
<b>Capítulo II: Características y fenómenos del oleaje.....</b>	<b>20</b>
II.1 Oleaje.....	21
II.2 Longitud del oleaje.....	22
II.2.1 Condiciones de frontera.....	23
II.3 Perfil de la superficie libre y componente de la velocidad de las partículas del agua al paso de una onda progresiva.....	30
II.3.1 Perfil de la superficie libre.....	30
II.3.2 Velocidad y aceleración de las partículas de agua al paso de una onda progresiva.....	31
II.4 Predicción del oleaje.....	34
II.4.1 Método de Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB).....	36
II.5 Refracción de oleaje.....	37



<b>Capítulo III: Vientos y corrientes litorales.....</b>	<b>42</b>
III.1 Viento.....	43
III.1.1 Características del viento.....	44
III.1.2 Diagramas de Lenz.....	46
III.2 Corriente.....	47
III.2.1 Fórmulas para evaluar la velocidad de la corriente litoral.....	49
III.2.2 Fórmulas que consideran batimétricas rectas y paralelas....	52
<b>Capítulo IV: Regímenes litorales.....</b>	<b>57</b>
IV.1 Introducción.....	58
IV.2 Dirección del movimiento de arena .....	59
IV.3 Cálculo de la cantidad de transporte litoral a lo largo de la costa.....	62
IV.3.1 Ecuaciones del transporte litoral a lo largo de la costa.....	66
IV.4 Evolución de la línea de playa utilizando la teoría de una línea.....	67
IV.5 Tratamiento sobre ángulo de oleaje incidente.....	71
<b>Capítulo V: Diseño de rompeolas y espigones.....</b>	<b>74</b>
V.1 Rompeolas y espigones.....	75
V.2 Diseño de estructuras formadas con elementos sueltos.....	80
V.2.1 Diseño de la sección transversal de la estructura.....	80
V.2.2 Peso de los elementos de la coraza.....	82
V.2.3 Ola de diseño.....	83
V.2.4 Coeficiente de estabilidad.....	84
V.2.5 Elevación y ancho de la corona de la coraza.....	85



V.2.6 Espesor de la capa secundaria o de la coraza y densidad de elementos colocados en la coraza.....	87
V.2.7 Profundidad de la coraza.....	88
V.2.8 Peso de los elementos de la coraza en el morro.....	88
V.2.9 Cálculo de los sobreeanchos de corona.....	89
<b>Capítulo VI: Estabilidad de accesos costeros.....</b>	<b>92</b>
VI.1 Introducción.....	93
VI.2 Criterios de estabilidad de accesos.....	93
VI.2.1 Estabilidad horizontal o de localización.....	94
VI.2.2 Estabilidad vertical o de la sección transversal.....	95
VI.3 Factores de estabilidad.....	95
VI.4 Forma de paso del material.....	101
VI.5 Grado de estabilidad.....	102
<b>Conclusiones.....</b>	<b>104</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>106</b>



---

---

## Introducción

El origen de la Ingeniería es tan antigua como las primeras civilizaciones. La necesidad que tuvo el hombre desde la aparición de las primeras sociedades de registrar los acontecimientos, es decir, el hombre descubrió que podía transformar, mediante algún proceso, las materias primas en productos de ciertas características deseadas. Luego, preocupado del problema del transcurso y medición del tiempo, le llevó a la invención de mecanismos, y a medida que las sociedades se hacían más complejas y con la aparición de problemas de vivienda, transportación y aprovisionamiento de alimentos se desarrollan diversas soluciones ante las problemáticas presentadas por su entorno social, así como la intervención de algunos métodos de construcción propios del hombre.

La **Ingeniería** es el conjunto de conocimientos y técnicas científicas aplicadas al desarrollo, implementación, mantenimiento y perfeccionamiento de estructuras (tanto físicas como teóricas) para la resolución de problemas que afectan la actividad cotidiana de la sociedad. Para ella, el estudio, conocimiento, manejo y dominio de las Matemáticas, Física y otras Ciencias es aplicado profesionalmente tanto para el desarrollo de tecnologías, como para el manejo eficiente de recursos y/o fuerzas de la naturaleza en beneficio de la sociedad.

Otra característica que define a la Ingeniería es la aplicación de los conocimientos científicos a la invención o perfeccionamiento de nuevas técnicas. Esta aplicación se caracteriza por usar el ingenio principalmente de una manera más pragmática y ágil que el método científico, ya que la Ingeniería está limitada al tiempo y recursos dados por el entorno en que ella se desenvuelve. La Ingeniería ha sido un aspecto de la vida desde el inicio de la existencia humana.



La Ingeniería tenía antiguamente dos ramas fundamentales: Militar y Civil. Pero con el paso del tiempo han aparecido otras grandes sub-ramas como la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Informática o de Sistemas, Ingeniería Química, Ingeniería en Ciencias Biológicas, Ingeniería Industrial, entre otras.

La **Ingeniería Civil** es la disciplina que emplea conocimientos de Física, Química, Matemáticas, Humanidades y específicos en Construcción, Estructuras, Geotecnia, Hidráulica, Sanitaria, Ambiental, Sistemas y Transportes para encargarse del diseño, construcción y mantenimiento de las infraestructuras emplazadas en el entorno, incluyendo carreteras, ferrocarriles, puentes, canales, presas, puertos, aeropuertos, diques y otras construcciones relacionadas. La Ingeniería Civil es la más antigua después de la Ingeniería Militar (para distinguir las actividades no militares con las militares).

Tradicionalmente ha sido dividida en varias subdisciplinas incluyendo Ingeniería Ambiental, Ingeniería Sanitaria, Ingeniería Geotécnica, Geofísica, Geodesia, Ingeniería de Control, Ingeniería Estructural, Mecánica, Ingeniería del Transporte, Ciencias de la Tierra, Ingeniería del Urbanismo, Ingeniería del Territorio, Ingeniería Hidráulica, Ingeniería de los Materiales, Ingeniería de Costas, Ingeniería de Ríos, Agrimensura, e Ingeniería de la Construcción.

En el presente trabajo se hace referencia de la Ingeniería de Ríos y Costas. Sin embargo, es necesario conocer algunos fundamentos:

La superficie de la Tierra está cubierta por continentes e islas, estos poseen varios lagos, ríos y otras fuentes de agua, que junto con los océanos, representan el 70.8 % de la superficie constituyendo la Hidrósfera. La abundancia de agua en la



superficie de la Tierra es una característica única que lo distingue de los otros planetas del Sistema Solar.

La masa de los océanos es de aproximadamente  $1.35 \times 10^{18}$  Toneladas Métricas, o aproximadamente  $1/4400$  de la masa total de la Tierra. Los océanos cubren un área de  $361.84 \times 10^6$  km<sup>2</sup> con una profundidad media de 3682.2 m, lo que resulta en un volumen estimado de  $1.3324 \times 10^9$  km<sup>3</sup>. Aproximadamente el 97.5 % del agua es salada, mientras que el restante 2.5 % es dulce. La mayor parte del agua dulce (68.7 %) se encuentra actualmente en estado de hielo.

Las zonas costeras son áreas dinámicas de cambios naturales y de uso humano creciente. Aunque ocupa menos del 15% de la superficie emergida de la Tierra, acoge a más del 50% de la población mundial (se estima que más de 3.1 mil millones de personas viven a menos de 200 kilómetros del mar). Para el año 2025, se estima que 75% de la población mundial residirá en las zonas costeras, esto significa que las actividades humanas originadas en esta pequeña porción de territorio impondrán una presión desorbitada sobre el sistema global. Las zonas costeras contienen riqueza en recursos para producir bienes y servicios además de albergar a la mayor parte de las actividades comerciales e industriales.

La creciente demanda por el aprovechamiento y conservación de las zonas costeras en el mundo ha llevado a la necesidad de invertir en investigación para un mejor entendimiento de los procesos físicos en la interfase mar-tierra-aire y la interacción con las obras y acciones del hombre, de ahí la importancia del campo disciplinario de Ingeniería de Ríos y Costas.

La **Ingeniería de Ríos** o **Ingeniería Fluvial** estudia las intervenciones humanas en los ríos para su adecuación al aprovechamiento del recurso hídrico (suministro de agua, vertimiento de excesos, encauzamiento, protección del fondo y



de las márgenes), la reducción de los riesgos de daño por inundación o bien por la intersección del río con una obra de infraestructura (carretera, ferrocarril, conducciones, etc.).

La **Ingeniería de Costas** o **Ingeniería de Playas** trata los fenómenos relacionados con la generación de olas y mareas, su cuantificación, la determinación de sus efectos sobre la navegación marítima, la conservación de las playas y la protección de las obras que se construyen en las costas. Tiene como objetivo resolver los problemas que se plantean en la franja costera a las escalas de tiempo y espacio manejadas por el hombre y con los medios técnicos y económicos que este posee.

Se puede afirmar que en las actividades señaladas en la Ingeniería de Ríos e Ingeniería de Costas interviene el ingeniero civil, bien sea directa o indirectamente. Ya que interviene en el dimensionamiento, proyecto, diseño y construcción de estructuras; asimismo, la presencia de la Ingeniería Civil es imprescindible para crear infraestructura que permita realizar las actividades correspondientes a la recreación de la población.

Por todo lo escrito anteriormente, es relevante realizar las consideraciones básicas para los estudios y trabajos de la Ingeniería de Ríos y Costas. Para llevar a cabo estas consideraciones se debe conocer del fenómeno de mareas, como se produce y como se puede medir.

Se analizará las características y fenómenos del oleaje mediante el cálculo de varias expresiones matemáticas. Asimismo, con la aplicación de algoritmos, se examinarán los fenómenos de vientos y corrientes litorales.



Para los regímenes litorales se emplearán modelos matemáticos para calcular los fenómenos que se pueden presentar. Una vez revisado y calculado los conceptos anteriores se procederán al diseño de rompeolas y espigones y se rematará con la revisión de la estabilidad de accesos costeros.

En el presente trabajo se otorgan las consideraciones básicas para los estudios y trabajos de la Ingeniería de Ríos y Costas, donde en cada capítulo se presenta un análisis general y básico con el uso de modelos matemáticos para describir una estructura hidráulica en fenómenos físicos de la naturaleza con una interpretación lógica de los resultados.



# *CAPÍTULO I*

## *MAREAS*



## I.1 Marea

La marea es el movimiento periódico de ascenso y descenso del nivel del mar, debido a las fuerzas de atracción gravitatoria que el Sol, y sobre todo la Luna, ejercen sobre la Tierra.

## I.2 Marea astronómica

El fenómeno de la marea astronómica es ocasionado por la atracción de cuerpos celestes sobre la superficie líquida de la Tierra, dando lugar a movimientos de grandes masas de agua. Los cuerpos celestes que tienen influencia decisiva en las mareas son: el Sol por su enorme masa: siendo sin embargo, la atracción de la Luna 2.18 veces mayor que la del Sol, ya que la fuerza de atracción es directamente proporcional a las masas de los cuerpos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

Las fuerzas de principal importancia en la generación de las mareas astronómicas son:

- Las fuerzas gravitacionales del Sol y la Luna.
- La fuerza centrífuga debida al movimiento de la Tierra alrededor de su órbita.
- La fuerza de Coriolis debida a la rotación de la Tierra alrededor de su eje.
- La fuerza de fricción debida al movimiento del agua con respecto a las fronteras que la contienen.

Si observamos las posiciones del Sol y la Luna, podemos darnos cuenta de la relación existente con el fenómeno de las mareas.

Esta influencia es función de las fases de la Luna, la posición relativa de los tres astros: Tierra, Luna y Sol; y la distancia de éstos con nuestro planeta son las causas que determinan a las mareas. Por esta razón las fases de la Luna juegan un papel muy importante en la amplitud de las mareas. Asimismo, recordaremos que la Luna describe una órbita elíptica alrededor de la Tierra, que ocupa uno de sus focos, que el periodo completo de sus fases o mes lunar es de 29 días, 12 horas, 44 minutos y que la duración del día lunar es de 24 horas, 50 minutos, 30 segundos.

Cuando las posiciones del Sol y la Luna están en línea recta con la Tierra, se suman las atracciones de los dos astros y se producen las mareas vivas. Cuando la Luna se halla en cuarto creciente o cuarto menguante, formando ángulo recto con los ejes de la Tierra y el Sol, las atracciones se contrarrestan, dando lugar a las mareas muertas.

Ahora bien, dentro de estas mareas vivas y muertas existen dos que corresponden a las sicigias de primavera y otoño, es decir, las llamadas equinocciales, que son las mareas vivas del año, mientras que las de menor carrera de marea (mareas muertas), son las correspondientes a los solsticios, comienzo de las estaciones de verano e invierno, ver Fig. No. 1.1.

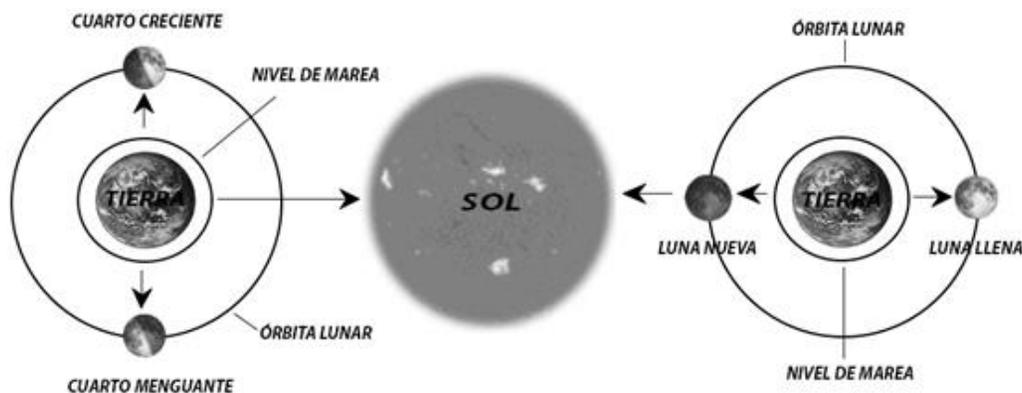


Fig. No. 1.1 Fenómenos de las mareas vivas y mareas muertas.

Los movimientos alternativos de las aguas del mar producidos por las mareas en un sitio determinado, se manifiestan por un ascenso del nivel hasta llegar a un máximo que recibe el nombre de pleamar, descendiendo después hasta alcanzar al cabo de cierto tiempo un valor mínimo llamado bajamar que se repite en forma periódica dependiendo del tipo característico de la marea. Por lo tanto, se entiende por periodo de la marea al tiempo transcurrido entre dos pleamares o dos bajamares consecutivas, y amplitud o carrera de la marea a la altura entre un pleamar y un bajamar siguiente o viceversa, es decir, la altura entre dos valores extremos consecutivos, ver Fig. No.1.2.

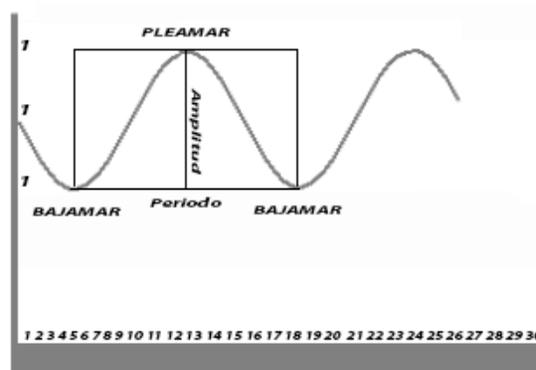


Fig. No. 1.2 Fenómeno de pleamar y bajamar

Atendiendo al número de pleamares (ascensos) y de bajamares (descensos) que tienen lugar en un día y su amplitud, las curvas de mareas (mareograma) se clasifican en tres tipos:

- a) Mareas semidiurnas.- Se caracterizan por tener dos pleamares y dos bajamares en un día, se presentan bajo una forma muy regular, y su amplitud es aproximadamente la misma. Su periodo es de medio día (12 horas, 25 minutos), de aquí su nombre de semidiurna (Fig. No. 1.3a). Este tipo de mareograma es el más frecuente en la mayoría de las costas del Océano Atlántico.

- b) Mareas diurnas.- Llamadas así por presentar solamente un pleamar y un bajamar en un día. Su periodo es de un día (24 horas, 50 minutos), ver Fig. No. 1.3b, generalmente son de pequeña amplitud y tienen lugar en el Golfo de México.
- c) Mareas mixtas.- Caracterizadas por tener dos pleamares y dos bajamares por día, pero con la particularidad de presentar amplitudes de marea diferentes. Suele suceder que la primera bajamar del día es la más baja, y la segunda pleamar la mayor, ver Fig. No. 1.3c, este tipo suele terminar transformándose en el de marea diurna al cabo de un mes, ya que una de las amplitudes va disminuyendo gradualmente, y a la vez que el periodo de la otra aumenta paulatinamente, al ser cada vez más lento el proceso de ascenso y descenso de las aguas, hasta acabar en una sola marea por día. Este tipo de marea es muy frecuente en el Océano Pacífico y muy raro en el Océano Atlántico, en ocasiones es posible observarlo en algún puerto de las Antillas.

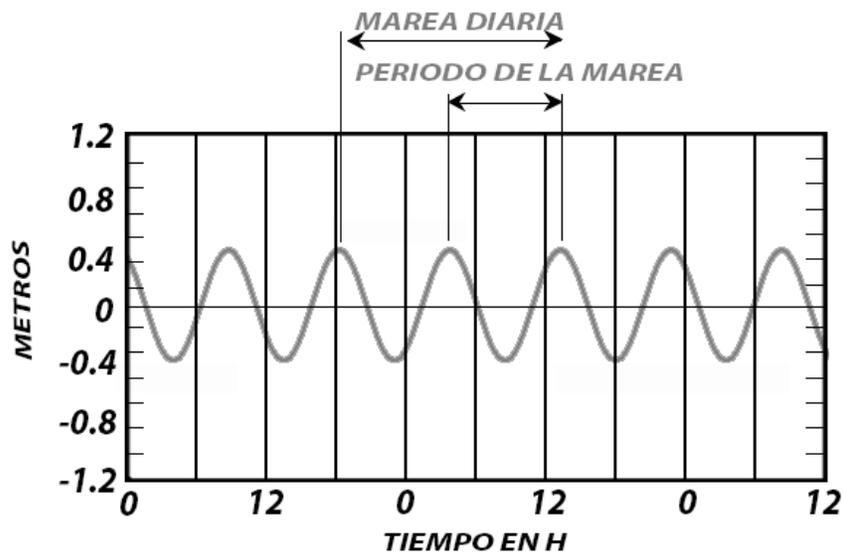


Fig. No. 1.3a Mareas semidiurnas

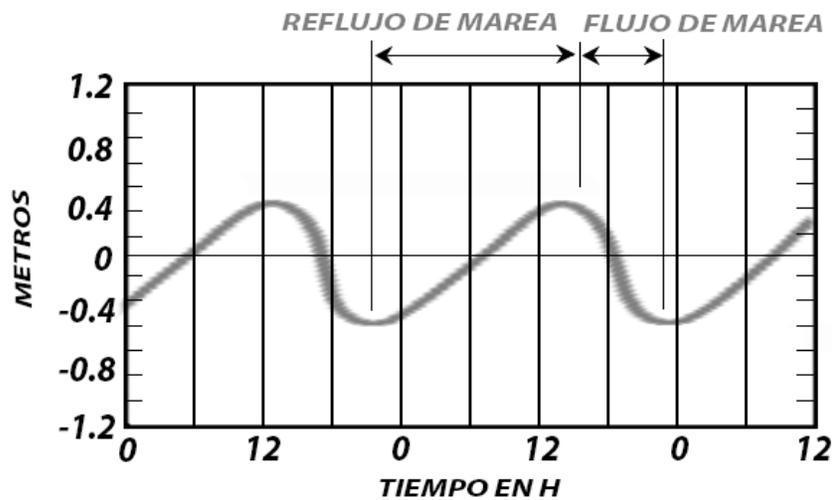


Fig. No. 1.3b Mareas diurnas

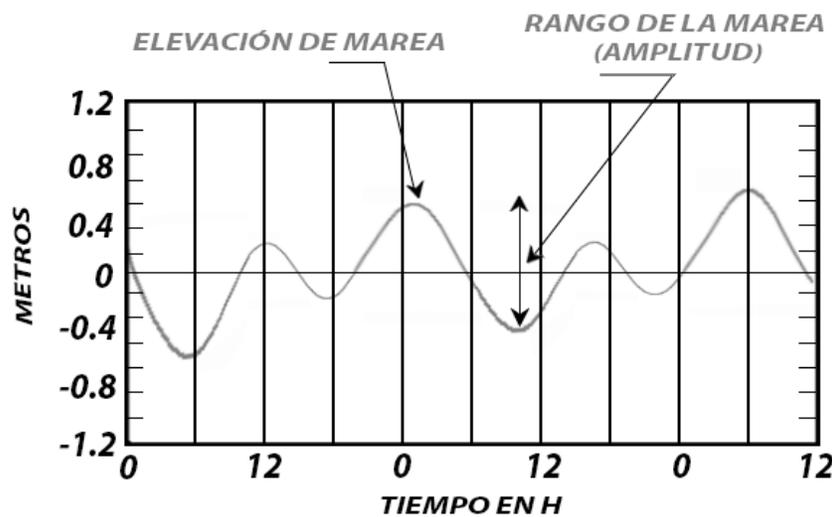


Fig. No.1.3c Mareas mixtas

La fase de ascenso de la marea astronómica en un estuario o en una laguna litoral se denomina flujo (flujo de agua con dirección del mar hacia aguas arriba) y la de descenso se denomina refluo o vaciante (flujo de agua con dirección de aguas arriba hacia el mar).

