

41121
39



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGÓN

"DEFORMACIONES DEL OLAJE Y
SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA
DIFRACCIÓN"

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

JUAN CARLOS VEGA JIMÉNEZ

ASESOR: ING. VALENTE TORRES ORTIZ



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

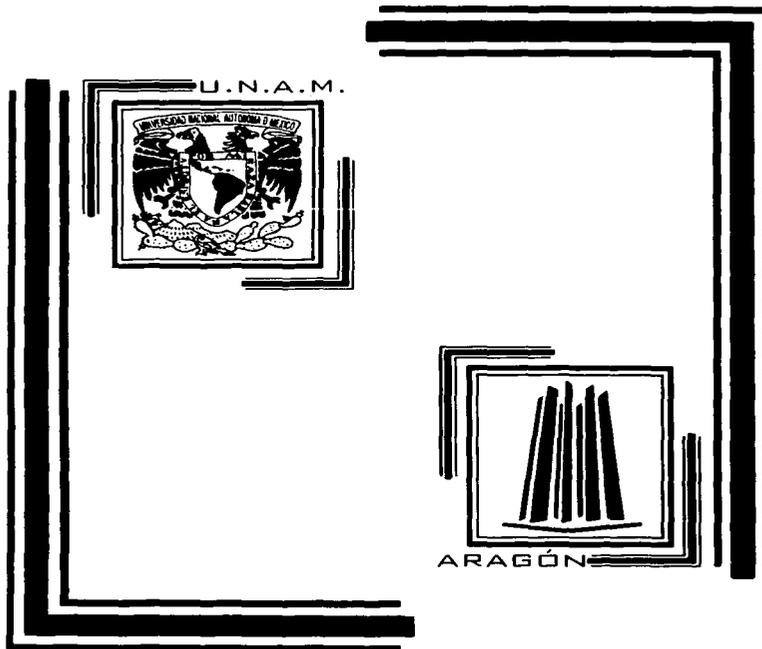
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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.

TESIS

NO-
CUC-
SI-
Y
E
LE
G
R
E
D
S
E
Z
O-
A
M
O
R
R
E
F
E
D



NUMÉRICA DE LA DIFRACCIÓN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN**

UNIVERSIDAD NACIONAL
SISTEMA DE
MEXICO

**JUAN CARLOS VEGA JIMÉNEZ
PRESENTE.**

En contestación a la solicitud de fecha 25 de febrero del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. VALENTE TORRES ORTIZ pueda dirigirse al trabajo de tesis denominado "DEFORMACIONES DEL OLEAJE Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DIFRACCIÓN", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México, 18 de marzo de 1997
LA DIRECTORA

L. Turcott
ARQ. LILIA TURCOTT GONZÁLEZ



- C p Secretaría Académica.
C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Civil.
C p Asesor de Tesis.

LTG/AIR/11a.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

A mis padres:

Les agradezco; sencillamente por darme la vida y por que reconozco el gran sacrificio que hicieron para darnos escuela a mis hermanos y a mí, y creo que una carrera, es la mejor herencia que me pudieron haber dado. Adolfo Vega García y Olaya Jiménez Castro. Gracias, por ser los mejores padres del mundo, Dios me los bendiga.

A mis hermanos:

Sencillamente; por que de cada uno de ellos he aprendido cosas valiosas. Carmelo, Lucia, Francisco, Martín, Ramón, Araceli, Jaime, Jacqueline, Oscar, Nicolás y Virginia. Gracias.

A mi asesor:

Primeramente; Gracias, por haberme facilitado la información suficiente para llevar a cabo este proyecto; además, de ser quien leyó este documento y me indicó un sinnúmero de mejoras y formas de aclarar los conceptos para la lectura del presente trabajo. Y en especial, le agradezco el haber aceptado dirigir mi tesis, ya que el esfuerzo que yo haga de hoy en adelante, el reconocimiento también será suyo.

A la U.N.A.M:

Por ser como mi segunda casa y por cobijarme desde el inicio de mi enseñanza media, hasta el término de mi carrera universitaria. Le agradezco, por darme enseñanzas de sabiduría y por que realmente es un honor portar la camiseta U.N.A.M.

A la Enep Aragón:

De ella; he aprendido a ser una persona madura y responsable, Gracias por cederme el privilegio de recibir cátedras y buenos consejos de ingenieros como: Heredia Domínguez Jesús Ignacio, Álvarez Bautista Gabriel, Gutiérrez Vázquez Karla Ivonne, García Cuevas Pascual, Lara Ruiz José, Toxky López Gerardo, Peña Alcalá Benjamín, Ruiz González Gabriel, Lovaco Amaya José Francisco, Ortiz León Martín, Ramírez Legaria Octavio Q.E.P.D, Pantoja García Jorge, Almazán Jaramillo Adolfo, García Santamaría Gilberto, Saavedra Otero Miguel Ángel, Heras Cruz Ricardo, Reyes Delgadillo Rubén, y de mi asesor de tesis, Valente Torres Ortiz.

A mis compañeros y amigos:

Por saber ser amigos de verdad; gracias, Ya que cada uno tiene algo que los hace ser especial. Ana Lilia, Sandra, Claudia, Karla, Juan Gerardo, Ricardo, Juan Gabriel, Carlos Ali, Valentín, Isidro, Miguel Ángel, Cesar, Israel y Miguel. Y a grandes amigos que a pesar del poco tiempo de conocernos me han dado lo mejor, su amistad y algo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

más; Sandra B, ing. Claudia D, Belén, Fermín R, Gregorio C, ing. Antonio D, Fernando B, Israel S, Mauro, ing. Fernando D.

A mis sinodales:

Por confiar en un servidor; gracias. Ing. Heredia Domínguez Jesús Ignacio, ing. Gutiérrez Vázquez Karla Ivonne, ing. Torres Ortiz Valente, ing. Pantoja García Jorge, ing. Sosa Rodríguez Mario.

A mi novia:

A ella; simplemente por ser una chica sencilla y agradable, y por que en poco tiempo me ha demostrado lo transparente que es y lo especial que puede llegar a ser nuestra relación, gracias.

Grupo senda de vida:

Al grupo senda de vida; gracias. Y sobre todo gracias a Dios, quien nos guía a vivir de la mejor manera posible.

