



24
27
Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

CRITERIOS DE EVALUACION DEL
TRANSPORTE LITORAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

MA. DEL PILAR S. CAMARILLO ESTRADA



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

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-262 T.E.

SRITA. MA. DEL PILAR S. CAMARILLO ESTRADA,
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Profr. Ing. Antonio Moreno Gómez, para que lo desarrolle como tesis para su Examen Profesional de la carrera de Ingeniero CIVIL.

"CRITERIOS DE EVALUACION DEL TRANSPORTE LITORAL"

1. Proceso litoral.
2. Criterios prácticos de cuantificación en campo.
3. Criterios empíricos.
4. Aplicación.
5. Conclusiones.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Coordinación de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, 30 de junio de 1982
EL DIRECTOR

ING. JAVIER JIMENEZ ESPINO

I. PROCESO LITORAL.

I.PROCESO LITORAL

Las playas estan constantemente en movimiento, lentamente cambia su configuración y su posición, grano por grano hasta grandes masas de arena. En pequeña escala y en cuestión de horas, los castillos de arena desaparecen y las huellas son borradas; a gran escala, después de días y meses la altura de la arena alrededor de un testigo físico, como puede ser una roca, cambia.

Estas modificaciones litorales, debidas al movimiento de las olas y corrientes son producto del Transporte Litoral.

El Transporte Litoral es un fenómeno difícil de determinar, aún cuando existen diversos métodos para su cuantificación, pero todos son poco confiables; pues se basan en modelos de fondo móvil con el inconveniente de que es muy difícil reproducir las condiciones naturales de un sitio. También se basan en expresiones matemáticas, las cuales estan realizadas por medio de observaciones y correlaciones para algún sitio determinado u otro que se asemeje. Otra forma de cuantificar el Transporte, es por medio de los métodos de campo que tambien son poco confiables.

En la realización de todos estos métodos, las consideraciones empleadas son muy similares. En este trabajo y específicamente en este capítulo, se analizaran estas consideraciones con las cuales se realiza el Transporte Litoral.

El movimiento del sedimento hacia la costa se estudia en dos zonas: Onshore, que es la más próxima a la costa dentro de la zona de rompientes y la más alejada denominada Offshore. (Fig. I.1).

En la zona onshore, existen movimientos transversales y longitudinales a lo largo de la costa, y en la offshore el movimiento es sólo transversal.

Otro tipo de movimiento, es el del sedimento hacia el mar; generado por las corrientes de retorno, tiene sentido transversal y se extiende a lo largo de las dos zonas.

1) Movimiento hacia la costa en la zona Onshore.

Cuando el oleaje avanza de tal forma que las olas son paralelas a la batimetría de la costa, se produce un movimiento transversal cuyo resultado es la formación del perfil de la playa dependiendo de las características del oleaje. De esta manera, si el oleaje es de fondo; origina un perfil de Swell y si el oleaje es de temporal; se forma un perfil de Sea.

1.a) Perfil de Sea.

Cuando sopla viento sobre un área oceánica, en una dirección más o menos constante y durante un cierto periodo de tiempo, se generan olas. Esta área oceánica recibe el nombre de Fetch. Así, cuando las olas se mueven dentro del fetch y por lo consiguiente en pleno periodo de formación, se denominan olas

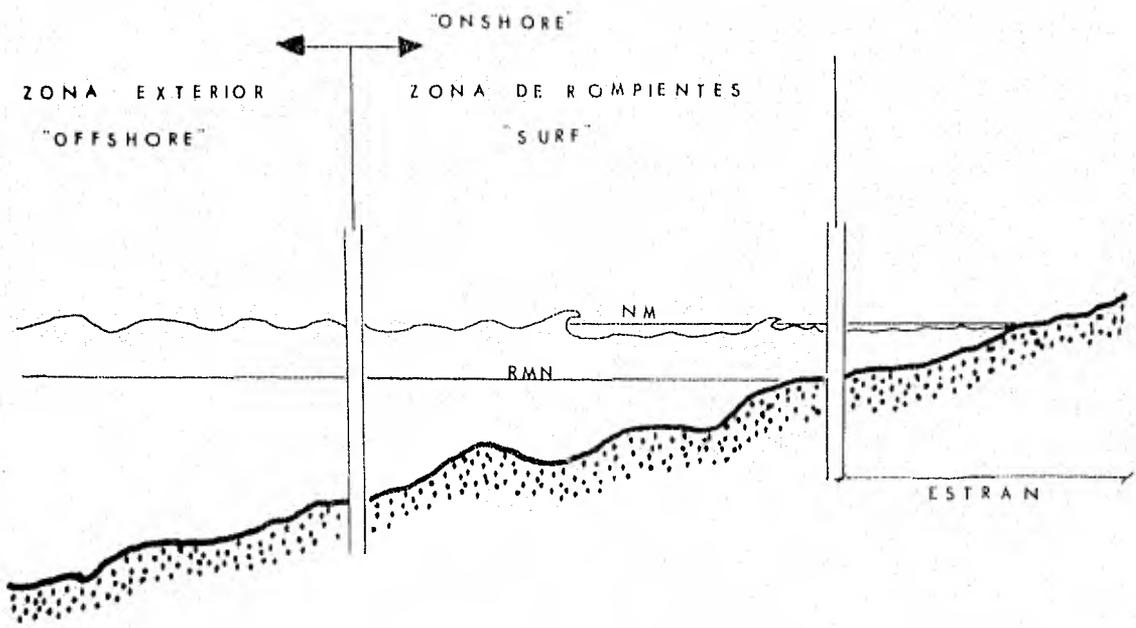


FIG. 1.1

de temporal. Para que dichas olas alcancen la línea costera, se necesita la proximidad a casi adyacencia del fetch a la costa.

Cuando un fetch está adyacente a la costa, llegan olas de temporal que se componen de muchos trenes de ola, como las olas son más grandes, se tiene mayor volumen y por lo consiguiente se lanza más agua en la ruptura, por lo que la arena de la superficie pronto está saturada. En estas condiciones, el nivel frático casi coincide con la superficie, por lo que la filtración resulta imposible. En este caso, el volumen de agua de retorno, iguala al del flujo de subida, con lo que las velocidades de retorno aumentan, formándose una turbulencia mayor cuando ésta se encuentra con el siguiente seno. Con esto, se producen en las costas grandes fuerzas erosivas en el sedimento cercano a la base de la playa que está casi en suspensión debido a la corriente de agua freática de retorno al mar. (Fig. 1.2).

El agua que es arrojada dentro de la playa, debe regresar al mar con el sedimento; cuando a cierta profundidad, su velocidad se reduce suficientemente, se origina un depósito, dando como resultado una barra de arena a cierta distancia de la costa. Si dicha barra es lo necesariamente grande, las siguientes olas rompen contra ella debido a la poca profundidad y a la contracorriente que también actúa contra ella. Esta barra costera preserva a la costa de la futura erosión, ya que sólo olas rotas y disipadas pueden llegar a la retrocedida línea de playa.

(Fig. 1.3).

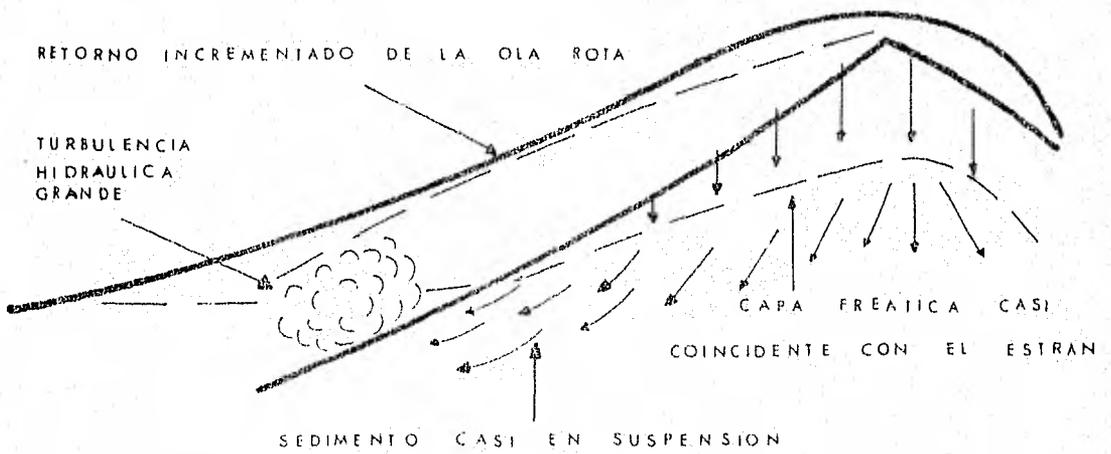


FIG. 1,2

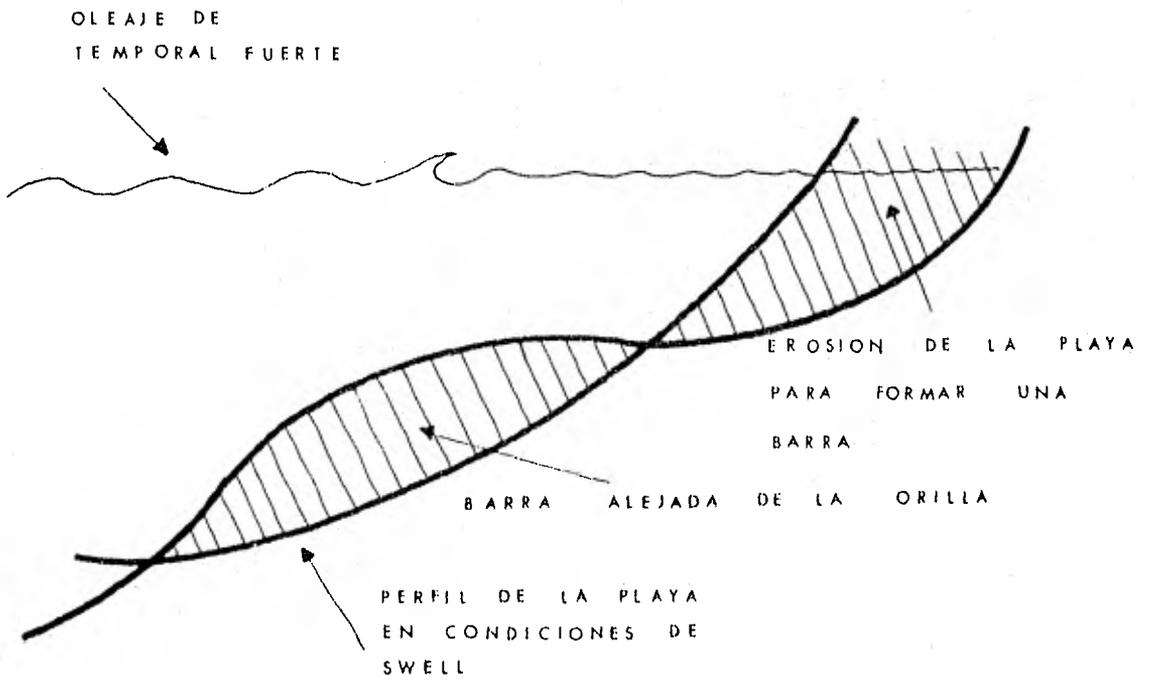


FIG. 1.3

1.b) Perfil de Swell.

Con este término se denomina a las olas que abandonan el fetch de generación y se propagan a través de áreas del océano con poco o ningún viento favorable. El área sobre la que se mueven es conocida como área de extinción, pues las olas se van atenuando según viajan a través del océano.

A medida que las olas se aproximan a la playa, al llegar a una distancia de la línea de la costa donde la profundidad es aproximadamente la mitad de la longitud de la ola, el sedimento del suelo oceánico se agita, originando que el transporte de masa impulse a las partículas agitadas a la costa.

En la subida del sedimento y agua, una vez rebasada la zona de rompientes, parte de esta agua empapa la arena de la playa, filtrándose una parte, y la restante regresa al mar. El volumen y la velocidad de esta contracorriente superficial es menor que la del flujo de subida, por lo que mucha de la arena suspendida se sedimenta en la playa produciendo un crecimiento y por lo tanto una pendiente empinada. (Fig. 1.4).

Mientras el oleaje en Swell persiste sobre la playa, existe un tiempo suficiente entre ola y ola para que se produzca la filtración de una gran parte del agua de remonte y así tenga lugar el crecimiento antes mencionado.

En este movimiento, los granos mayores han sido lanzados a lo más alto de la playa y el material fino tiende a depositarse en la zona de rompientes y el más fino más atrás. Cada sedimento

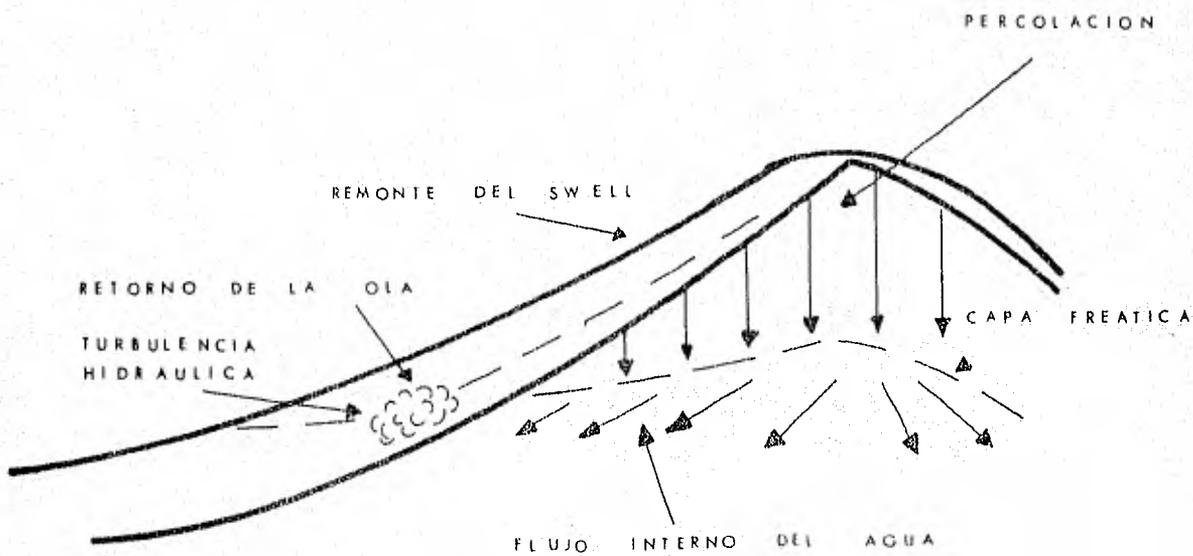


FIG. 1.4

tiene su propia pendiente de equilibrio para ciertas características de una ola dada. Mientras mayor sea el tamaño del grano más empinada será la pendiente.

Por lo que respecta a la formación de perfiles, ya que es en esta zona, onshore, y debido al movimiento transversal donde se originan, Per Bruun, de acuerdo con los ensayos de laboratorio que realizó, obtuvo las siguientes reglas de clasificación de perfiles.

1. Las olas con altos peraltes, producen un perfil con barra. (Fig. 1.5).

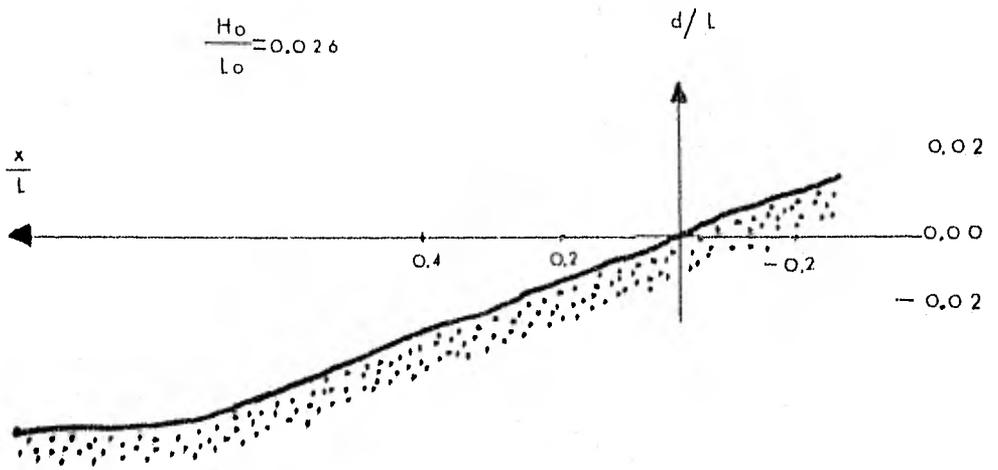
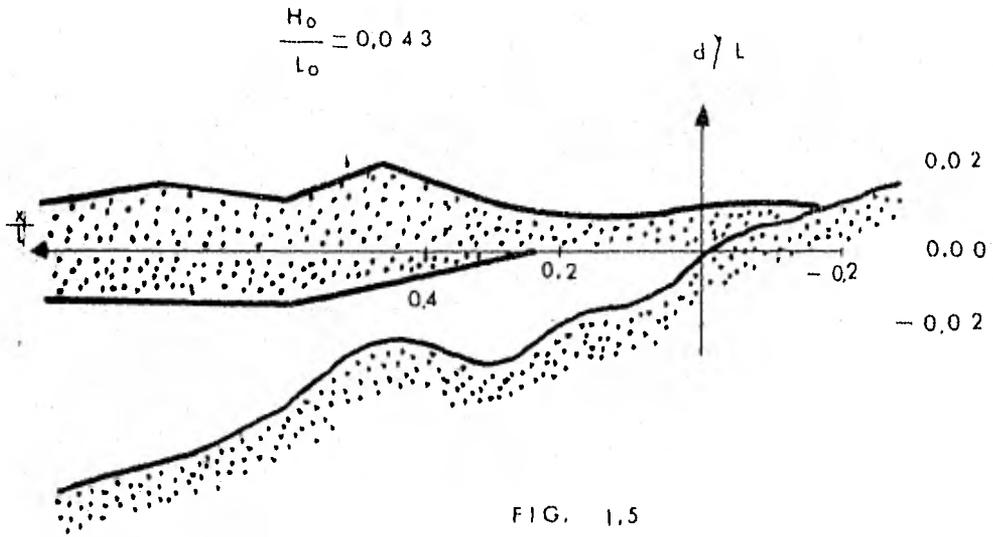
Las olas con bajos peraltes, producen un perfil rígido. (Figs. 1.6.a y b).

2. Las olas con altos peraltes erosionan la playa, las de bajo peralte producen acumulación.

3. Las olas muy peraltadas se denominan olas de invierno y forman el perfil de temporal o de invierno. Las poco peraltadas son las que forman el perfil de verano. El perfil intermedio se produce para valores próximos a $H_o/L_o = 0.026$. (Fig. 1.7).