La variación de los niveles de agua producida por las mareas y la necesidad de tener alguna referencia para la construcción de una estructura, requiere algún plano de referencia. En general, se usan los planos que a continuación se define:



- 1) **Altura Máxima Registrada (A.M.R.):** Es el nivel más alto registrado en la estación.
- 2) **Nivel de Pleamar Media Superior (N.P.M.S.):** Es el promedio de la más alta de las dos pleamares diarias durante el periodo considerado en cada estación.
- 3) **Nivel de Pleamar Media (N.P.M.):** Es el promedio de todas las pleamares durante el periodo considerado en cada estación. Cuando el tipo de marea es diurna, este plano se calcula tomando el promedio de la pleamar más alta diaria, lo que equivale a que la pleamar media en este caso sea la misma que la pleamar media superior.
- 4) **Nivel Medio del Mar (N.M.M.):** Es el promedio de las alturas horarias durante el periodo considerado en cada estación.
- 5) **Altura Mínima Registrada (A.M.R.):** Es el nivel más bajo registrado en la estación debido a efectos ajenos a la marea astronómica y sobrepuesta a ella.
- 6) **Bajamar Mínima Registrada (B.M.R.):** Es el nivel más bajo registrado debido a la marea astronómica bajo condiciones meteorológicas normales.
- 7) **Nivel de Bajamar Media Inferior (N.B.M.I.):** Es el promedio de la más baja de las dos bajamares diarias durante el periodo considerado en cada estación. Este plano es el que se utiliza como referencia para el pronóstico de mareas en la costa del Océano Pacífico y Golfo de California.
- 8) **Nivel de Bajamar Media (N.B.M.):** Es el promedio de todas las bajamares durante el periodo considerado en cada estación. Cuando el tipo de marea es diurno, este plano se calcula tomando el promedio de la bajamar más baja diaria, lo que equivale en este caso, a que la bajamar media es lo mismo que la bajamar media inferior.



- 9) Nivel de Media Marea (N.M.M.): Es el plano equivalente entre la pleamar media y la bajamar media, se obtiene promediando estos dos valores.

### **I.3 Equipo de medición**

La medición de las mareas, al igual que el oleaje, representa uno de los grandes problemas de la instrumentación oceanográfica no por las técnicas de diseño de los instrumentos, sino por su instalación pues se requiere fijarlos firmemente y referirlos a algún punto, cuya elevación sea conocida.

El instrumento para medir las mareas se puede simplificar tanto que puede sólo consistir en una escala graduada (regla), sobre la que visualmente se leen los desplazamientos del nivel de agua. Esto se utiliza cuando se efectúan mediciones durante un corto periodo de tiempo, menor de unos tres meses.

En estaciones definitivas o para la adquisición de datos durante períodos mayores se utilizan los mareógrafos que son aparatos destinados a registrar automáticamente las variaciones del nivel del mar. Se componen fundamentalmente de dos partes: un registrador y el sistema destinado a transmitir ha dicho aparato la variación del nivel presentada por el agua.

Esta transmisión puede hacerse de diferentes maneras, lo que da lugar a dos tipos de mareógrafos: los llamados de flotador y los de presión. Los primeros consisten en un flotador de bronce unido por medio de un alambre a una pluma, que va registrando los movimientos del flotador sobre un papel milimétrico enrollado en un tambor, este se mueve accionado por un reloj dando una rotación completa cada 24 horas. De esta manera se obtienen los mareogramas, que son las curvas de variación del nivel del mar en función del tiempo.

Generalmente este tipo de mareógrafo, que es muy usado, requiere de una pequeña obra para su instalación, que consiste en un tubo para el flotador y una caseta para el aparato registrador, por ello, una vez situado no se suele cambiar de lugar debido a las dificultades que entraña. Generalmente el agua del mar no llega directamente al tubo, sino a través de un sifón, para impedir el efecto de perturbaciones secundarias. Ver Fig. No. 1.4.

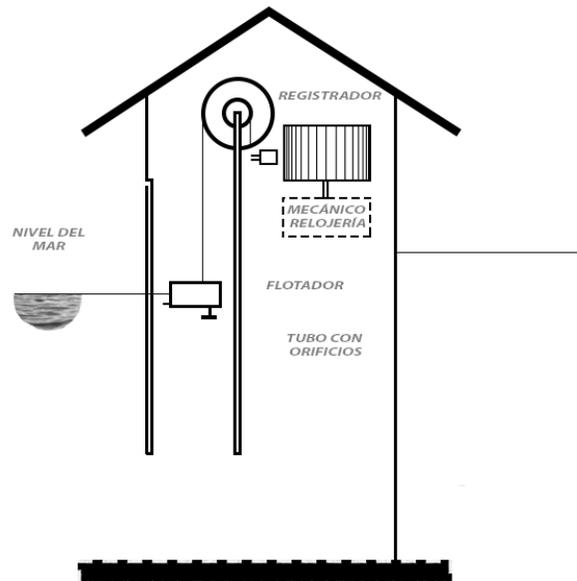


Fig. No.1.4 Mareógrafo de flotador

Otro tipo de mareógrafo es el de presión. Estos normalmente son portátiles, y consisten en esencia de unos manómetros registradores que miden las variaciones de presión ejercidas sobre el fondo del mar por la columna de agua que tiene encima, ver Fig. No. 1.5.

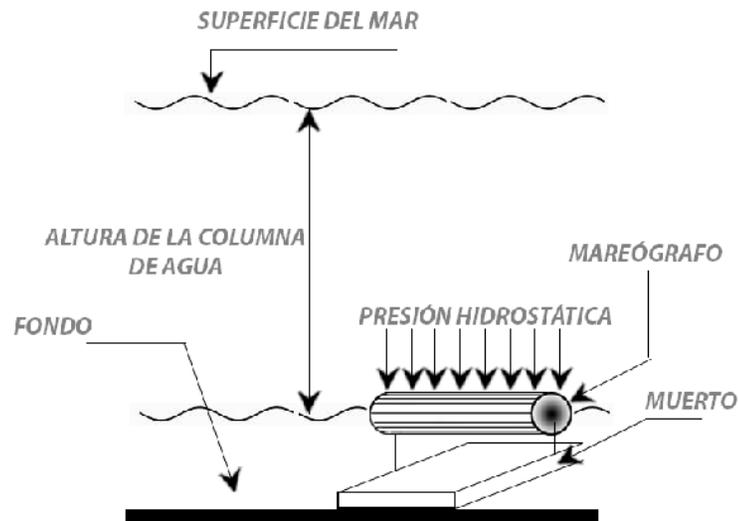


Figura No.1.5 Mareógrafo de presión

#### I.4 Corrientes de marea

Junto con el desplazamiento vertical del agua al producirse la marea, existen también desplazamientos horizontales del agua a los que se les denomina corrientes de marea, las cuales se caracterizan por variar su dirección e intensidad con la marea, tienen poca significancia en mar abierto y en cambio en puertos y estuarios estrechos tienen mucha importancia.

La dirección de una corriente es el rumbo hacia el cual se dirige, es decir, la forma de designar la dirección de una corriente es contraria a la que se utiliza en los vientos, ya que en estos se considera de donde sopla el viento y no hacia donde sopla este. La velocidad de una corriente se expresa tradicionalmente en nudos, cuando se tratan aspectos relativos a la navegación (un nudo = 1 milla marítima por hora = 1853 m/h = 0.5 m/s).

En bahías o lagunas litorales comunicadas con el mar por un canal de ancho considerablemente menor que el área del cuerpo del agua, podemos considerar que

las corrientes son rectilíneas, invirtiéndose el sentido según se presenta en ascenso o descenso de la marea.

La dirección del flujo es el establecido por la corriente, la máxima velocidad de la corriente se presenta más o menos al mismo tiempo en que se presenta el máximo cambio del nivel de agua.

La característica primordial de este tipo de corrientes es su periodicidad que puede ser diurna, semidiurna o mixta según sea la marea astronómica. En las entradas, la corriente de una marea fluye en dos sentidos: cuando está creciendo hacia la zona interna (flujo) y cuando está descendiendo hacia mar adentro (reflujo), ver Fig. No. 1.6.

Las corrientes de marea tienen pequeñas influencias en playas abiertas, pero pueden tener efectos considerables en el fenómeno de movimiento de arena, relacionado con el mantenimiento de accesos a puertos, en fenómenos de erosión en las proximidades de estructuras y en el azolvamiento de puertos. Por lo general, el efecto combinado de éstas corrientes y el oleaje casi siempre originan la formación de barras de arena en el lado exterior de los puertos, y por el contrario en zonas de mar profundo éstas corrientes mantienen una rotación periódica por causas de las fuerzas de Coriolis con velocidades relativamente bajas.

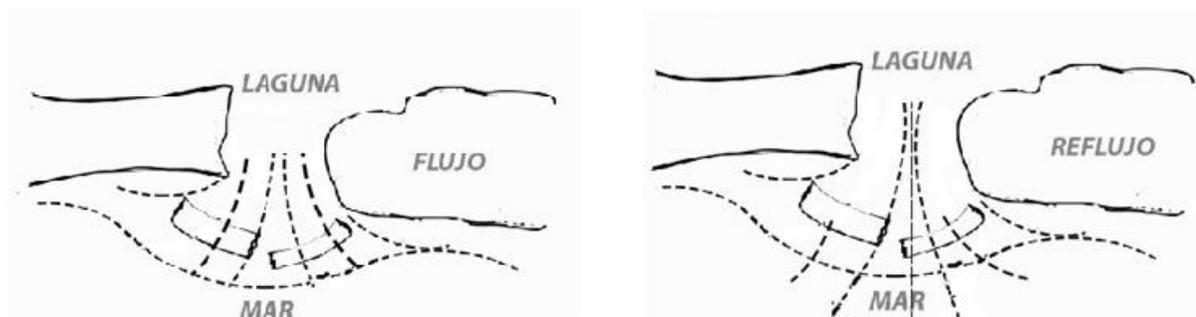


Fig. No.1.6 Dirección de flujo de corriente



Las características de las corrientes de marea, como es fácil de comprender, cambian de un lugar a otro dependiendo en primer término del carácter de la marea y en función también de la profundidad y la complicada topografía que en ocasiones está compuesta por cuencas profundas y someras y/o por estrechos canales y umbrales que las conectan.

## I.5 Medición de las corrientes

La marea siendo un fenómeno complejo en una teoría general no se podrían explicar todas sus características y su propagación como corriente de marea.

Los métodos empleados para la medición de las corrientes pueden dividirse en dos grandes grupos: directos e indirectos; los primeros consisten en hacer medidas con un aparato en el mismo punto, el aparato se llama corrientómetro y puede ser de tipo mecánico o electrónico (ver Fig. No.1.7), estos aparatos se introducen al agua desde una lancha y registran la velocidad en base a una propela calibrada y un contador de revoluciones, el tipo de aparato que se emplee dependerá del sitio, número y duración de las mediciones.



Fig. No.1.7 Corrientómetro



El aspecto de la circulación de las corrientes es uno de los menos conocidos y la mayor parte de este conocimiento ha sido adquirido a partir de métodos indirectos como son: modelos numéricos, Hidrografía, flujo de calor, observaciones de satélite, etc. Una teoría apoyada con mediciones de campo para determinar las características de las corrientes y niveles del mar puede ser posible mediante un método práctico para su estudio, dicho método consiste en modelos numéricos, y es uno de los más destacados. En general los trabajos realizados en base a modelos numéricos lineales muestran que las elipses de marea son casi unidireccionales en todo lo largo, se obtienen las máximas amplitudes en los canales estrechos que rodean las grandes islas.

No hay que olvidar que a excepción de los modelos numéricos, los demás métodos indirectos para inferir la circulación de las corrientes no dan información acerca del campo instantáneo de velocidad.

La mayoría de los estudios realizados en base a mediciones cuentan con un reducido número de ellas y representan condiciones en áreas restringidas.

En términos generales, el cálculo de las corrientes de marea se realiza para pronosticar los cambios que estas sufren y que se originan por la construcción de puertos, rellenos y estructuras en aprovechamientos lagunarios y estuarios en zonas costeras y portuarias, así como en los estudios de contaminación de las áreas de agua portuarias y costeras.

## **I.6 Marea de tormenta**

Una tormenta es una perturbación atmosférica caracterizada por fuertes vientos, los cuales pueden ir acompañados de precipitación. Las tormentas se clasifican en: tormentas tropicales y tormentas extratropicales (tormentas que surgen de un frente frío con un caliente). Ambas tormentas pueden producir levantamientos



anormales en el nivel del agua y en zonas poco profundas cercanas a la costa. Algunas tormentas tropicales son llamadas huracanes cuando los máximos vientos sostenidos son alrededor de 75 millas.



---

---

# ***CAPÍTULO II***

# ***CARACTERÍSTICAS Y FENÓMENOS DE OLEAJE***

## II.1 Fenómeno de oleaje

El oleaje es un evento universal físico que ocurre cuando las olas se acercan a la línea costera. Las olas en aguas profundas (más de la mitad de la longitud de la onda) son partículas de agua que se mueven esencialmente en un movimiento circular.

A medida que las olas se aproximan a la orilla, empiezan a disminuir su profundidad ya que algunas de las partículas de agua entran en contacto con el lecho marino. Esta interacción con el fondo del mar alarga este movimiento circular transformándolo en una elipse a medida que las partículas se van aplanando y alargando. Esto a su vez amplifica el movimiento horizontal de las partículas de agua en la zona cercana a la costa, creando una zona de fuerte oleaje, ver Fig. No. 2.1.

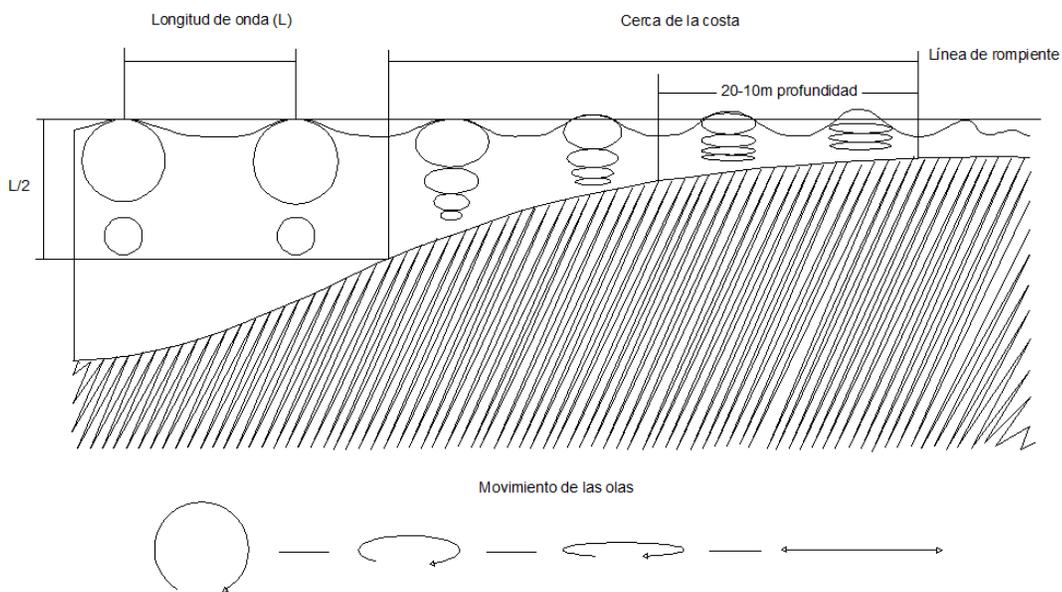


Fig. No. 2.1 Fenómeno de oleaje

## II.2 Longitud del oleaje

Considérese un oleaje progresivo propagándose en una profundidad uniforme,  $h$ , como el mostrado en la Fig. No. 2.2, en donde el eje  $x$  se toma en la dirección de propagación y el eje  $y$  verticalmente hacia arriba.

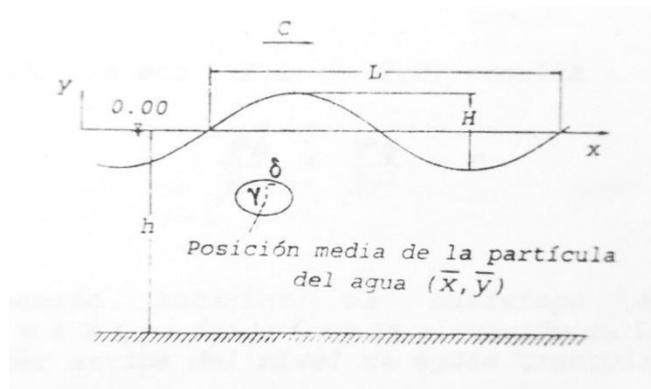


Fig. No. 2.2 Propagación de un oleaje progresivo

Supóngase además que:

- 1) La viscosidad del fluido es despreciable en el movimiento debido al oleaje.
- 2) Los oleajes son generados por una cierta acción desde el nivel de reposo del agua.

Con las consideraciones anteriores, el movimiento del oleaje se supone como un movimiento irrotacional de un fluido ideal, existiendo un potencial de velocidad  $\phi$ , definiéndose las componentes  $u$  y  $v$  en las direcciones  $x$ , y  $y$  respectivamente como sigue:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad ; \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (2.1)$$



Considerando el agua como un fluido incompresible, la ecuación de continuidad se simplifica a:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

Combinado las ecuaciones (2.1) y (2.2) resulta:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.3)$$

La ecuación anterior se satisface en la región  $-h \leq y \leq \zeta, -\infty < x < \infty$ ; donde  $\zeta$  es la elevación de la superficie del agua medida por arriba del nivel de aguas tranquilas.

### II.2.1 Condiciones de frontera

La condición de frontera sobre el fondo impermeable del mar se puede expresar en términos de la siguiente ecuación:

$$(V)_{y=-h} = \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right)_{y=-h} = 0 \quad (2.4)$$

La ecuación anterior significa que la componente de la velocidad en el fondo es cero.

Antes de expresar la condición de frontera en la superficie libre se introducirá la siguiente ecuación de la presión, la cual es la forma integral de la ecuación de momentum para un fluido irrotacional.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + g y = 0 \quad (2.5)$$



Donde,  $p$  es la presión,  $\rho$  es la densidad del fluido y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Tomando  $p_0$  como la presión en la superficie libre  $y = \zeta$ , la ec. (2.5) se reescribe como:

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)_{y=\zeta} + \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)^2 \right]_{y=\zeta} + \frac{p_0}{\rho} + g\zeta = 0 \quad (2.6)$$

La ecuación anterior es una de las condiciones de frontera en la superficie libre. Considerando lo siguiente: cuando la superficie libre se expresa por la ecuación  $F(x, y, z, t) = 0$ , la condición de frontera está dada por  $\frac{DF}{Dt} = 0$ .

Donde  $\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{n} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial}{\partial z}$  es un operador, el primer miembro del operador es la derivada del tiempo en la formulación Lagrangiana, y el segundo miembro es la derivada del tiempo en la formulación Euleriana. En el caso en cuestión, la función es independiente de  $z$ , y está dada por:

$$F(x, y, t) = \zeta(x, t) - y = 0 \quad (2.7)$$

Por lo tanto:

$$\left(\frac{DF}{Dt}\right)_{y=\zeta} = \left(\frac{\partial\zeta}{\partial t} + u \frac{\partial\zeta}{\partial x} - v\right)_{y=\zeta} = 0 \quad (2.8)$$

O también:

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + \frac{\partial\zeta}{\partial x} \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_{y=\zeta} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{y=\zeta} \quad (2.9)$$

La condición anterior, indica que la partícula del agua, presentará algunos estados en el tiempo.



De lo antes presentado, se puede concluir que la ec. (2.3) se puede resolver bajo las condiciones de frontera expresadas por las ecs. (2.4), (2.6) y (2.9).

**Algoritmo 1:** Las condiciones de frontera en la superficie libre dadas en las ecs. (2.6) y (2.9) son no lineales; resultando que la presente formulación del campo de oleajes es un problema no lineal. Antes de resolverlo, es importante señalar una característica física importante del oleaje real; normalmente las alturas de los oleajes en el océano son muy pequeñas comparadas con sus longitudes. Por lo tanto, para eliminar la no linealidad únicamente los oleajes con muy pequeña altura de ola se considerarán en este algoritmo, llamándose teoría de pequeña amplitud o simplemente teoría lineal a la teoría que da solución a este tipo de oleajes.

Al desarrollar los términos  $\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)_{y=\zeta}$  y  $\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{y=\zeta}$  en serie de Taylor, los cuales se encuentran dados en las ecs. (2.6) y (2.9) resulta:

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)_{y=\zeta} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)_{y=0} + \left[\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\right]_{y=0} \zeta + \frac{1}{2}\left[\frac{\partial^2}{\partial y^2}\left(\frac{\partial\phi}{\partial t}\right)\right]_{y=0} \zeta^2 + \dots \dots \dots \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{y=\zeta} = \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{y=0} + \left[\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)\right]_{y=0} \zeta + \frac{1}{2}\left[\frac{\partial^2}{\partial y^2}\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)\right]_{y=0} \zeta^2 + \dots \dots \dots$$

Despreciando los términos superior de orden cero, considerando que la presión  $p_o$  en la superficie libre es la presión atmosférica y refiriendo las presiones respecto a la atmósfera, es posible tomar  $p_o$  igual a cero, resultando las ecuaciones básicas del oleaje en la teoría lineal como sigue:

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} = 0, \quad -h \leq y \leq \zeta, \quad -\infty < x < \infty \quad (2.11)$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_{y=-h} = 0 \quad (2.12)$$



$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{y=0} + g \zeta = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_{y=0} \quad (2.14)$$

Eliminando  $\zeta$  de las ecs. (2.13) y (2.14), se determina otra condición de frontera dada por:

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}\right)_{y=0} = -g \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)_{y=0} \quad (2.15)$$

Cabe mencionar que no todos los términos de las ecs. (2.13), (2.14) y (2.15) son independientes.

