

63
291



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ALGORITMOS DE CALCULO APLICADOS A LA
INGENIERIA MARITIMA

T E S I S

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



CD. UNIVERSITARIA

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-141/92

Señor:
LOPEZ REYES JOSE MANUEL.
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Antonio Moreno Gómez, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

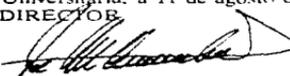
"ALGORITMOS DE CALCULO APLICADOS A LA INGENIERIA MARITIMA"

- I.- INTRODUCCION
- II.- CARACTERISTICAS Y FENOMENOS DEL OLEAJE
- III.- VIENTOS Y CORRIENTES LITORALES
- IV.- REGIMENES LITORALES
- V.- DISEÑO DE ROMPEOLAS Y ESPIGONES
- VI.- ESTABILIDAD DE ACCESOS COSTEROS
- VII.- CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 11 de agosto de 1992.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

cc. JMCS/RCR-rmta

DEDICATORIAS

**A LA MEMORIA DE MI PADRE:
ENRIQUE LOPEZ GALICIA.**

**A MI MADRE: QUE CON GRAN
SACRIFICIO, ME AYUDO Y
APOYO EN MOMENTOS
CRITICOS, PARA ELLE CON
MUCHO AMOR.**

**A MIS HERMANOS: FRANCISCO,
ROSA, ENRIQUE, ANA Y ELIA
POR SU CARINO, APOYO Y
COMPRESION.**

A MI NOVIA: SILVIA, POR SUS
CONSEJOS Y COMPRENSION.

AL ING. ANTONIO MORENO GOMEZ
POR EL APOYO BRINDADO PARA LA
DIRECCION DE ESTE TRABAJO.

AL ING. MIGUEL MONTOYA RODRIGUEZ POR
SU APOYO INCONDICIONAL Y VALIOSAS
SUGERENCIAS PARA LA REALIZACION DE
ESTE TRABAJO.

A LOS INGENIEROS DEL
LABORATORIO DE HIDRAULICA
MARITIMA DE LA S.C.T. POR
EL APOYO BRINDADO.

INDICE

CAPITULO I.-	INTRODUCCION	6
CAPITULO II.-	CARACTERISTICAS Y FENOMENOS DEL OLEAJE	9
II.1	LONGITUD DEL OLEAJE	10
II.2	PERFIL DE LA SUPERFICIE LIBRE Y COMPONENTES DE LA VELOCIDAD DE LAS PARTICULAS DEL AGUA AL PASO DE UNA ONDA PROGRESIVA	20
II.3	PREDICCION DEL OLEAJE	29
II.4	REFRACCION DE OLEAJE	36
CAPITULO III.-	VIENTOS Y CORRIENTES LITORALES	44
III.1	DIAGRAMAS DE LENZ	45
III.2	FORMULAS PARA EVALUAR LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE LITORAL	51
CAPITULO IV.-	REGIMENES LITORALES	62
IV.1	CALCULO DE LA CANTIDAD DEL TRANSPORTE LITORAL A LO LARGO DE LA COSTA	63
IV.2	EVOLUCION DE LA LINEA DE PLAYA UTILIZANDO LA TEORIA DE UNA LINEA	75
CAPITULO V.-	DISEÑO DE ROMPEOLAS Y ESPIGONES	87
V.1	DISEÑO DE ESTRUCTURAS FORMADAS CON ELEMENTOS SUELTOS	88
CAPITULO VI.-	ESTABILIDAD DE ACCESOS COSTEROS	103
VI.1	ESTABILIDAD DE ACCESOS COSTEROS	104
CAPITULO VII.-	CONCLUSIONES	115
REFERENCIAS		118

CAPITULO I

INTRODUCCION

I. INTRODUCCION.

La Ingeniería de Costas de ha desarrollado desde las pasadas décadas y se ha transformado en una moderna ciencia fundamentada en el conocimiento de la Oceanografía Física, Hidráulica Marítima, Hidráulica Fluviomarítima y Geotécnica, ésto basado en la comunicación entre Oceanógrafos e Ingenieros Civiles. La continuación de estos esfuerzos interdisciplinarios, es indispensable en los futuros desarrollos de la Ingeniería de Costas.

El uso de modelos matemáticos o más específicamente de modelos numéricos, fué introducido dentro de la Oceanografía Física y específicamente dentro de la Ingeniería Hidráulica en los 70^{os}.

La modelación en hidráulica marítima cuyo objetivo es representar o describir una estructura o fenómeno hidráulico inducido por los oleajes, las corrientes, las mareas entre otros fenómenos físicos de la naturaleza (comúnmente llamado prototipo), se realiza con modelos físicos y/o modelos matemáticos. Los modelos físicos también llamados modelos hidráulicos son representaciones a escala de los materiales y fenómenos físicos del prototipo, debiéndose cumplir la similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo. En los modelos matemáticos se usan relaciones matemáticas para representar el prototipo. Las ecuaciones matemáticas deben describir lo más real del fenómeno hidráulico y los resultados deberán tener una interpretación muy lógica. Si la solución de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno se obtiene mediante un análisis matemático, el modelo se llama analítico. Si se usan valores numéricos discretos para representar a las variables involucradas, usándose operaciones aritméticas se llama numérico.

En el Cuadro 1.1 se presenta la comparación de las fases para el desarrollo de un modelo físico y un modelo matemático.

Con el desarrollo de calculadoras de bolsillo y computadoras personales se ha generalizado, dentro de la Ingeniería Civil en nuestro país, específicamente en la Ingeniería de Costas y Puertos, la utilización de algoritmos numéricos para el estudio de fenómenos marítimos.

El objetivo de este trabajo es presentar algoritmos numéricos para el estudio de fenómenos del oleaje, corrientes litorales, vientos, diseño de obras exteriores portuarias y estabilidad de accesos costeros.

P A S O	MODELO FISICO	MODELO MATEMATICO
	1	DEFINICION DEL PROBLEMA
	IDENTIFICACION DE LAS PRINCIPALES FUERZAS QUE INTERVIENEN (FASE CONCEPTUAL)	
2	Formulación de los requerimientos de similitud	Formulación de las ecuaciones que representan el fenómeno
3	FORMULACION DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA	
4	Construcción física del modelo	Desarrollo del esquema de solución numérica
5	CALIBRACION DEL MODELO	
	Variación de la rugosidad y comparación con mediciones de campo	Variación de coeficientes y comparación con mediciones de campo
6	Mediciones - Solución	Cálculo - Solución
7	OPTIMIZACION DE LA SOLUCION DE ACUERDO AL PROBLEMA	
	Efectos de escala y de medición	Errores de redondeo y de truncamiento
8	TRANSFERENCIA DE LOS RESULTADOS DEL MODELO AL PROTOTIPO Y COMPARACION CON MEDICIONES DE CAMPO	

Cuadro 1.1 Comparación entre las fases requeridas para el desarrollo de un modelo físico y un modelo numérico.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS Y FENOMENOS DEL OLEAJE

II.1. LONGITUD DEL OLAJE

II.1.1 Introducción a los algoritmos 1 y 2

Considérese un oleaje progresivo propagándose en una profundidad uniforme, h , como el mostrado en la Fig. No. 2.1, en donde el eje, x , se toma en la dirección de propagación y el eje, y , verticalmente hacia arriba, [5]*.

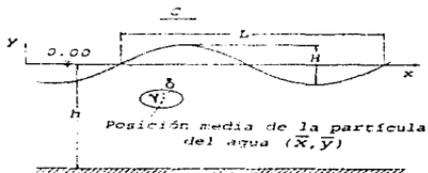


Fig. No. 2.1 Propagación de un oleaje progresivo

Supongase 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, ϕ , definiéndose las componentes u y v en las direcciones x , y y respectivamente como sigue.

* De aquí en adelante, el número encerrado entre corchetes indicará la referencia utilizada.

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

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

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

Combinando las ecs. (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 ζ es la elevación de la superficie del agua medida por arriba del nivel de aguas tranquilas.

II.1.2. Condiciones de frontera

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

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

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, ρ 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 $DF/Dt = 0$.

Donde $DF/Dt = \partial/\partial t + u \partial/\partial x + v \partial/\partial y + w \partial/\partial z$ 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).

II.1.3 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 $(\partial\phi/\partial t)_{y=0}$ y $(\partial\phi/\partial y)_{y=0}$ en serie de Taylor, los cuales se encuentran dados en las ecs. (2.6) y (2.9) resulta:

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

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

Despreciando los términos superior de orden cero, considerando que la presión p_0 en la superficie libre es la presión atmosférica, y refiriendo las presiones respecto a la atmosférica, es posible tomar p_0 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 ζ 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 $H/2$
- k : Es el número de onda, igual a $2\pi/L$
- σ : Es la frecuencia angular del oleaje, igual a $2\pi/T$, e igual a $2\pi f$
- f : Es la frecuencia del oleaje, igual a $1/T$
- H : Es la altura del oleaje
- L : Es la longitud del oleaje

C : Es la celeridad del oleaje, igual a σ/k , e igual a 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.

$$f = A e^{ky} + B e^{-ky} \quad (2.18)$$

Donde A y B son constantes, obteniéndose.

$$\phi = (A e^{ky} + B e^{-ky}) \operatorname{sen}(kx - \sigma t) \quad (2.19)$$

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

$$A e^{-kb} - B e^{kb} = 0 \quad (2.20)$$

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

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

$$\begin{vmatrix} e^{-kb} & e^{-kb} \\ \sigma^2 - gk & \sigma^2 + gk \end{vmatrix} = 0 \quad (2.22)$$

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 $C = \sigma/k$, 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 $C = L/T$ 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 :

$$\begin{aligned}D &= \sigma^2 h/g = 2\pi h/L_0 \\L_0 &= 2\pi g/\sigma^2 = gT^2/2\pi \\x &= kh = 2\pi h/L_0\end{aligned}\tag{2.28}$$

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:

$$y(x) = X - D \coth x = 0\tag{2.29}$$

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:

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

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

$$x_{i+1} = x_i - \frac{y(x_i)}{y'(x_i)}\tag{2.31}$$

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

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

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

$$x_1 = D \quad ; \text{ cuando } D \geq 1 \quad (2.33)$$

$$x_1 = D^{1/3} \quad ; \text{ cuando } D < 1$$

El error en la ec. (2.32) rápidamente decrece con el incremento en el número de iteraciones, observándose que el error absoluto $|1 - x_1 / x_1|$ es menor que 0.05% para la tercera iteración (para x_1).

En la Fig. No. 2.2 se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, en el cual se utiliza el algoritmo presentado con anterioridad, y que sirve para el cálculo de la longitud y celeridad del oleaje mediante el método descrito anteriormente.

```

05 'CALCULO DE LA LONGITUD Y CELERIDAD DEL OLEAJE
10 INPUT "DAME EL VALOR DE LA PROFUNDIDAD="; d
20 INPUT "DAME EL VALOR DEL PERIODO="; T
30 PI2 = 2 * 3.141592654
40 DD = PI2 * d / (9.8 * T ^ 2 / PI2)
50 IF ((DD - 10) <= 0) GOTO 70
60 XX = DD: GOTO 150
70 IF ((DD - 1) >= 0) GOTO 90
80 X = SQR(DD): GOTO 100
90 X = DD
100 COTHX = ((EXP(2 * X)) + 1) / ((EXP(2 * X)) - 1)
110 XX = X - (X - DD * COTHX) / (1 + DD * (COTHX ^ 2 - 1))
120 E = 1 - ((XX) / X)
130 X = XX
140 IF ((ABS(E) - .0005) >= 0) GOTO 100
150 A = XX
160 L = PI2 * d / A
170 C = L / T
180 PRINT "EL VALOR DE LA LONGITUD DEL OLEAJE = "; L
190 PRINT "EL VALOR DE LA CELERIDAD DEL OLEAJE ="; C
200 END

```

Fig. No. 2.2 Programa en Lenguaje BASIC para el cálculo de la longitud y celeridad del oleaje.

II.1.4 Comentarios del programa:

A continuación se describen las diferentes variables utilizadas en el programa de cómputo.

- d = Profundidad del mar, en m.
- T = Período del oleaje, en seg.
- L = Longitud del oleaje, en m.

II.1.5 Ejemplo de aplicación:

Un oleaje se propaga de aguas profundas hacia la costa, con período $T=8$ seg.

- a) Calcular con el programa desarrollado, la longitud del oleaje en la profundidad $d=50$ m.
- b) Calcular con el programa desarrollado, la longitud del oleaje en las profundidades $d=25$ m. y $d=5$ m.

SOLUCION :

- a) La longitud del oleaje en $d=50$ m. es:

$$L = 99.46 \text{ m.}$$

- b) Las longitudes del oleaje en las profundidades $d=25$ m. y $d=5$ m. son:

$$L = 93.19 \text{ m. ; para } d = 25 \text{ m.}$$

$$L = 53.05 \text{ m. ; para } d = 5 \text{ m.}$$

II.2 PERFIL DE LA SUPERFICIE LIBRE Y COMPONENTES DE LA VELOCIDAD DE LAS PARTICULAS DEL AGUA AL PASO DE UNA ONDA PROGRESIVA.

II.2.1 Algoritmo 2

Perfil de la superficie libre.

La ecuación que describe el desplazamiento vertical ζ , 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, [2]:

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

Donde:

- $H/2$: Es la amplitud de la ola
- H : Es la altura de la ola
- k : Es el número de la onda e igual a $2\pi/L$
- ω : Es la frecuencia angular de la onda e igual a $2\pi/T$
- L : Longitud de la onda
- T : Período 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 $2\pi t/T$ es sustituido por un signo positivo.

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

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

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

Donde:

- 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 θ valga $(2\pi x/L - 2\pi t/T)$, las ecuaciones anteriores se expresan como sigue:

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

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

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.

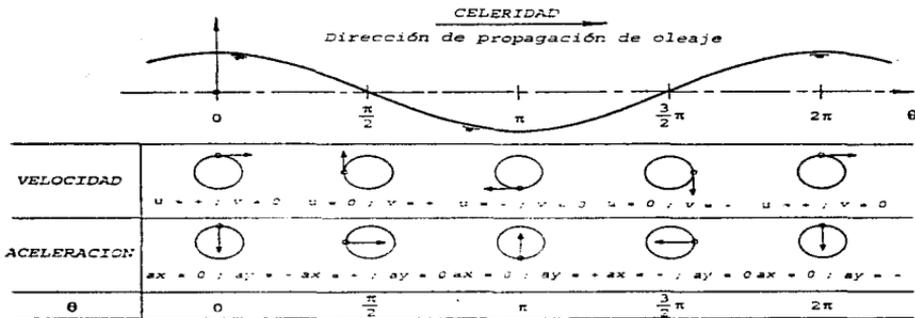


Fig. No. 2.4 Esquema de velocidad y aceleración de las partículas del agua.

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:

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

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

En la Fig. No. 2.4 se muestran valores de las aceleraciones de las partículas para diferentes valores de θ .