A usted:

Mil gracias; por que como lector se ha tomado la molestia de leer los agradecimientos de este trabajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE

	Pag.
<i>Agradecimientos</i>	vii
PRIMERA PARTE	
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. REFRACCIÓN DEL OLEAJE	7
2.1 Cálculo de la refracción y coeficiente de refracción.....	9
2.2 Método de cálculo de la refracción del oleaje regular.....	11
2.2.1 Método que toma como base la línea de la dirección del oleaje. (Método gráfico por ortogonales).....	13
2.2.2 Método gráfico por ortogonales con computadora.....	16
2.2.3 Análisis del oleaje por el método diferencial con computa- dora.....	17
2.2.4 Problemas en el método que toma como base la línea de dirección del oleaje.....	18
2.2.5 Límite del cálculo de la refracción del oleaje regular.....	18
2.3 Cálculo de la refracción del oleaje irregular.....	20
CAPÍTULO 3. DIFRACCIÓN DEL OLEAJE	25
3.1 Generalidades.....	27
3.2 Método de planos dobles de la difracción del oleaje.....	72
3.3 Combinación de la difracción y la refracción.....	74
CAPÍTULO 4. REFLEXIÓN DEL OLEAJE	77
4.1 Generalidades.....	79
4.2 Reflexión en un talud uniforme.....	81
4.3 Estimación del coeficiente de reflexión.....	84
4.4 Deformación por flexión de oleaje alrededor del morro del rompeolas y en sus deflexiones.....	85
1. Generalidades.....	85

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ÍNDICE

	Pag.
2. Método aproximado para calcular la distribución de las alturas del oleaje a lo largo de la deflexión del rompeolas....	85
4.5 Deformación del oleaje por efecto del fondo.....	91
SEGUNDA PARTE	
CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DIFRACCIÓN.....	95
5.1 Antecedentes.....	97
5.2 Regiones de cálculo del coeficiente de difracción, $ \Phi(X,Y) $	100
5.3 Difracción del oleaje por dos rompeolas semi-infinitos sin reflexión en el lado interior de estos.....	106
5.4 Difracción del oleaje por dos rompeolas semi-infinitos con reflexión en el lado interior de estos.....	111
5.5 Cambio del valor de ϕ por las posiciones de los rompeolas...	115
5.5.1 Caso de $0 \leq \alpha \beta \leq \pi$	115
5.5.1.1 Caso de $\beta < \alpha \beta$	115
5.5.1.2 Caso de $\beta > \alpha \beta$	121
5.5.2 Caso de $\alpha \beta > \pi$	124
5.6 Reflexión del oleaje originada por muros y el paso de oleajes dentro de una dársena secundaria.....	127
5.7 Cálculo de la altura del oleaje en el área dentro del puerto....	129
5.7.1 Teoría.....	129
5.7.2 Método de cálculo.....	132
5.8 Estructura del programa.....	134
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	139
<i>Bibliografía</i>	143

CAPÍTULO

1

INTRODUCCIÓN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo; estudiar los fenómenos de las deformaciones que presenta el oleaje durante su generación (refracción, difracción y reflexión) y sus causas. Así como, la presentación de la simulación numérica del fenómeno de la difracción.

Primeramente hay que reconocer, que pretender abarcar del todo el estudio de las deformaciones que se presentan en el oleaje, en un solo trabajo, sería un reto que cualquier conocedor del tema calificaría como ingenuo. Ya que, profundizar en el tema, ha llevado a los especialistas años de investigación, sin lograr aclarar totalmente estos complicados fenómenos. Sin embargo, en este trabajo se pretende presentar una perspectiva académica y crítica que vaya más allá de mostrar sólo una visión pasiva y poco comprendida del tema.

Muchas veces cuando se inicia un trabajo de esta envergadura, es porque se tiene inquietud de conocer más acerca del tema, estudiar los acontecimientos que se presentan en el mar, y reconocer que éste es una fuerza poderosa, por su propio derecho. Lo anterior induce a analizar cada uno de los fenómenos del oleaje, que son los que transforman las condiciones mar adentro y en algún lugar cercano a la costa, donde se necesitan estos datos ya transformados. Estos fenómenos son: la refracción, la difracción, la reflexión, deformación por efecto del fondo y deformación por rompimiento del oleaje.

Lamentablemente, la poca información que existe de estos fenómenos que se generan en el mar, es un inconveniente en el interés propio de los estudiantes. Sin embargo, éste fue uno de los puntos de utilidad para el inicio de este trabajo, que se espera realmente motive e invite a los alumnos a seguir investigando acerca de los fenómenos que se pueden presentar en el mar y sus efectos tanto positivos como negativos en la costa.

Sin embargo, se sabe que en cualquier estudio de ingeniería de costas o portuaria, tal como el diseño de las instalaciones dentro del puerto o la regeneración de playas, se requiere de mayor cantidad de datos para realizar un diseño óptimo. Por ello, el interés creció a tal grado de investigar y conocer aún

más acerca del tema; como por ejemplo conocer la importancia de la refracción del oleaje, que estriba en el hecho de que prácticamente todas las estructuras marítimas se construyen en aguas bajas o someras, donde las olas sufren considerables cambios. Por lo tanto, el estudio del fenómeno de refracción es materia obligada para determinar las características del oleaje y de sus acciones. El análisis de los fenómenos anteriormente mencionados requiere del manejo de fórmulas complejas.

Es importante saber, que el fenómeno de reflexión del oleaje en el diseño de las áreas de agua dentro del puerto, se produce por la acción del oleaje en muros y muelles, él cual puede provocar el fenómeno de "resonancia", y podría poner en peligro a las embarcaciones. Por lo tanto es recomendable, en el proyecto del puerto tratar de evitar hasta donde sea posible, el diseñar elementos reflejantes.

El estudio del comportamiento de la difracción resulta necesario, ya que éste influye en las operaciones portuarias. Por lo cual la aplicación de los modelos numéricos son hoy en día, en el área de la hidrodinámica marítima, una herramienta muy competitiva. Ya que, tienen una gran ventaja en cuanto a; costo, tiempo de ejecución, versatilidad y calidad.

Así mismo, este trabajo intenta dar a conocer una idea general de cada uno de las deformaciones a tal grado de comprenderlas para así tener las bases sólidas de cómo realizar un modelo matemático.