Considerando  $\zeta = a \cos k(x - ct)$  como la función que define el perfil del oleaje y tomando en cuenta la condición dada en la ec. (2.13), y asumiendo que la forma de la solución de las ecuaciones básicas es:

$$\phi = f(y) \operatorname{sen} k(x - ct) = f(y) \operatorname{sen}(kx - \sigma t) \quad (2.16)$$

Donde:

$a$  : Es la amplitud del oleaje, igual a  $\frac{H}{2}$

$k$  : Es el número de onda, igual a  $\frac{2\pi}{L}$

$\sigma$  : Es la frecuencia angular del oleaje, igual a  $\frac{2\pi}{T}$

$f$  : Es la frecuencia del oleaje, igual a  $\frac{1}{T}$

$H$  : Es la altura del oleaje

$L$  : Es la longitud del oleaje

$C$  : Es la celeridad del oleaje, igual a  $\frac{\sigma}{k}$ , e igual a  $\frac{L}{T}$

$t$  : Es el tiempo que transcurre al propagarse el oleaje



Sustituyendo la ec. (2.16) en la ec. (2.11) se obtiene la siguiente ecuación diferencial ordinaria.

$$\frac{d^2 f}{dy^2} - k^2 f = 0 \quad (2.17)$$

La solución de la ecuación anterior es de la forma.

$$f = Ae^{ky} + Be^{-ky} \quad (2.18)$$

Donde  $A$  y  $B$  son constantes, obteniéndose.

$$\phi = (Ae^{ky} + Be^{-ky})\text{sen}(kx - \sigma t) \quad (2.19)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en las ecs. (2.12) y (2.15), resulta:

$$Ae^{-kh} + Be^{kh} = 0 \quad (2.20)$$

$$(\sigma^2 - gk)A + (\sigma^2 + gk)B = 0 \quad (2.21)$$

Para obtener una solución de las ecuaciones anteriores con  $A \neq 0$  y  $B \neq 0$ , se debe satisfacer la siguiente condición:

$$\left| \begin{array}{cc} e^{-kh} & e^{-kh} \\ \sigma^2 - gk & \sigma^2 + gk \end{array} \right| = 0 \quad (2.22)$$

Al calcular el determinante dado anteriormente, se puede observar que la frecuencia angular del oleaje se expresa por:

$$\sigma^2 = gk \frac{e^{kh} - e^{-kh}}{e^{kh} + e^{-kh}} = gk \tanh kh = \frac{2\pi}{L} g \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (2.23)$$

Usando  $C = \frac{\sigma}{k}$ , la ec. (2.23) resulta:

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (2.24)$$



La ecuación anterior permite calcular la velocidad de propagación del oleaje (celeridad del oleaje) utilizando la teoría de pequeña amplitud.

Sustituyendo  $C = \frac{L}{T}$  en la ec. (2.24) y ordenando términos, se obtiene:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (2.25)$$

Las ecs. (2.23) y (2.25) permiten calcular la longitud del oleaje, pudiéndose observar que se trata de ecuaciones trascendentales, y los valores de  $L$ , dado,  $h$  y  $T$ . Deben calcularse mediante algún procedimiento iterativo.

Si se considera que  $\sigma = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ , la ec. (2.23) se puede expresar como sigue:

$$\sigma^2 = 4\pi^2 f^2 = gk \tanh kh \quad (2.26)$$

Transformándose la ec. (2.26) como sigue:

$$x \tanh x = D \quad (2.27)$$

Donde:

$$\begin{aligned} D &= \sigma^2 h / g = 2\pi h / Lo \\ Lo &= 2\pi \frac{g}{\sigma^2} = \frac{gT^2}{2\pi} \\ x &= kh = 2\pi h / Lo \end{aligned} \quad (2.28)$$

En este trabajo se utilizará un método numérico para calcular la longitud del oleaje mediante la ec. (2.26) transformada en la ec. (2.27), usando para tal efecto el método de Newton-Raphson.

Ordenando la ec. (2.27), la función por resolver mediante el método de Newton-Raphson resulta:

$$y(x) = X - D \coth x = 0 \quad (2.29)$$



En la ecuación anterior  $x$  es función de la longitud del oleaje. Para la aplicación del método se requiere obtener la derivada de la función expresada como sigue:

$$y'(x) = 1 + D (\coth^2 x - 1) \quad (2.30)$$

En la aplicación del método se utilizará la ecuación recursiva expresada como sigue:

$$x_{1+1} = x_1 - \frac{y(x_1)}{y'(x_1)} \quad (2.31)$$

Es decir, una solución iterativa se puede obtener a través de la siguiente ecuación, utilizando la ec. (2.31).

$$x_2 = x_1 - \frac{y(x_1)}{y'(x_1)} = x_1 - \frac{x_1 - D \coth x_1}{1 + D (\coth^2 x_1 - 1)} \quad (2.32)$$

La mejor estimación para el valor inicial está dada de acuerdo con los siguientes casos:

$$\begin{aligned} x_1 &= D ; \text{ cuando } D \geq 1 \\ x_1 &= D^{1/2} ; \text{ cuando } D < 1 \end{aligned} \quad (2.33)$$

El error en la ec. (2.32) rápidamente decrece con el incremento en el número de iteraciones, observándose que el error absoluto  $|1 - X_2/X_1|$  es menor que 0.05% para la tercera iteración (para  $X_4$ ).



## II.3 Perfil de la superficie libre y componente de la velocidad de las partículas del agua al paso de una onda progresiva

### II.3.1 Perfil de la superficie libre

**Algoritmo 2:** La ecuación que describe el desplazamiento vertical  $\zeta$  que sufre la superficie libre medida sobre el nivel del agua en reposo en función del tiempo  $t$ , o de la distancia horizontal  $x$  para una onda progresiva se define como sigue:

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.34)$$

Donde:

$\frac{H}{2}$  es la amplitud de la ola

$H$  es la altura de la ola

$k$  es el número de la onda e igual a  $2\pi/L$

$\sigma$  es la frecuencia angular de la onda es igual a  $2\pi/T$

$L$  longitud de la onda

$T$  Periodo de la onda

La ec. (2.34) también puede escribirse como sigue:

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2.35)$$

La ecuación anterior representa una ola senoidal periódica y progresiva desplazándose en la dirección positiva de  $x$ . Para una ola moviéndose en la dirección negativa de  $x$ , el signo menos antes de  $\frac{2\pi}{T}t$  es sustituido por un signo positivo.

En el perfil desarrollado por la ec. (2.35) el nivel medio del perfil coincide con el nivel de reposo con lo que se tiene que los desplazamientos son simétricos con respecto al eje horizontal, cumpliéndose en aguas profundas y no así para aguas intermedias y principalmente para aguas someras ya que el nivel medio del perfil se encuentra por arriba del nivel de reposo. Por lo que corresponde a las teorías de ondas de amplitud finita.

### II.3.2 Velocidad y aceleración de las partículas de agua al paso de una onda progresiva

Teóricamente, las partículas del agua se mueven en trayectorias circulares o elípticas cerradas, este movimiento de las partículas del agua debido al paso de una onda progresiva, de aguas profundas a aguas intermedias o someras queda representado por la Fig. No. 2.3.

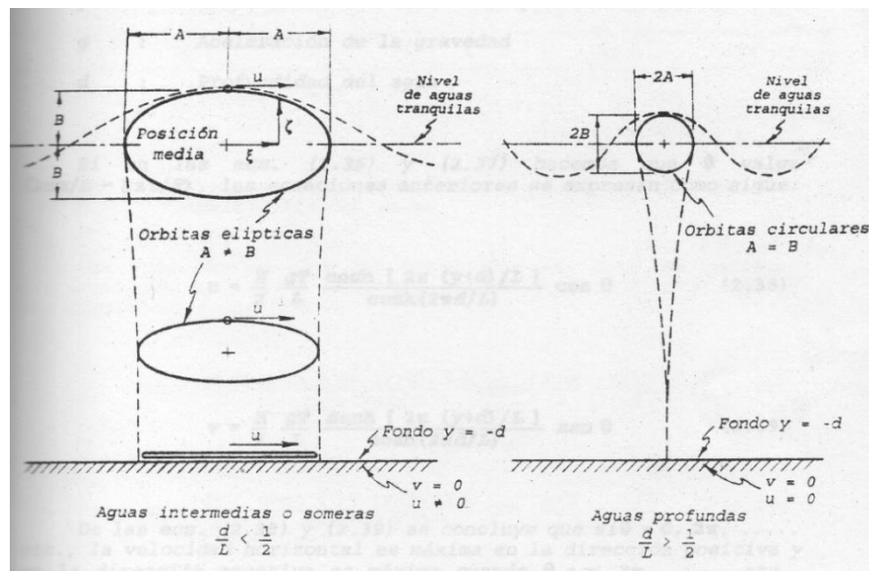


Fig. No. 2.3. Trayectorias de las partículas del agua al paso de una onda progresiva



Las ecuaciones que permiten calcular la velocidad horizontal  $u$ , la vertical  $v$  son:

$$u = \frac{H g T}{2 L} \frac{\cosh [2\pi (y + d) / L]}{\cosh(2\pi d / L)} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.36)$$

$$v = \frac{H g T}{2 L} \frac{\sinh [2\pi (y + d) / L]}{\cosh(2\pi d / L)} \sin\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.37)$$

Dónde:

$y$ : Profundidad variable de la partícula

$g$ : Aceleración de la gravedad

$d$ : Profundidad del agua

Si en las ecs. (2.36) y (2.37) hacemos que 0 valga  $(2\pi x / L - 2\pi t / T)$ , las ecuaciones anteriores se expresan como sigue:

$$u = \frac{H g T}{2 L} \frac{\cosh [2\pi (y + d) / L]}{\cosh(2\pi d / L)} \cos\theta \quad (2.38)$$

$$v = \frac{H g T}{2 L} \frac{\sinh [2\pi (y + d) / L]}{\cosh(2\pi d / L)} \sin\theta \quad (2.39)$$

De las ecs. (2.38) y (2.39) se concluye que si  $\theta = 0, 2\pi, \dots$  etc., la velocidad horizontal es máxima en la dirección positiva y en la dirección negativa es máxima cuando  $\theta = \pi, 3\pi, \dots$  etc., mientras tanto, la velocidad vertical máxima en la dirección negativa sucede cuando  $\theta = 3\pi/2, 7\pi/2, \dots$  etc., como se muestra en la Fig. No. 2.4.

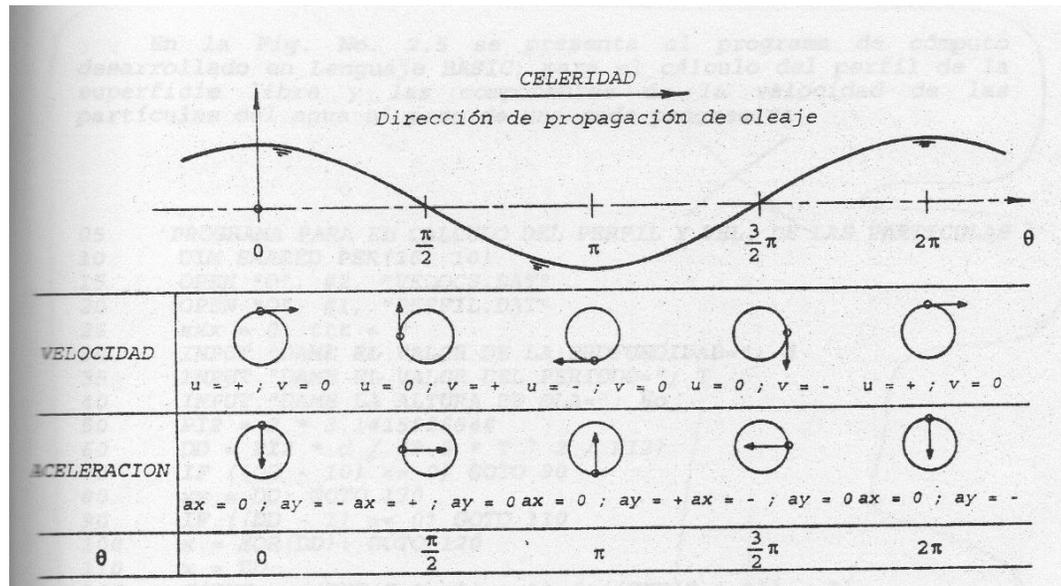


Fig. No. 2.4 Esquema de velocidad y aceleración de las partículas del agua.

Las aceleraciones de las partículas del agua se obtienen derivando con respecto a  $t$  las ecs. (2.36) y (2.37); obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$a_x = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[2\pi(y+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right) \quad (2.40)$$

$$a_y = \frac{g\pi H}{L} \frac{\sinh[2\pi(y+d)/L]}{\cosh(2\pi d/L)} \cos \left( \frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T} \right) \quad (2.41)$$

En la Fig. No. 2.4 se muestran valores de las aceleraciones de las partículas para diferentes valores de  $\theta$ .



## II.4 Predicción del oleaje

**Algoritmo 3:** Se denomina predicción del oleaje al procedimiento de cálculo que se realiza para conocer las características del oleaje producido por perturbaciones meteorológicas tales como: nortes, ciclones y huracanes. Para tal efecto, los métodos de predicción permiten obtener la altura y período del oleaje a partir de las características del viento que lo genera.

El viento es el principal agente generador del oleaje, que para efectos de su estudio se deberá entender la existencia de tres regiones verticales diferentes en que se genera. La región geostrófica (más allá de los mil metros). La de Ekman (entre los cien y mil metros de altura) y la capa subyacente constante de cortante, que es donde se genera el oleaje.

Para conocer ese oleaje en potencia se necesitan parámetros tales como: área de generación, velocidad del viento y su duración de la perturbación meteorológica.

Para producir el viento, existe un área de generación obtenida con ayuda de los mapas de superficie. Esta zona de generación está acotada por una variable llamada FETCH, la cual se define como la extensión rectilínea sobre la que sopla un viento de dirección y fuerza teóricamente constantes. El FETCH delimita su longitud en forma paralela a la dirección del viento, expresándose en kilómetros o millas, y para un viento dado con FETCH largos, la altura del oleaje es mayor que con FETCH cortos.

La velocidad del viento que actúa sobre la superficie del mar se llama velocidad del viento real o formativo, y se le designa con la letra U; para determinarla

se utiliza el equilibrio entre cuatro fuerzas que son: las de presión, la de Coriolis, la centrífuga y la de fricción.

La influencia de la duración del viento es importante, ya que de ella también depende la energía cedida por el viento. Para estimarla se utilizan los mapas de superficie, empleando las características isobáricas mostradas en ellos y que generalmente están calculadas a cada seis horas.

La primera zona donde se genera el oleaje se llama zona de generación que generalmente se presenta para la condición de aguas profundas. Al avanzar las olas estas se alejan de la zona donde fueron generadas y sus características son modificadas ya que la acción del viento no influye sobre ellas. Esta etapa del oleaje se realiza en una segunda zona llamada de decaimiento, en la cual las olas decrecen en altura ya que se separan por períodos. Por último, al acercarse a la costa, las olas dejan de estar en aguas profundas y pasan a una tercera zona donde sufren modificaciones por efecto del fondo (refracción; ver Algoritmo 4), lo anteriormente descrito se ilustra en la Fig. No. 2.5.

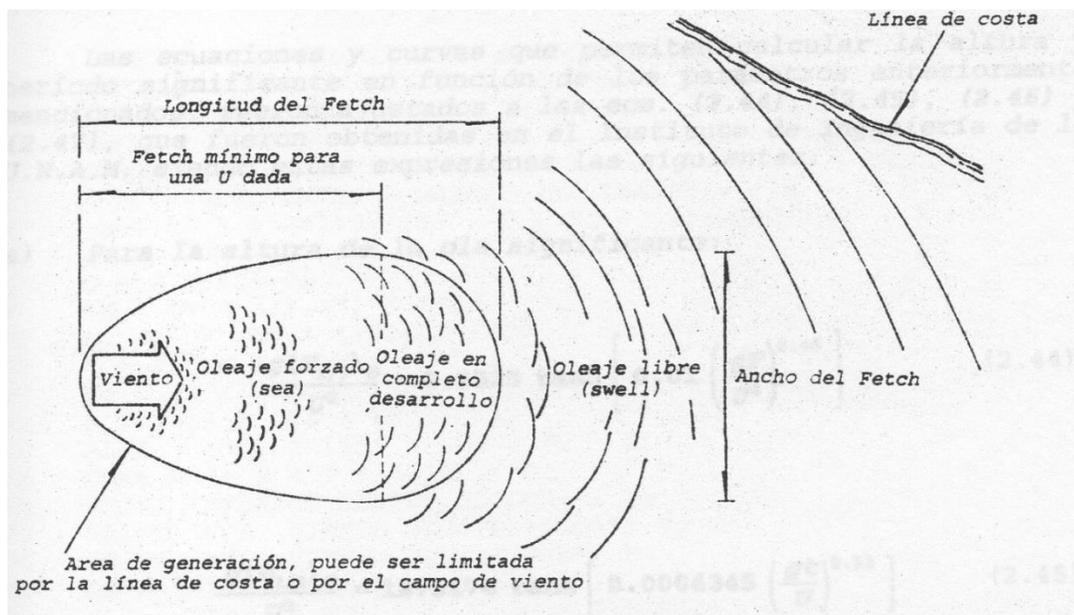


Fig. No. 2.5 Variación del oleaje dentro y fuera de la zona de generación.



### II.4.1 Método de Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB)

Los principales parámetros para la generación de olas en esta zona son: velocidad del viento formativo ( $U$ ) 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. Esas 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.

De lo anterior se determina que:

$$(H_{1/3})_G = f_1(U, F, t, g) \quad (2.42)$$

$$(T_{1/3})_G = f_2(U, F, t, g) \quad (2.43)$$

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

Las ecuaciones y curvas que permiten calcular la altura y período significativo en función de los parámetros anteriormente mencionados, fueron ajustadas a las ecs. (2.44), (2.45), (2.46) y (2.47), que fueron obtenidas en el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M, siendo estas expresiones las siguientes:

a) Para la altura de la ola significativa:

$$\frac{g \left( H_{\frac{1}{3}} \right)_G}{U^2} = 0.2525 \tanh \left[ 0.01 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{0.49} \right] \quad (2.44)$$



$$\frac{g\left(H_{\frac{1}{3}}\right)_G}{U^2} = 12.3174 \tanh \left[ 0.0004345 \left( \frac{gt}{U} \right)^{0.33} \right] \quad (2.45)$$

b) Para el período significativo:

$$\frac{g(T_{1/3})_G}{U} = 0.358 \left( \frac{gF}{U^2} \right)^{0.28} \quad (2.46)$$

$$\frac{g\left(T_{\frac{1}{3}}\right)_G}{U} = 50.721 \tanh \left[ 0.015 \left( \frac{gt}{U} \right)^{0.20} \right] \quad (2.47)$$

## II.5 Refracción de oleaje

**Algoritmo 4:** En un oleaje con crestas muy largas que avanzan en dirección oblicua hacia la costa, una parte del frente llega primero a aguas intermedias, mientras que la otra sigue en aguas profundas. La parte del oleaje que se desplaza a aguas someras tiene una menor celeridad que aquella que se encuentra aún en aguas profundas, originando que el frente se flexione de tal manera que tiende a ser paralela a la batimetría existente, a este fenómeno se le conoce como refracción de oleaje.

Pensemos en el caso en que el oleaje incide con un ángulo a la línea límite entre aguas profundas ( $h_1$ ) y aguas más someras ( $h_2$ ), como el mostrado en la Fig. No. 2.6. Es decir el ángulo incidente es  $\beta_1$ .

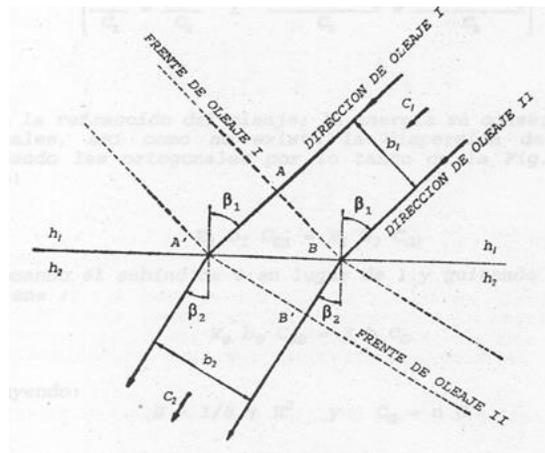


Figura No. 2.6 Refracción del Oleaje

$\beta_1$  es igual al ángulo entre la dirección de olas y la línea vertical a la línea límite.

Cuando un frente de ola llega al punto B sobre la línea límite, todos los puntos de la cresta del frente de ola, se desplazan a una misma velocidad; cuando es rebasado dicho límite, la velocidad disminuye en relación a la profundidad, es decir a una velocidad  $C_2 < C_1$ .

Por lo tanto, mientras el oleaje marcha del punto A a A' el punto B avanza solo a B'. Es decir el oleaje esta refractado por la línea límite entre  $h_1$  y  $h_2$  de profundidad. El ángulo de refracción  $\beta_2$  está dado por la Ley de Snell expresada como sigue:

$$\frac{\text{sen } \beta_2}{\text{sen } \beta_1} = \frac{C_2}{C_1} \quad (2.48)$$

$$\left[ \frac{AA'}{C_1} = \frac{BB'}{C_2} \therefore \frac{BA' \text{sen } \beta_1}{C_1} = \frac{BA' \text{sen } \beta_2}{C_2} \right]$$

En la refracción del oleaje; la energía se conserva entre dos ortogonales, así como no existe la dispersión de la energía atravesando las ortogonales por lo tanto de la Fig. No 2.6 se obtiene:

$$E_1 b_1 C_{G1} = E_2 b_2 C_{G2}$$



Tomando el subíndice 0 en lugar de 1 y quitando el subíndice 2 se tiene:

$$E_0 b_0 C_{G0} = E b C_G \quad (2.49)$$

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} E &= 1/8 \gamma H^2 & y & & C_G &= n C \\ 1/8 \gamma H_0^2 b_0 C_0 n_0 &= & 1/8 \gamma H^2 b C n & & & \end{aligned} \quad (2.50)$$

Como:

$$n_0 = 1/2 \text{ (en aguas profundas)}$$

$$H_0^2 b_0 C_0 1/2 = H^2 b C n$$

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{C_0}{n} \frac{b_0}{b}} \quad (2.51)$$

Por lo tanto el cambio de altura es:

$$\frac{H}{H_0} = K_s K_r \quad (2.52)$$

Dónde:

$K_s$  : Es el coeficiente de propagación

$K_r$  : Es el coeficiente de refracción

$$K_s = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{C_0}{n} \frac{L_0}{L}} \quad (2.53)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \quad (2.54)$$

La ec. (2.52) permite evaluar la altura de oleaje tanto en aguas intermedias como en las someras, a partir de las características del oleaje en aguas profundas, siempre y cuando se puedan determinar las separaciones entre ortogonales.

El factor de grupo  $n$ , está definido por la siguiente ecuación:

$$n = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{(4\pi d)/L}{\text{sen } h(2\pi d/L)} \right] \quad (2.55)$$

La altura de oleaje aumenta en la región donde las ortogonales convergen y disminuye en la región donde ellas divergen.