4. Bruun, considera dos tipos de transporte; el transporte de playa, debido a la subida y bajada del oleaje, y el transporte en suspensión en la zona de rompientes.

5. En los perfiles de equilibrio de temporal, el transporte es principalmente de material en suspensión. En los per-



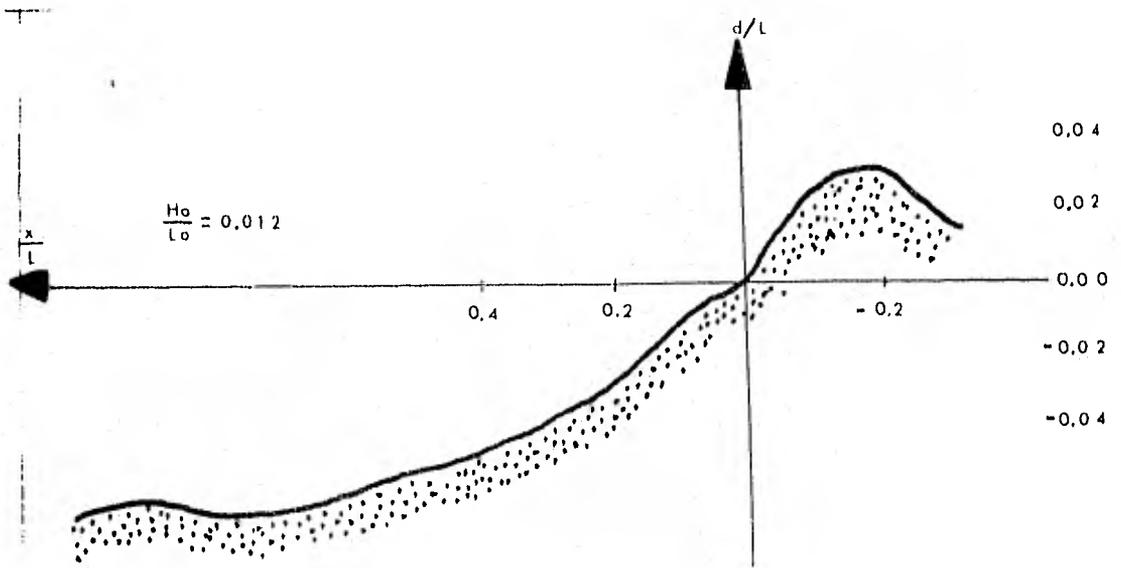


FIG. 1,6a

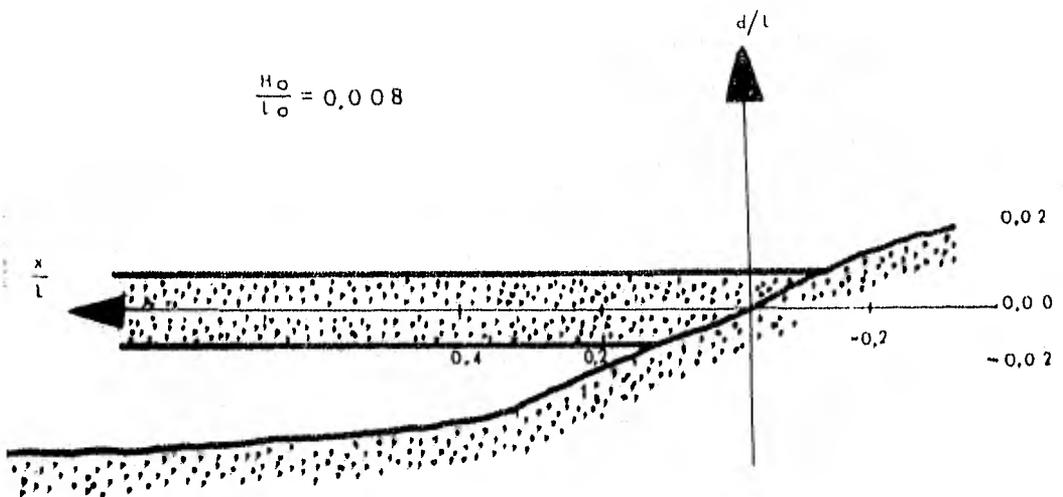


FIG. 1,6b

files de equilibrio de Swell, el transporte principal es de playa.

La transición entre ambos transportes sucede igualmente para $H_0/L_0 = 0.026$.

6. El transporte a lo largo de los perfiles de verano es mucho mayor que en los de invierno para la misma energía. El máximo de transporte ocurre para peraltes comprendidos entre 0.02 y 0.025 y es casi todo del tipo de transporte de playa.
7. El transporte decrece muy rápidamente para peraltes menores que 0.02.
8. El transporte aumenta con un incremento de la energía.

Existen varias expresiones analíticas de estos perfiles de playas. Per Bruun, por consideraciones de orden energético, llegó a la conclusión de que el perfil podía ser reducido a la expresión:

$$y^{3/2} = p x$$

Siendo x , y , los valores de un punto de la superficie del agua a la línea de playa y al fondo respectivamente, y p un parámetro deducido a partir del propio perfil.

Suponiendo que la pérdida de energía es debida sólo al rozamiento por el fondo y que esta pérdida es constante por unidad

de área, Per Bruun llegó a la expresión:

$$y^{3/2} = p \frac{x}{T^{2/3}}$$

Otro tipo de movimiento de sedimento que se presenta en la zona onshore es el longitudinal, es más importante que el transversal para los problemas portuarios. Este movimiento se presenta cuando las olas alcanzan las costas oblicuamente adoptando las siguientes formas de transporte:

a) En zig-zag, es provocado por la subida "run-up" de las olas en la dirección correspondiente con el ángulo de ruptura, y regresa según la línea de mayor pendiente de la playa.

(Fig. I.8).

b) Otra forma de transporte, tiene lugar en la zona comprendida entre la línea de rompientes y la playa, se origina por la acción de la componente paralela a la playa de la energía del oleaje. Esta corriente tiene gran capacidad de transporte ya que se forma en una zona fuertemente turbulenta, debido a la ruptura, y es en esta zona donde existen abundantes sedimentos en suspensión, susceptibles de ser transportados por corrientes de una velocidad incluso más baja que la velocidad requerida para transportar estos sedimentos.

c) Iribarren, demostró que al producirse la ruptura de la ola, se crea una sobreelevación respecto al nivel del mar. Si esto coincide con una diferencia de abrigo producida por la difrac

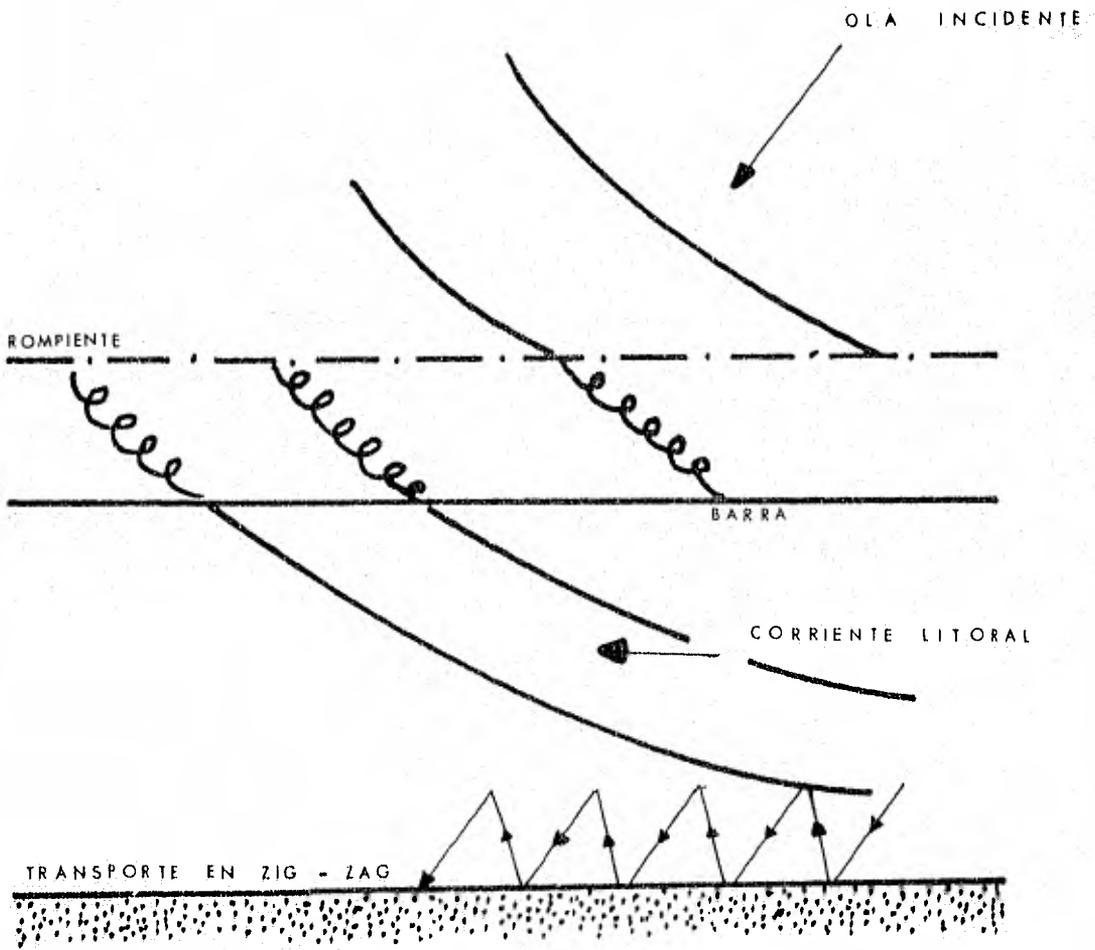


FIG. 1,8

ción, se provocará una corriente real, que junto con la incidencia oblicua, dan origen al transporte longitudinal a la costa.

2) Movimiento hacia la costa en la zona Offshore.

Esta zona abarca desde la zona de rompientes hasta una distancia en que la superficie del fondo deja de ser agitada por la acción de la ola. Con lo que su anchura varía según las características de las olas que se aproximan a la costa.

Aquí, en esta zona, se origina un movimiento oscilatorio que provoca el levantamiento del sedimento del fondo debido a que las partículas de agua cercanas al lecho marino oscilan hacia atrás y hacia adelante a medida que las olas se van propagando, y, cuando este movimiento se invierte, se forma un remolino que agita el movimiento en suspensión, asentándose éste para después ser levantado de nuevo por la acción de la siguiente ola.

Se ha llegado a la conclusión que el inicio del movimiento del sedimento puede realizarse por: arrastre, rodamiento, salto y suspensión. (Fig. 1.9).

En cuanto a la determinación de las velocidades críticas, que dan origen al movimiento, y basándose en la clasificación del tamaño de los granos, varios investigadores encontraron la siguiente relación:

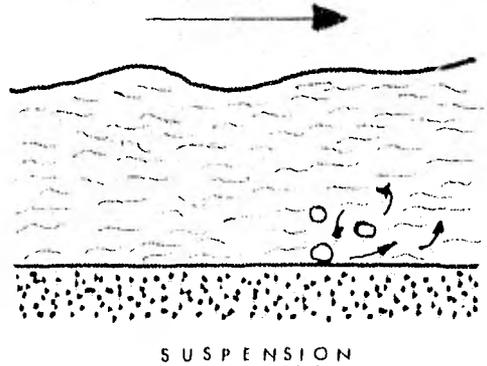
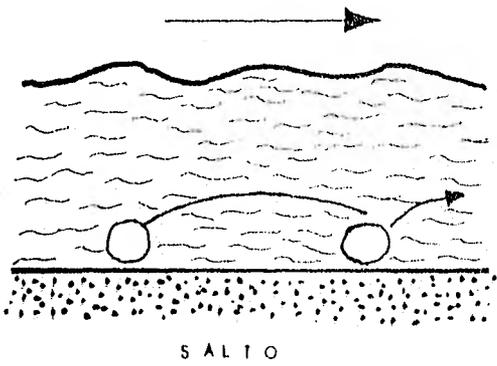
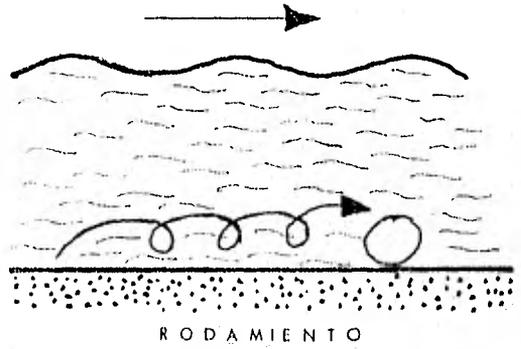
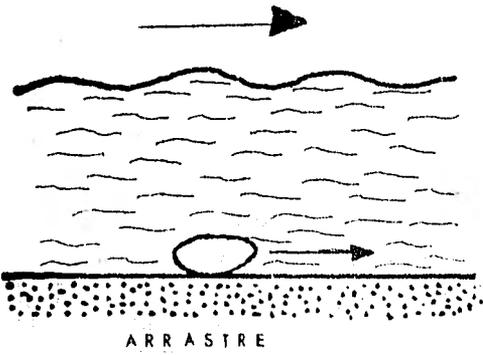


FIG. 1.9

Velocidades críticas (cm/seg) de
inicio de movimiento.

Diámetro de los granos (mm)

| | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Penck. | 4.5 | 6.3 | 9.0 | 11.0 | 12.7 | 14.2 | 20.0 | 24.4 | 28.3 |
| Eagleson. | 6.9 | 9.7 | 13.7 | 16.8 | 19.4 | 21.7 | 30.6 | 37.4 | 43.4 |
| Larras. | 5.2 | 6.2 | 8.9 | 11.1 | 13.4 | 15.6 | 23.6 | 27.8 | 31.5 |
| Bagnold. | 11.1 | 15.2 | 20.5 | 24.4 | 27.7 | 30.5 | 41.2 | 49.0 | 55.5 |
| Gungyaev. | 4.7 | 7.5 | 10.4 | 12.7 | 14.5 | 16.0 | 23.0 | 28.0 | 32.0 |
| Volkov. | --- | 8.0 | 10.2 | 12.8 | 15.3 | 17.3 | 25.2 | 29.8 | --- |
| Goddet. | --- | 27.2 | 32.3 | 35.8 | --- | --- | --- | --- | --- |

De este movimiento se origina la formación de rizados "ripples" en el lecho sedimentario, cuyo conjunto se orienta paralelamente a las crestas de las olas. Estos ripples originan una mayor turbulencia del agua que tiende a mantener el sedimento en suspensión durante un período más largo en cada oscilación.

La corriente principal que produce el movimiento de la zona offshore se denomina transporte de masa. Este transporte de masa varía según la profundidad del agua y las distintas características de la ola. Se ha demostrado, experimental y matemáticamente, que en el lecho y en la dirección de propagación de la ola, se produce una fuerte velocidad de transporte de masa, siendo más

fuerte para las menores relaciones de la profundidad a la longitud de onda. Por lo que, para una profundidad dada, será más intensa con olas de largo período, y para un tren de ola específico aumentará según disminuya la profundidad. (Fig. I.10).

3) Corrientes de retorno.

El agua que es lanzada sobre el estrán; zona que se cubre y descubre con el vaivén de las olas y variación de mareas, retorna al mar, esta restitución se realiza por una corriente celular de eje horizontal, denominada de resaca. (Fig. I.11). O bien por una circulación de eje vertical (en planta), que llega a la línea de rompientes por ciertos canales de desagüe, situados entre sí a cierta distancia a lo largo de la playa, formando unas corrientes denominadas "rip-currents". (Fig. I.12).

C.J. Sonu, afirma que los fenómenos de circulación de rip-currents están fuertemente influenciados por la batimetría, que junto con las características del oleaje, producen el mecanismo de conducción. (I.13.a y b).

4) Movimiento transversal por elevación del nivel del mar.

Bruun, afirma que el transporte transversal a largo plazo, es causado principalmente por la elevación del nivel del mar. Esta elevación parece poco importante, pero si se piensa en la es-

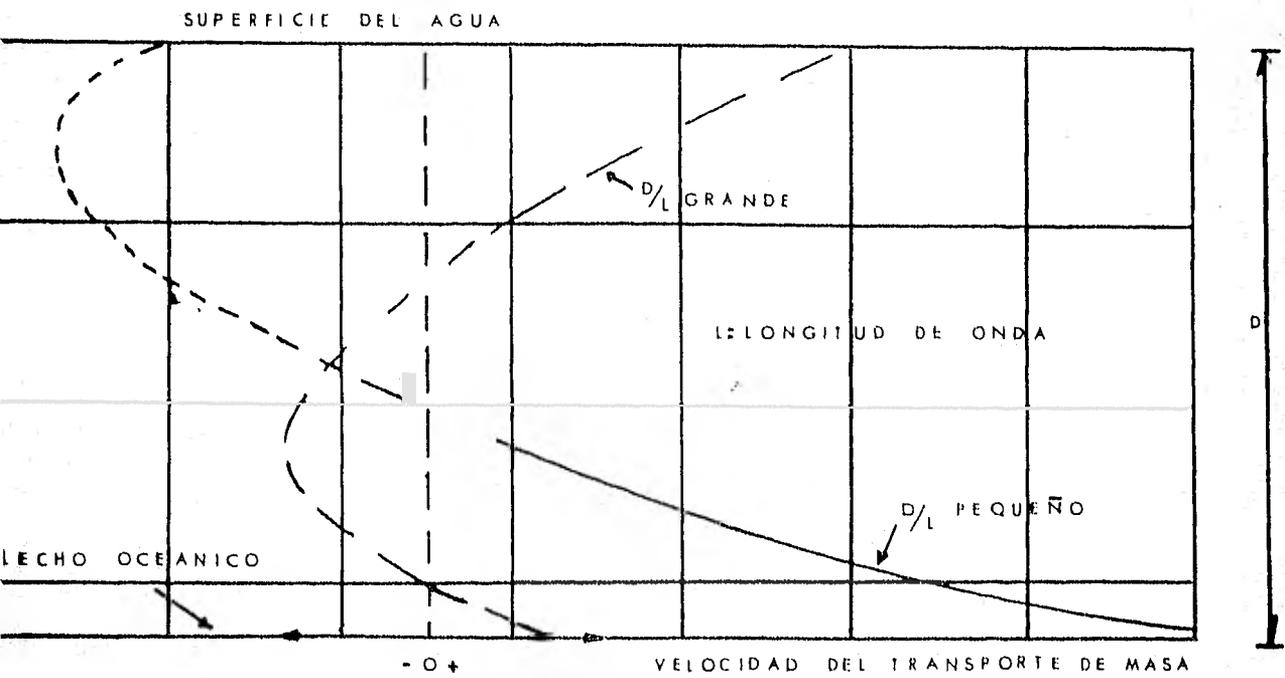
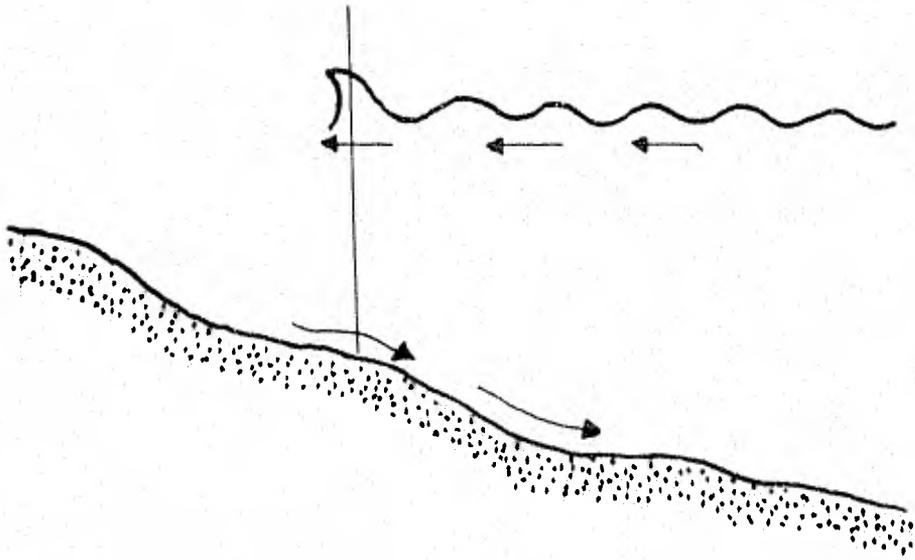