En la Fig. No. 2.5 se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el cálculo del perfil de la superficie libre y las componentes de la velocidad de las partículas del agua al paso de una onda progresiva.

```

05 'PROGRAMA PARA EL CALCULO DEL PERFIL Y VEL. DE LAS PARTICULAS
10 DIM SHARED PER(10, 10)
15 OPEN "O", #2, "VELOCS.DAT"
20 OPEN "O", #1, "PERFIL.DAT"
25 xxx = 0: ttt = 0
30 INPUT "DAME EL VALOR DE LA PROFUNDIDAD="; d
35 INPUT "DAME EL VALOR DEL PERIODO="; T
40 INPUT "DAME LA ALTURA DE OLA="; Ho
50 PI2 = 2 * 3.141592654#
60 DD = PI2 * d / (9.8 * T ^ 2 / PI2)
70 IF ((DD - 10) <= 0) GOTO 90
80 xx = DD: GOTO 170
90 IF ((DD - 1) >= 0) GOTO 110
100 x = SQR(DD): GOTO 120
110 x = DD
120 COTHX = ((EXP(2 * x)) + 1) / ((EXP(2 * x)) - 1)
130 xx = x - (x - DD * COTHX) / (1 + DD * (COTHX ^ 2 - 1))
140 E = 1 - ((xx) / x)
150 x = xx
160 IF ((ABS(E) - .0005) >= 0) GOTO 120
170 A = xx
180 L = PI2 * d / A
190 PRINT "EL VALOR DE LA LONGITUD DEL OLAJE = "; L
200 J = (d / L)
210 IF (J < (1 / 25)) GOTO 240
220 IF (J > (1 / 25)) AND (J < (1 / 2)) GOTO 410
230 IF (J > (1 / 2)) GOTO 580
240 INPUT "DAME EL VALOR DEL COEF. DE PROPAGACION Ks="; Ks
245 INPUT "DAME EL VALOR DEL COEF. DE REFRACCION Kr="; Kr
250 H = Ks * Kr * Ho
260 FOR tt = 0 TO T STEP (.25 * T)
270 FOR x = 0 TO L STEP (.25 * L)
280 n = (H / 2) * COS(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))
290 FOR Y = 0 TO -d STEP (-.25 * d)
300 U = (H / 2) * SQR(9.81 / d) * COS(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))
310 V = (PI2 / 2) * (H / T) * (1 + (Y / d)) *
    SIN(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))
320 GOSUB 1000
330 NEXT Y
340 PER(XXX, ttt) = n
350 XXX = XXX + 1
360 NEXT x
370 xxx = 0
380 ttt = ttt + 1

```

```

390 NEXT tt
400 GOTO 720
410 INPUT "DAME EL VALOR DEL COEF. DE PROPAGACION Ks="; Ks
415 INPUT "DAME EL VALOR DEL COEF. DE REFRACCION Kr="; Kr
420 H = Ks * Kr * Ho
430 FOR tt = 0 TO T STEP (.25 * T)
440 FOR x = 0 TO L STEP (.25 * L)
450 n = (H / 2) * COS(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))
460 FOR Y = 0 TO -d STEP (-.25 * d)
470 U = (H / 2) * ((9.81 * T) / L) * (((EXP(2 *
  (PI2 * ((Y + d) / L)) + 1) / (2 * EXP(PI2
  * ((Y + d) / L)))) / ((EXP(2 * ((PI2 * d)
  / L)) - 1) / (2 * EXP((PI2 * d) / L)))) *
  COS(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))
480 V = (H / 2) * ((9.81 * T) / L) * (((EXP(2 *
  (PI2 * ((Y + d) / L)) - 1) / (2 * EXP(PI2
  * ((Y + d) / L)))) / ((EXP(2 * ((PI2 * d)
  / L)) + 1) / (2 * EXP((PI2 * d) / L)))) *
  SIN(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))

490 GOSUB 1000
500 NEXT Y
510 PER(XXX, ttt) = n
520 XXX = XXX + 1
530 NEXT x
540 XXX = 0
550 ttt = ttt + 1
560 NEXT tt
570 GOTO 720
580 H = Ho
590 FOR tt = 0 TO T STEP (.25 * T)
595 FOR x = 0 TO L STEP (.25 * L)
600 n = (H / 2) * COS(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))
610 FOR Y = 0 TO -d STEP (-.25 * d)
620 U = (PI2 / 2) * (H / T) * EXP(PI2 * Y / L) *
  COS(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))
630 V = (PI2 / 2) * (H / T) * EXP(PI2 * Y / L) *
  SIN(PI2 * ((x / L) - (tt / T)))
640 GOSUB 1000
650 NEXT Y
660 PER(XXX, ttt) = n
670 XXX = XXX + 1
680 NEXT x
690 XXX = 0
700 ttt = ttt + 1
710 NEXT tt
720 CLOSE #2
730 PRINT #1, " x", " T=0"; " T/4"; " T/2"; " 3T/4";
740 " T"
750 PRINT #1, " "
760 FOR x = 0 TO 4
770 PRINT #1, x / 4; "L",
780 FOR tt = 0 TO 4

```

```

790 PRINT #1, USING "###.##"; PER(x, tt);
800 NEXT tt
810 PRINT #1, " "
820 NEXT x
830 CLOSE #1
840 END
850
*****
1000 IF (Y <> 0) GOTO 1200
1010 PRINT #2, " ": PRINT #2, " "
1020 PRINT #2, " " Y"; " X="; x; " TT = "; tt
1030 PRINT #2, " "
1200 PRINT #2, USING "#####.##"; Y; U; V
1210 RETURN

```

Fig. No. 2.5 Programa en Lenguaje BASIC para el cálculo del perfil de la superficie libre y componentes de la velocidad de las partículas del agua.

II.2.3 Comentarios:

Los resultados del programa desarrollado se encuentran almacenados en los archivos de datos PERFIL.DAT y VELOCS.DAT; que corresponden, a los valores del perfil de la superficie libre y al valor de las velocidades de la partícula del agua al paso de una onda, respectivamente.

Los cálculos en el programa para el perfil y las velocidades se tomaron para los puntos críticos, por lo tanto, si se requieren conocer mas puntos tendrían que cambiarse los incrementos en el programa.

II.2.4 Ejemplo de aplicación:

Utilizando el programa desarrollado obtener:

- a) Perfil de la superficie libre.
- b) Componentes de la velocidad de las partículas del agua al paso de una onda progresiva.

Se cuenta con los siguientes datos:

Periodo de oleaje $T=10$ seg.
 Altura de ola $H=3.0$ m.
 Profundidad $d=30.0$ m.

SOLUCION:

a) En la Tabla No. 2.1 se indica el perfil de la superficie libre del agua para la distancia x en el tiempo t .

Donde:

x : Distancia horizontal en m. Se tomarán valores múltiplos de $L/4$.
 t : Tiempo en seg. Se tomarán valores múltiplos de $T/4$.

x (m.)	t (seg.)				
	0	$T/4$	$T/2$	$3/4 T$	T
0	1.31	0.0	-1.31	0.0	1.31
$L/4$	0.0	1.31	0.0	-1.31	0.0
$L/2$	-1.31	0.0	1.31	0.0	-1.31
$3/4 L$	0.0	-1.31	0.0	1.31	0.0
L	1.31	0.0	-1.31	0.0	1.31

Tabla No. 2.1

En la Fig. No. 2.6 se muestra la representación gráfica de la superficie libre del oleaje.

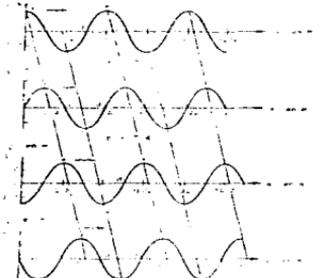


Fig. No. 2.6 Superficie libre del agua.

- b) En la Tabla No. 2.2 se indican las velocidades orbitales de las partículas del agua para diferentes profundidades de y en las condiciones de x y t .

Y	x=0, t=0		x=L/4, t=0		x=L/2, t=0		x=3/4 L, t=0		x=L, t=0	
	U	V	U	V	U	V	U	V	U	V
0.0	0.93	0.0	0.0	0.82	-0.93	0.0	0.0	-0.82	0.93	0.0
-7.5	0.70	0.0	0.0	0.54	-0.70	0.0	0.0	-0.54	0.70	0.0
-15.0	0.55	0.0	0.0	0.33	-0.55	0.0	0.0	-0.33	0.55	0.0
-22.5	0.47	0.0	0.0	0.16	-0.47	0.0	0.0	-0.16	0.47	0.0
-30.0	0.44	0.0	0.0	0.0	-0.44	0.0	0.0	0.0	0.44	0.0

Tabla No. 2.2 Velocidades orbitales de las partículas del agua al paso de una onda progresiva.

II.3 PREDICCIÓN DEL OLEAJE

II.3.1 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, [3].

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 geostrofica (mas 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 una 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 periodos. 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. 2.7.

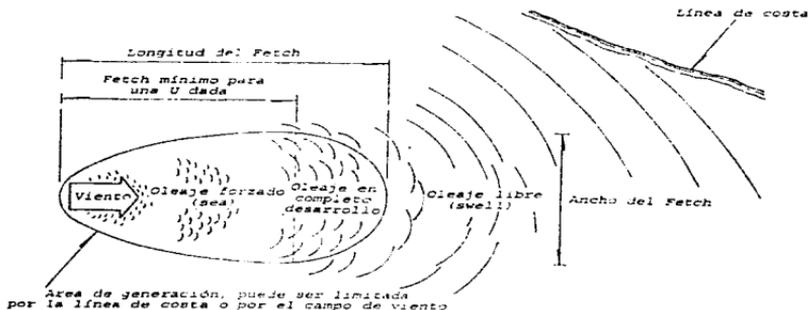


Fig. No. 2.7 Variación del oleaje dentro y fuera de la zona de generación.

II.3.2 Predicción del oleaje en la zona de generación.

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 periodo $T_{1/3}$ 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 periodo.

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 ajustados a las ecu. (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:

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

$$\frac{g(T_{1/3})_G}{U^2} = 12.3174 \tanh \left[0.0004345 \left(\frac{gt}{U} \right)^{0.22} \right] \quad (2.45)$$

b) Para el período significativo:

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

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

Empleando las ecs. (2.44) y (2.45) se calcula $g(H_{1/3})_C/U^2$, el valor que resulte menor de estas ecuaciones, va a ser, el que predomine para poder calcular el periodo significante $(T_{1/3})_C$, para ello a la ec. (2.44) le corresponderá la ec. (2.46) y a la ec. (2.45) la ec. (2.47).

En la Fig. No. 2.8 se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el cálculo de la predicción del oleaje en la zona de generación.

```

05 "METODO DE SVERDRUP-MUNK-BRETCHSNEIDER"
10 INPUT "DAME EN GRADOS LAT. An="; Am
10 INPUT "DAME LONG. FETCH (Km)="; LF
30 INPUT "DURACION (Hrs.)="; T
40 INPUT "POSICION CICLON (Lat)="; Pc
50 INPUT "ESP. ENTRE ISOBARAS (MLIBARES)="; E
60 An = Am * 3.141592/180 ; O = Pc * 3.141592/180
70 Po = (25.25 + .085 * (O)) * (25.4 / .75)
80 M = 7.2722E-05
90 AU = An * 111.111 * 1000
100 Ap = E * .75 * 13600 / 1000
110 f = 2 * M * SIN(O)
120 Vg = (1 / (.1228 * f)) * (Ap / AU)
130 U = .515 * .64 * Vg
140 ALFA = (9.8 * 1000 * LF) / (U ^ 2)
150 BETA = (9.8 * T * 3600) / U
160 PRINT "PRESION CENTRO CICLON="; Po
170 PRINT "VEL. VIENTO GEOSTROFICO="; Vg
180 PRINT "VEL. VIENTO FORMATIVO="; U
190 BU = .01 * (ALFA ^ (.49))
200 BD = (EXP(2 * BU) - 1) / (2 * EXP(BU))
210 BT = (EXP(2 * BU) + 1) / (2 * EXP(BU))
220 VU = .2525 * (BD / BT)
230 HG1 = VU * (U ^ 2) / 9.8
240 PRINT "ALT. OLA SIGNIFICANTE No.1="; HG1
250 VD = (ALFA ^ (.28)) * .358
260 TG1 = VD * U / 9.8
270 PRINT "PERIDO SIGNIFICANTE No.1="; TG1
280 CU = .004345 * (BETA ^ (.33))
290 CD = (EXP(2 * CU) - 1) / (2 * EXP(CU))
300 CT = (EXP(2 * CU) + 1) / (2 * EXP(CU))
310 VT = 12.3174 * (CD / CT)
320 HG2 = VT * (U ^ 2) / 9.8
330 DU = .015 * (BETA ^ (.2))
340 DD = (EXP(2 * DU) - 1) / (2 * EXP(DU))
350 DT = (EXP(2 * DU) + 1) / (2 * EXP(DU))
360 VC = 50.721 * (DD / DT)
370 PRINT "ALT. OLA SIGNIFICANTE No.2="; HG2
380 TG2 = VC * U / 9.8

```

```

390 PRINT "PERIODO SIGNIFICANTE No.2="; TG2
400 IF (HG1 <= HG2) GOTO 440
410 PRINT "ALT. OLA SIGNIFICANTE EN AGUAS PROFUNDAS="; HG2
420 PRINT "PERIODO SIGNIFICANTE EN AGUAS PROFUNDAS="; TG2
430 GOTO 460
440 PRINT "ALT. OLA SIGNIFICANTE EN AGUAS PROFUNDAS="; HG1
450 PRINT "PERIODO SIGNIFICANTE EN AGUAS PROFUNDAS="; TG1
460 END

```

Fig. No. 2.8 Programa en Lenguaje BASIC para el cálculo de la predicción del oleaje.

II.3.3 Comentarios:

Las variables HG1, TG1, HG2 y TG2 en el programa desarrollado, muestran los valores de la altura y período de la ola obtenidos en la zona de generación, a partir de la longitud del Fetch y la velocidad del viento formativo, de los cuales se selecciona el de menor valor de altura de ola, siendo este el representativo de las características del oleaje significativo en la zona de generación.

II.3.4 Ejemplo de aplicación:

Dado el ciclón Carla que se desplazó en el golfo de México el día 8 de Septiembre, obtener mediante el programa desarrollado para las observaciones de las 6:00 y 12:00 hrs.:

Presión al centro del ciclón.
 Velocidad del viento geostrofico (Vg).
 Velocidad del viento formativo (U).
 Altura de ola significativa ($H_{1/3}$) en la zona de generación.
 Período significativo ($T_{1/3}$) en la zona de generación.

La Fig. No. 2.9, muestra las isóbaras para el ciclón Carla a las 6:00 y 12:00 hrs. del día 8 de septiembre de 1961.

En la Tabla No. 2.3 se indican las características para las posiciones del ciclón Carla a las 6:00 y 12:00 hrs.

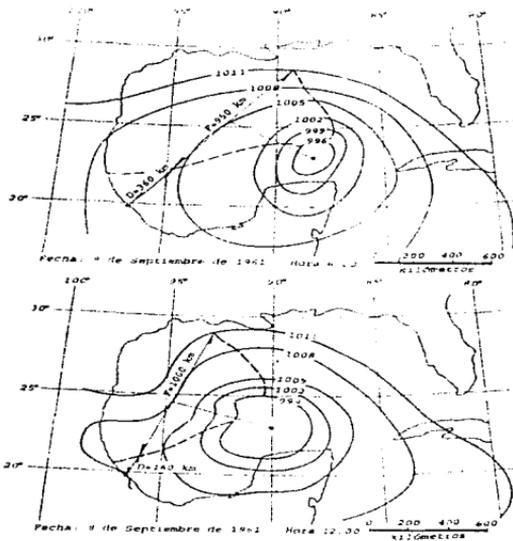


Fig. No. 2.9 Isobaras del ciclón Carla a las 6:00 y 12:00 hrs.

CICLON	Hr.	LONGITUD DEL FETCH (Km)	LONGITUD DE DECAIMIENTO (Km)	SEPARACION ENTRE ISOBARAS (gra.lat)	CENTRO DEL CICLON (gra.lat)	DURACION DEL VIENTO (hr)
CARLA	6	950	360	1.0	23.0	3
	12	1000	160	1.1	23.0	9

Tabla No. 2.3 Características del ciclón Carla.

SOLUCION:

La Tabla No. 2.4 muestra la presión al centro del ciclón (P_0), la velocidad del viento geostrofico (V_g) y la velocidad del viento formativo (U), para el ciclón Carla a las 6:00 y 12:00 hrs.