Pensemos en el caso de líneas batimétricas rectas y paralelas como se indica en la Fig. No. 2.7.

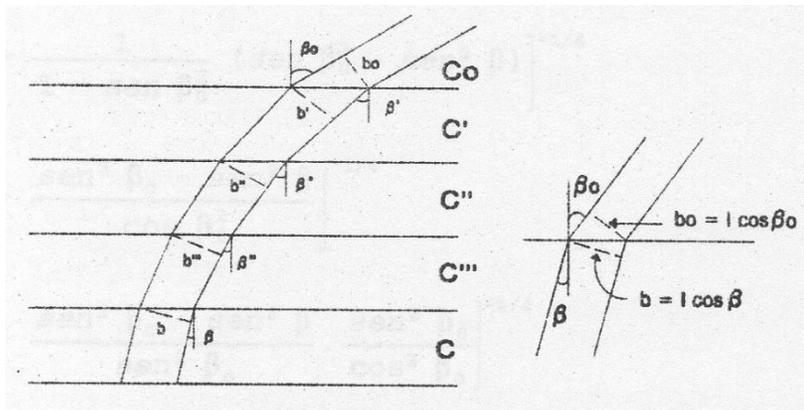


Fig. No 2.7 Refracción cuando las líneas batimétricas son rectas y paralelas.

El ángulo de refracción, utilizando la ec. (2.48) desde altamar se expresa como sigue:

$$\frac{\text{sen } \beta'}{\text{sen } \beta_0} \cdot \frac{\text{sen } \beta''}{\text{sen } \beta'} \cdot \frac{\text{sen } \beta'''}{\text{sen } \beta''} \cdot \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen } \beta'''} = \frac{c'}{c_0} \cdot \frac{c''}{c'} \cdot \frac{c'''}{c''} \cdot \frac{c}{c'''}$$



$$\therefore \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen } \beta_0} = \frac{c}{c_0} \quad (2.56)$$

Por otra parte, el coeficiente de refracción usando la ec. (2.54) se expresa como sigue:

$$K_r = \left(\frac{b_0}{b}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1 - \text{sen}^2 \beta_0}{1 - \text{sen}^2 \beta}\right)^{1/4} = \left(\frac{1 - \text{sen}^2 \beta}{1 - \text{sen}^2 \beta_0}\right)^{-1/4}$$

$$K_r = \left[ \frac{1 - \text{sen}^2 \beta_0 + \text{sen } \beta_0 - \text{sen}^2 \beta}{1 - \text{sen}^2 \beta_0} \right]^{-1/4}$$

$$K_r = \left[ 1 + \frac{1}{1 - \text{sen}^2 \beta_0} (\text{sen}^2 \beta_0 - \text{sen}^2 \beta) \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$K_r = \left[ 1 + \frac{\text{sen}^2 \beta_0 - \text{sen}^2 \beta}{\cos^2 \beta_0} \right]^{-1/4}$$

$$K_r = \left[ 1 + \frac{\text{sen}^2 \beta_0 - \text{sen}^2 \beta}{\text{sen}^2 \beta_0} \cdot \frac{\text{sen}^2 \beta_0}{\cos^2 \beta_0} \right]^{-1/4}$$

$$K_r = \left[ 1 + \left\{ 1 - \frac{\text{sen}^2 \beta}{\text{sen}^2 \beta_0} \right\} \frac{\text{sen}^2 \beta_0}{\cos^2 \beta_0} \right]^{-1/4}$$

$$K_r = \left[ 1 + \left\{ 1 - \left(\frac{C}{C_0}\right)^2 \right\} \tan^2 \beta_0 \right]^{-1/4}$$

Dónde:

$\beta_0$ : Es el ángulo de la ola en aguas profundas



# ***CAPÍTULO III***

## ***VIENTOS Y CORRIENTES LITORALES***



### III.1 Viento

Se define al viento como el movimiento de las masas de aire; sin embargo, una definición aceptada en la meteorología es: corriente horizontal de aire que circula con relativa proximidad a la superficie terrestre.

El viento se atribuye a las desigualdades de la densidad del aire, y a las presiones altas y bajas; el excesivo calentamiento del aire hace que este se dilate y se anime de un movimiento ascendente dejando un lugar vacío en el lugar en donde se dilató, o centro de baja presión barométrica; este vacío se llena con aire más denso que procede de otras regiones o lugares de alta presión.

Atendiendo a su acción los vientos se clasifican en:

- a) Constantes o regulares: soplan en una dirección todo el año
- b) Periódicos: invierten su dirección con las estaciones del año o con el día y la noche
- c) Irregulares: son los que carecen de periodicidad y soplan en una u otra dirección indiferentemente.

Atendiendo a su extensión se pueden clasificar a los vientos en:

- a) Generales o planetarios
- b) Locales

El viento es el principal generador del oleaje y su efecto sobre la costa es permanente, provocando mareas de vientos y fuerzas sobre las estructuras; de



ahí la importancia de su estudio desde el punto de vista de las obras marítimas y la ingeniería de costas.

### III.1.1 Características del viento

Los elementos que caracterizan al viento son 3:

- a) Dirección: Se utiliza la denominada “Rosa de los vientos” que por lo general se divide hasta en 32 partes. Es decir, la dirección del viento es el punto cardinal de donde sopla (ejemplo: un viento norte significa que proviene del norte).
- b) Intensidad: Es la velocidad con que sopla el viento y se expresa en unidades de longitud sobre las de tiempo (m/s, Km/h, nudo); para su medición se utiliza la escala internacional llamada de BEAUFORT que se presenta en la Tabla No. 3.1.

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación	Aspecto del mar	Efectos en tierra
0	0 a 1	< 1	<b>Calma</b>	Despejado	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	1 a 3	<b>Ventolina</b>	Pequeñas olas, pero sin espuma	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	4 a 6	<b>Flojito</b> (Brisa muy débil)	Crestas de apariencia vítrea, sin romper	Se caen las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos de los campos
3	12 a 19	7 a 10	<b>Flojo</b> (Brisa Ligera)	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas



## Consideraciones Básicas para los estudios y trabajos de la Ingeniería de Ríos y Costas



4	20 a 28	11 a 16	<b>Bonancible</b> (Brisa moderada)	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	17 a 21	<b>Fresquito</b> (Brisa fresca)	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	22 a 27	<b>Fresco</b> (Brisa fuerte)	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas.
7	50 a 61	28 a 33	<b>Frescachón</b> (Viento fuerte)	Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento	Se mueven los árboles grandes, dificultad para caminar contra el viento
8	62 a 74	34 a 40	<b>Temporal</b> (Viento duro)	Grandes olas rompientes, franjas de espuma	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas muy dificultosa
9	75 a 88	41 a 47	<b>Temporal fuerte</b> (Muy duro)	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	48 a 55	<b>Temporal duro</b> (Temporal)	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca.	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones



<b>11</b>	103 a 117	56 a 63	<b>Temporal muy duro</b> (Borrasca)	Olas excepcionalment e grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida	Destrucción en todas partes, lluvias muy intensas, inundaciones muy altas
<b>12</b>	+ 118	+64	<b>Temporal huracanado</b> (Huracán)	Olas excepcionalment e grandes, mar blanca, visibilidad nula	Voladura de autos, árboles, casas, techos y personas. Puede generar un huracán o un tifón

Tabla No. 3.1 Escala de BEAUFORT

- c) Frecuencia o número de veces que se presenta el viento con determinadas características durante un lapso cualquiera, utilizándose normalmente la hora, el día, mes, estación o año.

### III.1.2 Diagramas de Lenz

**Algoritmo 5:** Los vientos observados son procesados para obtener lo que se conoce como diagramas de viento o de " Lenz ", los cuales son representaciones vectoriales de las características que definen a un viento; la información que se plasma en los diagramas puede ser representativa de los regímenes mensual, trimestral, anual o de un período mayor de observación para un determinado sitio.

Para determinar las características de estos vientos se acostumbra representar el resultado de las mediciones en tres diagramas que se mencionan a continuación:



**Diagrama de "n":** Representa el número de veces que ha soplado el viento en cada dirección, se conoce también como diagramas de frecuencias; al viento que sopla con mayor frecuencia se le denomina "viento reinante".

**Diagrama de Velocidad Media "nv":** En este diagrama se grafican los productos de las frecuencias por las velocidades medias de presentación; se le conoce como diagrama de agitación.

**Diagrama de Velocidad Media Cuadrática "V2 MAX":** Contempla los datos concernientes al cuadrado de la velocidad máxima de presentación; al viento que sopla con mayor intensidad se le llama "viento dominante".

Los resultados del proceso de cálculo se consignan en "rosas de vientos" de 16 direcciones.

La primera gráfica define el viento reinante, la segunda la capacidad de transporte eólico, y la tercera define el viento dominante y la presión por él producida.

### III. 2 Corriente

En general se pueden definir a las corrientes como el desplazamiento de una masa de agua, determinadas por dos características: dirección y velocidad.

La dirección de una corriente es el rumbo hacia el cual se dirigen; es decir, la forma de designar la dirección de una corriente es contraria a la que se utiliza en los vientos, ya que en estos se considera de donde sopla y no hacia donde sopla. La velocidad de una corriente se expresa tradicionalmente en nudos, cuando se trata de aspectos relativos a la navegación (1 nudo = 1 milla marítima por hora = 1,853 m/h), o bien en m/s.

Las corrientes se pueden dividir en 4 apartados: corrientes oceánicas, corrientes inducidas por el viento, corrientes por marea y corrientes inducidas por el oleaje. Aunque en relación a su ámbito también pueden clasificarse en corrientes locales y generales, en función de su relativa área de influencia, resultando obvia su diferenciación.

Para efectos de estudio del presente trabajo solamente se hará referencia de la corriente de litoral o también conocida como corriente inducida por el oleaje.

El oleaje en la costa también genera corrientes que influyen considerablemente en el movimiento de los materiales sedimentarios a lo largo del litoral y es una causa fundamental de la erosión o progradación de la costa.

La corriente de deriva litoral se produce cuando las olas llegan oblicuas a una costa rectilínea, generalmente en ángulo inferior a  $10^{\circ}$  (el ángulo nunca puede ser mayor debido a la refracción), esto da nacimiento a una corriente paralela al litoral, entre la zona de rompiente y la orilla. La velocidad de la deriva es mínima fuera de la zona de rompiente, lo que demuestra claramente que es inducida por el oleaje y no puede ser atribuida a corrientes oceánicas o corrientes de marea, ver Fig. No. 3.1.

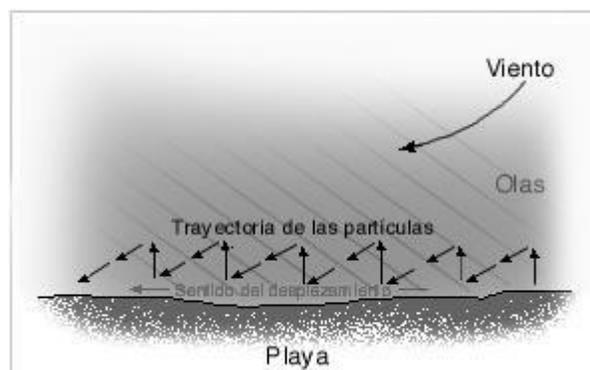


Fig. No. 3.1 Corriente inducida por el oleaje



### III.2.1 Fórmulas para evaluar la velocidad de la corriente litoral

**Algoritmo 6:** Cuando el oleaje incide oblicuamente en la costa, ya sea por efecto de la configuración del fondo marino o bien por su dirección de incidencia desde aguas profundas, la línea de rompientes tiene un cierto ángulo respecto a la línea de playa, induciendo por consiguiente una corriente litoral paralela a la costa, que desplaza una masa líquida a lo largo de ella, canalizándose entre la línea de rompientes y la línea de playa.

En esta zona se genera un fuerte movimiento de sedimentos en el instante del rompimiento del oleaje siendo, la corriente generada, la principal responsable del transporte de sedimentos a lo largo de la costa, cuyo conocimiento cualitativo y cuantitativo es esencial para el ingeniero de costas que se enfrenta a cualquier problema de dinámica litoral sedimentaria.

Muchos investigadores han puesto atención a las corrientes litorales a lo largo de la costa. Como resultado de experimentos en modelos hidráulicos, mediciones en el campo y teorías, se han obtenido varias fórmulas para calcular la velocidad media de la corriente litoral a lo largo de la costa.

En la Tabla No. 3.2 se listan algunas fórmulas para calcular la velocidad media de la corriente litoral a lo largo de la costa.

Las fórmulas corresponden a un tratamiento simplificado de la configuración del fondo del mar, con curvas batimétricas rectas y paralelas, condición que difícilmente se encuentra en la naturaleza.



Cabe citar que la mayoría de las fórmulas listadas en la Tabla No. 3.2, fueron obtenidas por los diferentes autores, considerando el balance del flujo de la cantidad de movimiento en la zona de rompientes utilizado en el primer tratamiento de Putnam, Munk y Taylor.

No.	AUTOR	FORMULA	ESQUEMA BASICO DE ANALISIS	TEORICO	CAMPO	LABORATORIO
(1)	Putnam-Munk-Taylor (1949)	$V = \frac{g}{2} \left[ \left( 1 - \frac{3C}{a} \text{sen} 2\alpha_b \right)^{1/2} - 1 \right]$ $a = 2.61 H_b i \cos \alpha_b / (LT)$ $i = h_b / L, \quad C = \sqrt{2.28 g H_b}$	Balance de Momentum Onda Solitaria	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Costa de California	<input type="checkbox"/> Modelo de Fondo Fijo
(2)	Inman-Quinn (1951)	$V = \left[ \left( \frac{1}{4x^2} + y \right)^{1/2} - \frac{1}{2x} \right]^2$ $x = 546 H_b i \cos \alpha_b / T$ $y = C \text{sen} 2\alpha_b, \quad C = \sqrt{2.28 g H_b}$	Balance de Momentum Onda Solitaria	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Playa del Torrey Pines, Playa del Pacifico en California	<input type="checkbox"/>
(3)	Nagai (1954)	$V = \frac{1}{8} H_b C_b K \left( \sqrt{1 + \frac{16 \text{sen} 2\alpha_b}{K H_b}} - 1 \right)$ $K = i / (L H_b)$	Balance de Momentum Onda Solitaria	<input type="checkbox"/>		
(4)	Galvin-Eagleson (1964)	$V = K g T i \text{sen} 2\alpha_b$ $K = 1$	Balance de Momentum	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Modelo de Fondo Fijo
(5)	Eagleson (1965)	$V = \left[ \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{V(0)^2}{A} \right) e^{-\frac{x}{b}} \right\} A \right]^{1/2}$ $A = \frac{1}{8} \left[ \frac{g H_b^3 n_b}{h_b} \right] \frac{\text{sen} \beta \text{sen} \alpha_b \text{sen} 2\alpha_b}{f}$ $b = \frac{2}{3} \left[ \frac{f}{h_b \cos \beta \text{sen} \alpha_b} \right]$	Balance de Momentum Onda Oscilatoria Corriente Desarrollada	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(6)	Sato-Tanaka (1966)	$V = K_0 \left[ \frac{i H_b^{2/3}}{T^{1/3}} \text{sen} 2\alpha_b \right]^{1/3}$ $K_0 = 1.5 \text{ (Costa de Kashima)}$	Balance de Momentum Onda Solitaria	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Costa de Kashima	

Tabla No. 3.2 Fórmula para calcular la velocidad media de la corriente litoral a lo largo de la costa en configuraciones batimétricas rectas y paralelas (Horikawa).

Las variables incluidas en las fórmulas de la Tabla No. 3.2 se definen como:

$H_b$  : Altura de la ola rompiente.

$H_0$  : Altura de ola en aguas profundas.

$h_b$  : Profundidad de la rompiente.



$C_b$  : Celeridad del oleaje en la rompiente.

1 : Pendiente media del fondo del mar en la zona de rompientes definidas por  
 $1 = \tan \beta$ .

$\alpha_b$  : Ángulo entre el frente de onda y la línea de costa en la rompiente.

$T$  : Periodo del oleaje.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$n_b$  : Relación de la celeridad del grupo y la celeridad del oleaje en la rompiente.

$Q_b$  : Volumen del agua que sale hacia el mar por adentro de línea de rompientes, por  
unidad de longitud de cresta y por oleaje.

$f$  : Factor de fricción de Darcy-Weisbach

$x$  : Distancia horizontal medida positivamente a lo largo de la playa en forma  
paralela a la línea de costa, con origen en la intersección de la barrera artificial  
(Eagleson, 1965) y la línea de costa, o la distancia a lo largo de la costa donde se  
inicia a corriente de retorno (Bruun, 1963).

$V(x)$  : Velocidad media de la corriente litoral a lo largo de la playa en  $x$ .

$V(0)$  : Velocidad media de la corriente litoral a lo largo de la playa en  $x = 0$ .

□ : Indica discutido u observado.

○ : Indica usando datos de la teoría de Putnam.



$\phi$  : Indica usando datos de la teoría de Inman y Quinn.

Adicionalmente a las fórmulas anteriormente enunciadas, se presenta la fórmula establecida por Bijker, la cual se expresa como sigue:

$$V = \frac{C_f U^*}{\sqrt{g}} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \zeta \frac{u_0}{V} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

$V$  : Velocidad a lo largo de la costa

$U^*$  : Velocidad al corte

$\zeta$  :  $0.0575 C_f$

$C_f$  : Coeficiente de Chezy.

$u_0$  : Velocidad orbital de la ola en aguas profundas

A continuación se explican los tratamientos seguidos para el establecimiento de las fórmulas más sobresalientes, indicadas en la Tabla No. 3.2.

### III.2.2 Fórmulas que consideran batimétricas rectas y paralelas

En el trabajo de Putnam, Munk y Taylor publicado en 1949 "The prediction of longshore currents", se establecía teóricamente la relación existente entre la velocidad media de la corriente litoral con altura, período y ángulo de incidencia de la ola rompiente y la pendiente de la playa en la zona de rompientes, de acuerdo con las consideraciones de la Fig. No. 3.2.

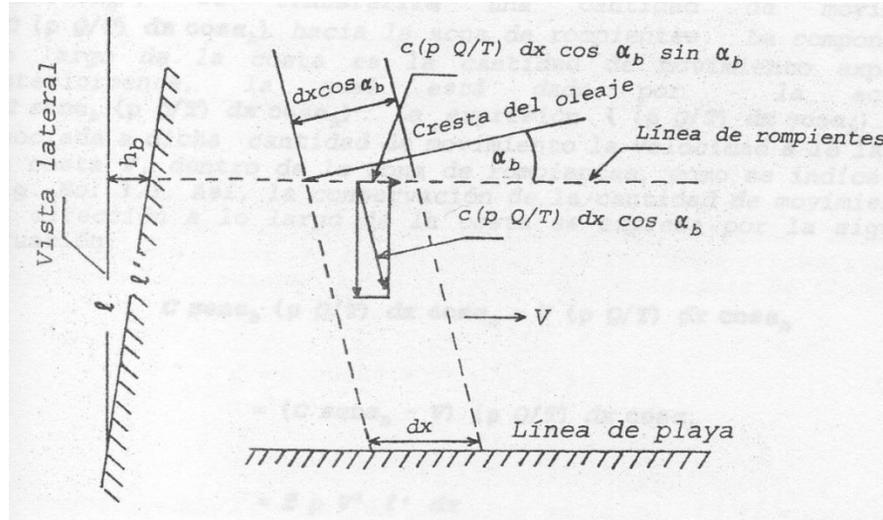


Fig. No. 3.2 Ilustración para el cálculo de la velocidad media de la corriente litoral a lo largo de la costa.

En la Fig. No. 3.2 la cantidad de movimiento transferida a través de la línea de rompientes por unidad de tiempo y por unidad de ancho de cresta del oleaje se expresa como sigue:

$$C (\rho Q/T) \tag{3.2}$$

Donde:

$Q$  : Es el volumen de agua de mar transportado por una ola rompiente a través de una sección vertical por un periodo de ola y por una unidad de ancho de cresta de ola.

$\rho$  : Es la densidad del agua del mar.

$T$  : Es el periodo del oleaje.

$C$  : Es la celeridad del oleaje en la zona de rompientes.

Por lo tanto, a través del ancho de una cresta de oleaje ( $dx \cos \alpha_b$ ), se transferirá una cantidad de movimiento ( $C (\rho Q/T) dx \cos \alpha_b$ ) hacia la zona de rompientes.



La componente a lo largo de la costa es la cantidad de movimiento expresada anteriormente, la cual está dada por la ecuación  $(C \operatorname{sen} \alpha_b (p Q/T) dx \operatorname{cos} \alpha_b)$ . La expresión  $(p Q/T) dx \operatorname{cos} \alpha_b$  tiene asociada a dicha cantidad de movimiento la velocidad a lo largo de la costa  $V$ , dentro de la zona de rompientes, como se indica en la Fig. No. 3.2. Así, la conservación de la cantidad de movimiento en la dirección a lo largo de la costa se expresa por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} C \operatorname{sen} \alpha_b (\rho Q/T) dx \operatorname{cos} \alpha_b - V (\rho Q/T) dx \operatorname{cos} \alpha_b \\ = (C \operatorname{sen} \alpha_b - V)(\rho Q/T) dx \operatorname{cos} \alpha_b \\ = f \rho V^2 \ell' dx \end{aligned} \quad (3.3)$$

Donde  $f$  es el coeficiente de fricción en el fondo del mar, y  $\ell'$  es la distancia (sobre el fondo del mar) de la línea de costa a la línea de rompientes. Asumiendo que  $t' * t$  (donde  $t$  es el ancho de la zona de rompientes), que  $Q = 4h_b^2 \sqrt{3H_b h_b}$  y  $C = \sqrt{2.28 g H_b}$  (estas dos últimas ecuaciones basadas en la teoría de la onda solitaria), y resolviendo la ec. (3.3), se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$V = \frac{a}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{4C \operatorname{sen} \alpha_b}{a}} - 1 \right] \quad (3.4)$$

Donde:

$$a = \frac{2.61 H_b i \operatorname{cos} \alpha_b}{fT}$$

$$C = \sqrt{2.28 g H_b}$$

$H_b$  : Es la altura de la ola en la rompiente.