El presente trabajo consta de dos partes. La primera está constituida por los capítulos 2 al 4, los cuales presentan las deformaciones de oleaje. En el capítulo 2, se hace referencia al fenómeno de la refracción del oleaje, en el cuál se desglosan cada uno de los cálculos para la refracción del oleaje regular como para el oleaje irregular. Además, de citar los métodos utilizados para calcular el fenómeno. En el capítulo 3, se presenta otro de los fenómenos del oleaje, que es la difracción, abarca el método de planos dobles generalmente utilizado para calcularla, se presentan figuras representativas de este fenómeno en rompeolas semi-infinitos con ángulos variados, figuras de difracción en el caso de que el oleaje incida oblicuamente. Posteriormente se presenta una comparación entre los fenómenos de la difracción y la refracción del oleaje, analizando el

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

comportamiento de cada una de ellas. En el capítulo 4, que se refiere al fenómeno de la reflexión del oleaje, presenta la utilidad de estudiar este fenómeno, cuando se diseñan estructuras dentro del puerto, además de la estimación de los coeficientes de reflexión ya sea en el campo o teniendo en cuenta resultados de ensayos en modelos, y se cita un ejemplo cuando se presenta la reflexión alrededor de un rompeolas recto o con deflexiones. Más adelante se da una explicación detallada, cuando se presenta la deformación por efecto de fondo mostrando la figura de los coeficientes de fondo y la manera de cómo se calcula cada uno de ellos.

La segunda parte, presenta la simulación numérica del fenómeno de la difracción que está compuesta por los capítulos 5 y 6 en los que se reseña el fenómeno de difracción del oleaje para dos casos: cuando existen dos rompeolas semi-infinitos con efecto de reflexión en el lado interior de éstos, explicando a detalle su procedimiento y, cuando se presenta sin efecto de reflexión en el lado interior de éstos. Se analiza la reflexión originada por muros y el paso del oleaje dentro de una dársena secundaria. Además, se presenta la estructura de un programa para el cálculo de la difracción. Sabiendo que en los últimos años se ha realizado un enorme progreso encaminado a desarrollar modelos matemáticos unificados, útiles para modelar los procesos de transformación del oleaje desde profundidades indefinidas hasta reducidas. Cabe mencionar, que la aplicación de modelos numéricos, a problemas de la ingeniería hidráulica portuaria, se encuentra en pleno desarrollo. Sin embargo, en este trabajo se da la iniciativa para continuar su investigación. Por último, en el capítulo 6 se dan las conclusiones a las cuáles se llegó en la presente investigación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPÍTULO

2

REFRACCIÓN DEL OLEAJE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

7

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2. REFRACCIÓN DEL OLAJE

En la zona de aguas someras, el fenómeno de la refracción ocurre por el cambio local de la celeridad del oleaje correspondiendo a un cambio en la profundidad. Por eso, se deben considerar los cambios de dirección y la altura de ola. Se recomienda considerar las características del espectro del oleaje para calcular la refracción.

2.1 Cálculo de la refracción y coeficiente de refracción

Cuando el oleaje incide oblicuamente y avanza de una profundidad h_1 a una profundidad h_2 , el oleaje se refracta sobre la línea de frontera y la celeridad del oleaje cambia (fig. 2.1). Si el intervalo entre dos líneas de la dirección del oleaje cambia de b_1 a b_2 y se considera que la energía del oleaje se conserva entre las dos líneas de la dirección del oleaje, y si no hay pérdida de energía de oleaje por fricción en el fondo del mar, entonces las proporciones de H_2 que corresponde a la profundidad h_2 y H_1 que corresponde a la profundidad h_1 se presentan en la fórmula siguiente por la continuidad de la energía transportada:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{C_{g1}}{C_{g2}}} \cdot \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad (\text{fórmula. 2.1})$$

donde:

- C_{g1} , C_{g2} : Celeridad de grupo en la profundidad h_1 y h_2 , respectivamente
 b_1 , b_2 : Intervalo de la línea u ortogonal de la dirección del oleaje en la profundidad h_1 y h_2 , respectivamente.

TEST CON
FALLA DE ORIGEN

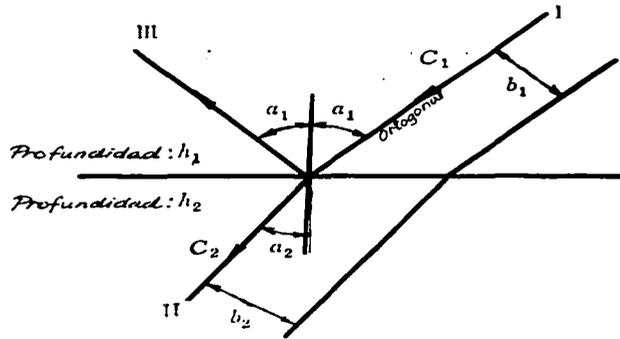


FIG.-2.1 REFRACCIÓN DEL OLEAJE

En esta fórmula $\sqrt{b_1/b_2}$ y $\sqrt{C_1/C_2}$ representan el efecto de la refracción y el efecto de fondo, respectivamente. $\sqrt{C_{G1}/C_{G2}}$ se puede representar como el coeficiente de fondo, el cual se indica en la siguiente expresión:

$$\sqrt{\frac{C_{G1}}{C_{G2}}} = \frac{K_{S1}}{K_{S2}} \quad (\text{fórmula. 2.2})$$

donde, K_{S1} y K_{S2} son los coeficientes de fondo en las profundidades h_1 y h_2 , respectivamente.

Cuando el intervalo de la línea de dirección de oleaje cambia de b_0 a b por el fenómeno de refracción, la proporción del cambio de la altura del oleaje se le llama el coeficiente de refracción. El coeficiente de refracción (K_r) se calcula con la fórmula siguiente:

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \quad (\text{fórmula. 2.3})$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2 Método de cálculo de la refracción del oleaje regular

Hay algunos métodos para calcular el coeficiente de refracción del oleaje regular como son:

- (1) Método que toma como base la línea de la dirección del oleaje. (método gráfico por ortogonales)
- (2) El método uno realizado con computadora
- (3) Método de análisis de oleaje numérico por el método diferencial con computadora.

Se puede elegir entre estos métodos para calcular la refracción de acuerdo a la situación.

El coeficiente de refracción, en caso de que las curvas batimétricas sean rectas y paralelas a la costa, se calculan con las fórmulas siguientes:

$$\text{Sen } \alpha = \text{Sen } \alpha_0 \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (\text{fórmula. 2.4})$$

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}} \quad (\text{fórmula. 2.5})$$

donde, L , α , α_0 son la longitud del oleaje, el ángulo de incidencia del oleaje y el ángulo de incidencia del oleaje en aguas profundas, respectivamente.

El coeficiente de refracción y el cambio de dirección del oleaje se presentan en las figs. 2.2(a) y 2.2(b) aplicando las fórmulas 2.4 y 2.5.