CICLON	HORA	P_0 (milibares)	V_g (m/s)	U (m/s)
CARLA	6:00	856.29	32.77	19.17
	12:00	856.29	36.05	21.09

Tabla No. 2.4

La Tabla No. 2.5 muestra los valores de la altura y período significantes del oleaje, calculados para la zona de generación a partir de:

- a) La longitud del Fetch y velocidad del viento formativo. (H_{G1} , T_{G1}).
- b) La duración del viento y velocidad del viento formativo. (H_{G2} , T_{G2}).

CICLON	HORA	H_{G1} (m)	T_{G1} (seg)	H_{G2} (m)	T_{G2} (seg)
CARLA	6:00	8.46	11.98	3.45	8.32
	12:00	10.00	12.67	5.81	11.17

Tabla No. 2.5

CONCLUSION:

De los valores presentados en la Tabla No. 2.5, se obtiene que la altura y período significantes del oleaje en la zona de generación corresponden a:

$$H_{1/3G} = 3.45 \quad ; \quad T_{1/3G} = 8.32$$
$$H_{1/3G} = 5.81 \quad ; \quad T_{1/3G} = 11.17$$

II.4 REFRACCION DE OLAJE

II.4.1 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 "REFRACCION DE OLAJE", [9].

Pensemos en el caso en que el oleaje incide con un ángulo β_1 a la línea límite entre aguas profundas (h_1) y aguas mas someras (h_2), como el mostrado en la Fig. 2.10. Es decir el ángulo incidente es β_1 .

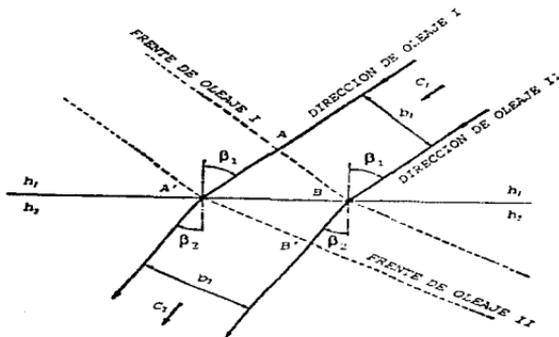


Fig. No. 2.10 Refracción del oleaje.

β_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 rebazado 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 está refractado por la línea límite entre h_1 y h_2 de profundidad. El ángulo de refracción β_2 está dado por la ley de Snell expresada como sigue:

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

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

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 2.10 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:

$$E = 1/8 \gamma H^2 \quad \text{y} \quad C_G = n C$$

$$1/8 \gamma H_0^2 b_0 C_0 n_0 = 1/8 \gamma H^2 b C n \quad (2.50)$$

Como:

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

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

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

Por lo tanto el cambio de altura es :

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

Donde:

K_p : Es el coeficiente de propagación

K_r : Es el coeficiente de refracción

$$K_p = \sqrt{\frac{1}{2n} \frac{C_0}{C}} = \sqrt{\frac{L_0}{2nL}} \quad (2.53)$$

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

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 , esta definido por la siguiente ecuación:

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

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. 2.11.

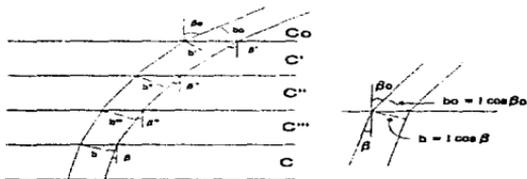


Fig. No 2.11 Refracción cuando las líneas batimétricas son rectas y paralelas.

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

$$\frac{\text{sen } \beta'}{\text{sen } \beta_0} \cdot \frac{\text{sen } \beta''}{\text{sen } \beta'} \cdot \frac{\text{sen } \beta'''}{\text{sen } \beta''} \cdot \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen } \beta'''} = \frac{C'}{C_0} \cdot \frac{C''}{C'} \cdot \frac{C'''}{C''} \cdot \frac{C}{C'''} \quad (2.56)$$

$$\therefore \frac{\text{sen } \beta}{\text{sen } \beta_0} = \frac{C}{C_0}$$

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

$$\begin{aligned}
K_r &= \left(\frac{b_0}{b}\right)^{1/2} = \left(\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta}\right)^{1/2} = \left(\frac{1 - \operatorname{sen}^2 \beta_0}{1 - \operatorname{sen}^2 \beta}\right)^{1/4} = \left(\frac{1 - \operatorname{sen}^2 \beta}{1 - \operatorname{sen}^2 \beta_0}\right)^{-1/4} \\
&= \left(\frac{1 - \operatorname{sen}^2 \beta_0 + \operatorname{sen} \beta_0 - \operatorname{sen}^2 \beta}{1 - \operatorname{sen}^2 \beta_0}\right)^{-1/4} \\
&= \left[1 + \frac{1}{1 - \operatorname{sen} \beta_0^2} (\operatorname{sen} \beta_0^2 - \operatorname{sen}^2 \beta)\right]^{-1/4} \\
&= \left[1 + \frac{\operatorname{sen}^2 \beta_0 - \operatorname{sen}^2 \beta}{\cos \beta_0^2}\right]^{-1/4} \\
&= \left[1 + \frac{\operatorname{sen}^2 \beta_0 - \operatorname{sen}^2 \beta}{\operatorname{sen}^2 \beta_0} \cdot \frac{\operatorname{sen}^2 \beta_0}{\cos^2 \beta_0}\right]^{-1/4} \\
&= \left[1 + \left\{1 - \frac{\operatorname{sen}^2 \beta}{\operatorname{sen}^2 \beta_0}\right\} \frac{\operatorname{sen}^2 \beta_0}{\cos^2 \beta_0}\right]^{-1/4} \\
&= \left[1 + \left\{1 - \left(\frac{C}{C_0}\right)^2\right\} \tan^2 \beta_0\right]^{-1/4}
\end{aligned}$$

Donde :

β_0 : Es el ángulo de la ola en aguas profundas

En la Fig. No. 2.12 se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el cálculo de refracción de oleaje con batimétricas rectas y paralelas.

```

10  'PROGRAMA QUE CALCULA LA REFRACCION"
20  INPUT "DAME LA PROFUNDIDAD="; d
30  INPUT "DAME EL PERIODO="; T
40  INPUT "DAME LA ALT. DE OLA EN A.P ="; Ho
50  INPUT "DAME EL ANG. EN A.P ="; Bo
60  BB = Bo * 3.141592 / 180
70  SIG = 2 * 3.141592 / T
80  A = d / 9.8 * SIG ^ 2
90  X = A*(A+1/(1+A*(.6522+A*(.4622+A*(.0864+A*.0675))))
100 XX = SQR(X)
110 L = 2 * 3.141592 * d / XX
120 Lo = 1.56 * T ^ 2
130 Co = Lo / T
140 C = L / T
150 B1 = (C / Co) * SIN(BB)
160 B = ATN(B1 / SQR(1 - (B1^2)))
170 ANG = B * 180 / 3.141592
180 PRINT "LONGITUD DE OLA ="; L
190 PRINT "CELERIDAD DE OLA ="; C
200 PRINT "ANGULO REFRACTADO ="; ANG
210 KR = (1 + (1 - ((C / Co) ^ 2)) * ((TAN(BB)) ^ 2)) ^ (-1 / 4)
220 PRINT "COEFICIENTE DE REFRACCION KR="; KR
230 K = (2 * 3.141592) / L
240 CN = .5 * (1 + ((2*K*d) / ((EXP(2*K*d) - EXP(-2*K*d)) / 2)))
250 PRINT "FACTOR DE GRUPO CN="; CN
260 KS = SQR((1 / (2 * CN)) * (Co / C))
270 PRINT "COEFICIENTE DE FONDO KS="; KS
280 H = Ho * KR * KS
290 Hb = .78 * d
300 IF (Hb <= H) GOTO 330
310 PRINT "ALTURA DE OLA EN LA ROMPIENTE Hb="; H
320 GOTO 340
330 PRINT "ALTURA DE OLA EN LA ROMPIENTE Hb="; Hb
340 END

```

Fig. No. 2.12 Programa en Lenguaje BASIC para el cálculo de refracción con batimétricas rectas y paralelas.

II.4.2 Comentarios:

Las unidades establecidas en el programa para las siguientes variables son:

d Profundidad (metros).
T Período (segundos).
Ho Altura de ola en aguas profundas (metros).
Bo Angulo de incidencia en aguas profundas (grados).

II.4.3 Ejemplo de aplicación:

En una profundidad $d=75.0$ m. Se ha medido un oleaje cuyas características son:

Altura de oleaje $H_0=3.45$ m.

Periodo $T=10$ seg.

Angulo $\beta_0=47^\circ$ medido entre la ortogonal y la perpendicular a las batimétricas.

El oleaje se propaga hacia la costa, sobre un fondo con pendiente uniforme de 0.02 con líneas batimétricas paralelas. Ver Fig. No. 2.13.

Calcular con el programa desarrollado la longitud y celeridad del oleaje, el coeficiente de refracción, el coeficiente de fondo, el factor de grupo, la altura de la ola y el ángulo del oleaje refractado, para diferentes profundidades partiendo de aguas profundas.

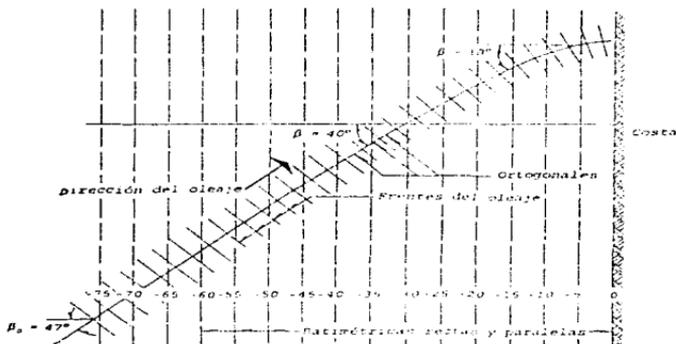


Fig. No. 2.13 Variación de los frentes de oleaje debido a la refracción, las batimétricas son rectas y paralelas.

SOLUCION :

En la Tabla No. 2.6 se resumen las características del oleaje para diferentes profundidades y en la Fig. No. 2.13 la variación de la dirección del oleaje, así como la trayectoria de un rayo u ortogonal.

d (m)	L (m)	C (m/s)	Kr	Ks	Cn	H (m)	β (grados)
75	154.30	15.43	0.994	0.9921	0.5136	3.40	47.0
70	153.84	15.38	0.992	0.9886	0.5188	3.38	46.2
65	153.24	15.32	0.990	0.9839	0.5258	3.36	45.9
60	152.43	15.24	0.987	0.9778	0.5352	3.33	45.6
55	151.35	15.13	0.984	0.9702	0.5475	3.29	45.2
50	149.90	14.99	0.979	0.9610	0.5634	3.25	44.7
45	147.94	14.79	0.973	0.9505	0.5836	3.19	43.9
40	145.28	14.53	0.965	0.9390	0.6089	3.13	42.9
35	141.68	14.17	0.955	0.9278	0.6395	3.06	41.6
30	136.81	13.68	0.943	0.9184	0.6759	2.99	40.0
25	130.21	13.02	0.928	0.9135	0.7179	2.92	37.6
20	121.29	12.13	0.911	0.9168	0.7651	2.88	34.7
15	109.20	10.92	0.891	0.9349	0.8172	2.87	30.8
10	92.46	9.25	0.870	0.9825	0.8738	2.95	25.7
5	67.66	6.77	0.848	1.1105	0.9348	3.25	18.5

Tabla No. 2.6

CAPITULO III

VIENTOS Y CORRIENTES LITORALES

III.1 DIAGRAMAS DE LENZ

III.1.1 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, [4].

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

1.- DIAGRAMA DE "n". Representa el número de veces que ha soplado el viento en cada dirección, y se conoce también como diagramas de frecuencias; al viento que sopla con mayor frecuencia se le denomina "viento reinante".

2.- 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.

3.- DIAGRAMA DE VELOCIDAD MEDIA CUADRÁTICA " V_{max}^2 ". 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.

Los dos primeros diagramas sirven para orientar correctamente las obras portuarias que se proyectan; el tercero sirve para realizar el cálculo de estabilidad de las mismas de acuerdo con las condiciones locales por lo que a viento se refiere.

En la Fig. No. 3.1, se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el cálculo de diagramas de Lenz.

```

10 DIM SHARED DIREC(16) AS STRING
20 DIM SHARED TABLA(3, 16), PROM(16)
30 DATA N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW
40 CLS
50 FOR I = 1 TO 16
60 READ DIREC(I)
70 NEXT I
80 OPEN "A:VIENTO.DAT" FOR INPUT AS #1
90 INPUT #1, TOTAL
100 FOR ITOTAL = 1 TO TOTAL
110 INPUT #1, MAG, DIRS
120 DIRS = LTRIMS(UCASES(DIRS))
130 FOR I = 1 TO 16
140 IF (DIRS = LTRIMS(DIREC(I))) THEN
150 ICONT = I
160 EXIT FOR
170 END IF
180 NEXT I
190 SELECT CASE ICONT
200 CASE 1
210 TABLA(1, 1) = TABLA(1, 1) + I
220 TABLA(2, 1) = TABLA(2, 1) + MAG
230 IF (MAG > TABLA(3, 1)) THEN TABLA(3, 1) = MAG
240 CASE 2
250 TABLA(1, 2) = TABLA(1, 2) + 1
260 TABLA(2, 2) = TABLA(2, 2) + MAG
270 IF (MAG > TABLA(3, 2)) THEN TABLA(3, 2) = MAG
280 CASE 3
290 TABLA(1, 3) = TABLA(1, 3) + 1
300 TABLA(2, 3) = TABLA(2, 3) + MAG
310 IF (MAG > TABLA(3, 3)) THEN TABLA(3, 3) = MAG
320 CASE 4
330 TABLA(1, 4) = TABLA(1, 4) + 1
340 TABLA(2, 4) = TABLA(2, 4) + MAG
350 IF (MAG > TABLA(3, 4)) THEN TABLA(3, 4) = MAG
360 CASE 5
370 TABLA(1, 5) = TABLA(1, 5) + 1
380 TABLA(2, 5) = TABLA(2, 5) + MAG
390 IF (MAG > TABLA(3, 5)) THEN TABLA(3, 5) = MAG
400 CASE 6
410 TABLA(1, 6) = TABLA(1, 6) + 1
420 TABLA(2, 6) = TABLA(2, 6) + MAG

```

```

430 IF (MAG > TABLA(3, 6)) THEN TABLA(3, 6) = MAG
440 CASE 7
450 TABLA(1, 7) = TABLA(1, 7) + 1
460 TABLA(2, 7) = TABLA(2, 7) + MAG
470 IF (MAG > TABLA(3, 7)) THEN TABLA(3, 7) = MAG
480 CASE 8
490 TABLA(1, 8) = TABLA(1, 8) + 1
500 TABLA(2, 8) = TABLA(2, 8) + MAG
510 IF (MAG > TABLA(3, 8)) THEN TABLA(3, 8) = MAG
520 CASE 9
530 TABLA(1, 9) = TABLA(1, 9) + 1
540 TABLA(2, 9) = TABLA(2, 9) + MAG
550 IF (MAG > TABLA(3, 9)) THEN TABLA(3, 9) = MAG
560 CASE 10
570 TABLA(1, 10) = TABLA(1, 10) + 1
580 TABLA(2, 10) = TABLA(2, 10) + MAG
590 IF (MAG > TABLA(3, 10)) THEN TABLA(3, 10) = MAG
600 CASE 11
610 TABLA(1, 11) = TABLA(1, 11) + 1
620 TABLA(2, 11) = TABLA(2, 11) + MAG
630 IF (MAG > TABLA(3, 11)) THEN TABLA(3, 11) = MAG
640 CASE 12
650 TABLA(1, 12) = TABLA(1, 12) + 1
660 TABLA(2, 12) = TABLA(2, 12) + MAG
670 IF (MAG > TABLA(3, 12)) THEN TABLA(3, 12) = MAG
680 CASE 13
690 TABLA(1, 13) = TABLA(1, 13) + 1
700 TABLA(2, 13) = TABLA(2, 13) + MAG
710 IF (MAG > TABLA(3, 13)) THEN TABLA(3, 13) = MAG
720 CASE 14
730 TABLA(1, 14) = TABLA(1, 14) + 1
740 TABLA(2, 14) = TABLA(2, 14) + MAG
750 IF (MAG > TABLA(3, 14)) THEN TABLA(3, 14) = MAG
760 CASE 15
770 TABLA(1, 15) = TABLA(1, 15) + 1
780 TABLA(2, 15) = TABLA(2, 15) + MAG
790 IF (MAG > TABLA(3, 15)) THEN TABLA(3, 15) = MAG
800 CASE 16
810 TABLA(1, 16) = TABLA(1, 16) + 1
820 TABLA(2, 16) = TABLA(2, 16) + MAG
830 IF (MAG > TABLA(3, 16)) THEN TABLA(3, 16) = MAG
840 END SELECT
850 NEXT ITOTAL
860 CLOSE #1
870 FOR I = 1 TO 16
880 IF TABLA(1, I) = 0 THEN
890 PROM(I) = 0
900 ELSE
910 PROM(I) = TABLA(2, I) / TABLA(1, I)
920 END IF
930 NEXT I
940 OPEN "A:RESUMEN.DAT" FOR OUTPUT AS #1

```

```

950 PRINT #1, "DIRECCION", " n", "Vmed", "n·Vmed", "Vmax", "Vmax^2"
960 PRINT #1,
970 FOR I = 1 TO 16
980 PRINT #1, DIREC(I), TABLA(1,I), PROM(I), TABLA(1,I)*PROM(I),
          TABLA(3,I), TABLA(3,I)^2
990 NEXT I
1000 CLOSE #1
1010 END

```

Fig. No. 3.1 Programa en lenguaje BASIC para el cálculo de diagramas de Lenz.