FIG. 1.10



CORRIENTES DE RESACA

FIG. 1.11

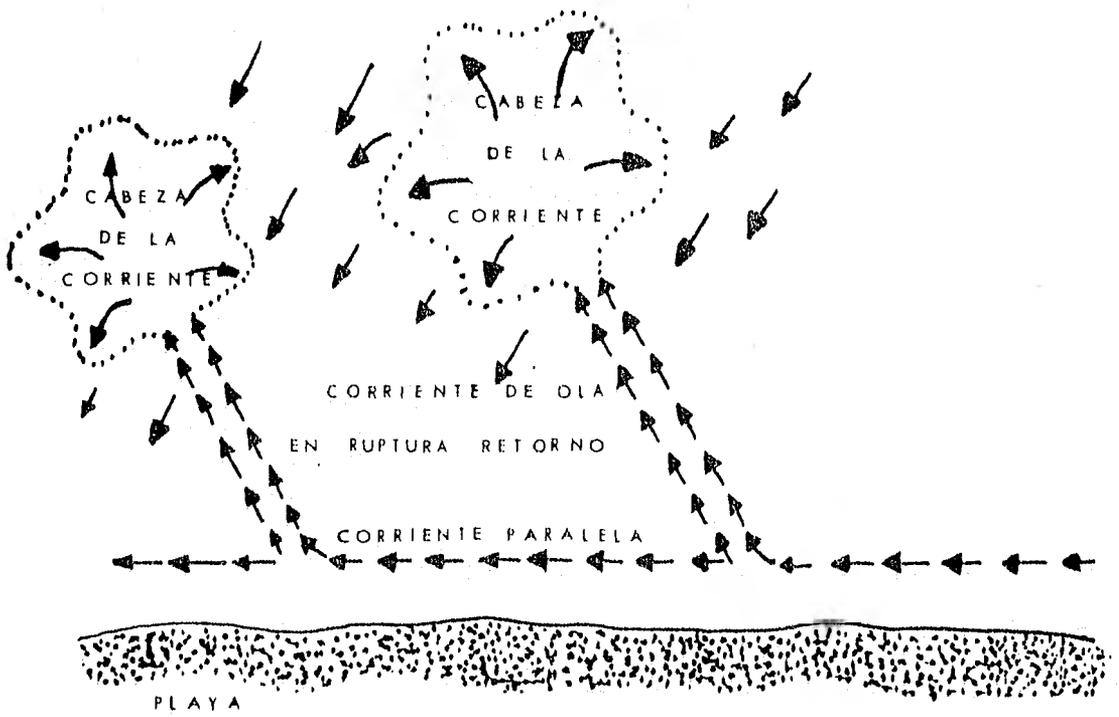


FIG. 1.12

CIRCULACION EN PLANTA DE "RIP-CURRENTS"

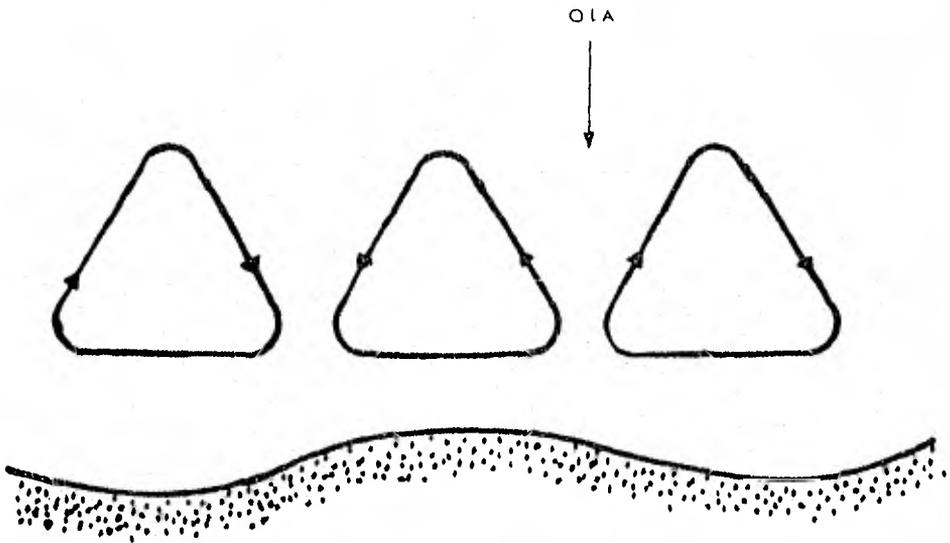


FIG 113a

CIRCULACION BAJO INCIDENCIA NORMAL DEL OLAJE

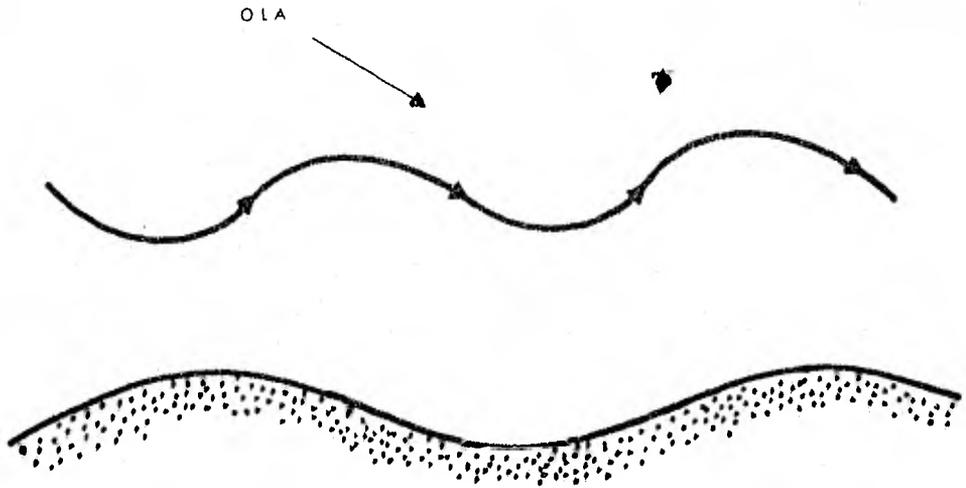


FIG 113b

ONDULACIONES BAJO INCIDENCIA OBLICUA DEL OLAJE

trechez de la playa, comparada con el área del mar que ha de ser alimentada por la erosión de la playa, a fin de equilibrar la su bida del nivel del mar con un aumento equivalente de los depósitos de material en el fondo, se comprende que una subida media de 3 mm por año puede causar regresiones en la línea costera de 0.60 a 1.50 m.

Características de los materiales de las playas.

Es frecuente que el material de la zona en estudio provenga de varias fuentes, por lo que se requiere inspeccionar un área más extensa que dicha zona. También el análisis mineralógico de las muestras obtenidas en ese lugar, comparado con las muestras de las posibles fuentes, puede ser un índice de la influencia en la formación del acarreo litoral. De aquí que también es importante considerar las características de los materiales costeros.

Es necesario un estudio de los materiales localizados en la zona, con el fin de conocer su distribución de tamaños, los mate riales pesados y sus relaciones granulométricas en función de las pendientes de las playas y magnitud del oleaje que reciben.

Existen cinco zonas en las que es preciso analizar los mate riales: en la zona seca de la playa, en el estrán, en la zona de rompientes, en la zona con profundidad del orden de 5 m. y en la zona con profundidad del orden de los 10 m. Dependiendo de la configuración de la zona en estudio, se realizarán los secciona-

mientos para los muestreos. Especificando que: cuando la configuración es muy irregular, las separaciones serán menores que si no lo fuera.

La siguiente tabla muestra la clasificación de tamaños:

| Nombre | Tamaño de los granos (Diámetros) |
|--------------|--|
| Guijarros | Más de 3" (Más de 76 mm) |
| Grava gruesa | 3/4" a 3" (19 mm a 76 mm) |
| Grava fina | Malla No. 4 a 3/4" (4.76 mm a 19 mm) |
| Arena gruesa | Malla 10 a malla 4 (2 mm a 4.76 mm) |
| Arena media | Malla 40 a malla 10 (0.42 mm a 2.0 mm) |
| Arena fina | Malla 200 a malla 40 (0.074 mm a 0.42mm) |
| Arcilla | Menos de la malla 200 (menos de 0.074mm) |

Una vez establecidos los porcentajes relativos en pesos para cada tamaño por medio de la curva de porcentaje retenido acumulado se establecen: el primer cuarto Q_1 , el tercer cuarto Q_3 y el medio D_m . El 25 % en peso de la muestra tiene granos con diámetros mayores que el diámetro del tercer cuarto (Q_3). El diámetro medio es el punto en el cual el 50 % en peso de los granos de la muestra tiene un diámetro mayor y el 50 % un diámetro menor.

Existen tres valores característicos, de los cuales si se comparan con valores análogos de otras muestras se pueden obtener conclusiones importantes: Diámetro medio (ya antes explicado). Coeficiente de clasificación (S_ϕ): indica la manera en

que se distribuye el material de la muestra según su tamaño, mediante la relación:

$$S \phi = \sqrt{Q_1/Q_3}$$

El tercero es el coeficiente de asimetría ($S \alpha$) y determina el grado de asimetría de los tamaños de los granos de la muestra, representados por la curva acumulativa y con respecto al diámetro medio (D_m).

$$S \alpha = \frac{Q_1 - Q_3}{D_m^2}$$

$S \alpha$, está determinado por la oblicuidad en el transporte de las arenas.

Si $S \alpha$ y $S \phi$ son pequeños, indican homogeneidad en los materiales respecto al de sus alrededores.

Si $S \phi$ es grande y $S \alpha$ pequeño, indican gran variabilidad de tamaños.

Si $S \phi$ es pequeño y $S \alpha$ grande, indican: aparte de gran variabilidad de tamaños, la existencia de una zona de abastecimiento dominante.

Si $S \phi$ y $S \alpha$ son grandes, implica que el proceso de sedimentación está completamente desajustado con respecto a su medio.

Cuando no es muy específica la fuente de abastecimiento,

los análisis mineralógicos pueden ayudar, comparando el contenido mineral de las posibles fuentes; por medio de la cuantificación del contenido de minerales pesados (densidad mayor de 2.85) así como también la identificación de minerales y de la frecuencia con que se presentan: expresándose esta clasificación en porcentajes por peso.

Un incremento en el por ciento de cierto material, no siempre significa la existencia de una nueva aportación, pues también puede significar que otro material disminuya su aportación, ya que la suma es 100 %.

II. CRITERIOS PRACTICOS DE CUANTIFICACION EN CAMPO.

II. CRITERIOS PRACTICOS DE CUANTIFICACION EN CAMPO.

Debido a la importancia en el diseño de las obras maríti--
mas, se busca la mejor forma de evaluación del Transporte Lito--
ral. En su determinación, tanto cualitativa como cuantitativa--
mente se han realizado varios intentos en campo. En el aspecto
cuantitativo se han hecho pruebas por medio de evaluaciones de
la cantidad de material atrapado por barreras naturales o arti--
ficiales a lo largo de la costa. Para estudios cualitativos se
puede mencionar a los trazadores radioactivos, trazadores a ba--
se de minerales naturales y trazadores fluorescentes.

Con estos métodos se pueden realizar comparaciones con los
resultados de las fórmulas empíricas existentes y conocer su
rango de aplicación en el sitio; cuando los resultados varían
demasiado, se puede corregir dichas expresiones mediante coefi--
cientes o exponentes, así como también desarrollar una nueva ex--
presión.

Otro de los objetivos de estos métodos es completar la ca--
libración de un modelo físico o de uno matemático que represen--
ten la zona en estudio. Por último, en un ciclo completo de me--
diciones se puede obtener la distribución de gastos sólidos,
gráficas con curvas de igual concentración de material en sus--
pensión y curvas de igual velocidad de corriente a lo largo de
un perfil perpendicular a la costa.

Por lo que respecta a los trazadores, tienen utilidad prin

principalmente en la localización de trayectorias que sigue la arena y cuantificación del arrastre litoral. En la localización de trayectorias se han empleado en bocas de lagunas costeras, entradas de puertos, desembocaduras de ríos; donde interesa conocer de dónde viene el sedimento, por dónde pasa y en dónde se deposita.

Los métodos prácticos de cuantificación de acarreo litoral que se analizarán en este trabajo son:

1. Método de trazadores fluorescentes.
2. Método de trazadores radioactivos.
3. Método de espigones de prueba.

1. METODO DE TRAZADORES FLUORESCENTES.

Este método se basa en el rastreo de arenas fácilmente identificables, las cuales se depositan previamente en un lugar clave. La técnica con material fluorescente presenta grandes ventajas, dentro de las cuales se pueden citar:

- a) Arena, gravas y cantos rodados, procedentes del lugar en estudio, pueden ser marcados fácilmente.
- b) La mayoría de los colorantes empleados no presentan problemas legales o peligro para la salud.
- c) Pueden emplearse diferentes colores para hacer pruebas sucesivas en el mismo sitio o para diferenciar el movimiento de granos de diferentes tamaños.
- d) El costo en el mercado es bajo.
- e) El marcado puede hacerse en cualquier parte, incluso desarrollarse en la playa.
- f) El tiempo de marcado es corto.
- g) Las arenas a marcar, generalmente no necesitan una preparación previa, más que secarlas.
- h) La sensibilidad de esta técnica es de un grano fluorescente por cada 1×10^6 granos sin marcar, lo que es equivalente al método de trazadores radioactivos.
- i) El colorante no afecta las características hidrodinámicas del grano.

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO Y CAMPO.

El material trazador es el aspecto más importante en la evaluación del Transporte Litoral por medio de trazadores fluorescentes. Se han realizado varios intentos para producirlos, tanto artificiales como naturales.

Por lo que se refiere a las características de los materiales fluorescentes, Teleki, describe a los trazadores fluorescentes como partículas clásticas con substancias orgánicas o inorgánicas, las cuales al excitarse con un rayo ultravioleta de una longitud de onda de $3\ 650\ \overset{\circ}{\text{A}}$ a $2\ 537\ \overset{\circ}{\text{A}}$, emiten fluorescencia en la región visible del espectro.

También es importante que el material que se va a emplear tenga las mismas características físicas del material del sitio en estudio con el que se va a mezclar, y deben ser fácilmente identificables; como mínimo que se distinga uno de entre 1×10^6 de granos sin marcar.

TIPOS DE RESINAS Y COLORANTES.

Existen por lo menos 100 colorantes en el mercado mundial que fluorescen en solución líquida, así como resinas que se pueden usar con este fin. Teleki, también desarrolló una selección de los productos que poseen las mejores características para emplearse con este método.

TEÑIDO DE LAS ARENAS.

En base a las resinas disponibles en el mercado, se busca una fórmula adecuada para establecer las proporciones de mezcla do. De esta manera se marcan las arenas y se someten a varias pruebas de laboratorio para determinar las características de la capa formada. Estas pruebas son:

- 1) Determinación del espesor de la capa de recubrimiento, por medio de granulometrías determinadas a través del tubo de sedimentación de Emery.
- 2) Observación en el microscopio petrográfico.
- 3) Exposición de las arenas a fuerzas capaces de distribuir las.
- 4) Resistencia a la abrasión y a la solubilidad.

PROCEDIMIENTO EN EL RECUBRIMIENTO.

Primeramente se toma una cantidad de arena de diferentes puntos localizados a lo largo del perfil de playa, para posteriormente dejarlo secar al sol sobre tiras de plástico. Una vez seca, se toman 10 Kg. y se depositan en una tinaja y se vacían 2.4 lts. de pintura rebajada en una proporción de una parte de pintura por tres de aguarrás. Se revuelve con las manos hasta que todos los granos están pintados y se secan nuevamente al sol sobre tiras de plástico. Esta operación se repite

por dos días. Seca la pintura, la arena marcada se pasa por un tamiz, con el fin de separar la conchilla y los grumos que se formaron durante el pintado. Por último se pesan 10 Kg. del material y se empacan en bolsas de plástico para proceder a la inyección.

INYECCION DE LAS ARENAS FLUORESCENTES.

Dentro de los métodos de inyección de material se pueden mencionar: el empleo de bolsas de plástico solubles en el agua, o simplemente desparramar el material sobre una zona dada en el estrán o por medio de aparatos utilizados en inyección de material radioactivo.

Debe considerarse que el material no se colocará a gran altura de la superficie del lecho, pues se pondría en suspensión y sería transportado a una velocidad anormal hasta que alcanzara a sedimentarse.

METODOS DE MUESTREO.

Existen varios métodos, de los cuales se pueden citar las dragas Petersen, rastras, observación directa de la superficie de la playa con la lámpara de rayos ultravioleta, toma de muestras con un volumen constante como pequeños cilindros de metal que penetran en la arena a una profundidad dada o por medio de

un sistema de tarjetas cubiertas con vaselina sólida; dichas tarjetas se sujetan por medio de ligas a un muestreador que consta de una base colocada a una estaca y que funciona presionándolo sobre la superficie de la arena, quedando así impreso sobre la tarjeta un área constante de una muestra de material.