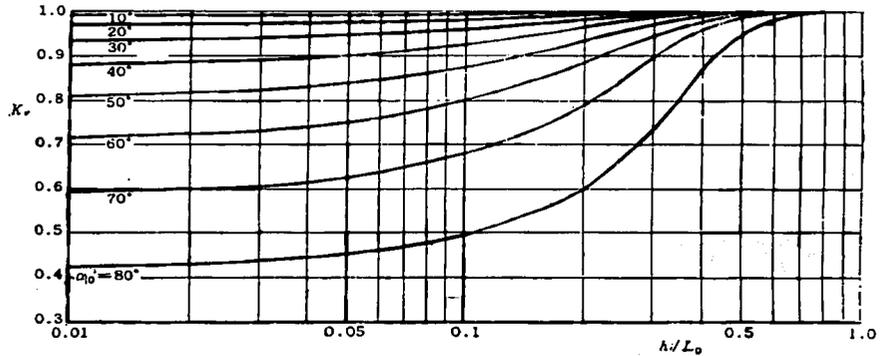


FIG.-2.2(a) COEFICIENTE DE REFRACCIÓN EN CASO DE QUE LAS LINEAS BATIMÉTRICAS SEAN RECTAS Y PARALELAS A LA COSTA

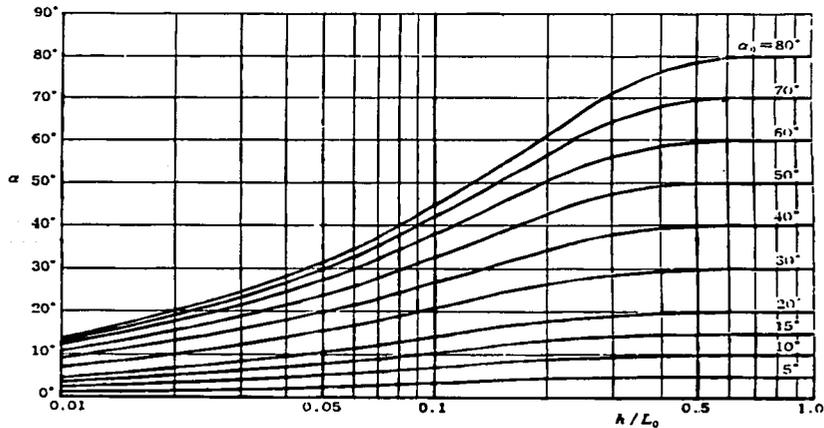


FIG.-2.2(b) CAMBIO DE DIRECCIÓN DE OLAJE REGULAR EN CASO DE QUE LAS LINEAS BATIMÉTRICAS SEAN RECTAS Y PARALELAS A LA COSTA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.1 Método que toma como base la línea de la dirección del oleaje. (Método gráfico por ortogonales).

(a) En el caso de que el ángulo de incidencia del oleaje sea menor de 80° (fig. 2.3).

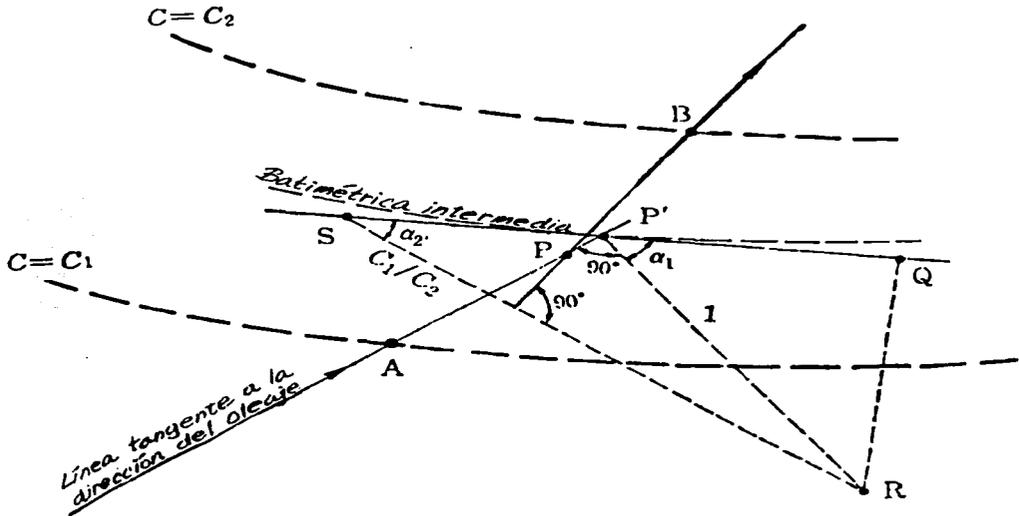


FIG.-2.3 MÉTODO GRÁFICO DEL CÁLCULO DE LA REFRACCIÓN

- (1) Escoger el período y la dirección del oleaje en aguas profundas.
- (2) Calcular la longitud de la ola y trazar las líneas batimétricas. En este caso es necesario suavizar éstas.
- (3) Calcular la celeridad del oleaje correspondiente a la profundidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- (4) Trazar la batimétrica intermedia.
- (5) Prolongar la línea tangente a la dirección del oleaje y poner el punto (P') en la intersección entre la línea tangente y la batimétrica intermedia.
- (6) Trazar una línea perpendicular a P' y elegir un punto arbitrario llamándolo R sobre esta línea perpendicular.
- (7) Trazar una línea tangente al punto P'.
- (8) Trazar un círculo con un radio igual a $\overline{PR} \times (C_1/C_2)$ e intersectar la línea tangente al punto P' localizando el punto S siendo $\angle QSR$ el ángulo de refracción.
- (9) Elegir una línea perpendicular a \overline{SR} que tenga una relación $\overline{AP} = \overline{BP}$ donde P está sobre la línea perpendicular y sobre la línea \overline{AP} . Donde B es el punto sobre la línea batimétrica con celeridad C_2 .
- 10) Repetir el mismo procedimiento para cada línea batimétrica.