III.1.2 Comentarios:

Para poder ejecutar el programa anterior, se necesita crear con cualquier editor el archivo de datos con el nombre "VIENTO.DAT"; el número total de datos se almacena en la variable TOTAL y se coloca en la primera línea del archivo, en las líneas subsiguientes se archivarán los datos del viento dando primeramente su magnitud y después su dirección, guardándose los valores en las variables MAG y DIR\$ respectivamente.

III.1.3 Ejemplo de aplicación.

Se cuenta con los datos de viento mostrados en la Tabla No. 3.1, recopilados en un periodo de observación de un mes.

DIRECCION	VELOCIDADES (m/s)	DIRECCION	VELOCIDADES (m/s)
N	1,2	S	0
NNE	1,1	SSW	0
NE	1,1,5,1,3,2,.8,.5	SW	0
ENE	2,.8,1.6,1.2	WSW	3.6
E	4,2.6	W	6,5,10,1.5,2,3,3.5,8,2.5,11,6.5,5,3,7.5,2,6,3.8,3,2.5
ESE	3.5,3.9	WNW	5.5,3,4,3,3.5,6,9,2,2.5,5.5,6,7,7.5,3.5,2.5,4,4.5,3,4,2
SE	5,3,2.8,9,3.5,2.5	NW	2.5
SSE	5,3,8,2	NNW	0

Tabla No. 3.1 Datos de Viento.

Calcular mediante el programa desarrollado :

- a) Diagrama de frecuencias.
- b) Diagrama de agitación.
- c) Diagrama de Velocidad máxima cuadrática.

SOLUCION :

En la Tabla No. 3.2 se muestran los resultados del programa, con los datos de viento anteriormente dados, los diagramas de Lenz correspondientes se presentan en la Fig. No. 3.2.

DIRECCION	n	V_{med}	$n \cdot V_{med}$	V_{mult}	V_{mult}^2
N	2	1.5	3.0	2.0	4.0
NNE	2	1.0	2.0	1.0	1.0
NE	6	1.2	7.2	2.0	4.0
ENE	4	1.4	5.6	2.0	4.0
E	2	3.3	6.6	4.0	16.0
ESE	2	3.7	7.4	4.0	16.0
SE	6	4.3	25.8	9.0	81.0
SSE	4	4.5	18.0	8.0	64.0
S	1	0.0	0.0	0.0	0.0
SSW	1	0.0	0.0	0.0	0.0
SW	1	0.0	0.0	0.0	0.0
WSW	1	3.6	3.6	3.6	12.96
W	18	4.8	86.4	11.0	121.0
WNW	20	4.4	88.0	9.0	81.0
NW	1	2.5	2.5	2.5	6.25
NNW	1	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla No. 3.2 Resumen de datos de Viento.

Diagrama de
"n"

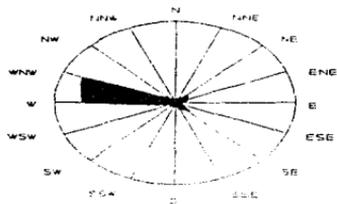


Diagrama de
"nv"

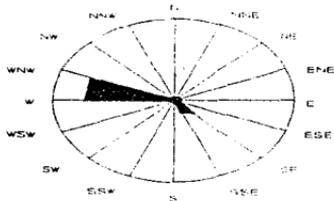


Diagrama de
"V_{max}²"

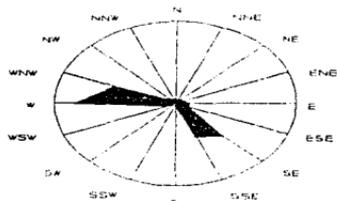


Fig. No. 3.2 Diagramas de LENZ.

III.2 FORMULAS PARA EVALUAR LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE LITORAL

III.2.1 ALGORITMO 6

Fórmulas para evaluar la velocidad media de la corriente litoral.

Quando 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, [8].

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. 3.3 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. 3.3, 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)	Purman-Munk-Taylor (1949)	$V = \frac{g}{k} \left\{ \left(1 + \frac{2k}{g} \frac{c}{\rho} \right)^{1/2} - 1 \right\}$ $c = 3.41 N_0 \cos \alpha \sqrt{L/T}$ $L = \rho g / T, \quad C = \sqrt{2T \rho g N_0}$	Balace de Momentum Onda Solitaria	☐	☐	☐
(2)	Imman-Quinn (1951)	$V = \left\{ \left(\frac{1}{4k^2} + \frac{c}{g} \right)^{1/2} - \frac{1}{2k} \right\} g$ $c = 4.48 L \cos \alpha \sqrt{L/T}$ $c = C \cos \alpha, \quad C = \sqrt{2T \rho g N_0}$	Balace de Momentum Onda Solitaria	☐	☐	☐
(3)	Naga (1954)	$V = \frac{1}{8} N_0 C_0 K \left(\sqrt{1 - \frac{2k^2 N_0^2}{2g}} - 1 \right)$ $K = 1/(2N_0)$	Balace de Momentum Onda Solitaria	☐	☐	☐
(4)	Gilvan-Eggleston (1954)	$V = K g T \sin^2 \alpha,$ $K = 1$	Balace de Momentum	☐	☐	☐
(5)	Eggleston (1963)	$V = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left(1 - \frac{31011}{A} \right) \right\} a^{-1/2} A^{1/2}$ $A = \frac{1}{2} \left[\frac{2N_0^2}{\rho g} \right] \frac{\sin^2 \alpha \cos \alpha}{T}$ $B = \frac{2}{3} \left[\frac{2N_0^2}{\rho g} \right] \frac{\sin^2 \alpha}{T}$	Balace de Momentum Onda Oscilatoria Corriente Diurno-Nocturna	☐	☐	☐
(6)	Saito-Tanaka (1966)	$V = K \left[\frac{1.2N_0^2 \sin^2 \alpha}{2T} \right]^{1/4}$ $K = \dots \text{Costa de Kamikaze}$	Balace de Momentum Onda Solitaria	☐	☐	☐

Tabla No. 3.3 Fórmulas para calcular la velocidad media de la corriente litoral a lo largo de la costa en configuraciones batimétricas rectas y paralelas (Horiikawa).

Las variables incluidas en las fórmulas de la Tabla N^o. 3.3 se definen como sigue:

- H_b : Altura de la ola rompiente.
- H_o : Altura de ola en aguas profundas.
- h_b : Profundidad de la rompiente.
- C_b : Celeridad del oleaje en la rompiente.
- i : Pendiente media del fondo del mar en la zona de rompientes definida por $i = \tan \beta$.
- α_b : Angulo entre el frente de onda y la línea de costa en la rompiente.
- T : Período del oleaje.
- g : Aceleración de la gravedad.
- n_b : Relación de la celeridad de 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 la 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 $x = 0$.
- \square : Indica discutido u observado.
- \circ : Indica usando datos de la teoría de Putnam.
- Φ : 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:

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

Donde:

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. 3.3.

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. 3.3.

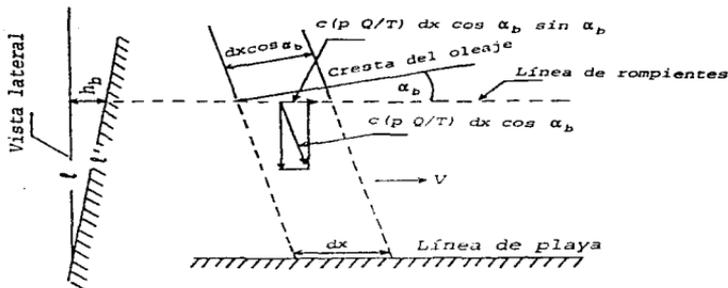


Fig. No. 3.3 Ilustración para el cálculo de la velocidad media de la corriente litoral a lo largo de la costa.

En la Fig. No. 3.3, 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:

$$C (p Q/T) \quad (3.2)$$

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.
- p : 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 ($dx \cos \alpha_p$), se transferirá una cantidad de movimiento ($C (p Q/T) dx \cos \alpha_p$) 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 ($C \sin \alpha_p (p Q/T) dx \cos \alpha_p$). La expresión ($(p Q/T) dx \cos \alpha_p$) 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. 3.3. Así, la conservación de la cantidad de movimiento en la dirección a lo largo de la costa se expresa por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 C \sin \alpha_p (p Q/T) dx \cos \alpha_p - V (p Q/T) dx \cos \alpha_p \\
 = (C \sin \alpha_p - V) (p Q/T) dx \cos \alpha_p \\
 = f p V^2 l' dx \qquad (3.3)
 \end{aligned}$$

Donde f es el coeficiente de fricción en el fondo del mar, y l' es la distancia (sobre el fondo del mar) de la línea de costa a la línea de rompientes. Asumiendo que $l' = l$ (donde l es el ancho de la zona de rompientes), que $Q = 4 H_b^2 \sqrt{3 H_b L_b}$ 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:

$$V = \frac{a}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4C \sin \alpha_p}{a}} - 1 \right] \qquad (3.4)$$

Donde:

$$a = \frac{2.61 H_b l \cos \alpha_p}{f T}$$

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

- 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 $i = h_b/l$

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 ecuación:

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

Donde:

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

$$y = C \operatorname{sen} \alpha_b$$

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

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 α_b se pueden determinar con ayuda de las Figs. No. 3.4 y 3.5 respectivamente, utilizando para ello los valores de α_o y H_o/L_o (relación de esbeltez de la ola) en aguas profundas.

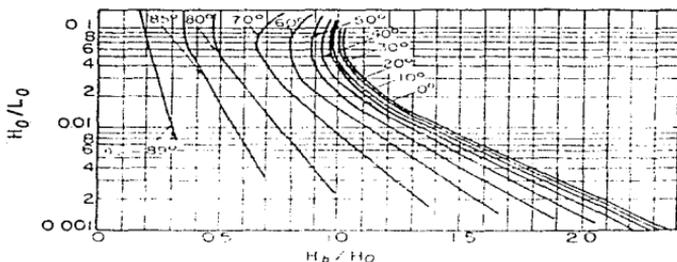


Fig. No. 3.4 Diagrama para determinar H_b/H_o para contornos paralelos (Groen y Weenink).

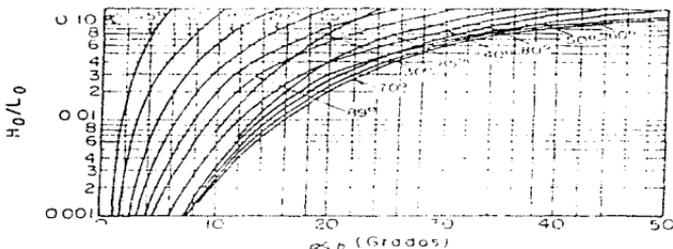


Fig. No. 3.5 Diagrama para determinar α_b para contornos paralelos (Groen y Weenink).

En la Fig. No. 3.6, se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el cálculo de la velocidad media de la corriente litoral, utilizando las ecuaciones indicadas en la Tabla No. 3.3.

```

10  "CALCULO DE LA VELOCIDAD MEDIA DE LA CORRIENTE LITORAL"
20  INPUT "DAME EL VALOR DEL PERIODO="; T
30  INPUT "DAME LA PROF. EN LA ROMPIENTE="; d
40  INPUT "DAME EL ANCHO DE LA ZONA DE ROMP.="; Z
50  INPUT "DAME EL VALOR x(0)="; XV
60  INPUT "DAME EL VALOR V(0)="; VV
70  INPUT "DAME LA ALT. DE OLA EN A.P="; HO
80  INPUT "DAME EL ANGULO EN A.P="; B
90  BO = B * 3.141592 / 180
100 PI2 = 2 * 3.141592
110 DD = PI2 * d / (9.8 * T ^ 2 / PI2)
120 IF (DD - 10) <= 0) GOTO 140
130 XX = DD: GOTO 220
140 IF (DD - 1) >= 0) GOTO 160
150 X = SQR(DD); GOTO 170
160 X = DD
170 COTHX = ((EXP(2 * X)) + 1) / ((EXP(2 * X)) - 1)
180 XX = X - (X - DD * COTHX) / (1 + DD * (COTHX ^ 2 - 1))
190 E = 1 - ((XX) / X)
200 X = XX
210 IF ((ABS(E) - .0005) >= 0) GOTO 170
220 A = XX
230 L = PI2 * d / A
240 C = L / T
250 Lo = 1.56 * T ^ 2
260 Co = Lo / T
270 KR = ((1 - ((C / Co) ^ 2)) * ((TAN(BO)) ^ 2)) ^ (-1 / 4)
280 K = (PI2) / L
290 CN = .5*(1+((2*K*d)/(EXP(2*K*d)-EXP(-2*K*d))/2))
300 KS = SQR((1 / (2 * CN)) * (Co / C))
310 HR = HO * KR * KS
320 AR = (C / Co) * SIN(BO)
330 Ab = ATN(AR / SQR(1 - (AR ^ 2)))
340 i = d / Z
350 CC = SQR(2.28 * 9.81 * HR)
360 AA = ((2.61 * HR * i * COS(Ab)) / (.01 * T))
370 V1 = (AA / 2) * (SQR(1 + ((4 * CC) / AA) * SIN(Ab))) - 1)
380 Y = CC * SIN(Ab)
390 EX = ((646 * HR * i * COS(Ab)) / T)
400 V2 = (SQR((1 / (4 * EX ^ 2)) + Y) - (1 / (2 * EX))) ^ 2
410 KK = (i / (.01 * d))
420 V3 = (1/8)*HR*C*KK*(SQR(1+((16*SIN(Ab))/(KK*HR)))-1)
430 V4 = (9.81 * T * i * (SIN(2 * Ab)))
440 Ke = 2 * 3.141592 / L
450 nb = (1/2)+((Ke*d)/((EXP(2*(2*KK*d))-1)/(2*EXP(2*KK*d))))

```

```

460 BU = ATN(i)
470 B1 = (2 / 5) * (.01 / (d * COS(BU) * SIN(AB)))
480 AD = (3/8) * ((9.81*HR^2*nb)/d) * ((SIN(BU)*SIN(AB)*SIN(2*AB))/
.01)
490 V5 = SQR((1 - ((1 - ((VV^2)/AD)) * EXP(-B1*XV))) * AD)
500 V6 = 1.6 * (((i * (HO^(5/3))) / (T^(1/3))) * SIN(2*(BO)))^(1/3))
510 PRINT "VALORES DE LA VELOCIDAD MEDIA DE LA CORRIENTE LITORAL"
520 PRINT " OBTENIDOS POR DIFERENTES CRITERIOS DE AUTORES"
530 PRINT
540 PRINT "VEL. MEDIA (PUTMAN-MUNK) ="; V1
550 PRINT "VEL. MEDIA (INMAN-QUINN) ="; V2
560 PRINT "VEL. MEDIA (NAGAI) ="; V3
570 PRINT "VEL. MEDIA (GALVIN-EAGLESON) ="; V4
580 PRINT "VEL. MEDIA (EAGLESON) ="; V5
590 PRINT "VEL. MEDIA (SATO-TONAKA) ="; V6
600 END

```

Fig. No. 3.6 Programa en lenguaje BASIC, para el cálculo de la velocidad media de la corriente litoral.