TOMA DE MUESTRAS

Generalmente se requieren 4 personas para llevar a cabo el método de tarjetas impresas con vaselina: uno prepara el muestreador, cambiando las placas untadas con vaselina y colocando las impresas en un tablero, otro maneja el tablero, otro carga el tablero hacia las estaciones o puntos donde se realizará la toma de muestras y el último maneja la cuerda para localizar los puntos de muestreo.

Una vez impresas las placas, se reemplazan del tablero por unas nuevas para fijarse en el muestreador. La primera recolección de muestras o ciclo, se empieza aproximadamente una hora después de haber hecho la inyección, el segundo ciclo se realiza también una hora después y así sucesivamente. El tiempo entre ciclo y ciclo es empleado para marcar y engrasar las tarjetas.

Es importante para la realización de los métodos de cuantificación en campo, conocer las condiciones oceanográficas, meteorológicas, topográficas y sedimentológicas de la zona en estudio; como perfiles de playa, medida de corrientes, oleaje, vientos y

ranulometrías, ya que en el caso de los trazadores se debe interpretar adecuadamente el resultado de la trayectoria de estos.

DISPERSION DEL MATERIAL TRAZADOR.

ANALISIS DE LAS MUESTRAS.

El conteo de los granos fluorescentes se puede realizar por medio de una lámpara de rayos ultravioleta, un contador manual y un vidrio reticulado. Este procedimiento consiste en seguir ciertas condiciones para su mejor desarrollo. Estas condiciones son:

- a) Conservar durante el análisis una total oscuridad, con el fin de poder distinguir la más mínima intensidad en la fluorescencia procedente de los granos más pequeños.
- 2) Mantener un sistema en el orden de conteo, ya que es común contar o dejar de contar algunos granos durante el análisis.
- 3) Usar lentes de protección para evitar quemaduras en los ojos por efecto de los rayos ultravioleta.
- 4) Hacer una estimación del área impresa, para posteriormente convertir la cantidad contada, a la cantidad correspondiente para el área total de la placa.
- 5) En caso de tener grandes concentraciones de granos en la placa, se toma un área representativa de ésta y se cuen-

tan los granos ahí existentes.

ELABORACION DE LOS PLANOS DE DISPERSION.

Ya que se obtuvieron las cantidades de concentración de granos por decímetro cuadrado, es necesario compensar estos valores, convirtiéndolos al valor correspondiente para un tiempo estandar.

Esto es necesario, considerando que el tiempo transcurrido a partir de la inyección, para el momento de obtener la muestra en cada una de las estaciones, no es el mismo. Por lo que se tiene que compensar el valor original por la cantidad de granos que se supone debería de haber para un tiempo escogido arbitrariamente.

Para lograr esto, se multiplica el valor original de la cantidad de granos obtenidos en un decímetro cuadrado, por un factor que representa el valor obtenido de dividir el tiempo transcurrido desde la inyección al momento de tomar la muestra, o sea;

$$\frac{T_s}{T_a} G_a = G_c$$

De donde:

T_s = Tiempo estandar escogido arbitrariamente.

T_a = Tiempo transcurrido hasta que la muestra se colectó.

G_a = Valor de la concentración de granos fluorescentes por dm^2 .

G_c = Concentración compensada.

Ingle, describe una forma de analizar el comportamiento del material trazador después de ser inyectado. Afirma que después de haber soltado el material fluorescente, se espera recobrar solamente algunas partículas para sólo unos sitios adelante de la fuente, y solamente para algunos casos en el tiempo; así, la localización en el espacio y tiempo del gran porcentaje de granos soltados, deberá ser deducido a partir de la relativa concentración absoluta determinada. También indica que, después de la inyección, se establece un gradiente en la concentración del material trazador a partir de la línea fuente, la dilución de los granos trazadores con el material natural será tal, como para evitar la detención de las partículas marcadas.

MOVIMIENTO DEL MATERIAL TRAZADOR A TRAVES DEL PERFIL DE PLAYA.

Ingle, llegó a la conclusión de que: la mayoría de los granos fluorescentes soltados en una playa de perfil regular, obser

van una fuerte tendencia a moverse hacia fuera de la costa, a lo largo de patrones casi paralelos con la línea de rompientes hasta alcanzar la zona de rompientes. Una vez alcanzada esta zona, los granos de arena son transportados dentro de la rompiente, longitudinalmente.

EFECTO EN LA VARIACION DE LA CORRIENTE LONGITUDINAL Y OLEAJE.

Ingle, encontró que generalmente una velocidad máxima de la corriente longitudinal mayor de 30.4 cms/seg., afecta significativamente la dirección del trazador, mientras que las corrientes bajo esta velocidad no tenían o tenían un pequeño efecto en la dirección de éste. Así bajo condiciones de una corriente longitudinal ligera, el movimiento del material es principalmente perpendicular a la costa. Este movimiento de material es entonces gobernado por el flujo de agua que va de la costa hacia afuera, asociado con el oleaje que rompe, las ondas de translación formadas y la corriente de resaca; junto con el efecto de gravedad.

CUANTIFICACION DEL ACARREO LITORAL A PARTIR DE PLANOS DE DISPERSION.

Ingle, enfatiza que la diferencia que existe entre estimar

el Transporte Litoral por medio de ecuaciones empíricas, aplicables a la mecánica de transporte de sedimentos en forma de flujo unidireccional y, al transporte real existente en una playa; para lo cual enumera tres analogías realizadas por Einstein:

- 1) Aunque las zonas de mayor Transporte Litoral (zona de rompiente y zona de derrame), pueden ser vagamente consideradas como flujo canalizado, la anchura del canal cambia diariamente, así como la zona de rompiente avanza y retrocede a través de la playa en respuesta a las mareas.
- 2) La mayoría de los perfiles de playa son sigmoidales más que cóncavos; el perfil sigmoidal junto con el movimiento de agua hacia fuera de la costa, crea un área irregular de flujo.
- 3) La naturaleza variable del oleaje incidiendo en las costas, causa irregularidades en la velocidad y dirección del flujo de material; inclusive, la dirección de la corriente longitudinal puede ser invertida.

De esta manera, mientras no existan instrumentos capaces de definir cuantitativamente un ambiente playero, los intentos para cuantificar el Transporte Litoral, serán relativos.

PROPORCIONES DE GASTO DEL MATERIAL TRAZADOR.

Para poder cuantificar el Transporte Litoral por medio de trazadores fluorescentes, es necesario obtener ciertos parámetros; que en conjunto determinarán la cantidad de material en tránsito durante la prueba. El primero de éstos, es la cantidad de gasto sólido; el cual indica en que proporción, el material trazador, abandona la zona de muestreo, expresado en por ciento del total de material soltado por minuto.

Primeramente hay que cuantificar la cantidad de granos contenidos en el material inyectado. Para esto, se recurre a una relación empleada en Mecánica de Suelos, para conocer el volumen total que produce cierta cantidad de arena a partir de los vacíos producidos por la irregularidad de los granos, considerando el grado de compactación y clasificación, o sea:

$$V_t = V_v + V_s$$

y

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

De donde:

V_t = volumen total

V_v = volumen producido por los vacíos

V_s = volumen producido por sólidos

n = factor que relaciona el grado de compactación y clasificación.

Conociendo el volumen que producen los sólidos en un volumen dado de material, y el diámetro medio de los granos, se está en posibilidad de conocer la cantidad de granos existentes en la inyección.

Una vez calculada la cantidad de granos soltados, se desarrollan análisis planimétricos para cada gráfica de dispersión elaborada. Para esto, se mide el área comprendida entre cada isopleta y se multiplica por el valor de la isopleta menor inmediata.

De esta manera, se obtiene el número aproximado de granos trazadores que permanecen entre las isopletas dadas. Sumando el total de granos contenidos entre cada isopleta, se establece el número de granos que existe dentro de la zona de muestreo, para el tiempo que la gráfica indique.

Con estos datos se está en posibilidad de conocer el valor

de flujo de material para cada prueba. Si se subtrae de la can-
tidad de granos soltados, el valor obtenido de la cantidad de gra-
nos que permanecen dentro de la zona de muestreo y se divide el
resultado por el tiempo que indica la gráfica, se conocerá el nú-
mero aproximado de granos que dejan la zona por minuto. Es conve-
niente expresar estos valores de gasto en por cientos de total de
material que permanece dentro de la zona de muestreo para cual-
quier tiempo.

ESTIMACION DE LA VELOCIDAD PROMEDIO DE LOS GRANOS TRAZADORES

Para estar en posibilidad de calcular la velocidad promedio
representativa de los granos, fue necesario determinar la distan-
cia que viajaron los granos antes de salir de la zona de muestreo.

Esto se puede obtener, midiendo directamente de la gráfica
de dispersión, la longitud de la trayectoria predominante que des-
cribió el material trazador. Esta distancia se determina para ca-
da gráfica construida en cada prueba. Al promedio de estos valo-
res, se les denominó la distancia promedio de viaje.

Con el valor de la distancia promedio de viaje, convirtiendo
las proporciones promedio de "gasto de equilibrio", a granos por
minuto, y conociendo el número de granos soltados; se está en po-
sibilidad de calcular la velocidad de los granos. Para sacar una
media de la velocidad promedio de los granos, se determina el 50
percentil de la velocidad del total de los granos. La expresión

para calcular una estimación de la velocidad promedio de los granos es la empleada por Ingle y relaciona lo anteriormente descrito:

$$\frac{(G)^{1/2}}{D^E} = t_{50}$$

De donde:

G = Cantidad total de granos soltados.

De = Proporción de gasto promedio en equilibrio (granos por minuto).

t_{50} = Tiempo para la mitad de los granos soltados, en dejar la zona de muestreo. (minutos).

Para estimar la velocidad promedio de los granos en "equilibrio", se emplea la siguiente expresión:

$$\frac{\tau}{t_{50}} = \bar{U}_g$$

De donde:

τ = Distancia promedio de viaje de los granos (metros).

\bar{U}_g = Velocidad promedio de los granos (m/min).

PROFUNDIDAD DE LA CAPA MOVIL.

De los tres parámetros necesarios para determinar la cantidad de Transporte Litoral, éste es el que menos se conoce. El espesor depende principalmente de la energía del oleaje y del peso del grano.

Usando la velocidad promedio de los granos, derivada de la curva de gesto trazador y la cantidad anual de depositación en algunos espigones, Ingle, logró determinar una relación directa con el diámetro medio de los granos de la playa y el espesor promedio de la capa móvil. Para esto, tomó en consideración valores de Transporte Litoral anual, determinado por la depositación medida en tres espigones; el promedio anual de la velocidad de los granos, el promedio anual del ancho de playa y una constante arbitraria de longitud de playa de 1 mt.; que relacionados con la expresión:

$$U_{ga} \cdot A \cdot B = Q_i$$

Se obtiene:

$$B = 100 \frac{Q_i}{U_{ga} \cdot A}$$

De donde:

U_{ga} = Promedio anual de la velocidad de los granos.

A = Unidad anual promedio de transporte (promedio anual de anchura de playa X 1 mt).

B = Profundidad de la capa móvil (cm).

Q_i = Promedio anual de Transporte Litoral (m^3 / día).

CALCULO DE LA CANTIDAD DE TRANSPORTE LITORAL.

Para poder calcular una unidad de volumen de arena transportada en una playa, se hizo uso del ancho de la playa, la profundidad estimada de la capa móvil y una constante de longitud de playa de 1 mt., que se relacionan de la siguiente forma:

$$V = K \cdot W \cdot B$$

De donde:

K = Constante de la longitud de playa de 1 mt.

W = Anchura de playa.

B = Espesor de la capa móvil.

V = Unidad de volumen de arena transportada (m^3).

Finalmente, con la unidad de volumen de arena transportada, se sustituye en la expresión anterior para obtener una expresión

final y propia de cada sitio para determinar así el Transporte Litoral.

2. METODO DE TRAZADORES RADIOACTIVOS.

Este método consiste en irradiar arena natural, o bien, agregarle a ésta, material radioactivo identificable, por medio de contadores Gaiger. Los elementos radioactivos más usados son los isótopos 198/199 de oro, con una energía de rayos gamma de 0.4 mev, con vida media de tres días.

DESCRIPCION DE UN MUESTREO.

En el fondo del mar se hace una inyección puntual de material radioactivo; un cierto tiempo después, se efectúa un muestreo en la zona con un contador de actividad radioactiva, que completada en su ubicación con base en el apoyo terrestre, permiten obtener curvas de isoconteo las que al dibujarse dan como resultado las llamadas nubes.

PRECAUCIONES QUE SE DEBEN TOMAR.

- 1) Limitar la cantidad de material radioactivo en el medio en que se va a trabajar, de tal forma que no exceda el límite máximo admisible de radiación.

- 2) Proteger cuidadosamente el material radioactivo en su manejo, transportación y colocación, para evitar cualquier derrame de dicho material.
- 3) Garantizar la seguridad del personal que interviene en el experimento, así como dotarlo del equipo indispensable de trabajo monitores portátiles de radiación, dosímetros individuales, ropa de protección adecuada, herramientas, equipo para instrumentos contaminados y de descontaminación (jabón, detergentes, cepillos suaves, etc.).

3. ESPIGONES DE PRUEBA.

Este método consiste en construir una barrera artificial (se acostumbra espigones perpendiculares a la costa), que impide el paso del material y en obtener batimetrías periódicas, una antes de construirlo, varias durante su construcción y varias durante la vida útil del espigón. (Fig. II.1).

Los espigones, aunque en el campo no se construyen completamente impermeables, se puede lograr que lo sean en un corto tiempo, ya que los orificios del espigón se obstruyen con los primeros granos de arena que llegan. La altura debe ser tal, que garantice que el material no pase por arriba de él, aún en tormen-

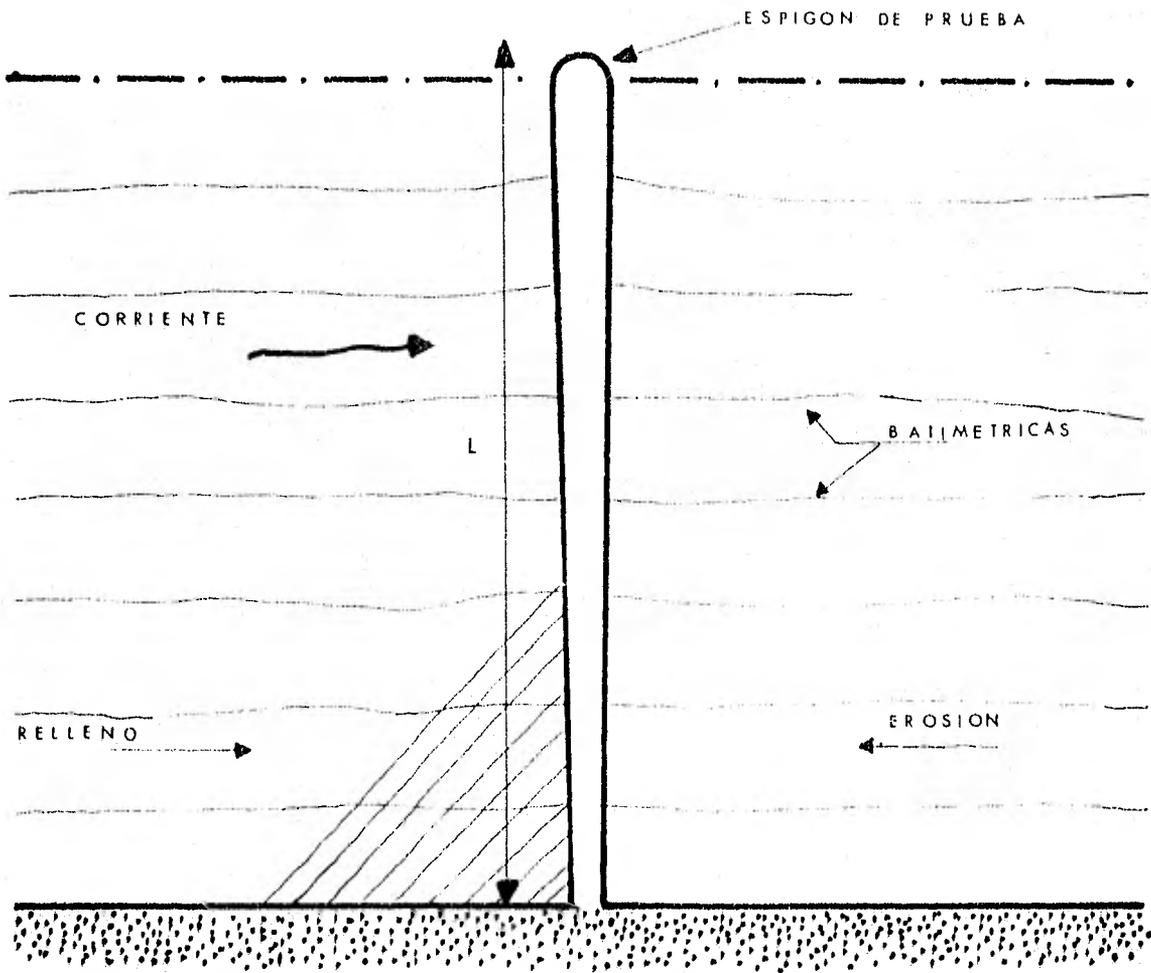


FIG. 11.1

tas. La longitud comprende tanto la línea de costa hacia mar adentro como hacia tierra, y con ella se debe garantizar que el material no pase por ninguno de sus extremos, la longitud hacia mar adentro debe abarcar toda la zona de rompientes y la longitud hacia tierra depende del tipo de costa.

La obtención de las batimetrías se hace generalmente del lado del espigón donde se acumula material, aunque en ocasiones, se hace en ambos lados. Una vez obtenidas las batimetrías, por comparación de volumen, se obtienen las cantidades de material acumulado de un lado y el erosionado del otro. Estas batimetrías se obtienen mensualmente, quincenalmente o por días, dependiendo de la exactitud requerida y de la variación estacional del perfil, esto es, la intensidad del Transporte Litoral.

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

Con este método es posible obtener los volúmenes netos de material que son arrastrados en intervalos de tiempos grandes, como un mes, seis meses o un año y difícilmente sirven para obtener fórmulas de arrastre.

Otro de los métodos empleados en la determinación del Transporte Litoral es el de modelos experimentales. Los más usuales son los tanques de olas con fondo móvil, en estos, se puede reproducir y hasta cambiar las variables que intervienen en los procesos costeros. Por lo tanto, son de gran ayuda en investigaciones puras, pero no así en las aplicadas, pues es sumamente difícil, sino imposible, reproducir todas las variables de un lugar determinado. No obstante, se han realizado evaluaciones de Transporte Litoral por medio de modelos, completando dicha evaluación ya sea con trazadores de algún tipo o por mediciones directas de erosiones y azolves.