Los pasos (6) a (9) pueden simplificarse si se usa una regla especial llamada regla de refracción y que se presenta en la fig. 2.4.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

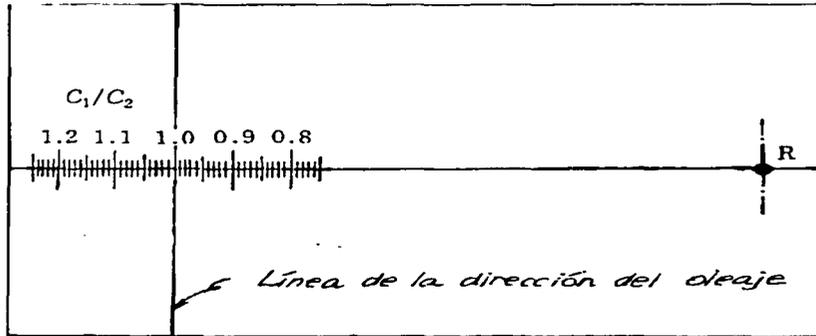


FIG.-2.4 REGLA DE REFRACCIÓN

(b) En el caso, de que el ángulo de incidencia del oleaje sea mayor de 80° (fig. 2.5)

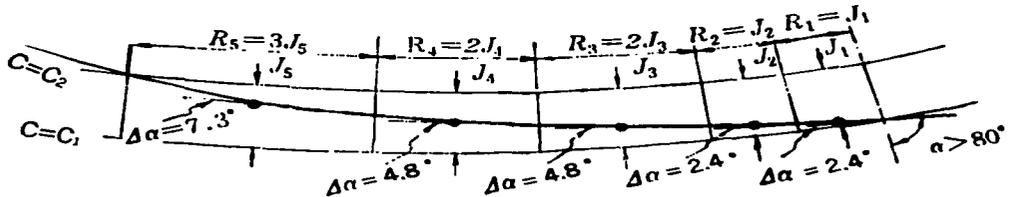


FIG.-2.5 FORMA DE DIBUJAR EL MÉTODO GRÁFICO DEL CÁLCULO DE LA REFRACCIÓN CUANDO α ES MAYOR QUE 80°

- (1) En este caso, primero se divide en intervalos arbitrarios las dos líneas batimétricas.
- (2) Calcular el nuevo ángulo con la (fig. 2.6) en el punto intermedio de cada intervalo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En la figura.2.6, J es la distancia entre dos líneas batimétricas y R es el intervalo dividido con valores desde R = J hasta R = 3J.

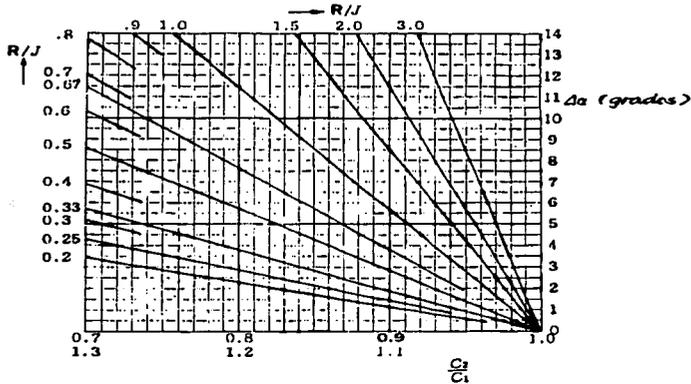


FIG.-2.6 CAMBIO DEL ÁNGULO DE LA DIRECCIÓN DEL OLAJE

2.2.2 Método gráfico por ortogonales con computadora.

Este método es básicamente el mismo que se describe en 2.2.1. En este método, la ecuación básica se calcula con computadora directamente. La línea de la dirección de oleaje y las coordenadas se presentan en la fig. 2.7

$$\frac{\partial \alpha}{\partial s} = \frac{1}{C} \left(\sin \alpha \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \alpha \frac{\partial C}{\partial y} \right)$$

(fórmula. 2.6)

$$\frac{\partial^2 \alpha}{\partial s^2} + p(s) \frac{\partial \alpha}{\partial s} + q(s) \alpha = 0$$

(fórmula. 2.7)

$$p(s) = \frac{1}{C} \left\{ -\cos \alpha \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \sin \alpha \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right\}$$

(fórmula. 2.8)



$$g(s) = \frac{\text{Sen}^2 \alpha}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial T^2} - 2 \text{Sen} \alpha \text{Cos} \alpha X \frac{\partial^2 C}{\partial T \partial Y} + \frac{\text{Cos}^2 \alpha}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2} \quad (\text{fórmula. 2.9})$$

donde, S es la longitud de la línea de la dirección del oleaje, α es el ángulo entre el eje x y la línea de la dirección del oleaje y β es la proporción del ancho entre dos líneas de dirección del oleaje que se da con la fórmula siguiente:

$$\beta = \frac{b}{b_0} = \frac{1}{Kr^2} \quad (\text{fórmula. 2.10})$$

donde, b_0 es el ancho entre dos líneas de la dirección del oleaje en aguas profundas.

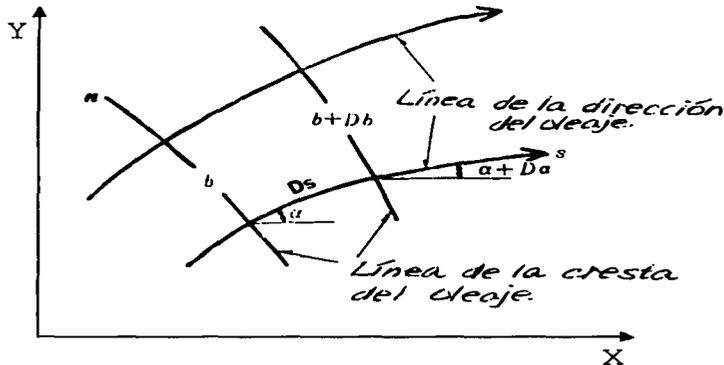


FIG.-2.7 LÍNEAS DE LA DIRECCIÓN DEL OLAJE Y SUS COORDENADAS

2.2.3 Análisis del oleaje por el método diferencial con computadora.

En este método, primero se calcula la ecuación de Euler donde no se considera el apartado no-lineal. Después se integra directamente por el método diferencial con computadora.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2.4 Problemas en el método que toma como base la línea de dirección del oleaje.

De vez en cuando las líneas se cruzan en este método (método gráfico por ortogonales). Se calcula la altura de la ola infinita en el punto de intersección de las dos líneas. Sin embargo, la altura de la ola no será infinita en realidad, por el flujo de la energía del oleaje cruzando las líneas de la dirección del oleaje. En este caso, en este punto se ensancha el intervalo de las líneas de la dirección del oleaje o se igualan las alturas de la ola que se calcula como oleaje incidente de dos direcciones.