III.2.3 Comentarios:

Las unidades de la velocidad media de la corriente litoral están especificadas en m/s; los valores de la velocidad de la corriente litoral obtenidos por medio de los diferentes criterios son aproximados.

III.2.4 Ejemplo de Aplicación:

Calcular con diversos criterios, la velocidad de la corriente litoral para un oleaje con las siguientes características:

Periodo del oleaje $T = 10$ seg.

Profundidad en la zona de rompiente $d = 5.0$ m.

Ancho de la zona de rompiente $Z = 150.0$ m.

Altura de ola en aguas profundas $H_o = 3.5$ m.

Angulo del oleaje en aguas profundas $\beta = 47^\circ$

$X_o = 5.0$ m. : $V_o = 0.8$ m/s

SOLUCION :

Valores de la velocidad media de la corriente litoral obtenidos por el programa desarrollado, para diferentes criterios de autores:

V_m (GALVIN-EAGLESON) = 1.96 m/s

V_m (PUTMAN-MUNK) = 1.68 m/s

V_m (INMAN-QUINN) = 2.48 m/s

V_m (NAGAI) = 1.52 m/s

V_m (EAGLESON) = 0.81 m/s

V_m (SATO-TANAKA) = 0.8 m/s

CAPITULO IV

REGIMENES LITORALES

IV.1 CALCULO DE LA CANTIDAD DEL TRANSPORTE LITORAL A LO LARGO DE LA COSTA..

IV.1.1 INTRODUCCION .

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 [7].

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 configuraciones 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.1.2 DIRECCION 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.

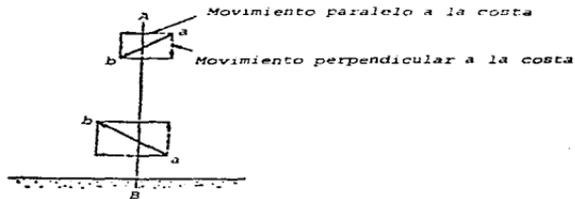


Fig. No. 4.1 Componentes del movimiento de la arena.

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. 4.2(a). 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.

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

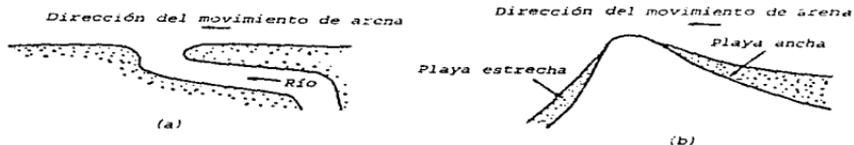


Fig. No. 4.2 Configuración alrededor de la boca de ríos y cabos.

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.1.3 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.

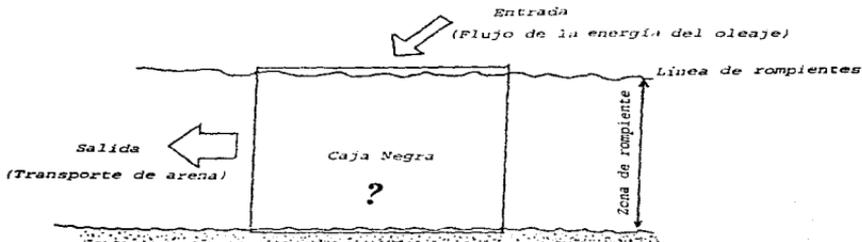


Fig. No. 4.3 Modelo de caja negra para el transporte litoral a lo largo de la costa.

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:

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

Donde :

- Q : Transporte litoral a lo largo de la costa.
- Pl_B : 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:

$$Q = \alpha Pl_B^2$$

Donde :

- Q : Transporte litoral que pasa por una sección (área) perpendicular a la línea de costa en un tiempo dado.
- α, n : Coeficientes, cuyo valor se determina mediante mediciones de campo.
- Pl_B : 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_B :

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:

$$W_b = \left\{ \frac{P_g}{8} (H_{1/3})^3 C_g \right\}_b \quad (4.2)$$

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 expresada por unidad de longitud de playa es :

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

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

$$Pl_s = \sum W_b \text{ sen } \alpha_b \cos \alpha_b$$

$$Pl_s = \sum \left\{ \frac{P_g}{8} (H_{1/3})^3 C_g \text{ sen } \alpha_b \cos \alpha_b \right\}_b \quad (4.4)$$

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 :

$$\bar{H} = (2 \pi m_0)^{1/2} ; H_{1/3} = 1.6 \bar{H} ; H_{rms}^2 = 8 m_0$$

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:

$$w_b = \frac{b_a}{b_b} w_a = K_r^2 w_a = K_r^2 \left(\frac{Pg}{B} (H_{1/3})^2 C_g \right)_a \quad (4.7)$$

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

$$Pl_s = \sum w_b \text{ sen } \alpha_b \text{ cos } \alpha_b$$

$$Pl_s = \sum K_r^2 \left(\frac{Pg}{B} (H_{1/3})^2 C_g \right)_a \text{ sen } \alpha_b \text{ cos } \alpha_b \quad (4.8)$$

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.1.4 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 (U.S.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 ($t_p * m/m$)	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.; $H_{C_{max}} = 3.5$ 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)	$Q = 0.131 Pl_s^{0.6}$	Bahía Suruga y Tagonaura en Japon ($d_s = 5-40$ 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 Japon ($d_s = 0.15-0.2$ mm., $H < 4$ m.)
SATO (1966)	$Q = 0.120 Pl_s$	Costa de kashima en Japon
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.

En la Fig. No. 4.5, se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el cálculo del transporte litoral a lo largo de la costa.

```

5      CLS
10     ' "CALCULO DEL TRANSPORTE LITORAL A LO LARGO DE LA COSTA"
20     PRINT "SI LA CONFIGURACION BATIMETRICA ES RECTA Y PARALELA"
30     INPUT "TECLEE 1, SI NO TECLEA 2"; I
40     IF (I = 1) THEN GOTO 50 ELSE 330
50     INPUT "DAME EL VALOR DEL PERIODO (seg) ="; T
60     INPUT "DAME EL VALOR DE LA PROFUNDIDAD EN LA ROMPIENTE (m) ="; d
70     INPUT "DAME LA ALTURA DE OLA EN AGUAS PROFUNDAS (m) ="; Ho
80     INPUT "DAME EL ANGULO DEL OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS (grados) ="; BO
90     INPUT "DAME LA PROFUNDIDAD DE LA ALT. DE OLA EN AGUAS PROFUNDAS ="; dap
100    INPUT "DAME EL TIEMPO EN QUE ACTUA EL OLAJE (h) ="; TP
110    INPUT "DAME EL VALOR DEL DIAMETRO D50 DE LOS SEDIMENTOS (mm) ="; Dsed
120    BB = BO * 3.141592 / 180
130    SIG = 2 * 3.141592 / T
140    a = d / 9.8 * SIG ^ 2
150    X = a*(a+1/(1+a*(.6522+a*(.4522+a*(.0864+a*.0675))))))
160    XX = SQR(X)
170    L = 2 * 3.141592 * d / XX
180    Lo = 1.56 * T ^ 2
190    Co = Lo / T
200    C = L / T
210    B1 = (C / Co) * SIN(BB)
220    B = ATN(B1 / SQR(1 - (B1 ^ 2)))
230    ANG = B * 180 / 3.141592
240    Kr = (1 + ((1 - (C/Co)^2)) * ((TAN(BB))^2)) ^ (-1/4)
250    K = (2 * 3.141592) / Lo
260    CN = .5 * (1 + ((2*K*dap) / ((EXP(2*K*dap) - EXP(-2*K*dap)) / 2)))
270    KS = SQR((1 / (2 * CN)) * (Co / C))
280    CG = Co * CN
290    H = Ho * Kr * KS
300    Hb = .78 * d
310    IF (Hb < H) THEN Hr = Hb ELSE Hr = H
320    GOTO 400
330    INPUT "DAME EL VALOR DEL PERIODO (seg) ="; T
340    INPUT "DAME LA ALTURA DE OLA EN LA ROMPIENTE (m) ="; Hr
350    INPUT "DAME EL ANGULO EN LA ROMPIENTE (grados) ="; Br
360    INPUT "DAME EL VALOR DEL COEF. DE REFRACCION EN LA ROMPIENTE ="; Kr
365    INPUT "DAME EL TIEMPO EN QUE ACTUA EL OLAJE (h) ="; TP
370    INPUT "DAME EL VALOR DEL DIAMETRO D50 DE LOS SEDIMENTOS (mm) ="; Dsed
380    B = Br * 3.141592 / 180
390    CG = .5 * 1.56 * T
400    PLS = Kr^2 * (1.03/S) * Hr^2 * CG * SIN(B) * COS(B) * TP * 60 * 60
410    Q1 = 1.21 * PLS ^ (.8)
420    Q2 = .217 * PLS ^ (.8)
430    Q3 = .13 * PLS ^ (.54)
440    Q4 = .131 * PLS ^ (.8)
450    Q5 = .786 * PLS ^ (.91) * Dsed ^ (.59);
460    Q6 = .30 * PLS
470    Q7 = .12 * PLS
480    Q8 = .401 * PLS
490    CLS
500    PRINT "ANGULO REFRACTADO EN LA ROMPIENTE ="; ANG; "grados"

```

```

510 PRINT "COEFICIENTE DE REFRACCION KR          ="; KR
520 PRINT "ALTURA DE OLA EN LA ROMPIENTE       ="; Hr; "m"
530 PRINT "POTENCIA DE LA ENERGIA DEL OLEAJE   ="; PLS; "tg*m/m"
540 PRINT
550 PRINT "VALORES DEL TRANSPORTE LITORAL OBTENIDOS POR"
560 PRINT "          DIFERENTES CRITERIOS DE AUTORES"
570 PRINT
580 PRINT "TRANSPORTE LITORAL (CALDWELL)          ="; Q1; "m3/h"
590 PRINT "TRANSPORTE LITORAL (SAVAGE)           ="; Q2; "m3/h"
600 PRINT "TRANSPORTE LITORAL (IJIMA-SATO)      ="; Q3; "m3/h"
610 PRINT "TRANSPORTE LITORAL (ICHIKAWA-OCHIAL) ="; Q4; "m3/h"
620 PRINT "TRANSPORTE LITORAL (MANOHA)          ="; Q5; "m3/h"
630 PRINT "TRANSPORTE LITORAL (IJIMA-SATO-TANAKA) ="; Q6; "m3/h"
640 PRINT "TRANSPORTE LITORAL (SATO)           ="; Q7; "m3/h"
650 PRINT "TRANSPORTE LITORAL (CERC)          ="; Q8; "m3/h"
660 END

```

Fig. No. 4.5 Programa en lenguaje BASIC, para el cálculo del transporte litoral a lo largo de la costa.

IV.1.5 Comentarios:

Las unidades de la potencia de la energía del oleaje y del transporte de litoral son: P_{1s} ($t_g \cdot m/m$) y Q_x (m^3/h) respectivamente. El valor del diámetro de los sedimentos "D50", deberá darse por el usuario en milímetros.

IV.1.6 Ejemplo de aplicación:

En una costa con batimétricas rectas y paralelas, actúa durante 2 hrs. un oleaje en aguas profundas con $H_0 = 3.4$ m., $T = 12$ seg. y un ángulo de incidencia de $\alpha_0 = 45^\circ$ en la profundidad de 75 m. La profundidad en la rompiente es $d = 5$ m., y el diámetro D50 de los sedimentos en la costa es $D50 = 0.5$ mm.

Calcular con el programa desarrollado:

- La altura de ola, ángulo de incidencia y el coeficiente de refracción en la rompiente.
- Calcular la potencia de la energía para las características del oleaje mencionado.

- c) Calcular la cantidad de transporte litoral para las condiciones de oleaje definidas en los incisos anteriores con los criterios descritos en la Tabla No. 4.1.

SOLUCION:

- a) Los resultados del oleaje, para la zona de rompiente son los siguientes:

ANGULO REFRACTADO EN LA ROMPIENTE = 15.00 grados.
 COEFICIENTE DE REFRACCION KR = 0.86
 ALTURA DE OLA EN LA ROMPIENTE = 3.90 m.

- b) La potencia de la energia del oleaje es:

$$P_{1s} = 27\ 143.07 \text{ (} t_f \cdot m/m \text{)}$$

- c) Los resultados de la cantidad de transporte litoral para las condiciones de oleaje definidas en los incisos anteriores con los criterios descritos en la Tabla No. 4.1, se muestran en la Tabla No. 4.2.

INVESTIGACION	Transporte litoral Q (m ³ /h)
CALDWELL (1956)	Q = 4262.97
SAVAGE (1959)	Q = 5890.05
IJIMA, SATO, AONO E ISHIL (1960)	Q = 32.22
ICHIKAWA, OCHIAL, TAMITA Y MOROBUSE (1961)	Q = 461.53
MANOHA (1962)	Q = 5655.16
IJIMA, SATO Y TANAKA (1964)	Q = 8142.92
SATO (1966)	Q = 3257.17
C.E.R.C (1975)	Q = 10884.37

Tabla No. 4.2 Resultados del cálculo de transporte de litoral.

IV.2 EVOLUCION DE LA LINEA DE PLAYA UTILIZANDO LA TEORIA DE UNA LINEA.

IV.2.1 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 [6]:

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

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.
- λ : 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, de la Fig. No. 4.6(a), $(1-\lambda)$ depende de la profundidad h la cual es la base del volumen de arena conteniendo vacíos aunque q_x y q_y es el mismo volumen de arena excluyendo los vacíos.

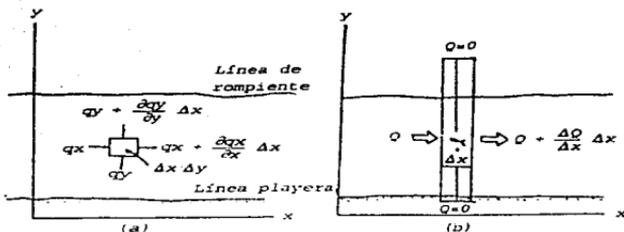


Fig. No. 4.6 Coordenadas de la ecuación de Continuidad de la arena en Movimiento.

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 $\Delta X \cdot l$ de la Fig. No. 4.6(b), donde ambos términos en la dirección y se prolongan hasta que q_y se hace cero.