$h_b$  : Es la profundidad en la rompiente.

$i$  : Es la pendiente de la playa, definida por  $i = h_b/\ell$



Para calcular la velocidad de la corriente litoral a lo largo de la costa debe estimarse el coeficiente de fricción. Para tal efecto, Inman y Quinn en base a resultados de campo y laboratorio, propusieron la siguiente ecuación para el coeficiente de fricción:

$$f = 0.00404 V^{-3/2}; (V, \text{ en } m/s) \quad (3.5)$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la ec. (3.4) encontraron la siguiente expresión:

$$V = \left[ \left( \frac{1}{4x^2} + y \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2x} \right]^2 \quad (3.6)$$

Donde:

$$x = \frac{646 i H_b \cos \alpha_b}{T}$$

$$C = \frac{y = C \sin \alpha_b}{\sqrt{2.28 g H_b}}; (C, \text{ en } m/s)$$

Al analizar la ec. (3.6) se puede notar que el coeficiente de fricción no aparece en forma explícita. Bajo la condición simplista de contornos batimétricos paralelos, los valores de la relación de alturas de ola  $H_b/H_o$  y del ángulo de incidencia del oleaje en la línea de rompientes ab se pueden determinar con ayuda de las Figs. No. 3.3 y 3.4 respectivamente, utilizando para ello los valores de  $a_0$  y  $H_o/Lo$  (relación de esbeltez de la ola) en aguas profundas.

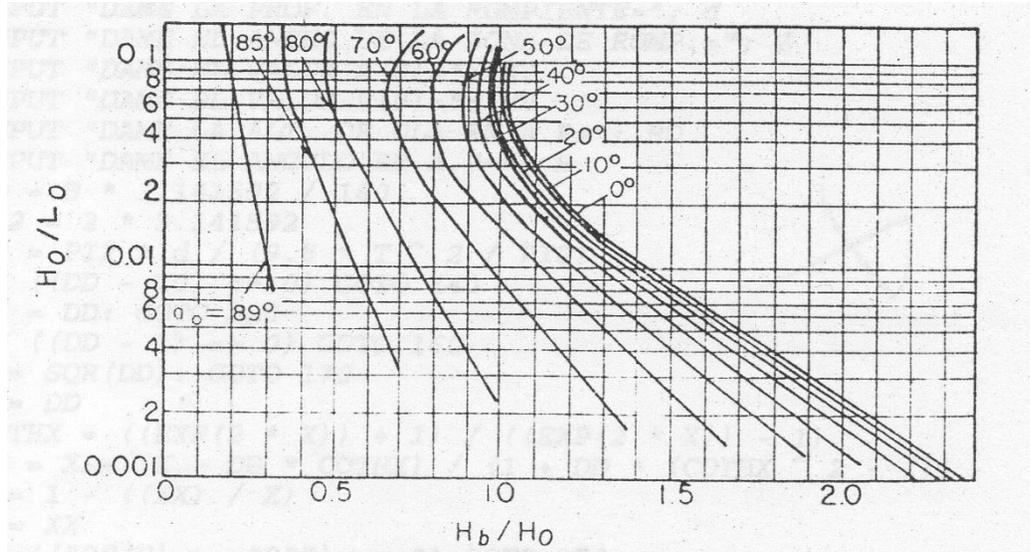


Fig. No. 3.3 Diagrama para determinar  $H_b/H_0$  para contornos paralelos (Groen y Weenink).

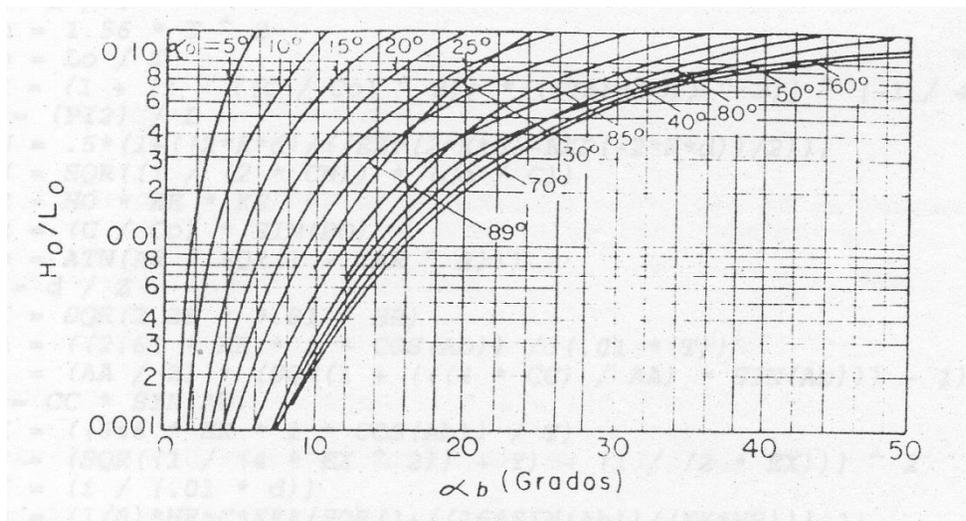


Fig. No. 3.4 Diagrama para determinar  $ab$  para contornos paralelos (Groen y Weenink).



# ***CAPÍTULO IV***

## ***REGÍMENES***

### ***LITORALES***



## IV. 1 Introducción

En el campo de la Ingeniería de Costas es de vital importancia evaluar la cantidad y la dirección del transporte litoral que se mueve en la zona de rompientes. A pesar del avance que ha tenido la hidráulica marítima en los últimos años en temas como: predicción de oleaje, conocimiento de los procesos costeros, interacción entre el oleaje y las partículas del fondo, aún no se ha resuelto completamente la forma de evaluar el transporte litoral a lo largo de la costa, producido por el oleaje rompiente y las corrientes litorales asociadas con dicho fenómeno.

Para determinar la dirección del transporte litoral, resulta de gran conveniencia investigar en el campo las características correspondientes a la variación de tamaños y pesos de los sedimentos a lo largo de la costa, así como las configuraciones de la costa alrededor de bocas de ríos y cabos y configuración de la playa; también las características de los sedimentos alrededor de estructuras construidas y la realización de análisis en gabinete de las componentes a lo largo de la costa de la potencia de la energía del oleaje.

Los métodos para evaluar la cantidad del transporte litoral a lo largo de la costa se clasifican como sigue:

- a) Obras marítimas de calibración o prueba. Dentro de esta clasificación se consideran los espigones de prueba y los dragados de prueba.
- b) Fórmulas empíricas en función de las características del oleaje.
- c) Fórmulas empíricas en función de la energía del oleaje y material de la playa.
- d) Fórmulas en función de la corriente litoral.
- e) Uso de trazadores fluorescentes y radioactivos.
- f) Uso de equipos para mediciones directas.

## IV. 2 Dirección del movimiento de arena

Generalmente el movimiento de arena se divide en la componente del movimiento de la arena paralela a la costa y la componente del movimiento de la arena perpendicular a la misma.

Esta clasificación indica las componentes paralela y perpendicular a la costa del movimiento resultante cuando el sedimento se mueve del punto "a" hacia el punto "b" como se muestra en la Fig. No. 4.1.

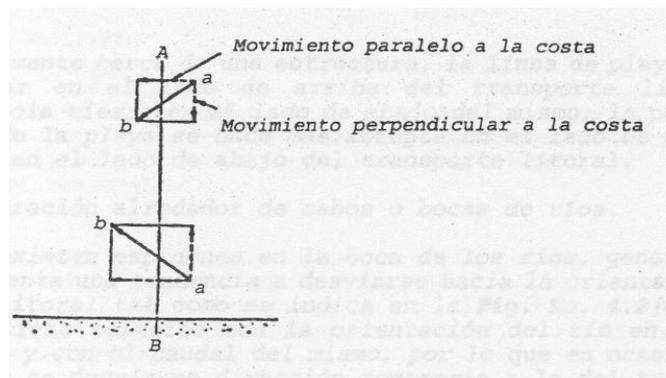


Fig. No. 4.1 Componentes del movimiento de la arena.

La dirección del movimiento resultante al relacionar las componentes del movimiento antes mencionado tiene mucha relación con la magnitud de los oleajes incidentes, pudiéndose establecer que el movimiento de la arena tendrá una orientación hacia el mar en época de tormentas y una orientación hacia tierra en época de calma con oleajes pequeños.

Los oleajes y las corrientes en la naturaleza varían con el tiempo, resultando como consecuencia una variación de la magnitud del transporte litoral. Pero al considerar un período de tiempo grande (una estación o un año), existirá la posibilidad de entender la orientación predominante del transporte litoral para cada



costa, esta orientación se conocerá al investigar en el campo las siguientes características:

1. Variación de la composición de tamaños y mineral pesado de los sedimentos a lo largo de la costa.
2. Componentes a lo largo de la costa de la potencia de la energía del oleaje.

En general, al sumar los componentes a lo largo de la costa de la potencia de la energía del oleaje (flujo de energía del oleaje) durante un período grande, la orientación predominante de esa suma coincidirá con la orientación del transporte litoral. Pero en lugares donde las corrientes son fuertes, es necesario tomar en cuenta estas corrientes para definir la orientación predominante del transporte litoral.

3. Configuración de la playa y características de los sedimentos alrededor de estructuras: escolleras, rompeolas, espigones, etc.

Generalmente cerca de una estructura la línea de playa avanza hacia el mar en el lado de arriba del transporte litoral y retrocede hacia tierra en el lado de abajo del mismo; la pendiente de la cara de la playa se hace más abrupta en el lado de arriba y más pequeña en el lado de abajo del transporte litoral.

4. Configuración alrededor de cabos o bocas de ríos.

Si no existen espigones en la boca de los ríos, generalmente la boca presenta una tendencia a desviarse hacia la orientación del transporte

litoral tal como se indica en la Fig. No. 4.2a. Esta desviación tiene relación con la orientación del río en la zona aguas arriba y con el caudal del mismo, por lo que en ocasiones la boca del río se desvía en dirección contraria a la del transporte litoral.

Alrededor de cabos, el ancho de la playa es mayor en el lado de arriba del transporte litoral y más pequeño en el lado de abajo del mismo, tal como se indica en la Fig. No. 4.2b.

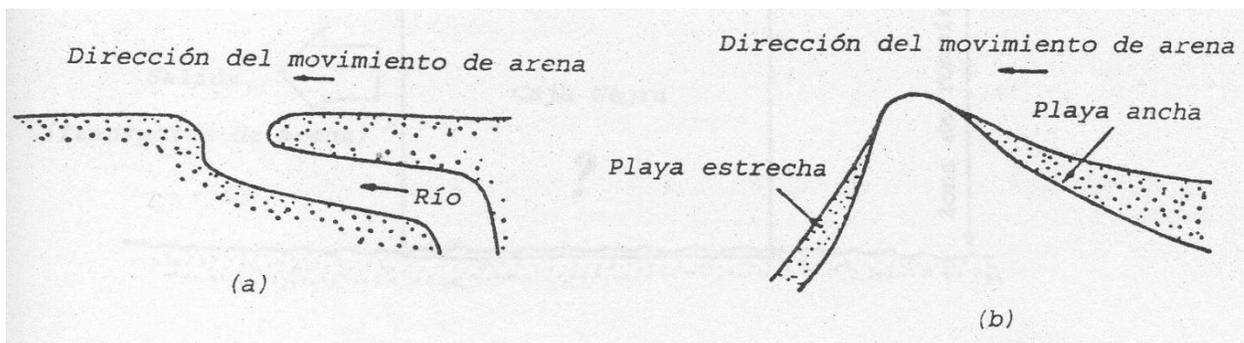


Fig. No. 4.2 Configuración alrededor de la boca de ríos y cabos.

Es difícil o muchas veces se cometen errores graves al decidir la orientación del transporte litoral, mediante la investigación de una o sólo algunas de las características descritas arriba, resultando necesario investigar en la medida de lo posible todas las características mencionadas.

Generalmente, la orientación del transporte litoral cambia con la estación, resultando peligroso decidir la orientación del mismo con base en la investigación de las características mencionadas durante una sola campaña estacional.

## IV. 3 Cálculo de la cantidad del transporte litoral a lo largo de la costa

**Algoritmo 7:** En la zona de rompientes, una gran cantidad de arena es transportada por la acción de oleajes y corrientes litorales. Sin embargo, en la actualidad el mecanismo del transporte de arena no se conoce claramente.

Por lo anterior, algunas veces es útil estudiar el mecanismo mediante el modelo conceptual de caja negra, como se indica en la Fig. No. 4.3; en esta caja negra no es necesario saber qué pasa dentro de ella, resultando necesario conocer la relación entre lo que entra y lo que sale.

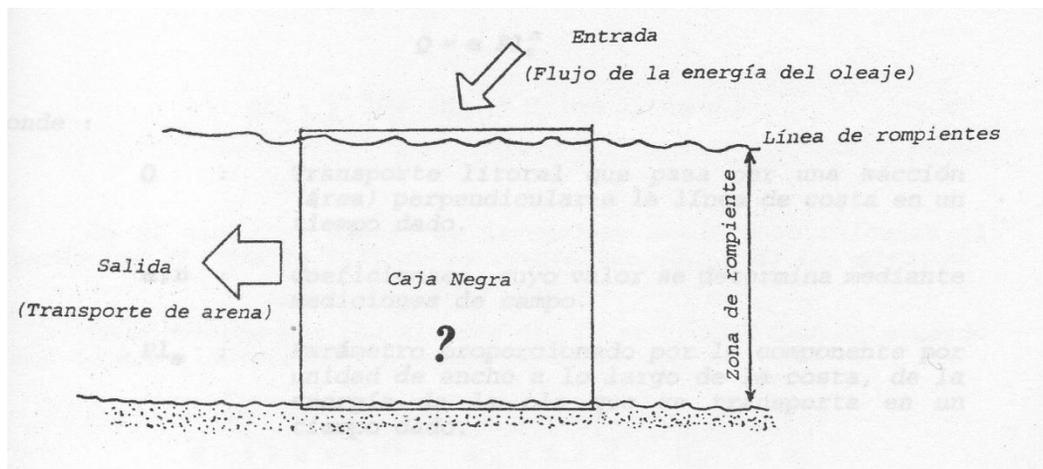


Fig. No. 4.3 Modelo de caja negra para el transporte litoral a lo largo de la costa.

Lo que sale de la caja negra corresponde a la cantidad de transporte litoral a lo largo de la costa y lo que entra corresponde a los oleajes. Existen muchos parámetros que representan las características del oleaje, tales como la altura, el período, la esbeltez, la energía del oleaje y su flujo, porque la energía se consume al transportar los materiales del fondo. En adición, el flujo de la energía del oleaje es proporcional al cuadrado de la altura de la ola y a la ocurrencia del mecanismo de



corrientes litorales como ya se ha explicado. Por lo anterior, al estudiar la relación de la entrada y la salida del modelo de caja negra, dicha relación se puede expresar como sigue:

$$Q = F ( Pl_s ) \quad (4.1)$$

Donde:

$Q$  : Transporte litoral a lo largo de la costa.

$Pl_s$  : Componente del flujo de la energía del oleaje a lo largo de la costa.

$F$  : Función.

Muchos investigadores han estudiado la relación de la ec. (4.1) y más concretamente la han expresado como sigue:

$$Q = \alpha Pl_s^n$$

Donde:

$Q$ : Transporte litoral que pasa por una sección (área) perpendicular a la línea de costa en un tiempo dado.

$\alpha, n$  : Coeficientes cuyo valor se determina mediante mediciones de campo.

$Pl_s$  : Parámetro proporcionado por la componente por unidad de ancho a lo largo de la costa de la energía de la ola que se transporta en un tiempo dado.

A continuación se indica la manera de calcular el parámetro  $Pl_s$ .

Tomando como referencia la Fig. No. 4.4, la energía de una ola significativa en la rompiente que se transporta por una unidad de ancho de cresta de oleajes se expresa como sigue:

$$W_b = \left\{ \frac{pg}{8} \left( H_{\frac{1}{3}} \right)^2 Cg \right\}_b \quad (4.2)$$



El subíndice  $b$ , indica que corresponde en la zona de rompientes y  $C_g$  indica la celeridad de grupo.

La energía transportada por el ancho  $b_b$  se expresa como  $b_b W_b$ .

La componente  $b_b W_b$  a lo largo de la costa es  $b_b W_b \text{sen} \alpha_b$  y es expresada por unidad de longitud de playa:

$$b_b W_b \text{sen} \alpha_b \frac{1}{b_b / \cos \alpha_b} = W_b \text{sen} \alpha_b \cos \alpha_b \quad (4.3)$$

La suma de la componente de energía transportada durante cierto tiempo se expresa como sigue:

$$Pl_s = \sum W_b \text{sen} \alpha_b \cos \alpha_b$$
$$Pl_s = \sum \left( \frac{pg}{8} \left( H_{\frac{1}{3}} \right)^2 C_g \text{sen} \alpha_b \cos \alpha_b \right) b \quad (4.4)$$

En el campo, el oleaje es irregular debiéndose calcular el parámetro  $Pl_s$  con la raíz media cuadrática ( $H_{rms}$ ) de los oleajes. Considerando que las alturas de ola se distribuyen de acuerdo con la distribución de Rayleigh, se tiene:

$$\bar{H} = (2 \pi m_o)^{1/2}; H_{1/3} = 1.6 \bar{H}; H_{rms}^2 = 8 m_o$$

Al relacionar las expresiones anteriores se obtiene:

$$H_{1/3} = 1.6 \bar{H} = 1.6 (2\pi m_o)^{1/2} = 1.6 \left( 2\pi \frac{H_{rms}^2}{8} \right)^{1/2}$$
$$H_{1/3} = 1.418 H_{rms} \quad (4.5)$$

De lo anterior se concluye que al calcular el parámetro  $Pl_s$  con la raíz media cuadrática ( $H_{rms}$ ), este es alrededor del doble del valor calculado con  $H_{1/3}$ .

En el cálculo de  $Pl_s$  no es común utilizar  $H_{1/3}$  en la zona de rompientes, pues la medición y el cálculo de los oleajes generalmente se efectúan en aguas profundas expresándose  $Pl_s$  con las características del oleaje en aguas profundas como a continuación se indica.

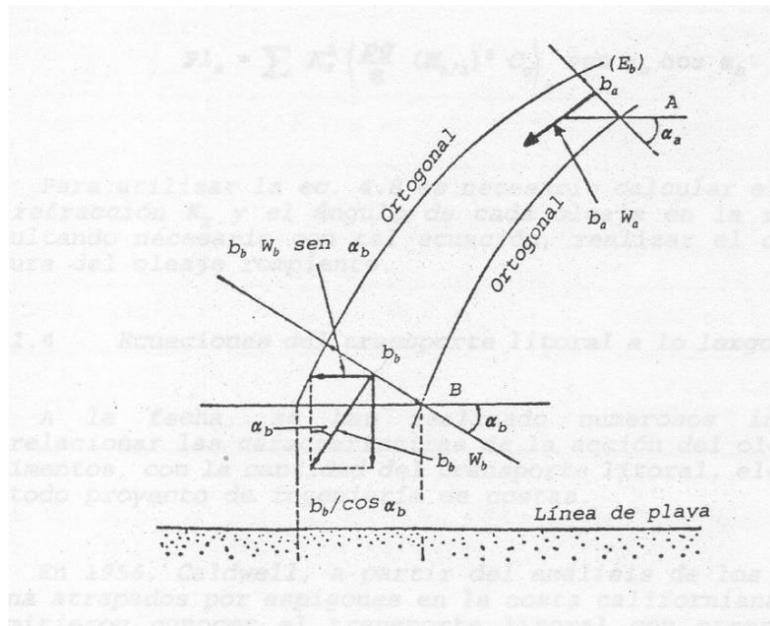


Fig. No. 4.4 Transmisión de la potencia de la ola.

En la Fig. No. 4.4, si la energía del oleaje que se transporta por el ancho  $b$  de la cresta se expresa como  $W_a b_a$ , al no haber cruce de la energía del oleaje entre ortogonales se puede obtener la siguiente ecuación:

$$b_a W_a = b_b W_b \quad (4.6)$$

Haciendo operaciones resulta:

$$W_b = \frac{b_a}{b_b} W_a = K_r^2 W_a = K_r^2 \left( \frac{pg}{8} (H_{1/3})^2 C_g \right)_a \quad (4.7)$$

Donde  $K_r$  corresponde al coeficiente de refracción entre los frentes del oleaje A y B, pudiendo expresar la ec. (4.4) como sigue:



$$Pl_s = \sum W_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b$$
$$Pl_s = \sum K_r^2 \left( \frac{pg}{8} (H_{1/3})^2 C_g \right)_a \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (4.8)$$

Para utilizar la ec. (4.8) es necesario calcular el coeficiente de refracción  $K_r$  y el ángulo de cada oleaje en la rompiente, no resultando necesario con tal ecuación realizar el cálculo de la altura del oleaje rompiente.

### IV. 3.1 Ecuaciones del transporte litoral a lo largo de la costa

A la fecha se han realizado numerosos intentos para correlacionar las características de la acción del oleaje y de los sedimentos con la cantidad del transporte litoral, elemento básico de todo proyecto de Ingeniería de Costas.

En 1956, Caldwell a partir del análisis de los volúmenes de arena atrapados por espigones en la costa californiana (E.U.A.), le permitieron conocer el transporte litoral con cierta exactitud. Posteriormente, muchos han sido los investigadores que han seguido analizando el tema.

En la Tabla No. 4.1 se presenta una lista de las ecuaciones más representativas para calcular el transporte litoral a lo largo de la costa.