2.2.5 Límite del cálculo de la refracción del oleaje regular.

La refracción del oleaje regular solamente puede calcularse cuando el oleaje tiene la banda del espectro estrecho como "swell" o "tsunami" y la dispersión direccional del oleaje es pequeña. Es necesario el cálculo de la refracción del oleaje irregular por el oleaje que tiene la banda de espectro ancho y la dispersión direccional del oleaje es grande con el oleaje de viento.

Las figs. 2.8(a) y 2.8(b) presentan los coeficientes de la refracción y el cambio de la dirección, en el caso del oleaje irregular cuando las líneas batimétricas son rectas y paralelas a la costa. Comparando las figs. 2.2(a) y 2.8(a) o las figs. 2.2(b) y 2.8(b) las diferencias de los resultados de los cálculos entre oleaje regular y oleaje irregular son muy pequeñas. Entonces, los resultados del cálculo del oleaje regular pueden aplicarse al coeficiente de refracción cuando la línea batimétrica varía muy poco.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

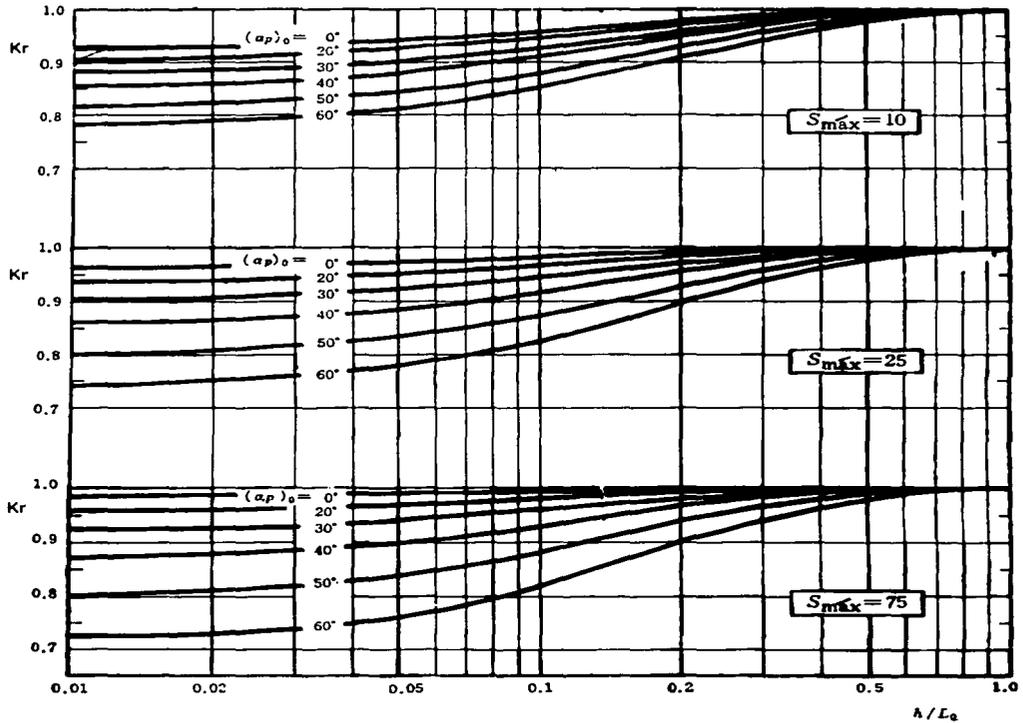


FIG.-2.8(a) COEFICIENTE DE REFRACCIÓN DEL OLAJE IRREGULAR EN CASO DE QUE LAS LÍNEAS BATIMÉTRICAS SEAN RECTAS Y PARALELAS A LA COSTA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

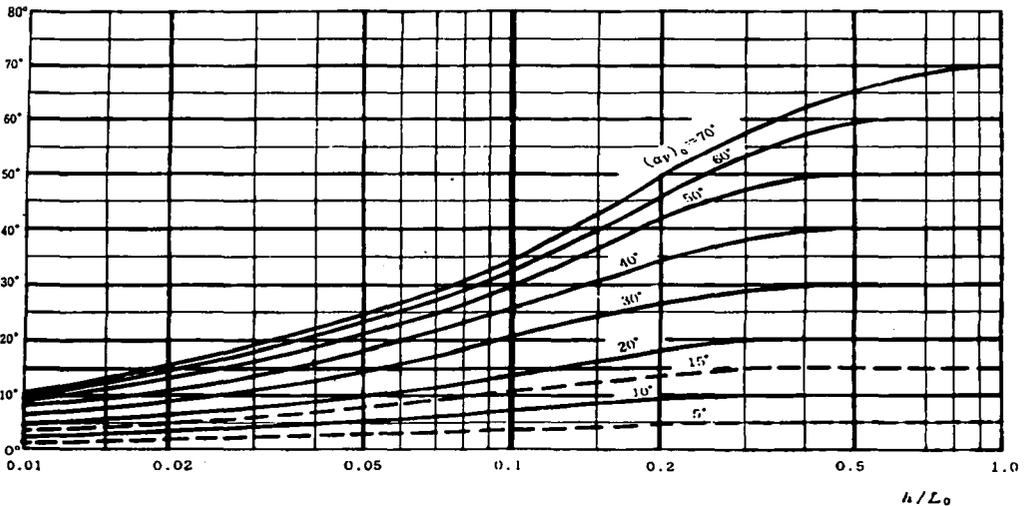


FIG.-2.8(b) CAMBIO DE DIRECCIÓN DEL OLAJE IRREGULAR EN CASO DE QUE LAS LÍNEAS BATIMÉTRICAS SEAN RECTAS Y PARALELAS A LA COSTA

2.3 Cálculo de la refracción del oleaje irregular

Hay dos métodos para calcular la refracción del oleaje y son:

- (1) Método del oleaje componente

En este método, primeramente el oleaje irregular se divide en algunos oleajes componentes y se calcula la refracción de cada oleaje componente. Después se calcula la refracción acumulando los coeficientes de refracción obtenidos.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

(2) Método con la ecuación de equilibrio de energía

Es el método que resuelve la ecuación de equilibrio de energía diferenciando directamente con computadora.

Normalmente puede usarse el método de oleaje componente. Sin embargo, el método con la ecuación del equilibrio de energía es mejor para reducir los errores de cálculo cuando hay muchas líneas de la dirección del oleaje que se cruzan.

El método del oleaje componente, es un método para acumular los resultados de los coeficientes de refracciones del oleaje componente.