De la Fig. No. 4.6(b), si la cantidad de arena por unidad de tiempo que entra en el elemento $\Delta X \cdot l$ a través de la longitud l 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 Δt en el elemento $\Delta X \cdot l$ se expresa como sigue:

$$\Delta V = Q \Delta t - \left(Q + \frac{\Delta Q}{\Delta X} \Delta X \right) \Delta t$$

$$\Delta V = -\frac{\Delta Q}{\Delta X} \Delta X \Delta t \quad (4.10)$$

ΔV tiene signo más cuando $\Delta Q / \Delta x$ tiene signo menos, 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 ΔV , resulta necesario establecer las dos suposiciones que se indican en la Fig. No. 4.7.

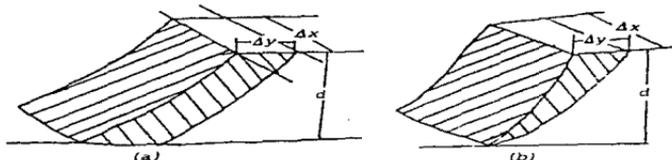


Fig. No. 4.7 Suposiciones para calcular el cambio de la línea de playa

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

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

Donde:

- d : Distancia vertical entre el límite del ascenso del oleaje sobre la playa y el fondo de mar, donde la profundidad no cambia.
- ΔY : Desplazamiento hacia el mar de la línea de playa.

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

$$d \Delta y \Delta x = - \frac{\Delta Q}{\Delta x} \Delta x \Delta t$$

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

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

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

Sustituyendo la ec. 4.13 en la ec. 4.10 se tiene:

$$\frac{1}{2} d \Delta y \Delta x = - \frac{\Delta Q}{\Delta x} \Delta x \Delta t$$

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

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. 4.7(a) se usa más frecuentemente que el de la Fig. No. 4.7(b).

IV.2.2 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:

$$Q = K P_{1b}$$

$$P_{1b} = (E C_g) b \frac{1}{2} \text{sen } 2\alpha_b \quad (4.15)$$

$$E = \frac{\rho g}{8} (H_{1/3})^3$$

Donde:

- E** : Energía total de oleaje
 $H_{1/3}$: Altura de oleaje significativa
 ρg : Peso del agua de mar
 C_g : Celeridad de grupo
b : Subíndice que indica el punto de rompiente
 α_b : Ángulo 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 α_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 Δx 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 Q_i .

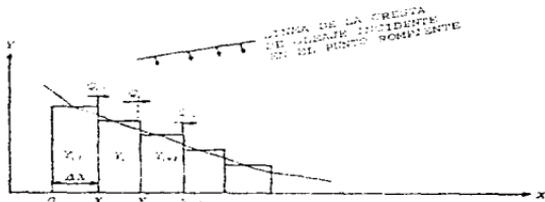


Fig. No. 4.8 División de la línea de playa.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

El método para determinar α_{bd} en el cálculo de Q_i , se expresa a continuación utilizando la Fig. No. 4.9.

El ángulo α_o 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 más y el ángulo medido en el sentido contrario tiene signo menos. α_1 es el ángulo entre la línea de playa y el eje x .

El ángulo α_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 :

$$\alpha_{bd} = \alpha_{oi} + \alpha_1 \quad (4.17)$$

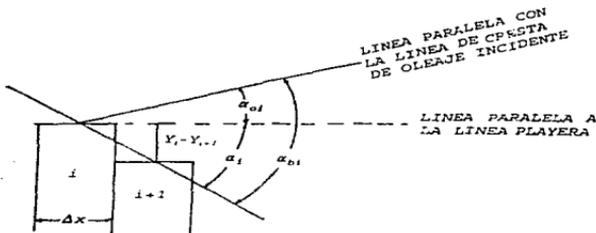


Fig. No. 4.9 Definición del ángulo del oleaje incidente.

IV.2.3 Ecuación en diferencias.

A fin de calcular la evolución de la línea de playa conforme a las ecuaciones descritas anteriormente, estas se deben de transformar a ecuaciones en diferencia.

La ec. 4.12 se puede transformar como sigue:

$$y_i^{(k+1)\Delta t} - y_i^{k\Delta t} = -(Q_i - Q_{i-1}) \frac{\Delta t}{d \Delta x} \quad (4.18)$$

Si se establecen las siguientes definiciones:

$$I = i$$

$$Y(I, K+1) = y_i^{(k+1)\Delta t} \text{ (el valor de } y_i \text{ al tiempo } (k+1)\Delta t \text{)}$$

$$Y(I, K) = y_i^{k\Delta t} \text{ (el valor de } y_i \text{ al tiempo } k\Delta t \text{)}$$

$$Q(I) = Q_i$$

$$DELTXD = \frac{\Delta t}{d \Delta x}$$

La ec. 4.18 cambia como sigue:

$$Y(I, K+1) = Y(I, K) + (Q(I-1) - Q(I)) DELTXD \quad (4.19)$$

La ec. 4.16 se puede transformar como sigue:

$$a_i = \text{ATN} (Y(I) - Y(I+1)) / DELX$$

Donde:

$$\text{ATN} : \tan^{-1}$$

$$\text{DELX} : \Delta x$$

Por lo anterior la ec. 4.17 queda como sigue:

$$ALFB = ALFO + ATN(Y(I) - Y(I+1)) / DELX \quad (4.20)$$

Donde:

$$ALFB : \alpha_{E1}$$

$$ALFO : \alpha_{o1}$$

En la Fig. No. 4.10 se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el cálculo de la evolución de la línea de playa bajo dichas condiciones.

```
10 'CALCULO DE LA EVOLUCION DE LA LINEA PLAYERA CON ESPIGON
20 SCREEN 1: CLS : KEY OFF
30 LOCATE 11, 4: PRINT "EJEMPLO CON LINEA INICIAL DE 40 M."
40 DEFINT I-N
50 NY = 30
60 DIM Y(NY), Q(NY)
65 OPEN "Q" #1: "EVOLIP.DAT"
70 GOSUB 160: 'CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA
80 GOSUB 230: 'ENTRADA DE DATOS DE OLAJE
90 TIME = 0
100 FOR K = 1 TO 50
110 TIME = TIME + DELT
120 GOSUB 250: 'CALCULO DE ANGULO Y TRANSPORTE LITORAL
130 GOSUB 310: 'CALCULO DEL CAMBIO DE LA LINEA PLAYERA
140 IF (K=(INT(K/5)*5)) THEN GOSUB 370: 'DIBUJO DE RESULTADOS
150 NEXT K
155 CLOSE #1
156 END
160 DELX = 25: DELT = .02: D = 5
170 DELTXD = DELT / (DELT * D)
180 PRINT "Y(I) INICIAL"
190 FOR I = 0 TO NY
200 PRINT "Y(", I, ")=";
205 INPUT Y(I)
210 NEXT I
220 RETURN
230 ALFO = (25 * 3.141592) / 180: P = 10 ^ 5
240 RETURN
250 FOR I = 1 TO (NY - 1)
260 ALFB = ALFO + ATN((Y(I) - Y(I + 1)) / DELX)
270 SCB = (SIN(2 * ALFB)) * (1 / 2)
```

```

280 Q(I) = .4 * P * SCB
290 NEXT I
300 RETURN
310 Q(0) = Q(1): Q(15) = 0
320 Q(NY) = Q(NY - 1)
330 FOR I = 1 TO NY
340 Y(I) = Y(I) + ((Q(I - 1) - Q(I)) * DELTXD)
350 NEXT I
360 RETURN
370 IF (K > 5) THEN GOTO 420
380 PRINT #1, "*****EVOLUCION DE LA LINEA PLAYERA*****"
390 PRINT #1, " "
400 PRINT #1, " T ", " Y(1) a Y("; NY; ") "
410 PRINT #1, " {años} ", " (m) "
420 PRINT #1, " "
430 TK = (.02 * K)
440 PRINT #1, USING "###.# "; TK
450 FOR I = 1 TO NY
460 PRINT #1, USING "###.# "; Y(I);
470 NEXT I
480 IF (K > 5) THEN GOTO 650
490 SCREEN 2: CLS
500 LOCATE 25, 5: PRINT "0": LOCATE 25, 18: PRINT "5"
501 LOCATE 25, 30: PRINT "10": LOCATE 25, 43: PRINT "15"
502 LOCATE 25, 55: PRINT "20": LOCATE 25, 68: PRINT "25"
503 LOCATE 25, 79: PRINT "30"
510 LOCATE 3, 5: PRINT "EVOLUCION DE LA LINEA DE PLAYA CON UN
    ESPIGON"
520 LOCATE 22, 2: PRINT "10": LOCATE 20, 2: PRINT "20"
530 LOCATE 17, 2: PRINT "30": LOCATE 14, 2: PRINT "40"
540 LOCATE 12, 2: PRINT "50": LOCATE 9, 2: PRINT "60"
550 LOCATE 7, 2: PRINT "70"
560 LINE (40, 30)-(635, 190), 1, B
570 FOR I = 1 TO 5
580 X = 40 + (I * 100)
590 LINE (X, 30)-(X, 190), 1
600 NEXT I
610 FOR I = -2 TO 4: 'LINEAS HORIZONTALES
620 Y = 130 - ((I * 20): 'INTERVALOS DE 20
630 LINE (40, Y)-(635, Y), 1
640 NEXT I
650 FOR I = 0 TO 14
660 Y1 = 110 - ((Y(I) - 40) * 2): X1 = 40 + (I * 20)
670 Y2 = 110 - ((Y(I + 1) - 40) * 2): X2 = 40 + ((I + 1) * 20)
680 LINE (X1, Y1)-(X2, Y2), 1
690 NEXT I
700 FOR I = 16 TO 39
710 Y1 = 110 - ((Y(I) - 40) * 2): X1 = 40 + (I * 20)
720 Y2 = 110 - ((Y(I + 1) - 40) * 2): X2 = 40 + ((I + 1) * 20)
730 LINE (X1, Y1)-(X2, Y2), 1
740 NEXT I
750 IF K = 50 THEN GOTO 770

```

```

760 RETURN
770 '***INSTRUCCION (INKEY)***
780 IF INKEY$ = "" THEN 770
790 SCREEN 0
800 RETURN

```

Fig. No. 4.10 Programa en lenguaje BASIC, para el cálculo de la evolución de la línea de playa con un espigón.

IV.2.4 Comentarios:

El programa desarrollado anteriormente habrá que modificarlo conforme a las condiciones de playa y de las estructuras para otro tipo de ejemplo; ya que dicho programa se ajustó a las condiciones iniciales y de frontera para el ejemplo presentado.

IV.2.5 Ejemplo de aplicación.

Considerando la evolución de la línea de playa recta mostrada en la Fig. No. 4.11, y la presencia de un espigón, calcular con el programa desarrollado:

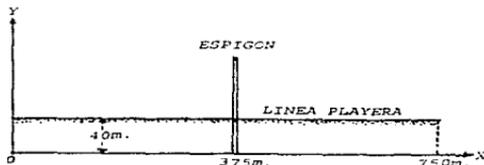


Fig. No. 4.11 Línea playera con un espigón largo.

- a) La evolución de la línea de costa después de un año con las siguientes condiciones adicionales:
- 1) La longitud de cálculo a lo largo de la playa es de 750 m., con 30 elementos diferenciales, de 25 m. de ancho.

- 2) La posición de la línea de playa, se localiza a una distancia de 40 m. desde el eje x.
- 3) El ángulo de incidencia del oleaje α_1 (de la ec. 4.17) es cero.
- 4) El ángulo de incidencia del oleaje α_0 (de la ec. 4.17) es $+15^\circ$, y no cambia durante el tiempo de cálculo.
- 5) El valor de la potencia de la energía del oleaje P_{10} (ec. 4.15), en un año, es de 10^5 ton. m/m.
- 6) $\Delta t = 0.02$ años y $\Delta x = 25$ m.
- 7) El valor de d (ec. 4.18) es igual a 5 m.

SOLUCION :

En la Tabla No. 4.3 se muestran los resultados del cálculo de la evolución de la costa utilizando el programa antes señalado, y en la Fig. No. 4.12 se presenta el dibujo de los resultados obtenidos.

*****EVOLUCION DE LA LINEA PLAYERA*****

T (años)	Y(1) a Y(30) (m)									
0.1	40.0	40.1	40.1	40.3	40.5	40.8	41.3	42.1	43.3	45.0
	47.1	49.7	52.6	56.2	61.1	18.9	23.6	27.4	30.3	32.9
	35.0	36.7	37.9	38.7	39.2	39.5	39.7	39.9	39.9	40.0
0.2	40.0	40.1	40.2	40.4	40.6	41.0	41.6	42.6	43.8	45.5
	47.7	50.3	53.6	57.7	63.0	17.0	22.3	26.4	29.7	32.3
	34.5	36.2	37.4	38.4	39.0	39.4	39.6	39.8	39.9	40.0
0.3	40.0	40.1	40.3	40.5	40.8	41.3	42.0	43.0	44.3	46.1
	48.3	51.1	54.7	59.1	64.6	15.4	20.9	25.3	28.9	31.7
	33.9	35.7	37.0	38.0	38.7	39.2	39.5	39.7	39.9	40.0
0.4	40.0	40.1	40.3	40.6	41.0	41.5	42.3	43.4	44.8	46.7
	49.0	52.0	55.7	60.4	66.0	14.0	19.6	24.3	28.0	31.0
	33.3	35.2	36.6	37.7	38.5	39.0	39.4	39.7	39.9	40.0
0.5	40.0	40.2	40.4	40.7	41.2	41.8	42.6	43.8	45.3	47.3
	49.8	52.9	56.8	61.6	67.2	12.8	18.4	23.2	27.1	30.2
	32.7	34.7	36.2	37.4	38.2	38.8	39.3	39.6	39.8	40.0
0.6	40.0	40.2	40.5	40.9	41.4	42.1	43.0	44.2	45.9	47.9
	50.6	53.8	57.8	62.7	68.4	11.6	17.3	22.2	26.2	29.4
	32.1	34.1	35.8	37.0	37.9	38.6	39.1	39.5	39.8	40.0

0.7	40.0	40.3	40.6	41.0	41.6	42.3	43.4	44.7	46.4	48.6
	51.3	54.7	58.8	63.8	69.6	76.4	84.2	93.0	103.0	114.4
	31.4	33.6	35.3	36.6	37.7	38.4	39.0	39.4	39.7	40.0
0.8	40.0	40.3	40.7	41.2	41.8	42.6	43.7	45.1	47.0	49.3
	52.1	55.6	59.8	64.8	70.6	77.4	85.2	94.0	104.0	115.4
	30.7	33.0	34.9	36.3	37.4	38.2	38.8	39.3	39.7	40.0
0.9	40.0	40.4	40.8	41.4	42.1	43.0	44.1	45.6	47.5	49.9
	52.9	56.5	60.8	65.8	71.7	78.4	86.2	95.0	105.0	116.4
	30.1	32.5	34.4	35.9	37.0	37.9	38.6	39.2	39.6	40.0
1.0	40.0	40.4	40.9	41.5	42.3	43.3	44.5	46.1	48.1	50.6
	53.7	57.3	61.7	66.8	72.7	79.4	87.2	96.0	106.0	117.4
	29.4	31.9	33.9	35.5	36.7	37.7	38.5	39.1	39.6	40.0

Tabla No. 4.3 Resultados del cálculo de la evolución de la línea de playa con un espigón.