INVESTIGACION	FORMULA: $Q$ ( $m^3/h$ ) $Pl_s$ ( $t_s^*m/m$ )	BASE DE LA FORMULACION
CALDWELL (1956)	$Q = 1.21 Pl_s^{0.8}$	Sur de la boca del lago Worth, Florida. ( $d_s=0.3-0.7$ mm.) Bahía Anaheim, California. ( $d_s=0.3-0.5$ mm.; $H_{O_{max}}=3.5$ ft.; $T=11.5-7.2$ seg.)
SAVAGE (1959)	$Q = 0.217 Pl_s$	Datos de campo y laboratorio.
IJIMA, SATO, AONO E ISHIL (1960)	$Q = 0.13 Pl_s^{0.54}$	Costa de Fukue en japon ( $d=1-2$ mm., $H<1$ m., $T=2-4$ seg)
ICHIKAWA, OCHIAL, TAMITA Y MOROBUSE (1961)	$Q = 0.131 Pl_s^{0.8}$	Bahía Suruga y Tagonaura en Japón ( $d_s=5-40$ mm., $\tan\beta=1/5-1/10$ )
MANOHA (1962)	$Q = 0.786 Pl_s^{0.91} d^{0.59}$	Datos de campo y laboratorio. $d$ (mm)
IJIMA, SATO Y TANAKA (1964)	$Q = 0.3 Pl_s$	Costa de Kashima en Japón ( $d_s=0.15-0.2$ mm., $H<4$ m.)
SATO(1966)	$Q = 0.120 Pl_s$	Costa de kashima en Japón
C.E.R.C (1975)	$Q = 0.401 Pl_s$	Datos de campo obtenidos por Komar, Caldwell y Watts

Tabla No. 4.1 Ecuaciones para el cálculo del transporte litoral a lo largo de la costa.

#### IV. 4 Evolución de la línea de playa utilizando la teoría de una línea

**Algoritmo 8:** Ecuación básica de teoría de una línea. Si se toma el eje x en la orientación de la línea de playa y el eje y perpendicular a la misma, la ecuación de continuidad del movimiento de arena se puede expresar como sigue:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (4.9)$$

Donde:

$h$  : Profundidad del punto  $(x, y)$

$q_x$  : Cantidad del movimiento de arena en la dirección  $x$  por unidad de tiempo

$q_y$  : Cantidad del movimiento de arena en la dirección  $y$  por unidad de tiempo

$t$  : Tiempo

$\lambda$  : Relación de vacíos de la arena en el agua

Esta ecuación indica que la suma de la arena que sale hacia  $x$  y  $y$  desde el área  $(\Delta x \cdot \Delta y)$  por unidad de tiempo, es igual al aumento de profundidad de la misma área por unidad de tiempo como se muestra en la Fig. No. 4.6a.

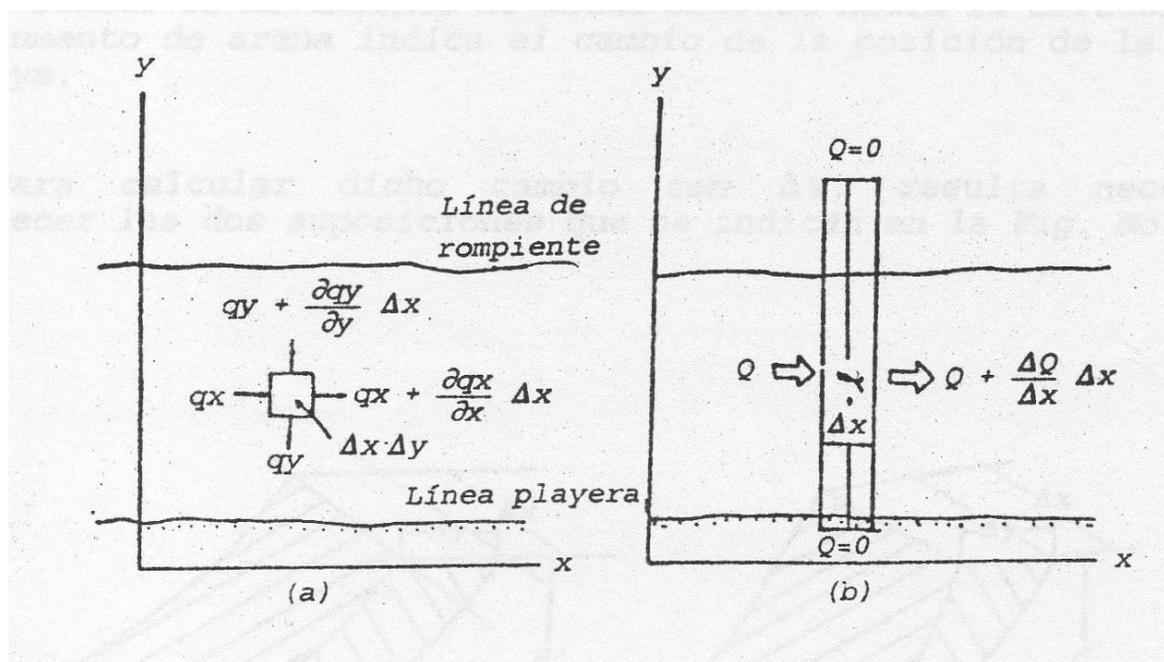


Fig. No. 4.6 Coordenadas de la ecuación de Continuidad de la arena en Movimiento.



Si  $q_x$  y  $q_y$  se evalúan exactamente, se pueden calcular los cambios de la profundidad según la ec. (4.9). Sin embargo las fórmulas para calcular  $q_x$  y  $q_y$  en la actualidad no se han establecido especialmente en la zona de rompiente. Por eso se considera el elemento  $\Delta X \cdot 1$  de la Fig. No. 4.6b, donde ambos términos en la dirección y se prolongan hasta que  $q_y$  se hace cero.

De la Fig. No. 4.6b, si la cantidad de arena por unidad de tiempo que entra en el elemento  $\Delta X \cdot 1$  a través de la longitud 1 se define como  $Q$ , la cantidad que sale desde dicho elemento se puede expresar como  $Q + \left(\frac{\Delta Q}{\Delta X}\right)\Delta X$ . Por lo anterior, el aumento de arena en la unidad de tiempo  $\Delta t$  en el elemento  $\Delta X \cdot 1$  se expresa como sigue:

$$\begin{aligned}\Delta V &= Q \Delta t - \left(Q + \frac{\Delta Q}{\Delta X} \Delta X\right) \Delta t \\ \Delta V &= -\frac{\Delta Q}{\Delta X} \Delta X \Delta t\end{aligned}\tag{4.10}$$

$\Delta V$  tiene signo positivo cuando  $\frac{\Delta Q}{\Delta X}$  tiene signo negativo, es decir, cuando el movimiento de arena decrece hacia la dirección  $x$ . Este aumento de arena indica el cambio de la posición de la línea de playa.

Para calcular dicho cambio con  $\Delta V$ , resulta necesario establecer las dos suposiciones que se indican en la Fig. No. 4.7.

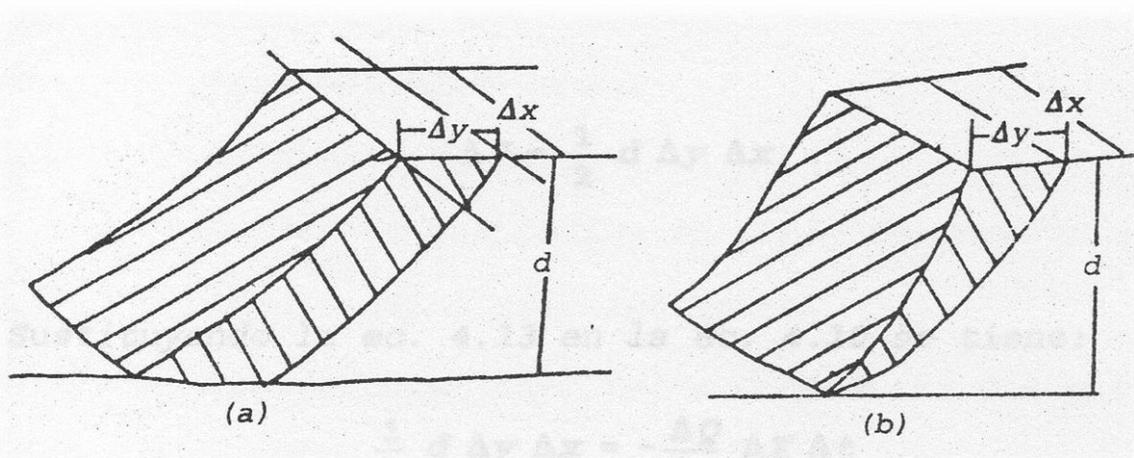


Fig. No. 4.7 Suposiciones para calcular el cambio de la línea de playa

En la suposición de la Fig. No 4.7a, la arena se deposita uniformemente en el elemento o se erosiona uniformemente desde el mismo, por lo que se mantiene la siguiente relación:

$$\Delta V = d \cdot \Delta y \cdot \Delta x \quad (4.11)$$

Dónde:

$d$  : Distancia vertical entre el límite del ascenso del oleaje sobre la playa y el fondo de mar, donde la profundidad no cambia

$\Delta y$  : Desplazamiento hacia el mar de la línea de playa.

Sustituyendo la ec. (4.10) en la ec. (4.11) se tiene:

$$\begin{aligned} d \Delta y \Delta x &= - \frac{\Delta Q}{\Delta x} \Delta x \Delta t \\ \frac{\Delta y}{\Delta t} &= - \frac{1}{d} \frac{\Delta Q}{\Delta x} \end{aligned} \quad (4.12)$$



Por otro lado, de la Fig. No, 4.7b se supone que la arena se deposita en razón inversa a la profundidad pudiéndose expresar la siguiente ecuación:

$$\Delta V = \frac{1}{2} d \cdot \Delta y \cdot \Delta x \quad (4.13)$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = - \frac{2 \Delta Q}{d \Delta x} \quad (4.14)$$

Las ecs. (4.12) y (4.14) son la ecuación de continuidad para el transporte litoral a lo largo de la línea de playa.

En la mayoría de los casos, la suposición de la Fig. No. 4.7a se usa más frecuentemente que el de la Fig. No. 4.7b.

#### IV. 5 Tratamiento sobre ángulo de oleaje incidente

El ángulo de oleaje incidente es un importante parámetro para evaluar la cantidad del transporte litoral a lo largo de la playa, el cual se calcula generalmente con la siguiente ecuación:

$$Q = K P_{ls}$$

$$P_{ls} = (EC_g)_b \frac{1}{2} \sin 2\alpha_b \quad (4.15)$$

$$E = \frac{pg}{8} (H_{1/3})^2$$

Donde:

$E$  : Energía total de oleaje

$H_{1/3}$  : Altura de oleaje significativa

$pg$  : Peso del agua de mar

$C_g$  : Celeridad de grupo

$b$  : Subíndice que indica el punto de rompiente

$\alpha_b$  : Angulo del oleaje incidente

$K$  : Coeficiente (cuyo valor está entre 0.1 y 0.5)

En la ec. (4.15) el ángulo de oleaje incidente en el punto de rompiente  $\alpha_b$  es el ángulo entre la línea de playa y la línea de cresta del oleaje.

En el cálculo por computadora, la línea de playa se divide en elementos pequeños de ancho  $\Delta x$  como se indica en la Fig. No. 4.8, donde la cantidad de transporte litoral que pasa del elemento  $i$  al elemento  $i + 1$  se define como:

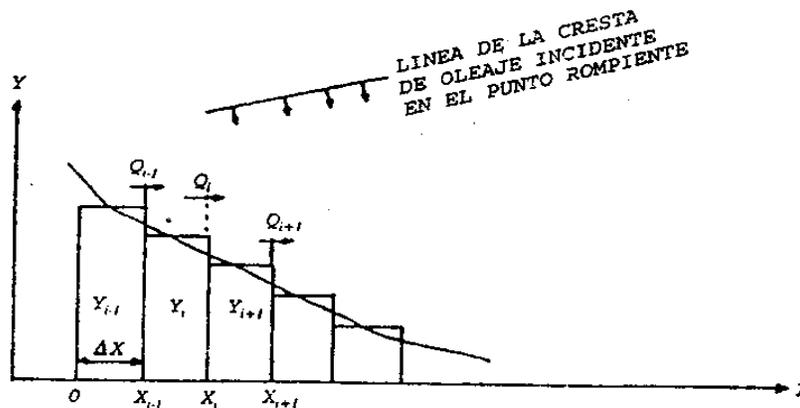


Fig. No. 4.8 División de la línea de playa.

El método para determinar  $\alpha_{bi}$  en el cálculo de  $Q_i$  se expresa a continuación utilizando la Fig. No. 4.9.

El ángulo  $\alpha_0$  es el ángulo entre la línea de cresta de oleaje incidente y el eje x, donde el ángulo medido en el sentido opuesto al movimiento de las manecillas del reloj desde el eje x hacia la línea de cresta de oleaje tiene signo positivo y el ángulo medido en el sentido contrario tiene signo negativo,  $\alpha_1$  es el ángulo entre la línea de playa y el eje x.

El ángulo  $\alpha_1$  de la línea de playa entre los elementos  $i$  e  $i + 1$  se define utilizando la Fig. No. 4.9 como sigue:

$$\tan \alpha_1 = \frac{y_i - y_{i+1}}{\Delta x}$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left( \frac{y_i - y_{i+1}}{\Delta x} \right) \quad (4.16)$$

También:

$$\alpha_{b1} = \alpha_{o1} + \alpha_1 \quad (4.17)$$

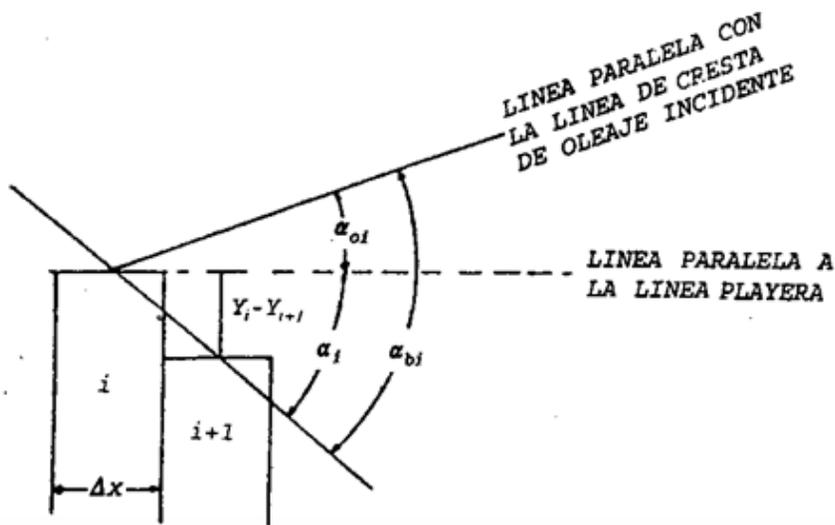


Fig. No. 4.9 Definición del ángulo del oleaje incidente.



***CAPÍTULO V***

***DISEÑO DE***

***ROMPEOLAS Y***

***ESPIGONES***



## V.I Rompeolas y espigones

**Rompeolas:** La función esencial de una obra de protección o rompeolas de un puerto es proteger los accesos, las zonas de maniobras y las obras interiores contra la acción de los oleajes procedentes de aguas profundas. A su vez, otras funciones que se dan paralelamente con la construcción de los rompeolas son el encauzamiento de corrientes, interrupción del transporte litoral, ganancia de terrenos al mar, etc.

Cualquiera que sea la función de un rompeolas, estructuralmente, deberá ser capaz de resistir las diferentes acciones o fuerzas a las que estará sujeto, siendo la principal de ellas la correspondiente al oleaje. Debido a esta característica, los rompeolas se dividen en dos grupos:

- a) Rompeolas que amortiguan el oleaje: Estas se dividen en rompeolas sumergidas, rompeolas flotantes, rompeolas neumáticas y rompeolas hidráulicas.
- b) Rompeolas que impiden el paso del oleaje: Estas se dividen en rompeolas de paramento vertical, rompeolas de paramento a talud, y rompeolas mixtas.

**Rompeolas sumergidas:** Producen una disminución en la altura de ola incidente, mediante una reflexión parcial. Ver Fig. No. 5.1.

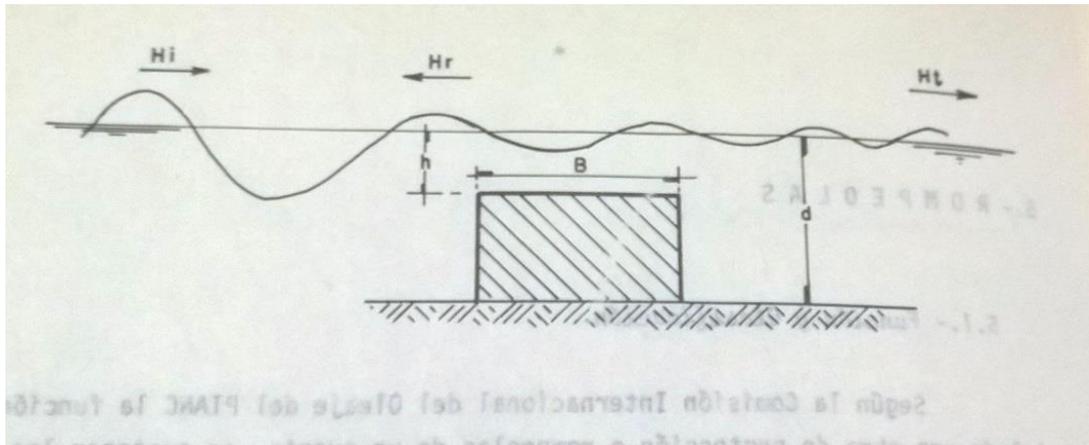


Fig. No. 5.1 Rompeolas sumergida

Kt: Coeficiente de transmisión =  $\frac{Ht}{Hi}$

Kr: Coeficiente de reflexión =  $\frac{Hr}{Hi}$

Hi: Altura de ola incidente

Hr: Altura de ola reflejada

Ht: Altura de ola transmitida

**Rompeolas flotante:** En la Fig. No. 5.2 se muestra el esquema de un rompeolas flotante, el cual también produce en su funcionamiento un coeficiente de transmisión del oleaje incidente hacia la zona por proteger.

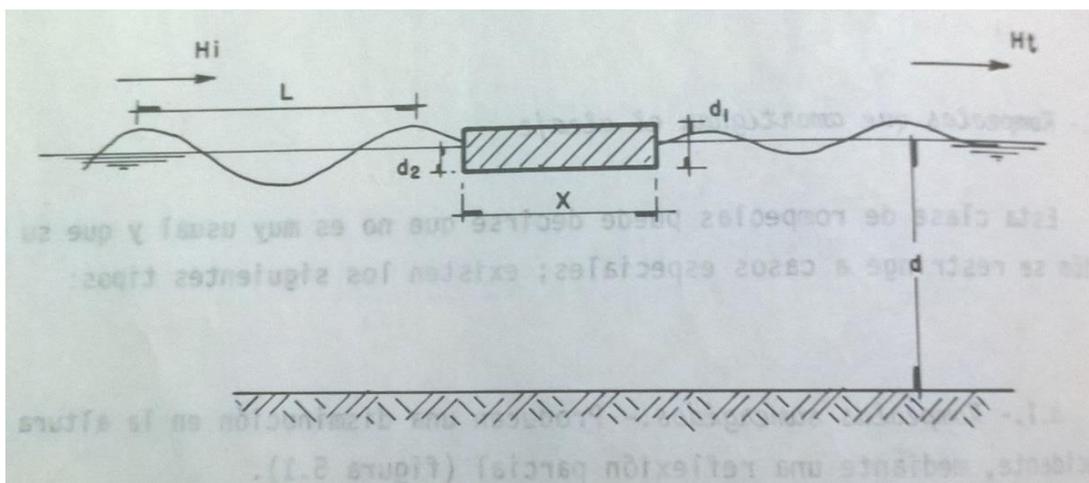


Fig. No. 5.2 Rompeolas flotante

**Rompeolas neumáticos e hidráulicos:** El amortiguamiento del oleaje se logra mediante dispositivos especiales que inyectan aire o agua a presión, como lo muestra la Fig. No. 5.3.

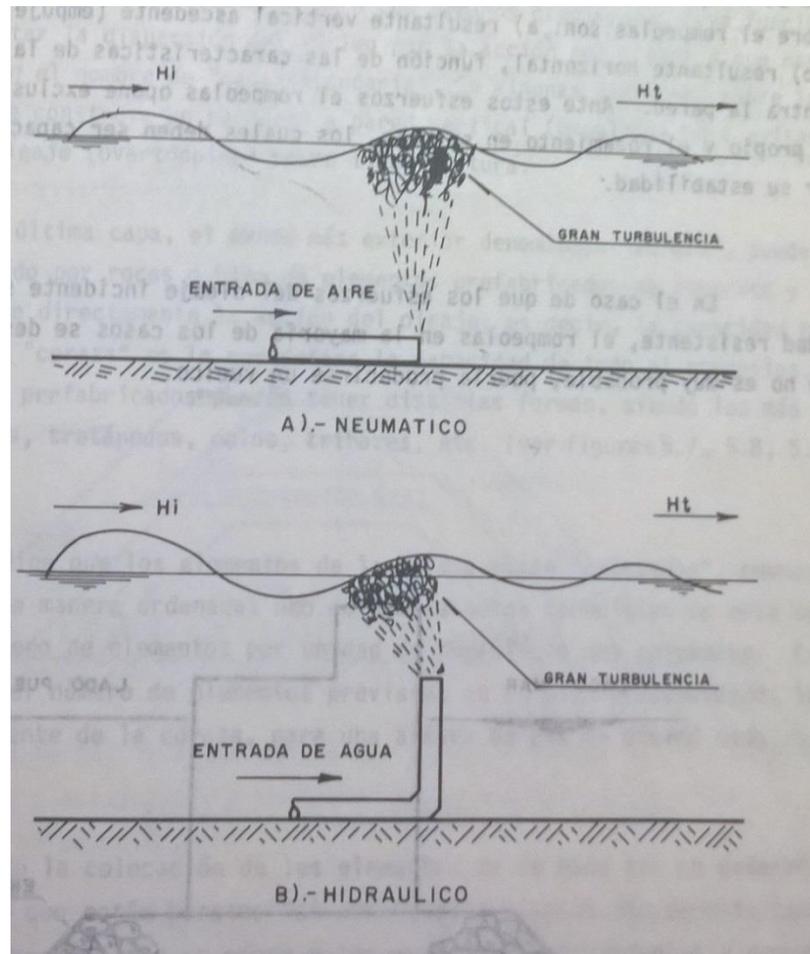


Fig. No. 5.3 Rompeolas neumáticos e hidráulicos

**Rompeolas de paramento vertical:** están constituidos por una pared vertical formada por cajones de concreto rellenos con arena o con roca sustentados por un enrocamiento (aunque también puede darse el caso de que se hinquen o descansen en el fondo). Ver Fig. No. 5.4.