Primero, la frecuencia del oleaje irregular se divide en N bandas de $f_1, f_2, \dots a f_N$ con la orden de la frecuencia pequeña quedará la misma energía en cada banda. También la dirección del oleaje irregular de -90° a 90° del centro de la dirección mayor del oleaje se divide en M direcciones de $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots a \theta_M$. La frecuencia $(f_m)_i$ y la dirección $(\theta_m)_j$ del oleaje regular que tiene la frecuencia de f_{i-1} a f_i y la dirección de θ_{j-1} a θ_j y la misma energía del oleaje componente son como sigue:

$$(f_m)_i^* = \frac{1}{0.9} \sqrt{2.9124 N [\phi(\sqrt{2 \ln(\frac{H}{L-1})}) - \phi(\sqrt{2 \ln(\frac{H}{L})})]} \quad (\text{fórmula. 2.11})$$

Donde

$$(\theta_m)_j = \frac{\theta_{j+1} + \theta_j}{2} \quad (\text{fórmula. 2.12})$$

$$\phi(x) = \int_0^x \frac{\exp(-\frac{z^2}{2})}{\sqrt{2\pi}} dz \quad (\text{fórmula. 2.13})$$

$$(f_m)_i^* = (f_m)_i \cdot T^{1/3} \quad (\text{fórmula. 2.14})$$

$(f_m)_i^*$ es la frecuencia adimensional

Los resultados del cálculo de $(f_m)^*i$ se presentan en la tabla 2.1. Después del cálculo del $(f_m)^*i$, el coeficiente de refracción del oleaje irregular se puede calcular como sigue:

$$(K_r)_{off} = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \frac{B_j}{N_j} (K_r)_{ij}^2 \quad (\text{fórmula. 2.15})$$

donde:

- M : Número en que se divide la dirección del oleaje
- N_j : Número en que se divide la frecuencia en la zona de la dirección "j" éxima del oleaje
- B_j : Proporción de energía del oleaje en la zona de la dirección en que fue dividida por todas las direcciones

B_j se calcula con la fig. 2.9 que es la curva de acumulación de energía del espectro del oleaje de cada dirección deduciendo el valor en θ_{j-1} del valor en θ_j . θ_j es el ángulo que se desvía de la dirección centro.

Por ejemplo, se calculará el coeficiente de refracción del oleaje con el método del oleaje componente cuando el período del oleaje por viento en aguas profundas sea de 8 seg.

El número de división de la frecuencia será 5 ($N_j = 5$). La dirección del oleaje se divide en 16 direcciones. Es decir, el área de la dirección de -90° a 90° se divide en 8 direcciones ($M= 8$). En cada zona, el coeficiente de refracción del oleaje regular se calcula como se presenta en la tabla 2.2. $Smáx$ será 10 porque el oleaje es por viento.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El valor de b_j se calcula con la fig. 2.9 como sigue:

Por $(\theta_m)_1 = -67.5^\circ$ y $(\theta_m)_0 = -90^\circ$, el valor de B_1 es 0.029. por $(\theta_m)_3 = -45^\circ$, $(\theta_m)_2 = -67.5^\circ$, el valor de B_2 es 0.071. Como éste, los valores de B_3 se calculan como se presentan en la tabla 2.2. Después se calculan los valores de $\sum (K_j)^2 \cdot b_j$, $\sum B_j \cdot \sum (K_j)^2 \cdot b_j$ por eso, el valor de $\frac{\sum B_j \cdot \sum (K_j)^2 \cdot b_j}{\sum (K_j)^2 \cdot b_j}$ será 0.924 como se presenta en la tabla 2.2 y finalmente, el valor del coeficiente de refracción por el oleaje irregular en aguas profundas que tiene 8 segundos de período significante $(Kr)_{eff}$ será 0.96.

TABLA -2.1 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE $(f_m)_i^*$

N ^o	$(f_m)_i^* = (f_m) \cdot T_{1/8}$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	0.86	1.11	1.85						
4	0.83	1.02	1.23	1.99					
5	0.81	0.96	1.11	1.31	2.11				
7	0.78	0.90	1.00	1.11	1.24	1.45	2.30		
9	0.76	0.87	0.95	1.02	1.11	1.20	1.34	1.55	2.46

(*) N es el número en que se dividió la dirección del oleaje.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

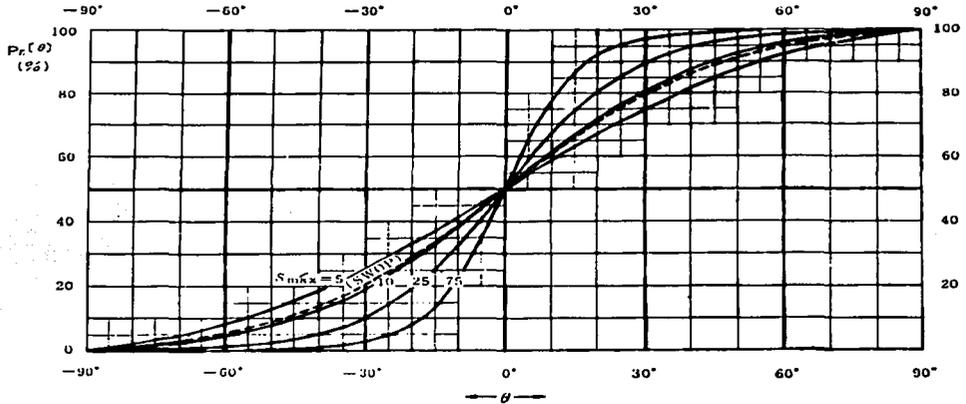


FIG.-2.9 CURVA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA DEL ESPECTRO DEL OLAJE