EVOLUCION DE LA LINEA DE PLAYA CON UN ESPIGON

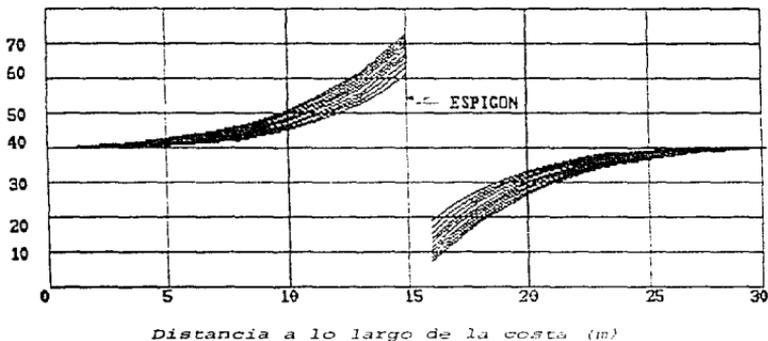


Fig. No. 4.12 Dibujo de los resultados de la evolución de la línea de playa con la presencia de un espigón.

CAPITULO V

DISEÑO DE ROMPEOLAS Y ESPIGONES

V. DISEÑO DE ROMPEOLAS Y ESPIGONES.

V.1 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 acolde del canal de navegación en la desembocadura de ríos, evitar la entrada de material a la obra de toma de plantas termeléctricas o nucleoeeléctricas 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, [6].

V.1.1 Diseño de la sección transversal de la estructura.

La estructura de elementos sueltos normalmente está formada por un faldón o delantal como base, núcleo, tapa 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. 5.1 y 5.2. La Fig. No. 5.1 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 o temporal de largo período de retorno. La Fig. No 5.2 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 (t)
W	Coraza	125 a 75
W/10 - W/15	Capa secundaria	125 a 75
W/200 - W/6000	Núcleo	170 a 30

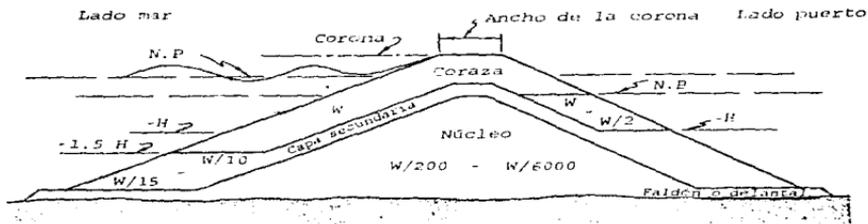


Fig. No. 5.1 Ejemplo de las dimensiones de una sección típica transversal en la que actúa el oleaje del lado exterior.

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

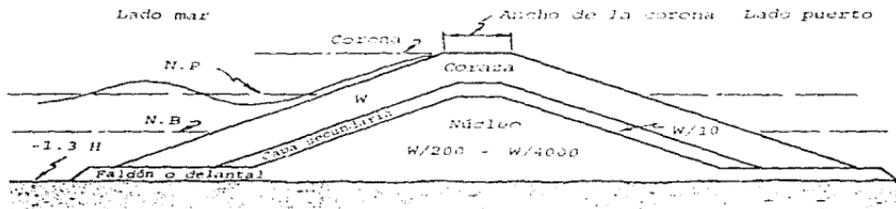


Fig. No. 5.2 Ejemplo de las dimensiones de una Sección típica transversal en la que actúa el oleaje de ambos lados.

V.1.2 *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.
- γ_r : Peso específico de los elementos de la coraza.
- S_r : Densidad de sólidos de los elementos sumergidos en el mar, es decir γ_r / γ_w .
- γ_w : Densidad del agua de mar, ($\gamma_w = 1.03 \text{ t/m}^3$)
- $\cot \alpha$: 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 y fué propuesta en 1959, la ec. 5.1 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 significante $H_{1/3}$. 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.1.3 *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_B , 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.1.4 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 estructura.
- 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 por ciento.

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 γ_r , S_r , H y W son iguales a los utilizados en la ec. 5.1. N_s es el número de estabilidad.

$$K_D = \frac{N_s^2}{\cot \alpha} \quad (5.2)$$

Donde:

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

TIPO DE ELEMENTO EN LA CORAZA	NUMERO DE CAPAS DE LA CORAZA	COLOCACION	VALOR DE K_p EN EL CUERPO			VALOR DE K_p EN EL MORRO			
			OLA ROMPIENTE	OLA NO ROMPIENTE	TALUD COT α	OLA ROMPIENTE	OLA NO ROMPIENTE	TALUD COT α	
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		2.9	3.2	1.5	
	2	AZAR	3.5	4.0		2.5	2.8	2.0	
						2.0	2.3	3.0	
RUGOSA Y ANGULAR	>3	AZAR	3.9	4.5		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		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	5.0	8.3	9.0	1.5	
						7.8	8.5	2.0	
	1	UNIFORME	12.0	15.0		7.0	7.7	3.0	
BOLOS	2	AZAR	22.0	25.0	2.0	7.5	9.5	1.5	
							3.0		
CUBO MODIFICADO	2	AZAR	6.8	7.8	1.5	15.0	16.5	2.0	
						13.5	15.0	3.0	
HEXAPODO	2	AZAR	8.2	9.5	5.0	----	5.0	1.5	
						5.0	7.0		
							3.0		

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

V.1.5 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:

$$B = \eta_B K_A \left(\frac{W}{W_r} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5.3)$$

Donde:

- B : Ancho de la corona (m.).
- η_B : Número de elementos. (se recomienda que el mínimo valor de η_B sea 3)
- K_A : 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/m³)

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, y de 1.5 por arriba del nivel de bajamar media inferior para obras ubicadas en el 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, como se indica en las Figs. No. 5.4 y 5.5.

V.1.6 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:

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

Donde:

- e_r : Espesor promedio de la capa secundaria o de la coraza (m.).
- η_r : Número de capas de los elementos de la capa secundaria o de la coraza. (Se da en la Tabla No. 5.2)
- K_A : Coeficiente de capa.
- W : Peso de cada elemento de la capa secundaria o de la coraza (ton.).
- W_r : Peso específico del material (ton/m³).

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

$$\frac{N_r}{A} = \eta_r K_A \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{W_r}{W} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.5)$$

Donde:

- N_r : Número de elementos necesarios en un área dada.
- A : Área de la superficie de la estructura (m²).
- P : Porosidad promedio de la coraza (en porciento).

V.1.7 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 5.1. 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. 5.2, H es la altura de ola de diseño.

Si 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. 5.1. El peso de la piedra de dicho apoyo será $W/10$, donde W es el peso de la piedra de la coraza.

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_p , coeficiente de capa K_A y porosidad promedio de la coraza P , obtenida de ensayos en modelos hidráulicos.

ELEMENTO DE CORAZA	n_p	COLOCACION	K_A	P (%)
ROCA DE CANTERA (LISA)	2	VOLTEO	1.03	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	45
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.1.8 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 siguiente tabla:

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

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

$$S_C = e_C * F_T * 2 + S_{CS} \quad (5.7)$$

Donde:

- e_r : Espesor de la coraza.
 S_{cs} : Sobreebancho de corona de la capa secundaria.

En las ecs. No. 5.6 y 5.7 el primer termino del segundo miembro de dichas ecuaciones se multiplica por 2, en virtud de que son dos lados de sobreebancho. Esta expresi3n ser1 v1lida siempre que el talud de la estructura sea el mismo en ambos lados, si no se cumple lo anterior, se deber1 calcular el sobreebancho con el factor correspondiente.

El ancho de corona as1 c1lculado, deber1 compararse con el resultado de la ec. 5.3, si el valor de la ec. 5.3 resulta mayor, se deber1 redise1nar la geometr1a de la estructura para el ancho de corona establecida en la ec. 5.3.

En la Fig. No. 5.3 se presenta el programa de c3mputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el dise1no de estructuras formadas con elementos sueltos, utilizando la metodolog1a descrita anteriormente.

```
10  CLS
20  'CALCULO DE ESTRUCTURAS CRITERIO DE HUDSON
30  PRINT "DISE1NO DE ESTRUCTURAS FORMADAS POR ELEMENTOS SUELTOS"
40  DEF FNREDO (A)
50  FIN = INT(A)
60  B = A - INT(A)
70  PASO = INT(B * 100)
80  PASO2 = INT((B * 100) - PASO) * 10)
90  IF PASO2 > 5 THEN
100 PASO = (PASO + 1) / 100
110 ELSE
120 PASO = PASO / 100
130 END IF
140 FNREDO = FIN + PASO
150 END DEF
160 OPEN "O", #1, "A:SALIDA.DAT"
170 INPUT "PEO ESPECIFICO DEL ELEMENTO DE LA CORAZA (Ton./m3)="; PS
180 INPUT "ALTURA DE CLA DE DISE1NO FRENTE A LA SECCION(H1/3m)="; H
190 GAMA = 1.03; PI = 3.141592
200 SS = PS / GAMA
210 PRINT "ANGULO CON RESPECTO A LA HORIZONTAL"
220 INPUT "SI LO TIENE EN GRADOS TECLEA 1, SI NO TECLEA 2"; I
230 IF I = 1 THEN 250
240 IF I = 2 THEN 280
250 INPUT "ANGULO EN GRADOS="; TETA
260 T = 1 / (TAN(TETA * PI / 180))
```

```

270 GOTO 330
280 PRINT "DAME LA RELACION DEL TALUD(HORIZONTAL , VERTICAL)"
290 INPUT "HORIZONTAL="; U
300 INPUT "VERTICAL="; V
310 T = U / V
320 TETA = ATN(T * 180 / PI)
330 INPUT "DAME EL VALOR DE Kd EN EL CUERPO="; KD
340 INPUT "DAME EL VALOR DE Kd EN EL MORRO="; KD1
350 W = ((PS * (H ^ 3)) / (KD * ((SS - 1) ^ 3 * T))) * 1000
360 W01 = ((PS * (H ^ 3)) / (KD1 * ((SS - 1) ^ 3 * T))) * 1000
370 'SECCION TRANSVERSAL DE UN ROMPEOLAS
380 WCS = W * 1.25; WCI = W * .75
390 W1 = W / 10; W2 = W / 15
400 W3 = W / 200; W4 = W / 6000
410 W11 = W01 / 10
420 W12 = W01 / 200; W13 = W01 / 4000
430 W5 = W / 15 + ((W / 10 - W / 15) / 2)
440 WMCS = W01 * 1.25; WMCI = W01 * .75
450 'CALCULO DE ESPESORES
460 INPUT "NUMERO DE ELEMENTOS (N)="; N
470 INPUT "COEFICIENTE DE CAPA (KA)="; KA
480 INPUT "POROSIDAD="; P1
490 E1 = N * KA * (((W / 1000) / PS) ^ (1 / 3))
500 E2 = N * KA * (((W5 / 1000) / PS) ^ (1 / 3))
510 EM1 = N * KA * (((W01 / 1000) / PS) ^ (1 / 3))
520 EM2 = N * KA * (((W11 / 1000) / PS) ^ (1 / 3))
530 INPUT "PROPON EL ANCHO DE LA CORONA DEL NUCLEO="; AN
540 PRINT "DAME EL VALOR DEL FACTOR DEBIDO AL TALUD"
550 INPUT "PARA EL CALCULO DE LOS SOBRECANCHOS="; FT
560 ACS = (E2 * FT * 2) + AN
570 AC = (E1 * FT * 2) + ACS
580 AMCS = (EM2 * FT * 2) + AN
590 AMC = (EM1 * FT * 2) + AMCS
600 'CALCULO DE ELEVACIONES
610 INPUT "DAME EL VALOR DEL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA="; NBM
620 ELN = 1.5 * NBM
630 TTA = ATN(FT / (SQ(1 - FT ^ 2)))
640 CACS = E2 * COS(TTA)
650 CAC = E1 * COS(TTA)
660 CAM1 = EM2 * COS(TTA)
670 CAM2 = EM1 * COS(TTA)
680 ELCS = ELN + CACS
690 ELC = ELCS + CAC
700 ELMCS = ELN + CAM1
710 ELMC = ELMCS + CAM2
720 CLS
730 PRINT #1, "DISEÑO PARA EL CUERPO DEL ROMPEOLAS"
740 PRINT #1,
750 PRINT #1, "PESO DE LOS ELEMENTOS DE LA CORAZA"
760 PRINT #1, "DE"; FNREDO(WCS); "a"; FNREDO(WCI); "Kg"
770 PRINT #1, "PESO DE LOS ELEMENTOS DE LA CAPA SECUNDARIA"
780 PRINT #1, "DE"; FNREDO(W1); "a"; FNREDO(W2); "Kg"

```

```

790 PRINT #1, "PESO DE LOS ELEMENTOS DEL NUCLEO"
800 PRINT #1, "DE"; FNREDO (W3); "a"; FNREDO (W4); "Kg"
810 PRINT #1, "ESPESOR DE LA CORAZA =" ; FNREDO (E1)
820 PRINT #1, "ESPESOR DE LA CAPA SECUNDARIA =" ; FNREDO (E2)
830 PRINT #1, "ANCHO DE LA CORONA DEL NUCLEO =" ; FNREDO (AN)
840 PRINT #1, "ANCHO DE LA CORONA DE LA CAPA SECUNDARIA =" ; FNREDO (ACS)
850 PRINT #1, "ANCHO DE LA CORONA DE LA CORAZA =" ; FNREDO (AC)
860 PRINT #1, "ELEVACION DEL NUCLEO=" ; FNREDO (ELN)
870 PRINT #1, "ELEVACION DE LA CAPA SECUNDARIA=" ; FNREDO (ELCS)
880 PRINT #1, "ELEVACION DE LA CORAZA=" ; FNREDO (ELC)
890 PRINT #1,
900 PRINT #1, "DISEÑO PARA EL MORRO DEL ROMPEOLAS"
910 PRINT #1,
920 PRINT #1, "PESO DE LOS ELEMENTOS DE LA CORAZA"
930 PRINT #1, "DE"; FNREDO (WMCS); "a"; FNREDO (WMC1); "Kg"
940 PRINT #1, "PESO DE LOS ELEMENTOS DE LA CAPA SECUNDARIA"
950 PRINT #1, "DE"; FNREDO (W11); "Kg"
960 PRINT #1, "PESO DE LOS ELEMENTOS DEL NUCLEO"
970 PRINT #1, "DE"; FNREDO (W12); "a"; FNREDO (W13); "Kg"
980 PRINT #1, "ESPESOR DE LA CORAZA =" ; FNREDO (EM1)
990 PRINT #1, "ESPESOR DE LA CAPA SECUNDARIA =" ; FNREDO (EM2)
1000 PRINT #1, "ANCHO DE LA CORONA DEL NUCLEO =" ; FNREDO (AN)
1010 PRINT #1, "ANCHO DE LA CORONA DE LA CAPA SECUNDARIA =" ; FNREDO (AMCS)
1020 PRINT #1, "ANCHO DE LA CORONA DE LA CORAZA =" ; FNREDO (AMC)
1030 PRINT #1, "ELEVACION DEL NUCLEO=" ; FNREDO (ELN)
1040 PRINT #1, "ELEVACION DE LA CAPA SECUNDARIA=" ; FNREDO (ELMCS)
1050 PRINT #1, "ELEVACION DE LA CORAZA=" ; FNREDO (ELMC)
1060 CLOSE #1
1070 END

```

Fig. No. 5.3 Programa en lenguaje BASIC para el diseño de estructuras formadas con elementos sueltos.

V.1.9 Comentarios:

La variable KD , es el valor del coeficiente de estabilidad que se obtiene de la Tabla No. 5.1. Las variables N , K_A y P_1 , corresponden al número de capas de los elementos de la coraza n_r , al coeficiente de capa K_3 y a la porosidad promedio de la coraza P respectivamente, y se obtienen de la Tabla No. 5.2.

V.1.10 Ejemplo de aplicación.