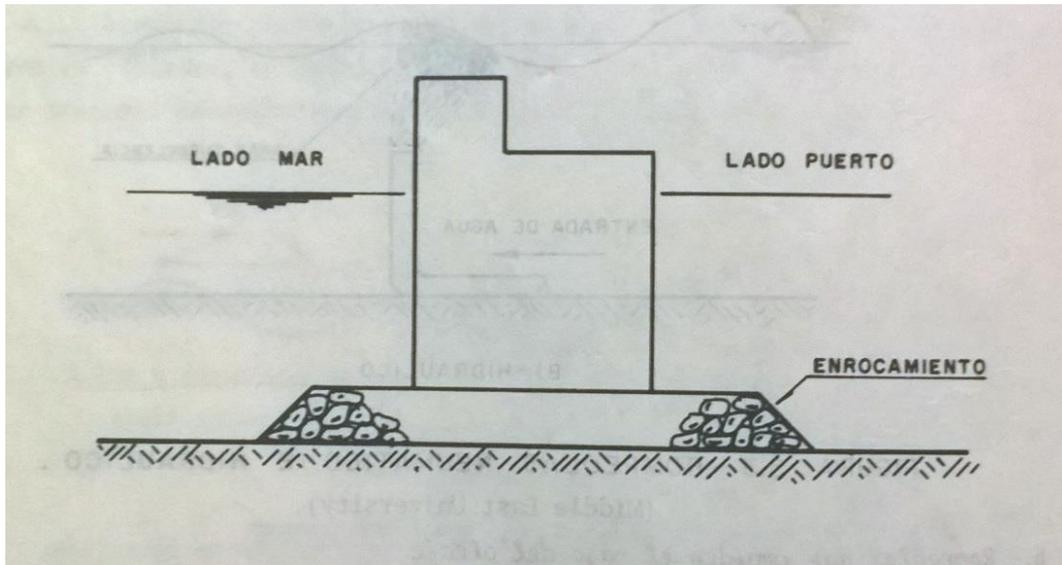


Fig. No. 5.4 Rompeolas de paramento vertical

**Rompeolas de paramento a talud:** están constituidos por un núcleo de enrocamiento (piedras relativamente pequeñas) que impide la transmisión de la energía dada su baja porosidad; este, a su vez, está protegido por una o varias capas de enrocamiento pero con tamaños crecientes y cuya función es la de evitar la dispersión del núcleo por la acción del oleaje. En algunas ocasiones sobre la corona de él se construye un parapeto a pared vertical (espaldón) para evitar el rebase del oleaje sobre la estructura. Ver Fig. No. 5.5.

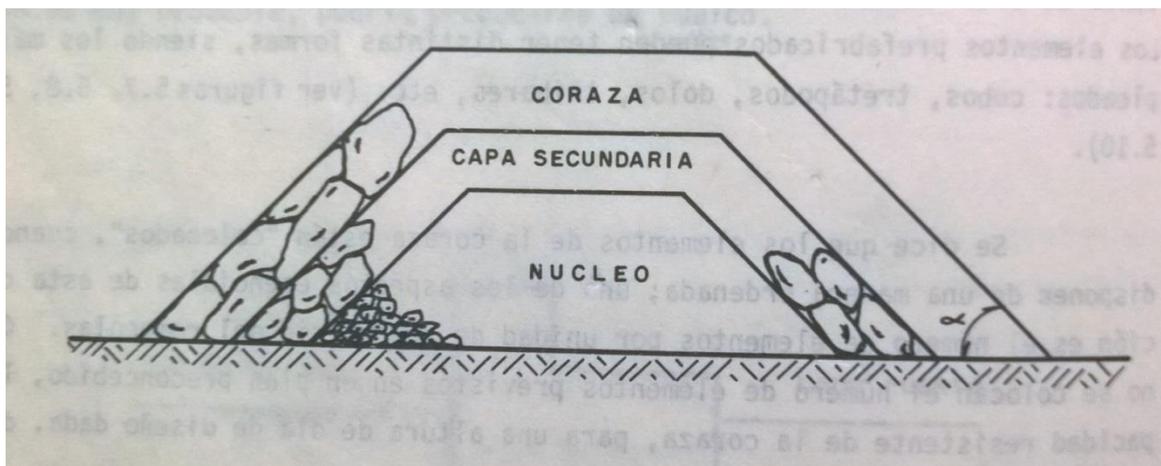


Fig. No. 5.5 Rompeolas de paramento a talud

**Rompeolas mixtas:** consiste en una muralla 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 bajamar. La característica fundamental es que las olas se reflejan sobre el en condición de pleamar y rompen contra él o contra el talud en condición de bajamar. Ver Fig. No. 5.6.

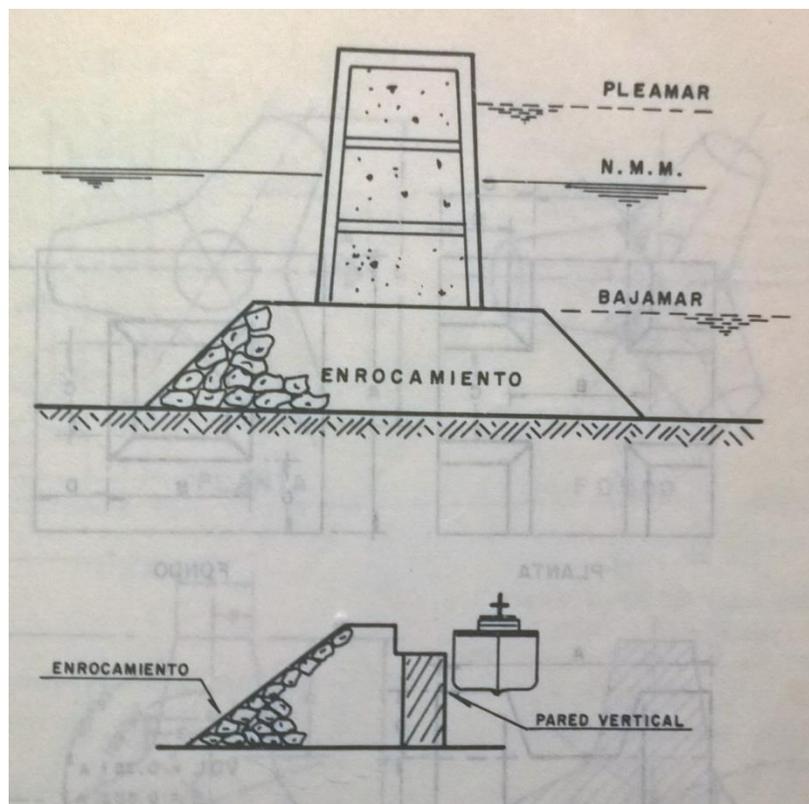


Fig. No. 5.6 Rompeolas mixtas

**Espigón:** Es una estructura construida para proteger una costa (usualmente perpendicular a la línea de costa) y que sirve para atrapar el transporte litoral o retardar la erosión de una costa.



## V.2 Diseño de estructuras formadas con elementos sueltos

Las estructuras marítimas formadas con elementos sueltos y denominadas obras exteriores son los rompeolas, las escolleras y los espigones.

Las estructuras anteriores se diseñan en forma similar aunque su tamaño y propósito difieren. Los rompeolas sirven principalmente para generar zonas de calma en los puertos. Las escolleras se utilizan para evitar el azolve del canal de navegación en la desembocadura de ríos, evitar la entrada de material a la obra de toma de plantas termoeléctricas o nucleoelectricas y proteger de la acción del oleaje la obra de toma y planta de bombeo de dichas centrales. Los espigones se utilizan para proteger playas contra la erosión o mantenerlas cuando estas se forman artificialmente.

Las estructuras anteriores se construyen generalmente con enrocamiento de gran tamaño o elementos artificiales de concreto, y están formadas por un cuerpo y un morro. El cuerpo se inicia desde la playa o costa hasta un poco antes del final de la estructura; el morro lo constituye la zona final y es la parte más expuesta al oleaje, se considera como morro los últimos 20 ó 50 m de la obra; en él se colocan los elementos más pesados y sus secciones transversales deben ser simétricas colocando elementos del mismo tamaño tanto del lado exterior como del interior.

### V.2.1 Diseño de la sección transversal de la estructura

La estructura de elementos sueltos normalmente está formada por un faldón o delantal como base, núcleo, capa secundaria y coraza de piedras grandes o elementos artificiales de concreto (elementos prefabricados). Una sección típica transversal de la estructura se presenta en las Figs. No. 5.7 y 5.8. La Fig. No. 5.7 es

la sección del rompeolas que permite poca sobreelevación del oleaje sobre su corona (overtopping); la altura de la corona de esta sección normalmente se diseña para permitir poco overtopping por tormenta temporal de largo período de retorno. La Fig. No 5.8 es la sección del rompeolas que se expone a la acción constante del oleaje en ambos lados como es el caso de un espigón, en este caso se permitirá el overtopping más frecuentemente.

TAMAÑO DE PIEDRA	CAPA	GRADUACION DE TAMAÑOS (±)
W	Coraza	125 a 75
W/10 - W/15	Capa secundaria	125 a 75
W/200 - W/6000	Núcleo	170 a 30

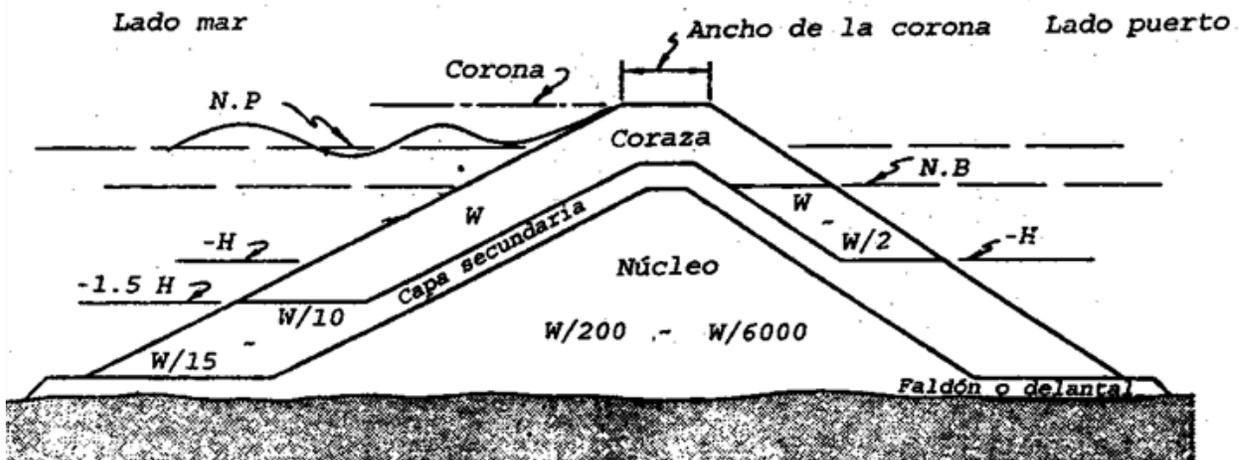


Fig. No. 5.7 Ejemplo de las dimensiones de una sección típica transversal en la que actúa el oleaje del lado exterior

TAMAÑO DE PIEDRA	CAPA	GRADUACION DE TAMAÑOS (±)
W	Coraza	125 a 75
W/10	Capa secundaria	125 a 75
W/200 - W/4000	Núcleo	170 a 30

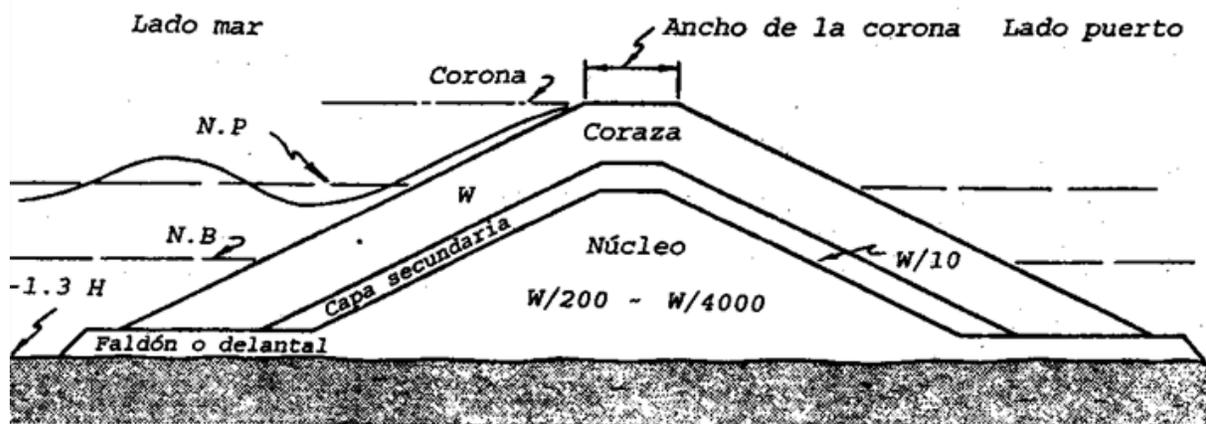


Fig. No. 5.8 Ejemplo de las dimensiones de una sección típica transversal en la que actúa el oleaje de ambos lados

## V.2.2 Peso de los elementos de la coraza

Cuando las estructuras se forman con elementos de piedra o elementos artificiales de concreto, el peso necesario de los elementos para la coraza se calcula con la fórmula de Hudson expresada como sigue:

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (5.1)$$

Donde:

$w$  : Peso mínimo necesario de los elementos para la coraza.

$\gamma_x$  : Peso específico de los elementos de la coraza.

$S_r$  : Densidad de sólidos de los elementos sumergidos en el mar, es decir  $\gamma_x / \gamma_s$



$\gamma_s$  : Densidad del agua de mar, ( $\gamma_s=1.03 \text{ t/m}^3$ )

$\cot \alpha$ : Talud de la coraza.

$H$  : Altura de ola de diseño ( $m$ ).

$K_D$  : Coeficiente de estabilidad (adimensional)

La ec. (5.1) es la más usada para calcular el peso de los elementos en la coraza, fue propuesta en 1959 y está sustentada en ensayos de modelo hidráulico y calibrada con datos de campo, sin embargo, el efecto del período no se incluye en esta ecuación. Cuando el período de la ola de diseño es largo, la fuerza sobre la coraza es algunas veces mayor, siendo necesario realizar ensayos en modelo hidráulico.

En la ec. (5.1) la altura de ola  $H$  corresponde por lo general a la altura de ola significativa  $H_{1/3}$ . Se pueden usar piedras o elementos artificiales más pequeños cuando la profundidad del lugar donde se les coloque sea mayor que  $1.5 H$ .

### V.2.3 Ola de diseño

Normalmente la destrucción de una estructura formada con elementos sueltos no ocurre por la acción de la ola máxima, sino por las acciones continuas del oleaje. Por lo tanto, se puede elegir la ola significativa del sitio donde la estructura se construye como la representativa del tren de oleaje. Si la profundidad es menor de  $0.5 H_o'$ , se debe usar el valor de  $H_{1/3}$  en lugar de  $H = 0.5 H_o'$ .  $H_o'$  se le conoce como la altura de ola equivalente de aguas profundas, es decir es aquella altura de ola que ha sido afectada por el coeficiente de fondo  $K_s$ , el coeficiente de refracción  $K_r$ , y



también por el coeficiente de difracción  $K_d$ , si la zona donde se quiera conocer la altura de ola  $H_o'$  se encuentra ubicada detrás de un obstáculo artificial o natural.

### V.2.4 Coeficiente de estabilidad

Las variables que intervienen en la selección del coeficiente de estabilidad  $K_D$  son:

1. Tipo de piedra o elemento artificial de concreto
2. Forma de colocación de los elementos.
3. Características de la ola.
4. Espesor de la coraza.
5. Talud de la coraza
6. Porcentaje de daño aceptado al actuar el oleaje.

En la Tabla No. 5.1 se indican los valores de  $K_D$  y en ellos se considera un posible daño comprendido entre 0 y 5 %.

Los datos mostrados en la Tabla No. 5.1 se obtuvieron de calcular el  $K_D$  por medio de la ec. (5.2) y los valores de  $\gamma_r$ ,  $S_r$ ,  $H$  y  $w$  son iguales a los utilizados en la ec. (5.1).

$$K_D = \frac{N_s^3}{\cot \alpha} \quad (5.2)$$



Donde:

$$N_s = \frac{\gamma_r^{1/3} H}{W^{1/3} (S_r - 1)}$$

$N_s$  es el número de estabilidad.

TIPO DE ELEMENTO EN LA CORAZA	NUMERO DE CAPAS DE LA CORAZA	COLOCACION	VALOR DE $K_D$ EN EL CUERPO			VALOR DE $K_D$ EN EL MORRO					
			OLA ROMPIENTE	OLA NO ROMPIENTE	TALUD COT $\alpha$	OLA ROMPIENTE	OLA NO ROMPIENTE	TALUD COT $\alpha$			
ROCA DE CANTERA LISA Y REDONDA LISA Y REDONDA RUGOSA Y ANGULAR	2	AZAR	2.1	2.4	1.5   5.0	1.7	1.9	1.5			
	>3	AZAR	2.8	3.2		2.1	2.3				
	1	AZAR	1.0	2.9		1.0	2.3	3.0			
RUGOSA Y ANGULAR	2	AZAR	3.5	4.0		1.5   5.0	2.9	3.2	1.5		
							2.5	2.8	2.0		
							2.0	2.3	3.0		
RUGOSA Y ANGULAR	>3	AZAR	3.9	4.5		1.5   5.0	3.7	4.2	1.5		
	2	ESPECIAL	4.8	5.5			3.5	4.5			
TETRAPODO Y CUADRIPODO	2	AZAR	7.2	8.3			1.5   5.0	5.9	6.6	1.5	
								5.5	6.1	2.0	
								3.7	4.1	3.0	
TRIBOR	2	AZAR	9.0	10.4			1.5   5.0	8.3	9.0	1.5	
	1	UNIFORME	12.0	15.0	7.8			8.5	2.0		
7.0					7.7			3.0			
DOLOS	2	AZAR	22.0	25.0	1.5   5.0			15.0	16.5	2.0	
								13.5	15.0	3.0	
CUBO MODIFICADO	2	AZAR	6.8	7.8				1.5   5.0	----	5.0	1.5
									----	5.0	
HEXAPODO	2	AZAR	8.2	9.5		1.5   5.0		5.0	7.0	1.5	
								5.0	7.0		
										3.0	

Tabla No. 5.1 Valores del coeficiente de estabilidad  $K_D$ , para el cuerpo y morro de la estructura

## V.2.5 Elevación y ancho de la corona de la coraza

El rebase del oleaje en una estructura de elementos sueltos tales como rompeolas o espigones normalmente se acepta si este no causa efectos perjudiciales en el lado interior de la estructura.



El rebase del oleaje en una estructura de elementos sueltos depende principalmente de las características del oleaje incidente, la pendiente de la estructura, la porosidad, la aspereza de la coraza y las condiciones batimétricas del fondo del mar.

Cuando el rebase del oleaje es excesivo en un rompeolas o espigón este origina agitación detrás del rompeolas y en ocasiones es perjudicial en las operaciones del puerto y en el atraque de las embarcaciones. El rebase del oleaje en diques o revestimientos también origina erosión detrás de estas estructuras.

El ancho mínimo de la corona de la coraza en el caso de que se acepte poco volumen de agua producido por el rebase del oleaje se expresa con la siguiente ecuación:

$$B = \eta_B K_\Delta \left( \frac{W}{W_r} \right)^{1/3} \quad (5.3)$$

Donde:

$B$  : Ancho de la corona (m.).

$\eta_B$  : Número de elementos. (se recomienda que el mínimo valor de  $\eta_B$  sea 3)

$K_\Delta$  : Coeficiente de capa. (se da en la Tabla No. 5.2)

$W$  : Peso de los elementos en la coraza (ton.)

$W_r$  : Peso específico de los elementos de la coraza (ton/m<sup>3</sup>)

La elevación de la corona de la coraza que se elija debe ser la mínima que trabaje con eficiencia, y estará sujeta a la elevación que presente el núcleo, el cual dependerá de las condiciones oceanográficas del sitio, es decir, se deberá prever que dicha elevación del núcleo garantice que no se tendrán problemas durante el proceso constructivo de la estructura.



Para determinar la elevación del núcleo se propone que su valor sea de 1.5 por arriba del nivel de bajamar media para obras ubicadas en el Golfo de México, y de 1.5 por arriba del nivel de bajamar media inferior para obras ubicadas en el Océano Pacífico.

Una vez definida la elevación del núcleo se tomarán en cuenta los espesores de la capa secundaria y coraza para finalmente determinar la elevación de la corona de la coraza.

### V.2.6 Espesor de la capa secundaria o de la coraza y densidad de elementos colocados en la coraza

Se puede determinar el espesor de la capa secundaria y de la coraza con la siguiente ecuación:

$$e_r = \eta_r K_\Delta \left( \frac{W}{W_r} \right)^{1/3} \quad (5.4)$$

Donde:

$e_r$  : Espesor promedio de la capa secundaria o de la coraza (m).

$\eta_r$  : Número de capas de los elementos de la capa secundaria o de la coraza. (ver Tabla No. 5.2)

$K_\Delta$  : Coeficiente de capa.

$W$  : Peso de cada elemento de la capa secundaria o de la coraza (ton)

$W_r$  : Peso específico del material (ton/m<sup>3</sup>)

La densidad de los elementos colocados en la coraza se calcula con la siguiente ecuación:



$$\frac{N_r}{A} = \eta_r K_\Delta \left(1 - \frac{P}{100}\right) \left(\frac{W_r}{W}\right)^{2/3}$$

Donde:

$N_r$  : Número de elementos necesarios en un área dada.

$A$  : Área de la superficie de la estructura ( $m^2$ )

$P$  : Porosidad promedio de la coraza (en porciento)

### V.2.7 Profundidad de la coraza

Se deben colocar los elementos de la coraza hasta una profundidad de 1.5 H abajo del nivel de diseño del mar, en el caso de que la profundidad de desplante sea mayor que 1.5 H como se presenta en la Fig. No 5.7. Cuando la estructura está a una profundidad menor que 1.5 H, se deben colocar los elementos hasta el fondo como se presenta en la Fig. No. 5.8, H es la altura de ola de diseño.