III. CRITERIOS EMPIRICOS.

III. CRITERIOS EMPIRICOS.

En el campo de la ingeniería de costas es muy importante conocer el valor del Transporte Litoral ($Q \propto$). Existen métodos basados en fórmulas matemáticas o en modelos a escala. Algunos parten de la conclusión de que el Transporte Litoral es una función de la energía del oleaje, pero al irse ampliando las investigaciones, se expresó la relación del Transporte Litoral con el conocimiento de ciertos factores como son:

\propto = Angulo de incidencia.

H = Altura de ola.

T = Periodo.

i = Pendiente del estrán.

l = Anchura del estrán.

\mathcal{M} = Coeficiente que caracteriza la morfología del estrán.

Métodos empíricos analizados en este trabajo:

Método de Caldwell.

Método de Castanho.

Método de Larras.

Método del CERC (Coastal Engineering Research Center).

METODO DE CALDWELL.

En 1956, basándose en los estudios de volúmenes de arena recogidos por unos espigones, Caldwell pudo conocer el Transporte Litoral, relacionando éste con la energía del oleaje por medio de la expresión:

$$Q_{\text{total}} = 210 E^{0.8}$$

De donde:

Q = Transporte sólido total en yd³ por día.

E = Energía del oleaje en millones de pies/libra por pie de playa por día.

$$E = \frac{\gamma H^2 L}{8}$$

Según Caldwell:

$$E = \frac{\gamma H^2 L}{8 \text{ 000 000}} (\text{No. de olas/día}) \text{ Sen } \alpha \text{ Cos } \alpha$$

O también:

$$E = \frac{\gamma H^2 L K_r^2}{8 \text{ 000 000}} (\text{No. de olas}) \text{ Sen } \alpha \text{ Cos } \alpha$$

De donde:

L = Longitud de ola.

K_r = Coeficiente de refracción

H = Altura de ola.

METODO DE CASTANHO.

En 1966, Castanho, estudia por separado el Transporte Litoral por arrastre y el de suspensión, al considerar el balance de energías que se presentan en la zona entre la línea de rompiente de la ola y la línea de costa, considerando que parte de la energía se disipa por rozamiento y que varía según la forma de ruptura.

ANALISIS DEL TRANSPORTE POR ARRASTRE.

La energía por unidad de tiempo y unidad de longitud de la playa, transmitida paralelamente a la costa, es igual a:

$$P_{tl} = \frac{E_b \text{ Sen} \alpha_b \text{ Cos} \alpha_b}{T}$$

De donde:

E_b = Energía en la línea de rompientes.

α_b = Angulo entre la línea de costa y la línea de rompientes.

Ya que parte de la energía se disipa por rozamiento y parte se consume en el transporte del material, y P_d es la energía disipada, tendremos:

$$P_d = S P_{t1}$$

De donde:

S = Factor determinado mediante la figura III. 1

Para la cual se requiere:

m = pendiente de playa

δ_i = peralte

k = Coef. rozamiento (rugosidad hidráulica de la playa)

= $\frac{g}{X^2}$ playas rugosas X = 32 (K = 0.01)
 = $\frac{g}{X^2}$ playas lisas X = 50 (K = 0.04)

$$\delta = \frac{H_i}{L} = \frac{1}{1.72} T \text{ siendo } T = \text{Período adimensional} = t \sqrt{\frac{g}{d_i}}$$

$$t = \text{Período medio } d_i = \frac{H}{0.78}$$

α_1 = Angulo formado entre la línea de rompiente y la línea de costa.

Además la potencia consumida es:

$$P_c = \epsilon_s P_d$$

De donde:

ϵ_s = Fracción de energía consumida en el transporte,

Se considera igual a 1 pues en este tipo de transporte se consume toda la energía.

Por lo tanto;

$$P_c = \frac{E_b \text{ Sen } \alpha_b \text{ Cos } \alpha_b}{T} S \epsilon_s$$

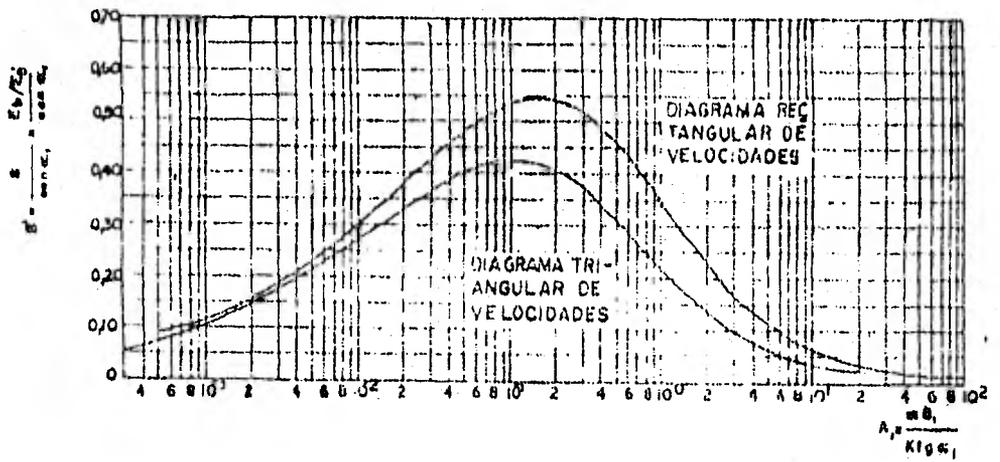


Figura III.1 Energía disipada por rozamiento con el fondo. Ruptura en spilling.

Si Z es la fuerza necesaria para arrastrar el material, (Fig III.2) tendremos:

$$Z = \gamma_s m_s \tan \theta$$

De donde:

θ = Angulo del talud natural del sedimento.

m_s = Masa del sedimento.

$$\gamma_s = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \times g$$

ρ_s = Masa específica del sedimento.

ρ = Masa específica del agua.

Si U_s es la velocidad media del transporte, entonces la potencia consumida en transportar el material será:

$$P_c = \gamma_s m_s \tan \theta U_s$$

Como $m_s U_s$ es el caudal sólido q_s , tendremos

$$q_s = \frac{E b \operatorname{Sen} \alpha_b \operatorname{Cos} \alpha_b}{T} S \quad \frac{\rho_s}{\gamma_s \tan \theta}$$

Si la relación $\frac{\rho_s}{\gamma_s \tan \theta} = A_a$, que es una función

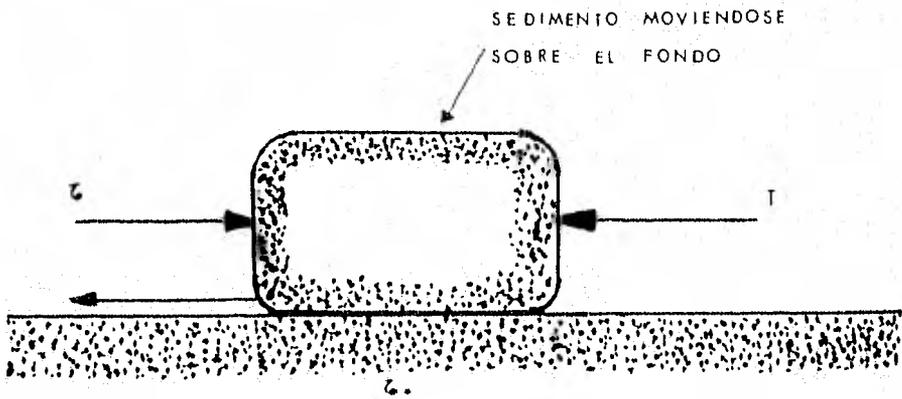


FIG. III.2

de las características del material, entonces:

$$q_s = \frac{E_b \operatorname{Sen} \alpha_b \operatorname{Cos} \alpha_b}{T} A_s S$$

Analizando una vena líquida entre dos ortogonales, (Fig.III.3)

se puede deducir que:

$$E_o \operatorname{Cos} \alpha_o = E_b \operatorname{Cos} \alpha_b$$

Entonces:

$$q_s = A_s S \frac{E_o \operatorname{Sen} \alpha_b \operatorname{Cos} \alpha_b}{T} \frac{\operatorname{Cos} \alpha_o}{\operatorname{Cos} \alpha_b}$$

Si E_o/T es constante y para una determinada playa m y k son constantes, entonces S y α_b serán funciones de δ_o y α_o

Por lo tanto:

$$q_s = f(\delta_o, \alpha_o)$$

En el laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa se obtuvieron para distintos valores de δ_o los siguientes resultados

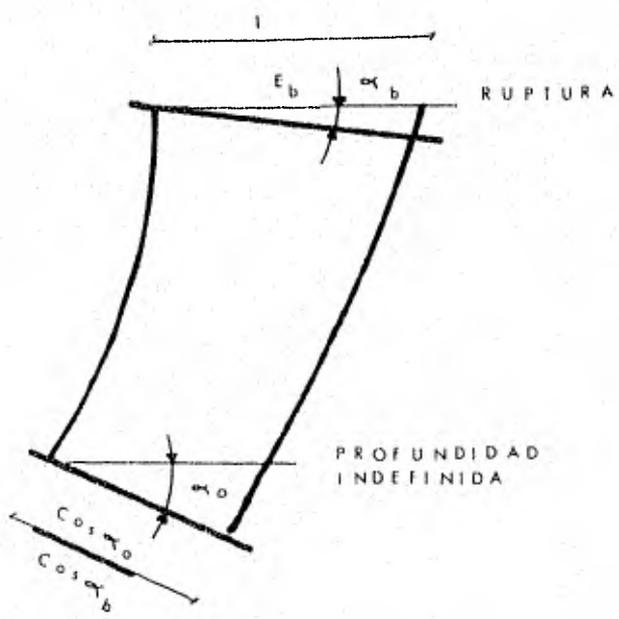


FIG. III.3

en forma gráfica y dando una variación de q_s en función de α_o , (Fig. III.4).

De donde se puede observar que: a α_m le corresponde el máximo del transporte para valores de 50° y 60° .

De la misma gráfica: Los valores menores de α_m corresponden a la formación de playas. En tal caso, α_b de ruptura es pequeño y el caudal litoral crece con α_o .

También se deduce que, los valores mayores de α_m corresponden a las formaciones llamadas flechas; en este caso el ángulo α_b es más elevado y el caudal decrece con α_o .

ANÁLISIS DEL TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN.

Este tipo de transporte es propio de la ruptura en voluta (Plunging) de los grandes temporales. La expresión para evaluar la cantidad de material transportado es muy similar a la deducida para el transporte por arrastre:

$$q_{ss} = A_3 h_o^{5/2} \text{ Sen } \alpha_b \text{ Cos } \alpha_b \epsilon$$

De donde:

A_3 = Coeficiente de proporcionalidad que depende de las características del material, del ángulo de ataque (α_b) y de la relación entre la velocidad de la corriente longitudinal y la compo-

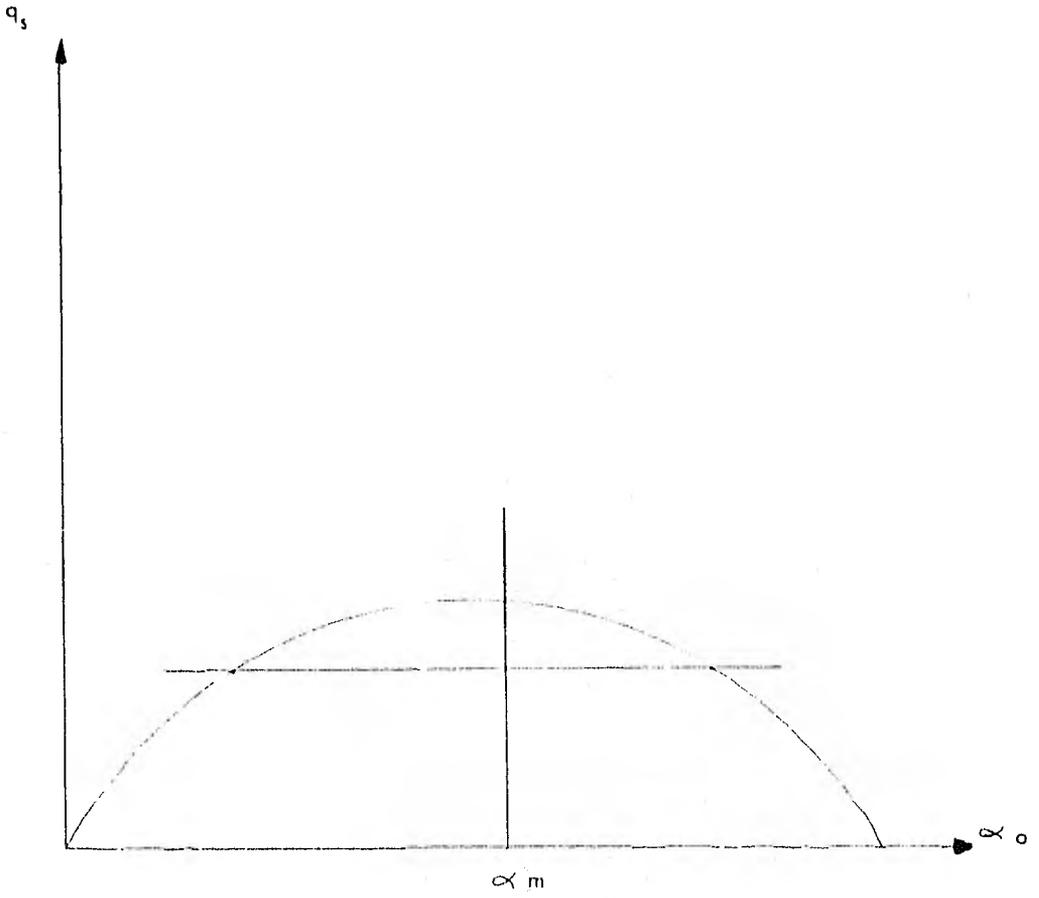


FIG. III,4

nente paralela a la costa de la velocidad de propagación de la onda, conocida como:

$$\epsilon = \frac{V}{C_b \text{ Sen } \alpha_b}$$

Este valor está representado en la figura III.5 en función de:

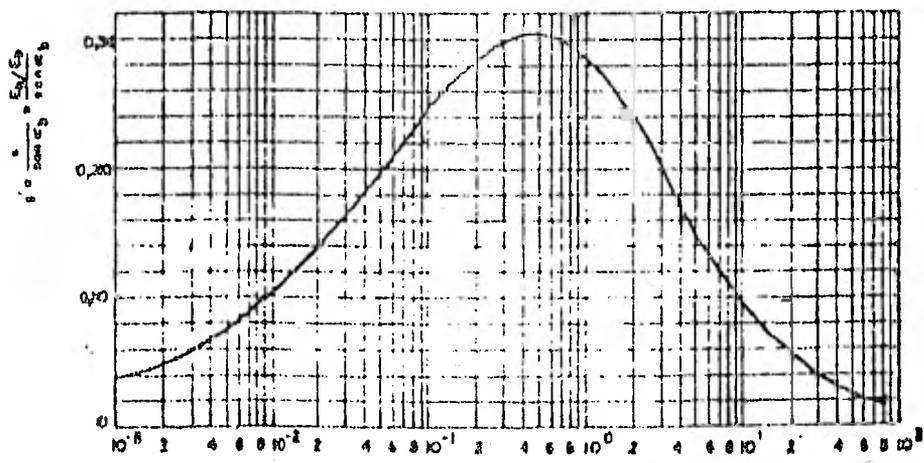
$$\frac{m \delta_1}{k \tan \alpha_b}$$

Por esta razón, para determinar el valor de q_{ss} es necesario el cálculo del coeficiente A_3 , que es una constante para cada tipo de playa y cada tipo de material.

La cantidad de material que se encuentra en suspensión durante la ruptura de la ola es difícil de evaluar y los modelos reducidos no producen con total exactitud el fenómeno de la suspensión. Por esta razón, Castanho propone una expresión para obtener el caudal total en forma aproximada de la siguiente manera:

$$q_s = \frac{S P}{\gamma_s \tan \theta}$$

Considera que todo el material transportado es en forma de arrastre, consumiéndose así toda la energía disipada, $\epsilon_s = 1$ por lo que:



$$A = \frac{m \delta_1}{K \tan \alpha_b}$$

FIG. III.5

RUPTURA EN PLUNGING

$$q_s = \frac{E_b \text{ Sen } \alpha_b \text{ Cos } \alpha_b}{T} \frac{S}{\gamma_s \text{ Tan } \theta}$$

Para la aplicación de esta expresión es necesario asignar un periodo a cada altura de agitación, por lo que se hace la hipótesis simplificada de suponer que dentro de un cierto intervalo de alturas de ola se produce un periodo más frecuente, es decir:

Para un cierto intervalo entre $H_1 < h_b < H_2$, le corresponde un periodo T.

Si se conoce la distribución de porcentajes de las distintas alturas para cada rumbo, se emplea la expresión para cada h y T en cada dirección, encontrando así el transporte para dichas direcciones.

Silvester simplificó la expresión de Castanho para playas de arena con los siguientes factores:

$$\frac{m \delta_1}{k} = 0.12 \quad \theta = 35^\circ \quad \gamma_s = 6 \text{ m seg}^{-2}$$

quedando la expresión:

$$q_s = S \text{ Sen } \alpha_b \text{ Cos } \alpha_o \frac{\omega H_o^2 L_o^2}{7 T}$$

Los valores de S y $\text{Sen } \alpha_b \text{ Cos } \alpha_o$ los representó en una grá-

fica en función del valor de H_0/L_0 , el valor de q_s está en lb/seg y ω es el peso específico del agua de mar. (Figs. III.6 y 7).