Diseñar la sección transversal de un rompeolas de enrocamiento con el programa desarrollado, con las condiciones indicadas a continuación:

- a) Profundidad de desplante 11.0 m.
 b) Altura de ola de diseño $H_{1/3} = 3.80$ m.
 c) $\cotg \alpha = 2$ (talud del rompeolas)
 d) $\gamma_r = 2.6 \text{ ton/m}^3$, $\gamma_w = 1.03 \text{ ton/m}^3$
 e) $K_D = 2.8$ (Morro), $K_D = 4.0$ (Cuerpo)
 f) Condición de ola no rompiente.
 g) Elemento de coraza: Roca de cantera (rugosa), colocada al azar.
 h) El nivel de bajamar media es de -0.3 m.

SOLUCION:

El diseño de la sección transversal para el cuerpo y el morro del rompeolas se presentan en las Tablas No. 5.4 y 5.5 respectivamente, y los dibujos de las secciones anteriores se presentan en la Figs. No. 5.4 y 5.5.

PESO DE LOS ELEMENTOS (Kg):	
CORAZA	De 6294.44 a 3776.66
CAPA SECUNDARIA	De 503.55 a 335.7
NUCLEO	De 25.18 a 0.84
ESPESOR (m):	
CORAZA	2.87
CAPA SECUNDARIA	1.25
ANCHO DE LA CORONA (m):	
CORAZA	5.44
CAPA SECUNDARIA	4.39
NUCLEO	3.5
ELEVACION (m):	
CORAZA	5.2
CAPA SECUNDARIA	2.42
NUCLEO	1.2

Tabla No. 5.4 Diseño de la sección transversal del rompeolas para el (cuerpo).

PESO DE LOS ELEMENTOS (Kg):	
CORAZA	De 8992.05 a 5395.23
CAPA SECUNDARIA	De 719.36
NUCLEO	De 35.97 a 1.8
ESPESOR (m):	
CORAZA	3.23
CAPA SECUNDARIA	1.5
ANCHO DE LA CORONA (m):	
CORAZA	5.73
CAPA SECUNDARIA	4.21
NUCLEO	3.5
ELEVACION (m):	
CORAZA	5.79
CAPA SECUNDARIA	2.66
NUCLEO	1.2

Tabla No. 5.5 Diseño de la sección transversal del rompeolas para el (morro).

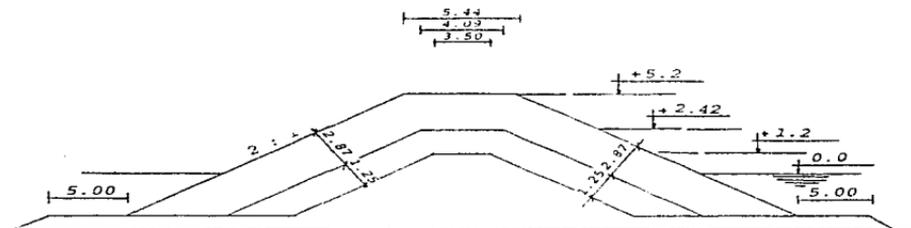


Fig. No. 5.4 Sección transversal del cuerpo del rompeolas.

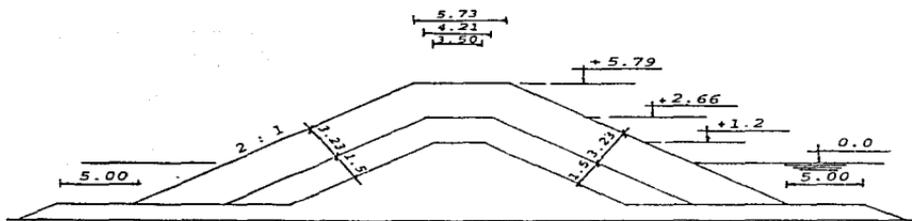


Fig. No. 5.5 Sección transversal del morro del rompeolas.

CAPITULO VI

ESTABILIDAD DE ACCESOS COSTEROS

VI. ESTABILIDAD DE ACCESOS COSTEROS.

VI.1.1 INTRODUCCION.

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 [1].

VI.1.2 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 ésta 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.1.3 ESTABILIDAD HORIZONTAL O DE LOCALIZACION.

Un canal puede ser migratorio o ser estable, siendo la migración función de su edad. En el caso de albúferas, 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, aun más, la dimensión del área puede ser muy reducida siempre y cuando esté debidamente protegida.

En todos los casos hay que preveer 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.1.4 ESTABILIDAD VERTICAL O DE LA SECCION 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, examinemos 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.

FACTORES DE ESTABILIDAD.

Entre ellos, es básico para los análisis el prisma de marea

Q , que es el volúmen 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: defasamientos, 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:

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

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

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.
- θ = Angulo de fase.
- K = Coeficiente del llenado.

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

- $2H$ = Rango de la marea.
- T = Período de un ciclo de la marea.
- a = Área de la sección transversal del canal.
- A = Área del vaso.

- λ = 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 en el mar:

$$h_2 = \text{sen}(\theta - \zeta) \quad (6.3)$$

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:

$$z = h_2 - h_1$$

$$z = h_1 - h_2$$

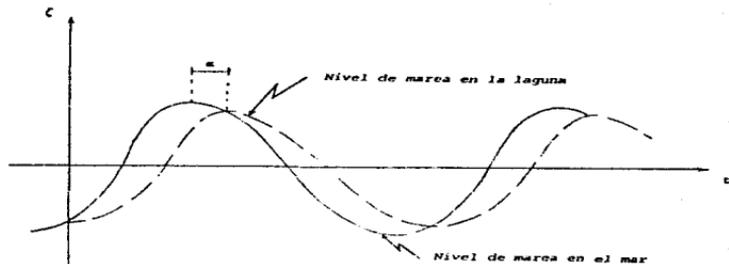


Fig. No. 6.1 Desfasamiento entre las curvas de marea del mar y de la laguna.

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 $z=0$. Esto sucede cuando $\theta = 0$ y $\zeta = \pi$.

$$h_2 = \text{sen } \zeta \quad (6.4)$$

Pero como:

$$\begin{aligned} h_1 &= z + h_2 \\ h_{1m} &= \text{sen } \zeta \end{aligned} \quad (6.5)$$

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

El valor de ζ es una función directa del coeficiente de llenado K . La pleamar en el mar se presenta para $\theta - \zeta = \pi/2$, 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, función de K .

Consecuentemente, la velocidad media máxima está dada por:

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

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 0.80.

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. así mismo, 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 τ .

La relación con τ 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 τ debe analizarse considerando ciertos valores específicos, como son:

- τ_0 Esfuerzo cortante crítico, valor para el cual el material del canal, representado por el D_{50} , empieza a moverse.
- τ_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	τ_s (Kg/m ²)
- 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^{1/2}/seg), el cual se calcula como sigue:

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

Q_m = Gastos máximos en mareas vivas.

VI.1.5 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 reflujo, 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:

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

$\frac{M}{Q} < 10 \text{ a } 20$ 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.1.6 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 $\frac{Q}{M} > 150 \text{ a } 200$, 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 τ_c ; este criterio se muestra en la Tabla No. 6.2.

	$\frac{Q}{M} > 600$	$150 < \frac{Q}{M} < 600$	$\frac{Q}{M} < 150$
τ_c (Kg/m ²)	0.45	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.

En la Fig. No. 6.2, se presenta el programa de cómputo desarrollado en Lenguaje BASIC, para el cálculo de la estabilidad de accesos costeros.

```

10  CLS
20  REM "PROGRAMA PARA EL CALCULO DE ESTABILIDAD DE ACCESOS"
30  INPUT "DAME EL VALOR DEL PERIODO DE MAREA": T
40  IF (T = 12.5) THEN PRINT "EL CALCULO DE LA ESTABILIDAD SE
REALIZARA CON PERIODO DE MAREA DIURNA": GOTO 60
50  IF (T = 25) THEN PRINT "EL CALCULO DE LA ESTABILIDAD SE
REALIZARA CON PERIODO DE MAREA SEMIDIURNA"
60  INPUT "DAME EL TRANSPORTE LITORAL NETO EN M3/AÑO": M
70  INPUT "DAME EL GASTO DE LA CORRIENTE DE MAREA MAXIMO
INSTANTANEO EN CICIGIAS EN M3/SEG.": QM
80  INPUT "DAME EL VALOR DE LA PROFUNDIDAD MEDIA DEL ACCESO EN
METROS": R
90  INPUT "DAME EL VALOR DE LA VELOCIDAD MAXIMA EN EL ACCESO EN
M/SEG.": VM
100 PRINT "DAME LA CONDICION DEL TRANSPORTE LITORAL DEL FONDO Y EN
SUSPENSION"
110 INPUT "SI ES CONSIDERABLE TECLEA 2, SI ES MEDIO TECLEA 1, SI
ES BAJO TECLEA 0": ECE
120 INPUT "DAME EL VALOR DEL ANGULO DE FASE EN HRS.": TT
130 INPUT "DAME EL TALUD PROPUESTO PARA EL CANAL DE ACCESO =": TA
140  CLS
150  IF (ECE = 2) THEN TACM = .5
160  GOTO 140
170  IF (ECE = 1) THEN TACM = .45
180  GOTO 140
190  IF (ECE = 0) THEN TACM = .35

```

```

200 PM = (QM * T + 3600) / (.8 * 3.141592)
210 C = SQRT(1030 * VM / TACM)
220 A = (QM / (C + SQRT(TAOM / 1030)))
230 E = PM / M
240 P = M / QM
250 IF (E > 300) GOTO 280
260 IF (150 < E AND E < 300) GOTO 290
270 IF (E < 150) GOTO 300
280 PRINT "EL ACCESO TIENE ALTO GRADO DE ESTABILIDAD": GOTO 310
290 PRINT "EL ACCESO TIENE UN GRADO DE ESTABILIDAD ACCEPTABLE":
GOTO 310
300 PRINT "EL ACCESO ES INESTABLE"
310 IF (P > 200) THEN GOTO 330
320 IF (P > 10 AND P <= 20) THEN GOTO 350
330 PRINT "EL PASO DEL MATERIAL PLAYERO ES POR BARRA"
340 GOTO 360
350 PRINT "EL PASO DEL MATERIAL PLAYERO ES POR CORRIENTE DE MAREA"
360 B = (A - (TA * R ^ 2)) / R
375 AF = (TT * 2 * 3.141592) / T
380 AFG = (AF * 180 / 3.141592)
390 PRINT "LAS CARACTERISTICAS DE LA SECCION ESTABLE SON"
400 PRINT "AREA DE LA SECCION ="; A
410 PRINT "ANCHO DEL CANAL DE ACCESO ="; B
420 PRINT "PROFUNDIDAD DEL CANAL ="; R
430 PRINT "TALUD DEL CANAL ="; TA
440 PRINT "PRISMA DE MAREA ="; PM
450 PRINT "ANGULO DE FASE ="; TT; "hrs"; AFG; "grados"
460 PRINT "PERIODO DE MAREA ="; T
470 PRINT "TRANSPORTE LITORAL ="; M
480 END

```

Fig. No. 6.2 Programa en lenguaje BASIC, para el cálculo de estabilidad de accesos costeros.

VI.1.7 Comentarios:

Las unidades del periodo de marea debe especificarse en segundos y las del transporte litoral neto en $m^3/año$. La variable ECE en el programa, corresponde al valor del esfuerzo cortante de estabilidad que se obtiene de la Tabla No. 6.1.

VI.1.8 Ejemplo de aplicación:

Analizar la estabilidad de un acceso costero y definir las

dimensiones de la sección transversal estable del mismo, se cuenta con los siguientes datos:

Período de marea = 12.5 hr.

Gasto máximo de la marea = 650 m³/seg.

Velocidad máxima por marea = 1.10 m/seg.

Transporte litoral neto anual M = 13,000 m³/año.

Profundidad media = 5 m

Talud del canal = 4

Angulo de fase = 3.0 hr.

SOLUCION:

Los resultados obtenidos con el programa desarrollado son:

El acceso tiene: ALTO GRADO DE ESTABILIDAD.

El paso del material es por: CORRIENTE DE MAREA.

Las características de la sección estable son:

AREA = 619.75 m².

ANCHO DE PLANTILLA = 103.95 m.

PROFUNDIDAD = 5.0 m.

PRISMA DE MAREA = 1.1638 E7

ANGULO DE FASE = 3 hr. = 86.4°

PERIODO DE MAREA = 12.5 hr.

TRANSPORTE LITORAL = 13,000 m³/año.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

VII.- CONCLUSIONES.

Las siguientes conclusiones pueden ser extraídas de lo expuesto en el presente trabajo.

- 1.- Para la aplicación en casos específicos de los modelos numéricos presentados en este trabajo, resulta necesario contar con información de campo a fin de calibrar dichos modelos, para considerar válidos los resultados que de ellos se obtengan.
- 2.- Los modelos numéricos presentados son bastante flexibles, toda vez que su formulación se puede adecuar de acuerdo a las necesidades del usuario, pues en cada uno de ellos se presenta la teoría y el algoritmo utilizado para la formulación numérica de cada uno de ellos.
- 3.- Con los modelos numéricos presentados se pueden estudiar varios problemas relacionados con los fenómenos del oleaje, corrientes litorales, transporte litoral, estabilidad de bocas, entre otros, y su aplicación es bastante accesible a cualquier usuario con conocimientos básicos de Hidráulica, Ingeniería de Costas y Programación de Computadoras.
- 4.- El empleo de los modelos numéricos presentados puede ajustarse a los recursos económicos y computacionales disponibles por los usuarios.
- 5.- De conformidad con lo señalado en los puntos anteriores, se puede establecer que los objetivos planteados en este trabajo se cumplieron.
- 6.- Con objeto de mostrar los datos de entrada necesarios para la operación de los modelos numéricos presentados, así como los resultados correspondientes, se realizaron varios ejemplos para tal fin.
- 7.- Los modelos numéricos presentados se pueden considerar como una herramienta bastante útil para la solución de problemas de Ingeniería de Costas.

- 8.- Se recomienda concentrar mayores esfuerzos para desarrollar modelos numéricos capaces de simular algunos otros fenómenos marítimos no estudiados en el presente trabajo.
- 9.- Se recomienda verificar la validez de los modelos numéricos presentados, mediante la comparación de resultados obtenidos con medidas de campo o de medidas realizadas en modelos hidráulicos.

R E F E R E N C I A S .

- [1] AGUILAR, A.J. BOYER, O.J., SEMPERE, R.R. (1977): *Ingeniería de Ríos y Costas. Ed. Arte y Fotografía, S.A.*
- [2] COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. (1984): *Shore protection, manual, U.S army corps. of engrs., U.S Govt. printing office, Vols. 1 y 2.*
- [3] COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD. (1983): *Manual de diseño de obras civiles. Sección Hidrotécnica, vol. Hidráulica Marítima.*
- [4] FRIAS, V.A. MORENO, C.G. (1986): *Ingeniería de Costas. Ed. Limusa.*
- [5] HORIKAWA, K. (1978) : *Coastal Engineering an introduction to ocean engineering. University of Tokyo press.*
- [6] MADRID, M.de O.R. (1988) : *Diseño de rompecolas de piedra. Texto preparado para el curso internacional de capacitación en hidráulica portuaria, Ed. Dirección General de Obras Marítimas y Agencia de Cooperación Internacional del Japón. México, D.F.*
- [7] MONTOYA, R.J.M. (1988) : *Movimiento de arena. Texto preparado para el curso internacional de capacitación en hidráulica portuaria, Ed. Dirección General de Obras Marítimas y Agencia de Cooperación Internacional del Japón. México, D.F.*
- [8] MONTOYA, R.J.M. (1996) : *Efectos del esfuerzo radial en la generación de corrientes litorales. Tesis de Maestro en Ciencias con especialidad en Hidráulica, I.P.N.*

[9] SATO, S. (1985):

Características generales de las ondas progresivas regulares. Texto para el proyecto del centro hidráulico portuario de México, Vol. 1. Ed. Dirección General de Obras Marítimas y Agencia de Cooperación Internacional del Japón. México, D.F.