Sí el oleaje rompiente actúa directamente en la coraza es recomendable que se apoye de acuerdo a las recomendaciones que se presentan en la Fig. No. 5.7. El peso de la piedra de dicho apoyo será  $W/10$ , donde  $W$  es el peso de la piedra de la coraza.

### V.2.8 Peso de los elementos de la coraza en el morro

En la naturaleza el oleaje actúa en el morro procedente de varias direcciones requiriéndose mayor estabilidad de los elementos que lo constituyen. Es recomendable que el peso de los elementos en el morro sea 1.5 veces el peso de los elementos en el cuerpo.



En la Tabla No. 5.2 se presentan los valores del número de capas de los elementos de la coraza,  $n_r$ , coeficiente de capa y porosidad promedio de la coraza  $P$  obtenida de ensayos en modelos hidráulicos.

ELEMENTO DE CORAZA	$n_r$	COLOCACION	$K_{\Delta}$	$P$ (%)
ROCA DE CANTERA (LISA)	2	VOLTEO	1.02	38
ROCA DE CANTERA (RUGOSA)	2	VOLTEO	1.15	37
ROCA DE CANTERA (RUGOSA)	3	VOLTEO	1.10	40
CUBO MODIFICADO	2	VOLTEO	1.10	47
TETRAPODO	2	VOLTEO	1.10	50
CUADRIPODO	2	VOLTEO	0.95	49
HEXAPODO	2	VOLTEO	1.15	47
TRIBAR	2	VOLTEO	1.02	54
DOLOS	2	VOLTEO	1.00	63
TRIBAR	1	UNIFORME	1.13	47

Tabla No. 5.2 Valores del número de capas de los elementos de la coraza, coeficiente de capa y porosidad.

### V.2.9 Cálculo de los sobreeanchos de corona

Para el cálculo de sobreeanchos de corona se deberá considerar que el ancho mínimo permitido para el núcleo deberá ser de 3.5 m y para facilitar el proceso constructivo se propone un ancho de corona del núcleo de 4.0 m.

El cálculo de sobreeancho de corona para la capa secundaria y coraza deberá afectarse por un factor que depende del talud de la estructura y cuyos valores se presentan en la Tabla No. 5.3.



TALUD	FACTOR ( $F_T$ )
1.0 : 1	0.414
1.33 : 1	0.334
1.5 : 1	0.302
2.0 : 1	0.236
2.5 : 1	0.193
3.0 : 1	0.162
3.5 : 1	0.140
4.0 : 1	0.123
5.0 : 1	0.099

Tabla No. 5.3 Factores para cálculo de sobreebanco

El sobreebanco de corona para la capa secundaria se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_{cs} = e_{cs} * F_T * 2 + A_n \quad (5.6)$$

Donde:

$e_{cs}$  : Espesor de la capa secundaria

$F_T$  : Factor que depende del talud de la estructura

$A_n$  : Ancho de corona del núcleo

El sobreebanco de corona para la coraza se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$S_c = e_r * F_T * 2 + S_{cs} \quad (5.7)$$

Donde:



$e_r$  : Espesor de la coraza.

$S_{cs}$  : Sobreancho de corona de la capa secundaria.

En la ecs. No. (5.6) y (5.7) el primer término del segundo miembro de dichas ecuaciones se multiplica por 2, en virtud de que son dos lados de sobreancho. Esta expresión será válida siempre que la altitud de la estructura sea el mismo en ambos lados, si no se cumple lo anterior se deberá calcular el sobreancho con el factor correspondiente.

El ancho de corona así calculado deberá compararse con el resultado de la ec. (5.3), si el valor de esta ecuación resulta mayor se deberá rediseñar la geometría de la estructura para el ancho de corona establecida en la ec. (5.3).



---

---

# *CAPÍTULO VI*

## *ESTABILIDAD DE*

## *ACCESOS COSTEROS*



## **VI.1 Introducción**

Las extensas zonas de lagunas costeras y áreas estuarinas con que cuenta México, la gran productividad de especies marinas que pueden obtenerse y el hecho de que la mayoría de la población pesquera nacional viva actualmente en sus riberas ha implicado una serie de estudios e investigaciones en el campo de la Biología y la Hidráulica, que tiene como objetivos el conocimiento de las condiciones climáticas y el cuadro ecológico existente entre las lagunas y aguas estuarinas, así como el funcionamiento hidráulico de las mismas con el fin de proyectar las obras de Ingeniería necesarias para mantener o modificar las condiciones ambientales requeridas para el mejor desarrollo de las especies.

Las obras de Ingeniería tienen como función primordial el suministrar los aportes de agua dulce o marina a las lagunas en épocas críticas o en forma constante según se determine, siendo el principal problema a resolver, el relativo al acceso costero que permita no solamente mantener ciertos niveles de salinidad sino la entrada de larvas u organismos requeridos por el ciclo biológico de las principales especies susceptibles de explotarse.

En los accesos costeros tiene un papel preponderante la acción combinada de los aportes de aguas interiores, sedimentos, mareas, corrientes, transporte litoral, áreas de las lagunas y el área de la sección transversal del mismo acceso, por lo que el estudio de estos factores será determinante en el tipo de obras que se proyecten.

## **VI.2 Criterios de estabilidad de accesos**

El problema fundamental de los accesos costeros es el de mantener el equilibrio entre el volumen de agua movido en cada ciclo de marea y el equilibrio en



el acarreo litoral que llega a su desembocadura. Este equilibrio se le llama estabilidad y se puede analizar de dos formas: horizontal y vertical o transversal; en el primero se considera la posición de la entrada respecto a su localización en planta; y en la segunda se toman en cuenta las características de la sección transversal.

### VI.2.1 Estabilidad horizontal o de localización

Un canal puede ser migratorio o ser estable, siendo la migración función de su edad. En el caso de albuferas puede abrirse un canal durante una tormenta cerrándose de inmediato; pero si las condiciones interiores de la laguna son favorables es posible que permanezca abierto, iniciando un proceso migratorio, que de no existir interferencias, puede adoptar una situación estable. En este proceso tiene una gran influencia el acarreo litoral  $M$ , el área del acceso  $a$  y la longitud  $L$  del canal.

Hay que considerar también el efecto que puede tener sobre la boca la presencia de escolleras. En términos generales, según O'Brien, las escolleras no solo estabilizan la posición de una entrada sino que la protegen contra el cierre de ella por la acción del oleaje, aún más, la dimensión del área puede ser muy reducida siempre y cuando esté debidamente protegida.

En todos los casos hay que prever que el cordón litoral sea lo suficientemente robusto para no debilitarse por las erosiones y dar lugar a la apertura de nuevas bocas que restarían eficiencia a la original.



## VI.2.2 Estabilidad vertical o de la sección transversal

La estabilidad de la sección transversal está ligada con la estabilidad horizontal en el aspecto relativo a la forma de paso del acarreo litoral de un lado a otro de la entrada, independientemente de la estabilidad de la sección transversal propiamente dicha se deberá examinar cada uno de los factores que es necesario considerar para el análisis completo de estabilidad.

Los factores a considerar los agruparemos en dos tipos fundamentales como sigue:

- a) Los que generan estabilidad.
- b) Los que la contrarrestan.

## VI. 3 Factores de estabilidad

Entre ellos, es básico para los análisis el prisma de marea  $Q$ , que es el volumen en la laguna comprendido entre el nivel de mareas bajas y de mareas altas (marea viva). Sin embargo esta definición pierde generalidad a medida que aumenta el área de la laguna debido a desfases, pérdidas y modificaciones por la configuración del fondo.

Existen formas teóricas aceptables para calcular el prisma de marea idealizando este fenómeno y utilizando valores de velocidades medias. Entre los métodos que permiten efectuar este cálculo se encuentra el de Keulegan, el cual, no obstante lo simplificado de sus consideraciones iniciales como son paredes verticales del vaso, ningún aporte de agua dulce, marea senoidal, canal rectangular de profundidad mayor que las variaciones de marea y flujo siguiendo la fórmula de



Manning, proporciona resultados que han sido verificados satisfactoriamente en la naturaleza.

De acuerdo con Keulegan, se parte de la ecuación de almacenamiento expresada como sigue:

$$\frac{dh_1}{d\theta} = K(h_2 - h_1)^{1/2} ; h_2 > h_1 \quad (6.1)$$

$$\frac{dh_1}{d\theta} = -K(h_1 - h_2)^{1/2} ; h_1 > h_2 \quad (6.2)$$

Donde:

$h_1$  : Relación entre el nivel en la laguna, para una fase con la semiamplitud  $h$  de la marea.

$h_2$  : Relación entre el nivel en la laguna, para una fase con la semiamplitud  $h$  de la marea, para el mar.

$\theta$  : Ángulo de fase

$K$  : Coeficiente del llenado

$$K = \frac{T}{2H\pi} \frac{a}{A} \left( \frac{2grH}{\lambda L + mr} \right)^{1/2}$$

$2H$  : Rango de la marea

$T$  : Periodo de un ciclo de la marea

$a$  : Área de la sección transversal del canal

$A$  : Área del vaso

$\lambda$  : Coeficiente de fricción

$m$  : Coeficiente de distribución de velocidades en la sección.

$L$  : Longitud del canal.

$r$  : Radio hidráulico.

Considerando la siguiente ley de variación de la marea se tiene que:

$$h_2 = \sin(\theta - \zeta) \quad (6.3)$$

Se observa que si:

$$\zeta = \theta, \quad h_2 = 0$$

Aceptando que en general  $h_1 > h_2$ , existirá una curva tal (Fig. No. 6.1), que sus ordenadas valgan:

$$\begin{aligned} z &= h_2 - h_1 \\ z &= h_1 - h_2 \end{aligned}$$

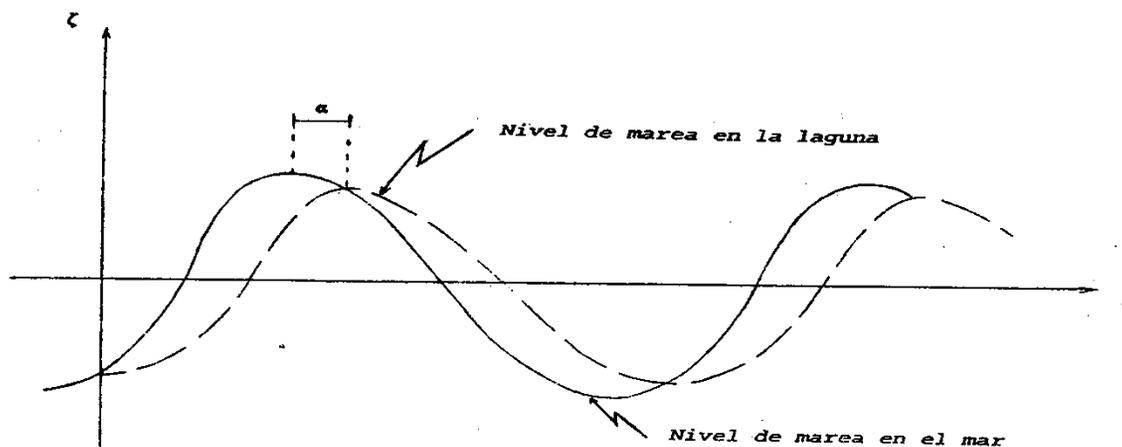


Fig. No. 6.1 Desfasamiento entre las curvas de marea del mar y de la laguna

De acuerdo con la Fig. No. 6.1 se observa que los valores máximos o mínimos de la marea en la laguna corresponden a los valores de  $z = 0$ .

Pero como:

$$h_2 = \sin \zeta \quad (6.4)$$

$$h_1 = z + h_2$$

$$h_{1m} = \sin \zeta \quad (6.5)$$



Que representa la relación de amplitudes entre la marea en el mar y en la laguna.

El valor de  $\zeta$  es una función directa del coeficiente de llenado  $K$ . La pleamar en el mar se presenta para  $0 - f = n/2$ , y el defasamiento entre los valores máximos de la marea y al final del canal de unión es:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \zeta \quad (6.6)$$

A partir de la definición de prisma de mareas y de acuerdo con lo establecido, se tendrá:

$$Q = 2 H A h_{1m} \quad (6.7)$$

Por otra parte, el gasto máximo durante una fase de marea y el prisma de marea, están ligados por la siguiente expresión:

$$\frac{T Q_m}{\pi Q} = C_1 \quad (6.8)$$

Donde:

$C_1$  = Coeficiente adimensional, en función de  $K$ .

Consecuentemente, la velocidad media máxima está dada por:

$$V_m = 2\pi C_1 \frac{A}{a} \sin \zeta \quad (6.9)$$

La relación entre la velocidad media y máxima para un perfil estable teórico según Bretting varía entre 0.73 y 0.86, dado que para una sección parabólica vale 0.85 es aceptable para una trapecial un valor de 0.30.



En análisis similar, Larras propone como relación entre amplitudes la siguiente expresión:

$$h_{1m} = \cos \frac{2\pi\alpha}{T} \quad (6.10)$$

Que equivale al mismo valor dado en la ec. (6.5)

La velocidad máxima se expresa como sigue:

$$V_{max} = (g h)^{1/2} [1 - (h_{1m})^2]^{1/4} \quad (6.11)$$

Una vez establecido el valor del prisma de marea  $Q$ , el área mínima de equilibrio de la entrada del canal, con o sin escolleras, está controlada por dicho prisma de marea y por tanto una reducción en él traerá como consecuencia una reducción en esa área; asimismo, cuando existen dos o más bocas en la misma laguna el cierre de alguna de ellas traerá como consecuencia, según O'Brien, un aumento en las dimensiones de las otras.

Es conveniente analizar los efectos del gasto máximo  $Q_m$ , la velocidad máxima y el esfuerzo cortante  $x$ .

La relación con  $x$  puede hacerse a través de la fórmula de Chezy como sigue:

$$\tau = \rho g R s \quad (6.12)$$

$$V = C (R s)^{1/2} \quad (6.13)$$

$$Q = \frac{V}{a} \quad (6.14)$$

El esfuerzo cortante  $x$  debe analizarse considerando ciertos valores específicos como son:



$\tau_c$  : Esfuerzo cortante crítico, valor para el cual el material del canal representado por el empieza a moverse.

$\tau_s$  : Esfuerzo cortante de estabilidad, puede interpretarse como el valor para el cual no hay problemas de movimiento o aquel para el cual el material que entra por la sección considerada es igual al que sale de ella.

Cerca de la entrada el movimiento de arena en el fondo y en suspensión es complicado debido al doble efecto de las corrientes de marea y efecto oscilatorio producido por el oleaje; además para cada tamaño de entrada habrá un cierto tipo de oleaje, con altura y duración determinados, que pueden cerrar la boca no obstante el efecto de las corrientes de marea. Hechas las observaciones anteriores, Bruun propone los siguientes valores del esfuerzo cortante de estabilidad dados en la Tabla No. 6.1:

CONDICION	$\tau_s$ (Kg/m <sup>2</sup> )
- Transporte litoral del fondo y en suspensión considerables.	0.50
- Transporte litoral del fondo y en suspensión medios.	0.45
- Transporte litoral del fondo y en suspensión bajos.	0.35

Tabla No. 6.1 Valores del esfuerzo cortante de estabilidad.

A partir de lo anterior, la expresión correspondiente para el área de estabilidad es:

$$a_s = \frac{Q_m}{c \left( \frac{\tau_s}{\rho g} \right)^{1/2}} \quad (6.15)$$



Donde:

$C$  : Coeficiente de Chezy, en ( $m^{\frac{1}{2}}/seg$ ), el cual se calcula como sigue:

$$C = 30 + 5 \log a$$

$Q_m$  : Gastos máximos en mareas vivas.

#### VI.4 Forma de paso del material

En la naturaleza se observan dos formas típicas de paso de material de un lado a otro de la boca.

La primera, frente al canal, se forma una barra convexa hacia el mar que sirve de puente por donde circula el arrastre de fondo. Esta condición no es muy favorable cuando se pretende utilizar el acceso para entrada de embarcaciones.

La segunda, es utilizar las corrientes de marea como medio de transporte; el material es arrastrado hacia el canal por las corrientes de flujo y regresando al mar del otro lado de la boca con las de reflujó, esta condición es en extremo favorable siempre y cuando las características del canal sean tales que no se produzcan depósitos en su extremo interior. La forma de paso del material está determinado, según Bruun, por la relación del gasto máximo y el acarreo litoral neto como sigue:

$$\frac{M}{Q} > 200 \text{ a } 300 \text{ Paso del material playero por barra}$$

$$\frac{M}{Q} > 10 \text{ a } 20 \text{ Paso por corriente de marea}$$



Normalmente pueden presentarse formas de paso combinadas, ya que el intervalo entre 20 y 200 es demasiado grande. En general, mientras más regular sea el transporte por una acción moderada o fuerte del oleaje en las playas inmediatas a la boca existirán mejores condiciones para el paso del material.

### **VI.5 Grado de estabilidad**

La relación que da el mejor índice es la establecida entre el prisma de marea y el acarreo litoral neto.

Si  $\frac{Q}{M} < 100$ , existirá una gran tendencia a la formación de bajos y la capacidad de autodragado de las corrientes de marea será muy bajo, de hecho esta situación generará una tendencia a la divagación e inclusive bifurcación del canal, disminuyendo en consecuencia la eficiencia hidráulica de la sección.

Cuando la relación  $\frac{Q}{M} > 150$  a 200, el grado de estabilidad es aceptable, siendo óptimo cuando el valor es superior a 300. El cociente  $\frac{Q}{M}$  proporciona un criterio para la selección del esfuerzo cortante de estabilidad  $T_B$ ; este criterio se muestra en la Tabla No. 6.2.

	$\frac{Q}{M} \geq 600$	$150 < \frac{Q}{M} < 600$	$\frac{Q}{M} \leq 150$
$\tau_s$ (Kg/m <sup>2</sup> )	0.46	0.50	0.51

Tabla No. 6.2 Criterio para la selección del esfuerzo cortante de estabilidad

Este criterio hace ver que para valores muy cercanos o inferiores a una estabilidad aceptable puede tratarse de subsanar esta deficiencia con un incremento en la velocidad y por tanto en el esfuerzo cortante de estabilidad, buscando en esta



forma la eficiencia hidráulica de la sección, hecho que podrá llevar un incremento en el valor del prisma de marea y en consecuencia en el grado de estabilidad de la sección.



---

---

## **Conclusiones**

Cada etapa del desarrollo humano ha requerido de nuevos retos, constancia y dedicación a la construcción de la infraestructura necesaria para el mejoramiento su entorno social, ya que los diversos factores que van ligados a ello han provocado invertir demasiado esfuerzo para lograr el objetivo deseado así como el desarrollo de la tecnología, economía e innovación.

Este trabajo tiene como propósito aportar una base escrita sobre la Ingeniería de Ríos y Costas, ya que en México no existen muchas referencias bibliográficas sobre el tema de estudio.

Además, servirá como un apoyo bibliográfico para el estudiante que está cursando la asignatura de Ríos y Costas en la Carrera de Ingeniería Civil.

Es de suma importancia hacer notar que este trabajo tiene un propósito de carácter informativo, es decir, que solo hace muestra las diferentes metodologías para calcular algunos fenómenos que ocurren tanto en las zonas costeras como en las fluviales y que para analizar o diseñar infraestructura especializada se deberá recurrir a aspectos particulares de la zona de obra.

Las metodologías aquí presentadas para realizar estudios específicos tienen la fácil aplicación en problemas de Ingeniería Costera y que para la correcta aplicación de la metodología se debe de contar con la información correcta, además se pueden considerar como una herramienta útil para la solución de dichos problemas.

Finalmente, el presente trabajo está expuesto con un método sistemático, por lo que puede manejarlo como una herramienta más para su ampliar conocimiento.



Pero eso no significa que pueda ser mejorado e incluso ampliado, ya que ningún trabajo ni temática está concluida, pues no existen las verdades absolutas.



---

---

## Bibliografía

- FRÍAS VALDÉZ, A.; MORENO CERVANTES, G.  
**Ingeniería de Costas**  
Limusa; 2ª edición; México, 1988; 339 p.
- MARTÍN VIDE, J.P.  
**Ingeniería de Ríos**  
Alfaomega; 1ª edición; México, 2008; 331 p.
- AGUILAR ALCERRECA, J.; BOYER OROZCO, J.; SEMPERE RAMÍREZ, R.  
**Ingeniería de Ríos y Costas**  
Arte y Fotografía S.A.; 1ª edición; México, 1977; 505 p.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
**Manual de Diseño de Obras Civiles: Sección Hidrotecnia, Vol. Hidráulica Marítima**  
CFE; México, 1983.
- MONTOYA, R.J.M.  
**Efectos del esfuerzo radial en la generación de corrientes litorales**  
Tesis: Maestría en Ciencias con Especialidad en Hidráulica, IPN; México, 1996.
- MADRID, M. de O.R.  
**Diseño de rompeolas de piedra**  
*Texto para el Curso Internacional de Capacitación en Hidráulica Portuaria*  
Dirección General de Obras Marítimas y Agencia de Cooperación Internacional del Japón; México, 1988.
- MONTOYA, R.J.M.  
**Movimiento de arena**  
*Texto para el Curso Internacional de Capacitación en Hidráulica Portuaria*  
Dirección General de Obras Marítimas y Agencia de Cooperación Internacional del Japón; México, 1988.



- SANTO, S.  
**Características generales de las ondas progresivas regulares**  
*Texto para el Proyecto del Centro Hidráulico Portuario de México: Vol. 1*  
Dirección General de Obras Marítimas y Agencia de Cooperación  
Internacional del Japón; México, 1985.
  
- US ARMY CORP OF ENGINEERS; COASTAL ENGINEERING RESEARCH  
CENTER  
**Shore Protection Manual, Vols. 1 Y 2**  
US Government Printing Office; 4ª edición; EUA, 1984.
  
- HORIKAWA, K.  
**Coastal Engineering: An introduction to ocean engineering**  
University of Tokyo Press; 1ª edición; Japón, 1978, 401 p.