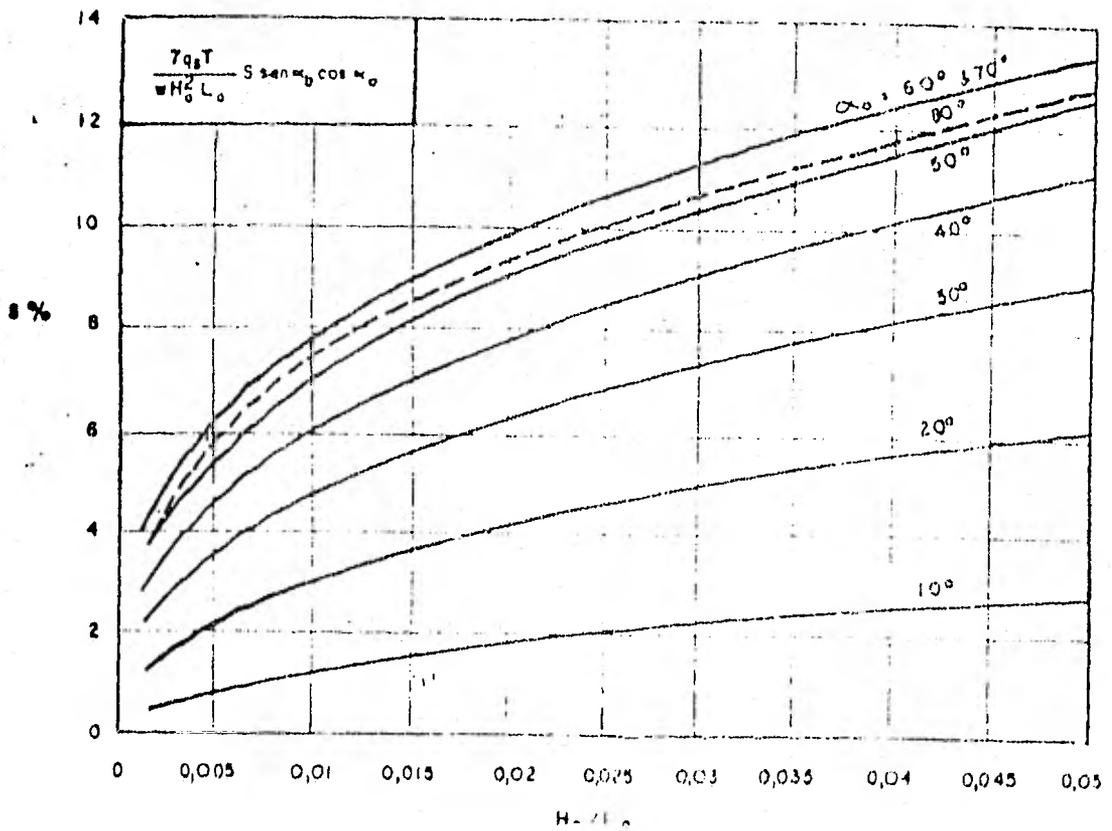


Figura III.6 Gráfica para el cálculo de S.

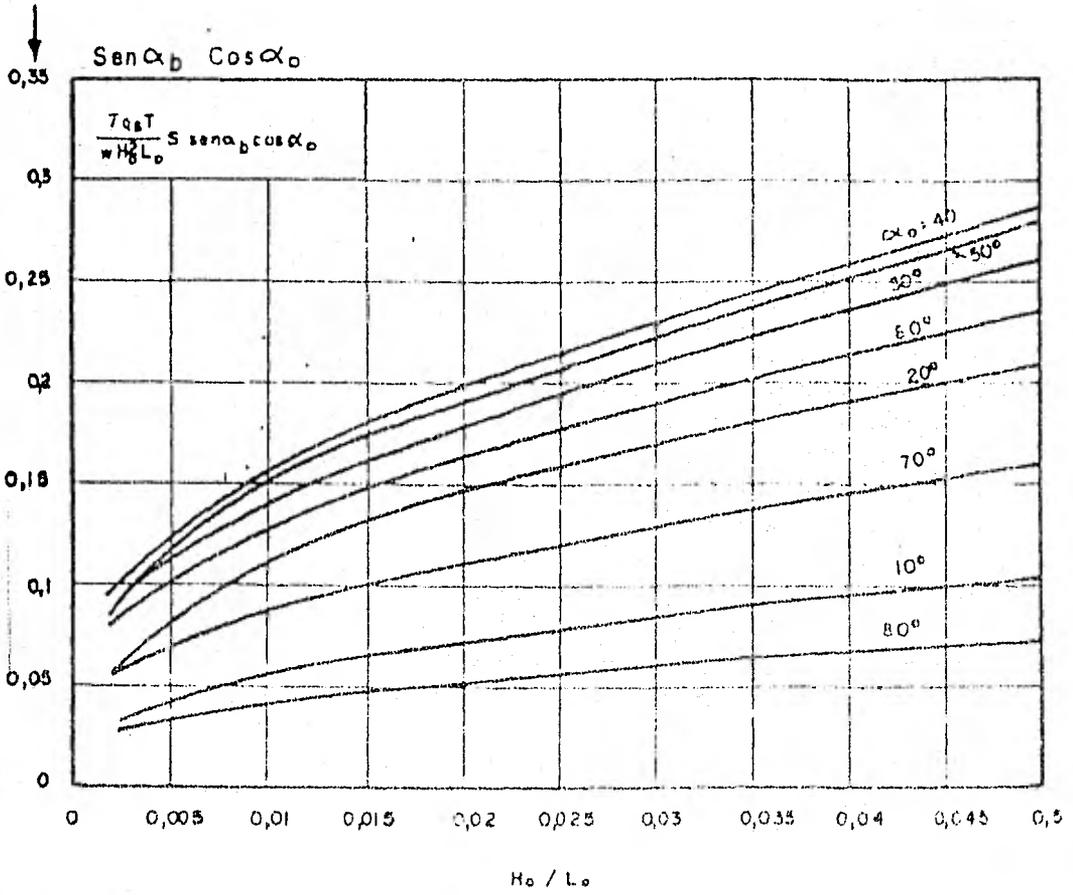


Figura III.7 Gráfica para el cálculo de $\text{Sen } \alpha_b \text{ Cos } \alpha_o$

METODO DE LARRAS.

Larras, presentó un estudio con modelo reducido sobre la determinación de la capacidad de transporte de arena paralela a la playa, producida por una ola monocromática que llega a la playa con un ángulo constante de 20° . La intensidad del Transporte Litoral, para diversas alturas de ola H , periodos T y diámetro D le permitió obtener la siguiente relación:

$$Q = K (\gamma, D) \frac{H^3}{T} f(\alpha)$$

De donde:

$f(\alpha)$ = función de oblicuidad que inicialmente se podía tomar igual a $7/4$.

$K(\gamma, D)$ = función del peralte de la ola y del diámetro D . (Fig. III. 8).

Sin embargo en esta expresión hay que tener en cuenta que la función K está mal definida para pequeños peraltes, pues fue obtenida en un modelo de fondo móvil para una playa indefinida, aunque las olas de peralte pequeño transportan cantidades importantes de arena.

En base a esta observación Bonnefille y Perneckner estudiaron una ley que relaciona a los resultados anteriores y los reales de la naturaleza. El inicio del arrastre de sedimentos por

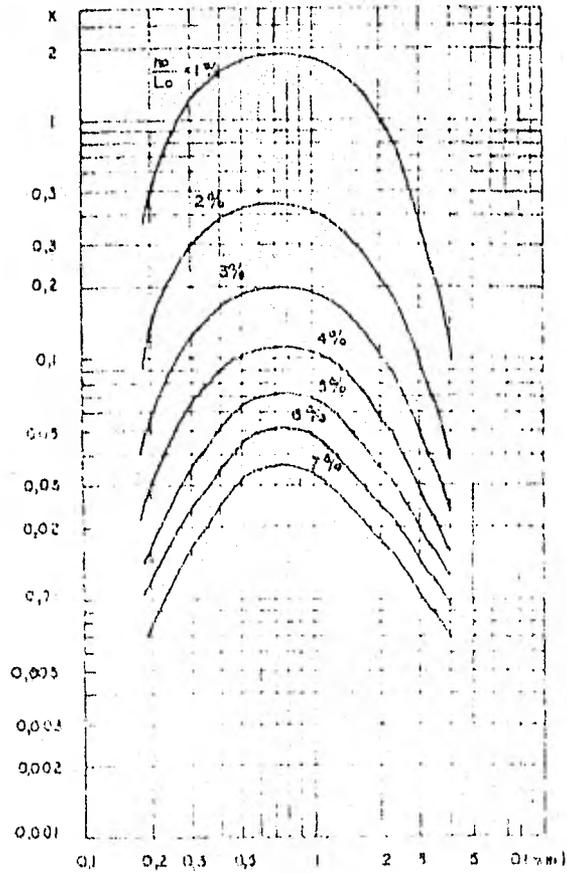


Figura III.8 Variación de K en función de $\frac{h_0}{L_0}$ y D.

la ola fue factor predominante del fenómeno estudiado. Por lo que utilizaron el mismo sedimento en la naturaleza que en el modelo, originando una distorsión de las escalas de los diferentes parámetros que intervienen en el proceso. El resultado fue que la función adimensional $K(\gamma, D)$, determinada experimentalmente en modelo sería aplicable a la naturaleza para una arena de diámetro D y de un peralte 2.75 veces más pequeño. Quedando una expresión:

$$Q = K\left(\frac{\gamma}{2.75}, D\right) \frac{H^3}{T} \frac{f(\alpha)}{f(20^\circ)}$$

En esta expresión se introdujo el factor $f(20^\circ)$ para tener en cuenta que K ha sido determinado para la incidencia oblicua $\alpha = 20^\circ$.

METODO DE FLUJO DE ENERGIA (CERC).

Está basado en la hipótesis de que el transporte Q es directamente proporcional a la componente paralela a la costa del flujo de la energía en la zona de rompientes, surf. Tal componente se calcula por medio del principio de conservación de la energía en profundidades reducidas, empleando la teoría de las ondas de pequeña amplitud y evaluando la relación del flujo de energía con la posición de la línea de rompiente.

La relación en que la energía de la onda es transmitida a través de un plano de anchura unitaria perpendicular a la dirección de avance es:

$$P = E C_g = \frac{\rho}{8} g H^2 C_g$$

Si α es el ángulo que la cresta forma con la línea de costa, entonces la relación anterior es:

$$P \cos \alpha = \frac{\rho}{8} g H^2 C_g \cos \alpha$$

Por lo tanto la componente longitudinal a lo largo de la playa es:

$$P_1 = P \cos \alpha \sin \alpha$$

$$P_1 = \frac{\rho g}{8} H^2 C_g \cos \alpha \sin \alpha$$

$$P_1 = \frac{\rho g}{16} H^2 C_g \sin 2\alpha$$

$$P_1 = \frac{E}{2} C_g \sin 2\alpha$$

Para la zona de rompientes será:

$$P_{1s} = \frac{\rho g}{16} H_b^2 C \sin 2\alpha_b (C_g)_b$$

Pero C_g o velocidad de grupo, está relacionada con la celeridad C , y basándose en la teoría de la onda lineal en pequeñas profundidades:

$$C_g = C$$

$$P_{1s} = \frac{\rho g}{16} H_b^2 C \sin 2\alpha_b$$

De donde:

H_b = Altura de ola en las profundidades de rom---
piente

α_b = Angulo formado entre la línea de rompiente y
la línea de playa.

C = Celeridad.

Según la teoría lineal:

$$C = \frac{g T}{2 \pi} \operatorname{Tan} h \frac{2 \pi d}{L}$$

que en profundidades pequeñas:

$$C = \sqrt{g d}$$

Para evaluar P_1 en función de las características de la onda en aguas profundas $C_g = 0.5 C_0$

De donde:

$$C_0 = \text{Celeridad en aguas profundas.}$$

Pero:

$$C_0 = \frac{g T}{2 \pi} = 5.12 \text{ (ft/seg)}$$

Con lo que se llega a un valor de P_{1s} de:

$$P_{1s} = \frac{\rho g}{64} T (H_0 K_r)^2 \operatorname{Sen} 2 \alpha_b$$

De donde:

$$K_r = \text{Coeficiente de refracción.}$$

Se debe considerar que el valor de P_1 varía conforme el oleaje se propaga por el fondo de la playa cercano a la línea de costa.

El cuadro siguiente proporciona varias expresiones para obtener P_1 a cualquier profundidad en función de las características que se conozcan del oleaje. Está basado en la teoría del oleaje de pequeña amplitud y se refiere a una onda de periodo único.

| Datos conocidos | Valor de P_1 |
|-----------------------------|---|
| d, T, H, α | $2 C_g \frac{1}{4} \bar{E} \text{ Sen } 2\alpha$ |
| d, T, H_0, α_0 | $C_g \frac{1}{4} E_0 \text{ Sen } 2\alpha_0$ |
| T, H_0, α_0, α | $K_R^2 C_g \frac{1}{4} \bar{E}_0 \text{ Sen } 2\alpha_0$ |
| $d, T, H, \alpha_0, \alpha$ | $2 C_g (K_R^2 C_g)^{-1} C_g \frac{1}{4} \bar{E} \text{ Sen } 2\alpha_0$ |

De donde:

E_0 = Energía en aguas profundas.

E = Energía en un punto específico.

H_0 = Altura de ola en aguas profundas.

H = Altura de ola en un punto específico.

d = Profundidad en un punto específico.

α = Angulo en un punto específico.

α_0 = Angulo en aguas profundas.

K_R = Coeficiente de refracción en un punto específico.

$$K_R = \sqrt{\frac{\text{Cos } \alpha_0}{\text{Cos } \alpha}}$$

C_g = Velocidad de grupo.

C_o = Celeridad en aguas profundas.

Si se emplea P_1 en los cálculos es necesario referirlo a la línea de rompientes P_{1s} , el cual se denomina factor de flujo de energía.

Basándose en el cuadro anterior se realizó el siguiente que proporciona expresiones de P_{1s} en la zona de rompientes. Tomando en cuenta los siguientes aspectos:

-Las alturas de ola se refieren a H 1/3.

-Las pérdidas de energía del oleaje por rozamiento de fondo se desprecian.

-El coeficiente de sobreelevación por efecto de la profundidad K_s es igual al valor obtenido por observaciones en la zona de rompiente:

$$K_s = \frac{K_r H_o}{H_b}$$

Dicho coeficiente es función de la profundidad relativa y de la forma en que el fondo actúa sobre la altura de onda.

Para el cálculo de todas las expresiones se supuso batimetría rectilínea y paralela.

| Expresión | Datos de partida | Valores de P_{1s} |
|-----------|------------------|--|
| 1 | $H_b \propto b$ | $32.1 H_b^{5/2} \text{ Sen } 2 \alpha_b$ |

| Expresión | Datos de partida | Valores de P_{1s} |
|-----------|------------------------------|--|
| 2 | H_o, α_o | $18.3 H_o^{5/2} (\cos \alpha_o)^{1/4} \text{Sen} 2 \alpha_o$ |
| 3 | $H_o, T, \alpha_o, \alpha_b$ | $20.5 T H_o^2 \text{Sen} \alpha_b \cos \alpha_o$ |
| 4 | H_b, T, α_o | $100.6 (H_b^3 / T) \text{Sen} \alpha_o$ |

Las hipótesis en las que se basaron para cada expresión fueron:

Expresión 1.

1.1 Energía en la zona de rompiente.

$$E = \frac{\rho g H_b^2}{8}$$

1.2 Velocidad de la ola en la zona de rompiente (para la profundidad de ruptura).

$$C_g = C = \sqrt{2 g H_b}$$

1.3 En la ruptura se emplea $\alpha = \alpha_o$

Expresión 2

2.1 Igual que 1.1

2.2 La altura de ola en la ruptura que se estima a partir de la teoría lineal del oleaje tiene como valor:

$$H_b = K_r K_s H_o$$

$$K_s = \text{Constante.}$$

$$K_s = 1.14^2$$

$$\text{Cos}(\alpha_b)^{1/4} \doteq 1$$

Expresión 3

3.1 Se emplea la teoría lineal del pleaje para determinar la refracción.

Expresión 4

4.1 Igual que 1.1

4.2 Igual que 2.2

4.3 Igual que 3.1

4.4 $\text{Cos}\alpha_b \doteq 1$

La relación entre Q y P_{1s} se ajusta de una manera aproximada a la expresión:

$$Q = (7.5 \times 10^3) P_{1s}$$

IV. APLICACION.

IV. APLICACION.

Los métodos vistos anteriormente nos ofrecen varios caminos hacia la determinación del Transporte Litoral, objetivo de este trabajo. Sin embargo, el tratar de explicar estos métodos en forma teórica, no siempre permiten lograr su comprensión, por este motivo se hace necesario proceder a trabajar con ellos en forma práctica mediante su aplicación directa de un problema real.

Considerando el caso de los estudios realizados en la zona costera del Golfo de México, específicamente en la región de Tuxpam, Ver. En este lugar se realizaron estudios con objeto de determinar el Transporte Litoral, lo que permitiría continuar los estudios necesarios para las obras de tipo portuario que se piensan llevar a cabo en dicha zona.

El Transporte Litoral es un parámetro representativo de acumulación de material que llega a afectar las costas, obras del mismo puerto como son: rompeolas, canales de acceso, etc.; por lo que se procederá a su cuantificación aplicando los métodos expuestos en el capítulo anterior, y que son:

Método de Caldwell.

Método de Castanho o del Laboratorio Nacional de Lisboa.

Método de Larras.

Método de Coastal Engineering Research Center (CERC).

La aplicación de estos métodos requiere de la obtención de una serie de datos necesarios en su desarrollo, estos datos son:

PENDIENTE MEDIA DE LA ZONA EN ESTUDIO.

Fue necesario determinarla, ya que se requiere para la obtención de las distintas profundidades de rompiente de las 5 alturas de ola esperadas.

Esta pendiente se obtuvo como el promedio de las pendientes entre cada batimétrica, hasta la profundidad de 100 m.

| Batimétrica | Longitud a escala | Pendiente por tramos. |
|-------------|-------------------|-----------------------|
|-------------|-------------------|-----------------------|

| | | |
|-----|-------|--------|
| 10 | 350 | 0.0285 |
| 20 | 350 | 0.0285 |
| 30 | 1 100 | 0.0090 |
| 40 | 580 | 0.0172 |
| 50 | 650 | 0.0153 |
| 60 | 130 | 0.0769 |
| 70 | 150 | 0.0667 |
| 80 | 100 | 0.1000 |
| 90 | 150 | 0.0667 |
| 100 | 180 | 0.0555 |

Suma 0.4647

$\bar{S} = 0.04647$

PERIODO.

Este parámetro es de los más importantes ya que influye en la determinación de la longitud de ola en aguas profundas (L_0) y Celeridad, también en aguas profundas (C_0), ambos parámetros son básicos a su vez en la obtención de ángulos de refracción y consecuentemente coeficientes de refracción. La información se obtuvo de SEA AND SWELL.

| Periodo (Seg) | Tiempo de actuación (%) | Distribución acumulada | $T_i \times P_i$ |
|------------------|------------------------------|---------------------------|------------------|
| 5.0 | 48.93 | 48.93 | 244.65 |
| 7.5 | 40.18 | 89.11 | 301.35 |
| 9.0 | 10.89 | 100.00 | 98.01 |
| | | Suma | <u>644.01</u> |

$$T_m = \frac{644.01}{100}$$

$$T_m = 6.44 \text{ seg.}$$

ALTURAS DE OLA.

Se obtuvieron también de SEA AND SWELL CHARTS.

Periodo: anual

Unidades: porcentaje

Tiempo de actuación (%)

D I R E C C I O N

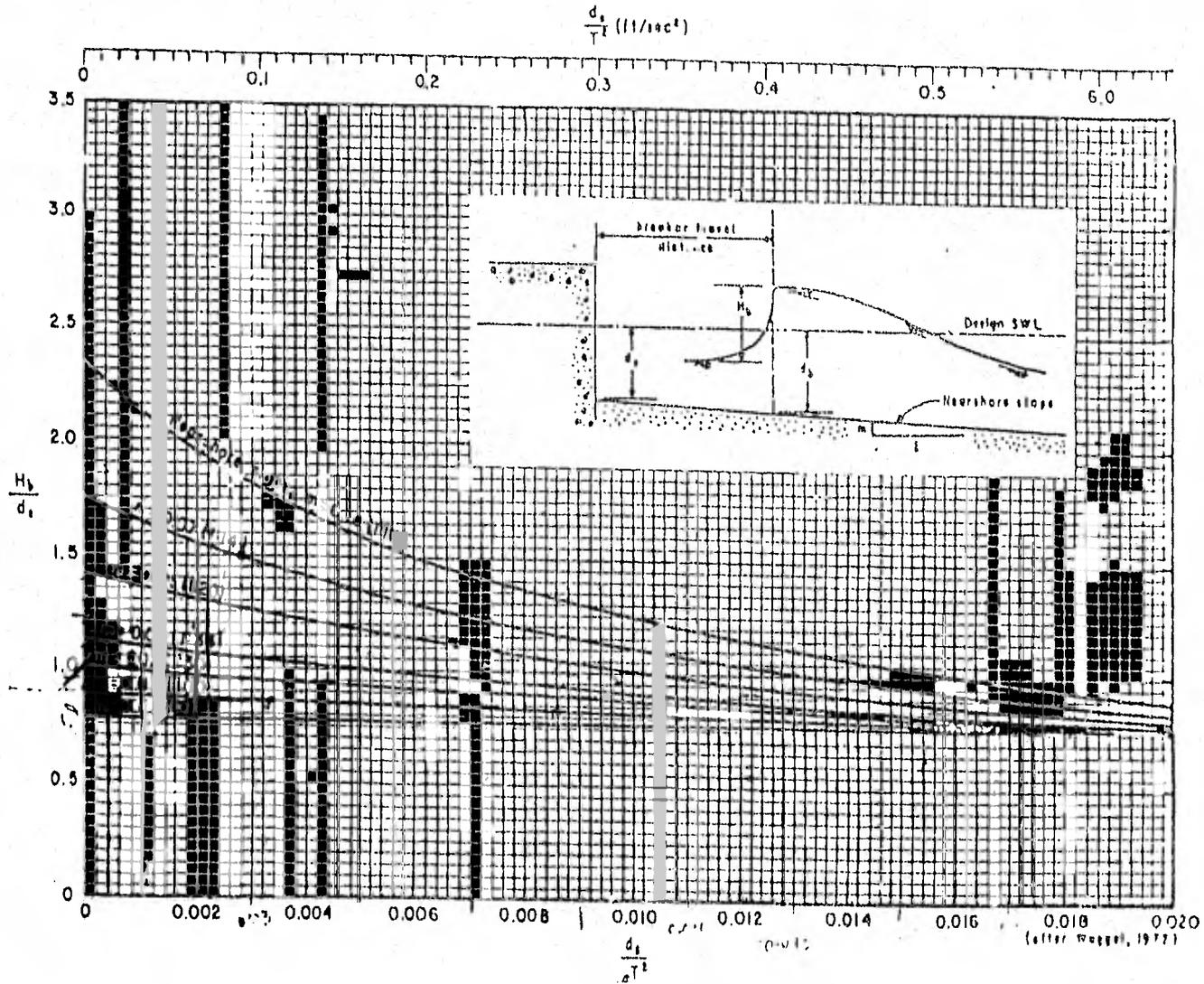
| Altura de ola (m) | NORTE | NORESTE | ESTE | SURESTE | TOTAL |
|----------------------|-------|---------|-------|---------|--------|
| 0.9 | 7.97 | 11.68 | 20.41 | 14.01 | 54.07 |
| 0.9-1.5 | 3.55 | 4.07 | 7.42 | 6.23 | 21.27 |
| 1.5-2.4 | 3.55 | 2.73 | 3.69 | 2.92 | 12.89 |
| 2.4-3.6 | 3.77 | 1.95 | 2.24 | 1.64 | 9.60 |
| 3.6 | 1.74 | 0.30 | 0.24 | 0.06 | 2.17 |
| TOTAL | 20.58 | 20.56 | 34.00 | 24.86 | 100.00 |

PROFUNDIDADES DE ROMPIENTE.

Fue necesario determinarlas, ya que se considera que es aquí donde se inicia el Transporte Litoral. Y es a esta profundidad donde se encuentran las alturas de ola empleadas en los métodos.

Para cada altura de ola se propone una profundidad de rompimiento (d_s), este valor se divide entre gT^2 , para que por medio de la figura IV.1 y la pendiente del sitio en estudio obtenida con anterioridad, determinar el factor H_b/d_s , H_b es la altura de ola. Así se obtiene una d_s nueva, que si resulta igual a la propuesta, es esta la d_s final.

FIG. IV.1



| Hb (m) | ds propuesta | ds/gT ² | Hb/ds | ds final |
|--------|--------------|--------------------|-------|----------|
| 0.90 | 0.769 | 0.0018 | 1.18 | 0.762 |
| 1.20 | 1.025 | 0.0025 | 1.16 | 1.030 |
| 1.95 | 1.820 | 0.0044 | 1.08 | 1.800 |
| 3.00 | 2.940 | 0.0072 | 1.02 | 2.940 |
| 3.60 | 3.63 | 0.0089 | 0.99 | 3.630 |

CELERIDAD EN AGUAS PROFUNDAS (C₀). LONGITUD DE OLA EN AGUAS PROFUNDAS (L₀), LIMITE DE AGUAS PROFUNDAS, CELERIDADES Y LONGITUDES DE OLA PARA CADA PROFUNDIDAD DESPUES DEL LIMITE DE AGUAS PROFUNDAS.

Todos estos parámetros son básicos para el desarrollo de los métodos antes mencionados.

C₀ o celeridad en aguas profundas, se obtiene de:

$$C_0 = \frac{g T}{2 \pi}$$

$$C_0 = 10.05$$

L₀ o longitud de ola en aguas profundas, se obtiene de:

$$L_0 = \frac{g T^2}{2 \pi}$$

$$L_0 = 64.75$$

Límite de aguas profundas, se obtiene de:

$$d = 0.5 L$$

$$d = 32.375$$

Para obtener la celeridad y longitud de ola para cada pro--

fundidad se determinan los coeficientes d/L_0 y $\text{Tanh } 2\pi d/L_0$, este último factor se multiplica por C_0 para obtener las diferentes celeridades y por L_0 para las diferentes longitudes de g la.

| d | d/L ₀ | Tanh 2π d/L ₀ | C | L |
|--------|------------------|--------------------------|-------|---------|
| 32.375 | 0.500 | 0.9964 | 10.01 | 64.5169 |
| 30.000 | 0.463 | 0.9943 | 9.99 | 64.3800 |
| 25.000 | 0.386 | 0.9855 | 9.90 | 63.8100 |
| 20.000 | 0.308 | 0.9645 | 9.69 | 62.4500 |
| 15.000 | 0.231 | 0.9186 | 9.23 | 59.4700 |
| 10.000 | 0.154 | 0.8250 | 8.29 | 53.4100 |
| 5.000 | 0.077 | 0.6392 | 6.42 | 41.3800 |
| 3.630 | 0.056 | 0.5582 | 5.61 | 36.1430 |
| 2.940 | 0.045 | 0.5066 | 5.09 | 32.8000 |
| 1.800 | 0.027 | 0.4002 | 4.02 | 25.9100 |
| 1.030 | 0.016 | 0.3117 | 3.13 | 20.1820 |
| 0.762 | 0.012 | 0.2711 | 2.72 | 17.5500 |

ANGULOS DE INCIDENCIA Y REFRACTADOS.

Estos ángulos se obtuvieron mediante la Ley de Snell:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\text{Sen } \alpha_2}{\text{Sen } \alpha_1}$$

De donde:

C_1 : Celeridad con que incide la ola.

C_2 : Celeridad con que se refracta.

α_1 : Angulo con que incide el frente de ola respecto a la batimetría.

α_2 : Angulo con que se refracta el frente de ola con respecto a la batimetría.

| NORTE | ESTE | NORESTE | SURESTE |
|---|---|---|---|
| Angulo incidente: 70° Angulos inci-- dente y refrac <u>o</u> tado. | Angulo incidente: 18° Angulos inci-- dente y refrac <u>o</u> tado. | Angulo incidente: 54° Angulos inci-- dente y refrac <u>o</u> tado. | Angulo incidente: 67° Angulos inci-- dente y refrac <u>o</u> tado. |
| 69.38 | 17.90 | 53.68 | 66.46 |
| 69.08 | 17.80 | 53.53 | 66.20 |
| 67.76 | 17.70 | 52.83 | 65.06 |
| 64.96 | 17.30 | 51.26 | 62.56 |
| 59.66 | 16.40 | 47.99 | 57.72 |
| 50.82 | 14.76 | 41.86 | 49.41 |
| 36.89 | 11.38 | 31.11 | 36.01 |
| 31.36 | 9.93 | 26.84 | 30.91 |
| 28.42 | 9.00 | 24.19 | 27.79 |
| 22.09 | 7.10 | 18.89 | 21.61 |
| 17.03 | 5.53 | 14.60 | 16.67 |
| 14.75 | 4.80 | 12.66 | 14.44 |

COEFICIENTE DE REFRACCION (K_r).

Este factor es muy importante ya que influye en la determinación de la altura de ola a la profundidad de rompiente. Se obtuvo mediante canales de energía. (Fig. IV.2).

| Batimétrica | NORTE | | ESTE | | NORESTE | | SURESTE | |
|-------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-------|
| | Ancho del canal | K_r |
| 32.375 | 1.000 | | 1.000 | | 1.000 | | 1.000 | |
| 30.000 | 1.056 | 0.972 | 1.017 | 0.99 | 1.002 | 0.999 | 1.021 | 0.98 |
| 25.000 | 0.696 | 1.230 | 0.988 | 1.01 | 1.092 | 0.958 | 1.070 | 0.97 |
| 20.000 | 0.835 | 1.120 | 1.023 | 0.99 | 0.413 | 1.550 | 0.997 | 1.01 |
| 15.000 | 1.392 | 0.870 | 0.992 | 1.01 | 0.607 | 1.280 | 0.960 | 1.03 |
| 10.000 | 1.512 | 0.836 | 1.051 | 0.98 | 0.746 | 1.150 | 1.302 | 0.88 |
| 5.000 | 1.878 | 0.749 | 1.077 | 0.97 | 0.864 | 1.070 | 1.479 | 0.83 |
| 3.630 | 2.302 | 0.678 | 1.066 | 0.97 | 0.976 | 1.010 | 2.109 | 0.69 |
| 2.940 | 2.378 | 0.666 | 1.069 | 0.97 | 0.998 | 1.000 | 2.175 | 0.68 |
| 1.800 | 2.506 | 0.649 | 1.074 | 0.97 | 1.035 | 0.984 | 2.285 | 0.66 |
| 1.030 | 2.585 | 0.639 | 1.077 | 0.97 | 1.059 | 0.973 | 2.355 | 0.65 |
| 0.762 | 2.615 | 0.636 | 1.078 | 0.97 | 1.068 | 0.968 | 2.380 | 0.65 |

ALTURAS DE OLA EN LAS PROFUNDIDADES DE ROMPIENTE.

Estas alturas de ola se obtuvieron al afectarlas por los coeficientes de refracción y de fondo (K_f). Este último coeficiente se determina mediante:

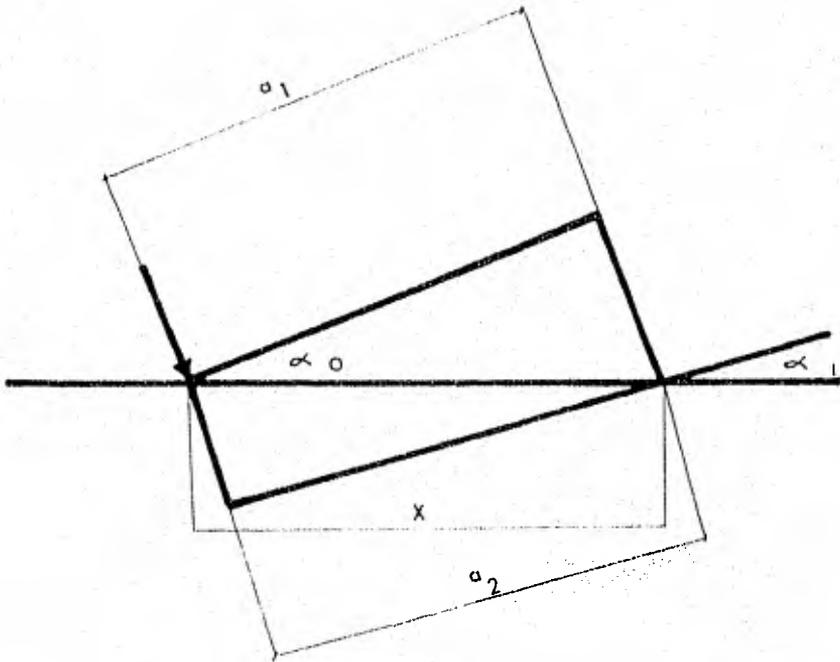


FIG. IV. 2

$$\cos \alpha_0 = \frac{a_1}{x}$$

$$x = \frac{a_1}{\cos \alpha_0}$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{a_2}{x}$$

$$a_2 = \frac{a_1 \cos \alpha_1}{\cos \alpha_0}$$

DE DONDE:

α_1 : ANGULO REFRACTADO.

α_0 : ANGULO DE INCIDENCIA.

a_1 : ANCHO DEL CANAL A LA PROFUNDIDAD 1.

a_2 : ANCHO DEL CANAL A LA PROFUNDIDAD 2.

$$K_r = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}$$

$$K_f = \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}}$$

Finalmente:

$$H' = H K_r K_f$$

De esta forma, las alturas resultantes fueron:

| H (m) | NORTE | | | ESTE | | NORESTE | | SURESTE | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | K_f | K_r | H' | K_r | H' | K_r | H' | K_r | H' |
| 0.90 | 1.375 | 0.636 | 0.787 | 0.971 | 1.201 | 0.968 | 1.197 | 0.655 | 0.810 |
| 1.20 | 1.288 | 0.639 | 0.972 | 0.972 | 1.502 | 0.973 | 1.503 | 0.658 | 1.010 |
| 1.95 | 1.150 | 0.649 | 1.455 | 0.973 | 2.180 | 0.984 | 2.206 | 0.668 | 1.490 |
| 3.00 | 1.042 | 0.666 | 2.080 | 0.975 | 3.040 | 1.002 | 3.130 | 0.685 | 2.140 |
| 3.60 | 1.004 | 0.678 | 2.450 | 0.977 | 3.530 | 1.013 | 3.660 | 0.696 | 2.510 |

METODO DE CALDWELL.

$$Q_s = 210 E^{0.8}$$

DE donde:

$$E = \frac{\gamma H^2 L}{8 \times 10^6} \text{ No. de olas/día } \text{Sen} \alpha \text{ Cos } \alpha$$

$$\gamma = 62.2 \text{ lb/ft}^3$$

H = Altura de ola en el sitio.

$$\text{No. de olas/día} = 86400/T = 13416 \text{ olas/día.}$$

α = Angulo de incidencia en el sitio.

| Dirección | H (ft) | L (ft) | α (grados) | E_1 | Q_s (yd ³ /día) | Q_s (m ³ /día) |
|-----------------------|--------|--------|-------------------|--------|------------------------------|-----------------------------|
| N O R T E | 2.581 | 57.57 | 17.03 | 11.21 | 1 451.87 | 1 108.57 |
| | 3.188 | 66.20 | 22.09 | 24.46 | 2 710.95 | 2 069.95 |
| | 4.773 | 86.47 | 28.42 | 86.03 | 7 412.07 | 5 659.50 |
| | 6.284 | 108.66 | 31.63 | 235.68 | 16 599.16 | 12 674.32 |
| | 8.037 | 117.61 | 46.00 | 396.06 | 25 144.03 | 19 198.77 |
| E S T E | 3.940 | 57.57 | 5.52 | 8.93 | 1 211.35 | 924.92 |
| | 4.927 | 66.20 | 7.10 | 20.57 | 2 359.91 | 1 801.91 |
| | 7.152 | 86.47 | 9.00 | 71.28 | 6 377.26 | 4 869.36 |
| | 9.973 | 108.66 | 9.93 | 191.53 | 14 060.88 | 10 736.21 |
| | 11.581 | 117.61 | 5.50 | 156.98 | 11 992.21 | 9 156.67 |
| NOR ES TE | 3.927 | 57.57 | 14.60 | 22.59 | 2 543.13 | 1 941.81 |
| | 4.931 | 66.20 | 18.89 | 51.43 | 4 911.40 | 3 750.11 |
| | 7.237 | 86.47 | 24.19 | 176.61 | 13 177.67 | 10 061.83 |
| | 10.260 | 108.66 | 26.84 | 481.50 | 29 396.81 | 22 445.99 |
| | 12.000 | 117.61 | 37.86 | 857.10 | 46 627.93 | 35 602.84 |
| SUR ES TE | 2.657 | 57.57 | 16.67 | 11.65 | 1 497.61 | 1 143.50 |
| | 3.336 | 66.20 | 21.61 | 26.32 | 2 873.93 | 2 194.39 |
| | 4.911 | 86.47 | 27.79 | 89.73 | 7 666.56 | 5 853.81 |
| | 7.024 | 108.66 | 30.91 | 246.47 | 17 204.15 | 13 136.26 |
| | 8.234 | 117.61 | 53.00 | 399.84 | 25 335.65 | 19 345.08 |

METODO DE CASTANHO O DEL LABORATORIO NACIONAL DE LISBOA.

Ruptura en plunging:

$$q_s = \frac{2.2 \rho_g h_b^3}{T} \text{Sen} \alpha_b \text{Cos} \alpha_b \frac{S}{\gamma_s \text{Tan} \theta}$$

De donde:

$$\rho_g = 1.030 \text{ Kg/m}^3$$

h_b = Altura de ola en la zona de rompiente.

$$\gamma_s = 5.900 \text{ m/seg}^{-2}$$

$$\theta = 35^\circ$$

S = Factor que se determina por medio de la figura III.5.

| Dirección | H (m) | $T = t \sqrt{\frac{g}{H/0.78}}$ | $\delta = \frac{T}{1.72}$ | α_b | $A = \frac{m \delta^3}{K \tan \alpha_b}$ | $G' = \frac{S}{\text{Sen} \alpha_b}$ | S | q_s m ³ /seg | m ³ /día |
|-----------|-------|---------------------------------|---------------------------|------------|--|--------------------------------------|-------|------------------------------|---------------------|
| N | 0.787 | 20.080 | 11.674 | 17.03 | 70.844 | 0.020 | 0.007 | 0.0814 | 7 032.96 |
| O | 0.972 | 18.069 | 10.505 | 22.09 | 48.110 | 0.024 | 0.009 | 0.2453 | 21 193.92 |
| R | 1.455 | 14.768 | 8.586 | 28.42 | 29.491 | 0.040 | 0.019 | 2.0868 | 180 078.40 |
| T | 2.080 | 12.352 | 7.181 | 31.63 | 21.671 | 0.058 | 0.030 | 10.4060 | 899 078.40 |
| E | 2.450 | 11.381 | 6.616 | 36.89 | 16.383 | 0.077 | 0.046 | 27.7868 | 240 779.52 |
| E | 1.201 | 16.255 | 9.450 | 5.52 | 181.499 | 0.018 | 0.001 | 0.0241 | 2 082.24 |
| S | 1.502 | 14.535 | 8.450 | 7.10 | 126.054 | 0.018 | 0.002 | 0.0779 | 6 730.56 |
| T | 2.180 | 12.065 | 7.014 | 9.00 | 82.319 | 0.018 | 0.002 | 0.3818 | 32 987.52 |
| E | 3.040 | 10.217 | 5.940 | 9.93 | 63.060 | 0.020 | 0.003 | 1.3823 | 119 430.72 |
| E | 3.530 | 9.481 | 5.512 | 11.38 | 50.906 | 0.025 | 0.004 | 3.5516 | 306 858.24 |
| NOR | 1.197 | 16.282 | 9.466 | 14.60 | 67.549 | 0.019 | 0.004 | 0.1710 | 14 783.04 |
| ES | 1.503 | 14.350 | 8.448 | 18.89 | 45.888 | 0.030 | 0.009 | 0.8594 | 74 252.16 |
| TE | 2.206 | 11.994 | 6.973 | 24.19 | 28.849 | 0.040 | 0.016 | 5.6065 | 484 401.60 |
| TE | 3.130 | 10.069 | 5.854 | 26.84 | 21.500 | 0.058 | 0.026 | 27.5700 | 2 382 048.00 |
| TE | 3.660 | 9.317 | 5.413 | 31.11 | 16.670 | 0.077 | 0.039 | 73.5300 | 6 352 992.00 |
| SUR | 0.810 | 19.793 | 11.507 | 16.67 | 71.430 | 0.020 | 0.005 | 0.0709 | 6 125.76 |
| ES | 1.017 | 17.664 | 10.270 | 21.62 | 48.188 | 0.025 | 0.009 | 0.2823 | 24 390.72 |
| ES | 1.497 | 24.559 | 8.465 | 27.79 | 29.654 | 0.040 | 0.018 | 2.1924 | 189 423.36 |
| TE | 2.141 | 12.173 | 7.077 | 30.91 | 21.970 | 0.058 | 0.029 | 10.9741 | 948 162.24 |
| TE | 2.515 | 11.233 | 6.530 | 36.01 | 16.700 | 0.077 | 0.045 | 29.1304 | 2 516 866.50 |

Ruptura en spilling:

$$q_s = \frac{E_b \text{ Sen } \alpha_b \text{ Cos } \alpha_b}{T} S \frac{\epsilon_s}{\gamma_s \text{ Tan } \theta}$$

De donde:

E_b = Energía en la zona de rompiente.

$$E_b = \frac{\gamma H^2 L}{8 \times 10^6} (\text{No. de olas/día}) \text{ Sen } \alpha_b \text{ Cos } \alpha_b$$

S = Factor que se determina por medio de la figura III.4.

ϵ_s = Fracción de energía consumida en el transporte = 1.

$$\gamma_s = 5.900 \text{ m/seg}^{-2}$$

$$\theta = 35^\circ$$

| Dirrec- ción | H (m) | L (m) | α_b | $T=t \sqrt{\frac{g}{H/0.78}}$ | $A=\frac{\delta 1}{K \tan \alpha_1}$ | $S'=\frac{S}{\text{Sen } \alpha_1}$ | S | m^3/seg | q_s | $m^3/\text{día}$ |
|-----------------|-------|--------|------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------|-------|------------------|
| N | 0.787 | 17.547 | 17.03 | 20.080 | 70.844 | 0.025 | 0.0073 | 0.0004 | | 34.56 |
| O | 0.972 | 20.177 | 22.09 | 18.069 | 48.110 | 0.030 | 0.0113 | 0.0016 | | 146.01 |
| R | 1.455 | 26.350 | 28.42 | 14.768 | 29.491 | 0.050 | 0.0238 | 0.0151 | 1 | 304.64 |
| T | 2.080 | 33.120 | 31.63 | 12.352 | 21.671 | 0.080 | 0.0420 | 0.0779 | 6 | 730.56 |
| E | 2.450 | 35.850 | 38.89 | 11.381 | 16.386 | 0.090 | 0.0540 | 0.1739 | 15 | 024.00 |
| | 1.201 | 17.547 | 5.52 | 16.255 | 181.499 | 0.025 | 0.0024 | 0.00003 | | 3.11 |
| E | 1.502 | 20.177 | 7.10 | 14.535 | 126.054 | 0.025 | 0.0031 | 0.00013 | | 11.92 |
| S | 2.180 | 26.350 | 9.00 | 12.065 | 82.319 | 0.025 | 0.0039 | 0.00075 | | 64.80 |
| T | 3.040 | 33.120 | 9.93 | 10.217 | 63.060 | 0.020 | 0.0034 | 0.00195 | | 168.48 |
| E | 3.530 | 35.850 | 11.38 | 9.481 | 50.906 | 0.030 | 0.0059 | 0.00640 | | 552.16 |
| | 1.197 | 17.547 | 14.60 | 16.282 | 67.549 | 0.025 | 0.0063 | 0.00061 | | 52.87 |
| NOR | 1.503 | 20.177 | 18.89 | 14.530 | 45.888 | 0.030 | 0.0097 | 0.00269 | | 232.76 |
| ES | 2.206 | 26.350 | 24.19 | 11.994 | 28.849 | 0.050 | 0.0205 | 0.02385 | 2 | 060.64 |
| TE | 3.130 | 33.120 | 26.84 | 10.069 | 21.500 | 0.080 | 0.0361 | 0.12346 | 10 | 666.94 |
| | 3.660 | 35.850 | 31.11 | 9.311 | 16.670 | 0.090 | 0.0465 | 0.28380 | 24 | 520.66 |
| | 0.810 | 17.547 | 16.67 | 19.793 | 71.430 | 0.025 | 0.0072 | 0.00040 | | 35.16 |
| SUR | 1.017 | 20.177 | 21.61 | 17.664 | 48.188 | 0.030 | 0.0110 | 0.00174 | | 151.02 |
| ES | 1.497 | 26.350 | 27.79 | 14.559 | 29.854 | 0.050 | 0.0233 | 0.01520 | 1 | 313.36 |
| TE | 2.141 | 33.120 | 30.91 | 12.173 | 21.970 | 0.080 | 0.0411 | 0.07871 | 6 | 800.97 |
| | 2.510 | 35.850 | 36.01 | 11.233 | 16.700 | 0.090 | 0.0529 | 0.17550 | 15 | 163.37 |

METODO DE LARRAS:

$$Q_s = K g \frac{H_o^2}{k_r} T (\text{No. de olas por día}) \text{Sen } \alpha \text{ Cos } \alpha$$

De donde:

$$K = 1.18 \times 10^6 \phi^{-1/2} \frac{L_o}{H_o}$$

H = Altura de ola en m.

k_r = Coeficiente de refracción.

T = Periodo en segundos.

α = Angulo de incidencia en grados.

L_o = Longitud de ola.

ϕ = Diámetro 50 del material en mm.

| Dirección | H ₀ (m) | K _r | α | K | Q _s (m ³ /seg) | Q _s (m ³ /día) |
|-----------|--------------------|----------------|----------|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| N | 0.90 | 0.636 | 17.03 | 0.00016979 | 0.001746 | 150.85 |
| O | 1.20 | 0.639 | 22.09 | 0.00012734 | 0.002054 | 255.22 |
| R | 1.95 | 0.649 | 28.42 | 0.00007836 | 0.006050 | 522.72 |
| T | 3.00 | 0.666 | 31.63 | 0.00005094 | 0.010568 | 913.07 |
| E | 3.60 | 0.578 | 36.89 | 0.00004245 | 0.014426 | 1 246.40 |
| | 0.90 | 0.971 | 5.52 | 0.00016979 | 0.001376 | 118.88 |
| E | 1.20 | 0.972 | 7.10 | 0.00012374 | 0.002355 | 203.47 |
| S | 1.95 | 0.973 | 9.00 | 0.00007836 | 0.004837 | 417.91 |
| T | 3.00 | 0.975 | 9.93 | 0.00005094 | 0.008223 | 710.46 |
| E | 3.60 | 0.977 | 11.38 | 0.00004245 | 0.011299 | 976.25 |
| | 0.90 | 0.968 | 14.60 | 0.00016979 | 0.003511 | 303.35 |
| NOR | 1.20 | 0.973 | 18.89 | 0.00012734 | 0.005982 | 516.84 |
| ES | 1.95 | 0.984 | 24.19 | 0.00007836 | 0.012270 | 1 060.12 |
| TE | 3.00 | 1.002 | 26.84 | 0.00005094 | 0.021255 | 1 836.43 |
| | 3.60 | 1.013 | 31.11 | 0.00004245 | 0.029010 | 2 506.46 |
| | 0.90 | 0.655 | 16.67 | 0.00016979 | 0.001816 | 156.90 |
| SUR | 1.20 | 0.658 | 21.61 | 0.00012734 | 0.003075 | 265.68 |
| ES | 1.95 | 0.668 | 27.79 | 0.00007836 | 0.006304 | 544.66 |
| TE | 3.00 | 0.685 | 30.91 | 0.00005094 | 0.011007 | 951.00 |
| | 3.60 | 0.696 | 36.01 | 0.00004245 | 0.015002 | 1 296.25 |

METODO DE CERC.

$$Q = 7.5 \times 10^3 P_{1s}$$

De donde:

$$P_{1s} = \frac{\rho_g}{64} T (H_o K_r)^2 \text{ Sen } 2 \alpha_b$$

H_o = Altura de ola.

K_r = Coeficiente de refracción.

ρ_g = 62.2 lb/ft³.

α_b = Angulo de incidencia en las rompientes.

T = Periodo en segundos.

| Dirección | H ₀ (ft) | α_b | K _r | P _{1s} | Q (yd ³ /día) | Q (m ³ /día) |
|-----------|---------------------|------------|----------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|
| N | 2.952 | 17.03 | 0.636 | 3.93 | 36 975.00 | 28 232.00 |
| O | 3.937 | 22.09 | 0.639 | 8.78 | 65 902.50 | 50 319.97 |
| R | 6.397 | 28.42 | 0.649 | 28.74 | 215 550.00 | 164 583.61 |
| T | 9.842 | 31.63 | 0.666 | 76.44 | 573 300.00 | 437 744.30 |
| E | 11.811 | 46.00 | 0.678 | 127.67 | 957 525.00 | 731 120.03 |
| | 2.952 | 5.52 | 0.971 | 3.13 | 23 505.00 | 17 947.28 |
| E | 3.937 | 7.10 | 0.972 | 7.15 | 53 670.00 | 40 979.83 |
| S | 6.397 | 9.00 | 0.973 | 23.85 | 178 875.00 | 136 500.34 |
| T | 9.842 | 9.93 | 0.975 | 62.32 | 467 415.00 | 356 895.61 |
| E | 11.811 | 5.50 | 0.977 | 50.61 | 379 575.00 | 289 825.21 |
| | 2.952 | 14.60 | 0.968 | 7.93 | 59 475.00 | 45 412.24 |
| NOR | 3.937 | 18.89 | 0.973 | 17.91 | 134 325.00 | 102 564.10 |
| ES | 6.397 | 24.19 | 0.984 | 59.01 | 442 575.00 | 337 928.98 |
| TE | 9.842 | 26.84 | 1.002 | 156.11 | 1 170 825.00 | 893 985.65 |
| | 11.811 | 37.86 | 1.013 | 276.38 | 2 072 850.00 | 1 582 728.55 |
| | 2.952 | 16.67 | 0.655 | 4.09 | 30 697.50 | 23 439.13 |
| SUR | 3.937 | 21.61 | 0.658 | 9.15 | 68 662.50 | 52 427.38 |
| ES | 6.397 | 27.79 | 0.668 | 30.00 | 225 000.00 | 171 799.17 |
| TE | 9.842 | 30.91 | 0.685 | 79.81 | 598 575.00 | 457 043.07 |
| | 11.811 | 53.00 | 0.696 | 129.41 | 970 575.00 | 741 084.38 |

| Método | (+) | (-) | Volumen Neto | Volumen Total |
|---------------------|---------------|---------------|-----------------|------------------|
| Caldwell | 843 164.08 | 532 221.71 | 310 942.37 | 1 375 385.79 |
| Castanho (Plunging) | 43 193 950.54 | 11 119 893.55 | 32 074 056.99 | 54 313 844.09 |
| Castanho (spilling) | 321 407.10 | 76 222.36 | 245 184.74 | 397 629.46 |
| Larras | 80 342.11 | 52 465.17 | 27 876.94 | 132 807.28 |
| CERC | 28 195 147.15 | 14 561 506.39 | 13 633 640.76 | 42 756 653.54 |

V. CONCLUSIONES.

V. CONCLUSIONES.

Es importante considerar en el diseño, construcción y vida útil de una obra portuaria, el conocimiento de varios factores que tienen gran influencia en el comportamiento de dicha obra, ya que de éstos dependerán las medidas que se deban tomar para su óptima conservación en la etapa de funcionamiento.

El Transporte Litoral es uno de los factores que se deben considerar, ya que permite determinar los regimenes de a-zolve, erosión y cantidad de material en tránsito, que prevalecen para una zona durante un ciclo anual; y su conocimiento es de gran ayuda para planear medidas que eviten el mal funcionamiento de estructuras de gran importancia debido a la acumulación de sedimentos.

Existen dos campos de estudio que nos permiten evaluar el Transporte Litoral en una zona dada:

Estudios teóricos o empíricos.

Estudios prácticos o de campo.

Los estudios teóricos, están basados en fórmulas matemáticas deducidas a partir de datos estadísticos de oleaje y parámetros playeros o por medio de modelos. Los métodos teóricos, desarrollados en capítulos anteriores de este trabajo son:

Método de Caldwell.

Método de Larrás.

Método de Castanho.

Método del CERC.

El método de Caldwell, toma en cuenta la energía del oleaje. Es de uso local y sólo puede aplicarse en las playas donde se obtuvieron los parámetros o en otras de características semejantes. Su fórmula relaciona la energía del oleaje por unidad de longitud de playa con el volumen de arena que se mueve en un intervalo de tiempo.

El método de Larrás, toma en cuenta la energía del oleaje y las características del material transportado. Su fórmula es muy importante debido a esto, pues la intensidad del Transporte Litoral depende de las características del sedimento.

El método de Castanho, está desarrollado de acuerdo a dos tipos de ruptura: en plunging y en spilling. La ruptura en plunging, considera el arrastre en suspensión y la ruptura en spilling considera el arrastre en el fondo. En el desarrollo de las expresiones, considera además el coeficiente τ_c , que es la fuerza necesaria para arrastrar el material. Sin embargo, este método tiene el inconveniente de analizar las dos condiciones por separado y siempre existe el transporte en

suspensión y fondo a la vez.

El método del CERC, se basa en la recopilación de datos obtenidos de modelos y playas, además, toma en cuenta las condiciones promedio del oleaje. Sin embargo, no considera en sus estudios las características granulométricas del material en movimiento.

Los estudios prácticos o de campo, permiten una determinación cuantitativa de los efectos del Transporte Litoral por medio de evaluaciones de la cantidad de material atrapado por barreras naturales o artificiales a lo largo de la costa con el método de espigones de prueba. Y una determinación cualitativa por medio de la aplicación de métodos tales como: Trazadores radioactivos y trazadores fluorescentes.

El método de espigones de prueba, tiene el inconveniente de su elevado costo. Sin embargo, es aconsejable utilizarlo cuando va a formar parte de una estructura definitiva como puede ser una escollera, rompeolas o espigón.

Los trazadores son muy útiles en la localización de las trayectorias que sigue la arena y en la cuantificación del Transporte Litoral. Sin embargo, el de trazadores radioacti--

vos presenta mayores ventajas en comparación con el de trazadores fluorescentes, ya que, el método radioactivo es más costoso, más lenta su aplicación, más peligroso su manejo y causa más daños en la ecología de la zona en estudio que el de trazadores fluorescentes. Además la sensibilidad óptica de la técnica fluorescente es similar a la obtenida por el método radioactivo.

El estudio del Transporte Litoral hace necesario el conocimiento de varios parámetros propios de cada playa y estos pueden variar de un lugar a otro, por lo que la aplicación de un método determinado, no puede proporcionarnos resultados confiables.

De los métodos teóricos expuestos, el método de Larras es el que reúne el conocimiento del mayor número de parámetros necesarios, además del conocimiento de las características del material transportado, lo que redundará en un resultado más confiable, al menos en nuestras playas, en el del Transporte Litoral.

De los métodos de campo, el mejor sería el espigón de prueba, sin embargo, el método de trazadores fluorescentes es más práctico y su aplicación permite obtener resultados satisfactorios.

Es definitivo que la correlación de los resultados obtenidos en la aplicación de los métodos teóricos o prácticos

nos lleva a la obtención de resultados más apropiados que los obtenidos por separado. Además, la aplicación de ambos métodos nos permite hacer correcciones y, en ocasiones, desarrollar un nuevo modelo matemático.

Es difícil la evaluación del Transporte Litoral, y aún cuando se apliquen determinados métodos teóricos o prácticos, se tendrá gran incertidumbre en cuanto a los volúmenes movidos por oleaje, por lo que es recomendable la aplicación de diversos métodos y formas de cuantificarlo que permitan reducir esta inseguridad.

Resultaría importante buscar en el sitio, testigos físicos que permitan apreciar tendencias de acarreo para corroborar los resultados, ya que puede suceder, que aunque los métodos sean adecuados, los datos no sean muy precisos y resulten valores completamente opuestos, además de que se trata de un fenómeno aleatorio.