Dirección		j=1		2		3		4		5		6		7		8		
Frecuencia		$(\theta_m)_j = -78.75^\circ$		-56.25°		-33.75°		-11.25°		11.25°		33.75°		56.25°		78.75°		
i	$(T_m)_i$ (sec)	$(K_r)_{i1}$	$(K_r)_{i1}^2$	$(K_r)_{i2}$	$(K_r)_{i2}^2$	$(K_r)_{i3}$	$(K_r)_{i3}^2$	$(K_r)_{i4}$	$(K_r)_{i4}^2$	$(K_r)_{i5}$	$(K_r)_{i5}^2$	$(K_r)_{i6}$	$(K_r)_{i6}^2$	$(K_r)_{i7}$	$(K_r)_{i7}^2$	$(K_r)_{i8}$	$(K_r)_{i8}^2$	
1	0.1	10.0	0.61	0.372	0.63	0.397	0.70	0.490	0.90	0.810	1.05	1.103	1.14	1.300	1.03	1.061	0.82	0.672
2	0.12	8.3	0.70	0.490	0.75	0.563	0.76	0.578	0.94	0.884	1.03	1.061	1.08	1.166	1.02	1.040	0.85	0.723
3	0.14	7.1	0.75	0.563	0.80	0.640	0.82	0.672	0.99	0.941	1.01	1.020	1.02	1.040	1.01	1.020	0.89	0.792
4	0.16	6.3	0.80	0.640	0.91	0.828	0.94	0.884	1.00	1.000	1.00	1.000	1.01	1.020	1.00	1.000	0.93	0.865
5	0.26	3.8	0.90	0.810	0.95	0.903	0.99	0.980	1.00	1.000	1.00	1.000	1.00	1.000	1.00	1.000	0.95	0.903
$\sum_i (K_r)_{ij}^2$		2.875		3.331		3.604		4.635		5.184		5.526		5.121		3.955		
u_j		0.029		0.071		0.155		0.245		0.245		0.155		0.071		0.029		
$\frac{1}{N_j} u_j \sum_i (K_r)_{ij}^2$		0.017		0.047		0.112		0.227		0.254		0.171		0.073		0.023		
$\sum_j \frac{1}{N_j} u_j \sum_i (K_r)_{ij}^2$																0.924		
$(K_r)_{eff}$																0.96		

TABLA.-2.2 RESULTADOS DEL EJEMPLO PARA CALCULAR $(K_r)_{off}$

TESIS CON
FALLA EN ORIGEN

CAPÍTULO

3

DIFRACCIÓN DEL OLEAJE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3. DIFRACCIÓN DEL OLAJE

3.1 Generalidades

La difracción del oleaje es fundamentalmente una transferencia de la energía de una zona a otras; se presenta cuando el oleaje es interrumpido por un obstáculo que impide su paso a la zona posterior del mismo. El obstáculo puede ser natural (islas) o artificial (rompeolas); las ondas se curvan a su alrededor y penetran dentro de la zona protegida, diciéndose que se presenta una " expansión lateral " fig 3.1.

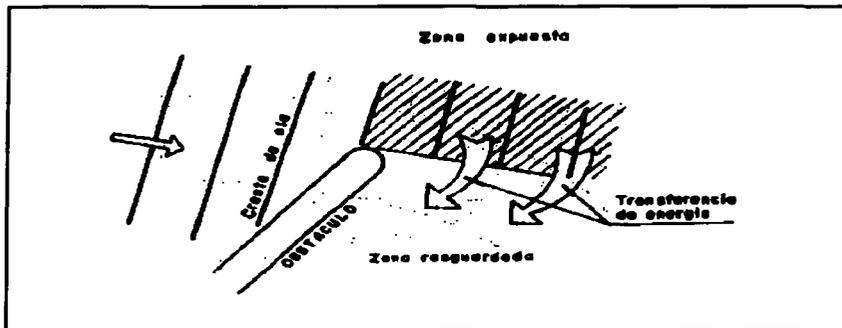


FIG .-3.1 DIFRACCIÓN DEL OLAJE

La altura del oleaje en el área influida por el oleaje difractado en islas o rompeolas se debe estimar con: gráficas de difracción, cálculo de la difracción o ensayos en modelo. En el caso de la estimación de la difracción, generalmente se considera el espectro del oleaje.

Las gráficas de difracción de un rompeolas semi-infinito se presentan en las figs. 3.2 a 3.8. En estas gráficas las líneas continuas son curvas de igual coeficiente de proporción de la altura del oleaje y las líneas punteadas son curvas que indican el periodo.

Los valores de $S_{m\acute{a}x} = 10, 25$ y 75 corresponden a oleaje por viento, swell disminuido y swell, respectivamente. En aguas someras se debe considerar el cambio de $S_{m\acute{a}x}$. La proporción entre la altura de la ola difractada y la ola incidente es el coeficiente de difracción y se presenta como K_d . θ es la dirección de mayor ocurrencia del oleaje. Los ejes se presentan en longitudes adimensionales. En estas gráficas, el oleaje reflejado detrás del rompeolas no se toma en cuenta.

Las fig. 3.9 a 3.12 presentan la difracción cuando se tiene una boca entre rompeolas. La dirección mayor de oleaje es perpendicular al eje del rompeolas.

Los ejes se presentan en longitudes adimensionales en función del periodo. Si se desea calcular la difracción del mismo caso, anteriormente mencionado, cuando el oleaje incide en dirección oblicua, el cálculo numérico se hace con ayuda de la computadora. Si no, puede aplicarse un método aproximado.

Cuando el oleaje incide en dirección oblicua, la dirección del oleaje difractado (θ') cambia como se presenta en la fig. 3.13. Los resultados del cálculo se presentan en las fig. 3.14 a 3.15.

La dirección del oleaje difractado (θ') y la dirección del oleaje incidente se presentan en la tabla 3.1. con esta tabla, puede calcularse el valor de B'/L como sigue:

$$\frac{B'}{L} = \frac{B}{L} \text{ Sen } \theta' \quad (\text{fórmula. 3.1})$$

Después, con las figs. 3.9 a 3.12 se elige la que tenga el mismo valor de B'/L y utilizando la tabla 3.1 se conoce el valor del cambio de la dirección del oleaje y con este valor se sobrepone la figura girando hasta dar con el ángulo obtenido en la tabla 3.1. De no existir la figura de difracción que tenga el mismo valor de B'/L , puede estimarse el coeficiente de difracción con las figuras que tengan valores más cercanos a B'/L .

El período significativo del oleaje irregular difractado será un poco más largo que el período presentado antes de la difracción. Cuando se refleja el oleaje difractado en el muelle, se debe considerar la influencia de este oleaje reflejado. Cuando el valor de H_o'/L_o es menor que 0.005, puede aplicarse las figuras. 3.16 (a) a (h) y 3.17(a) a (h) que representan la difracción del oleaje regular.

En el caso de un ensayo aplicando el oleaje regular, las frecuencias y las direcciones de las componentes del oleaje se deben dividir tal como se mencionó en el capítulo de refracción del oleaje. El coeficiente de difracción del oleaje irregular se calcula como sigue:

$$(K_d)_{eff} = \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \frac{B_j}{N_j} (K_d)_{ij}^2} \quad (\text{fórmula. 3.2})$$

donde:

- M** : Número de divisiones de la dirección del oleaje
- N_j** : Número de divisiones de la frecuencia en la zona de la dirección "J" ésima del oleaje
- B_j** : Coeficiente de energía del oleaje correspondiente a cada división de la dirección del oleaje

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

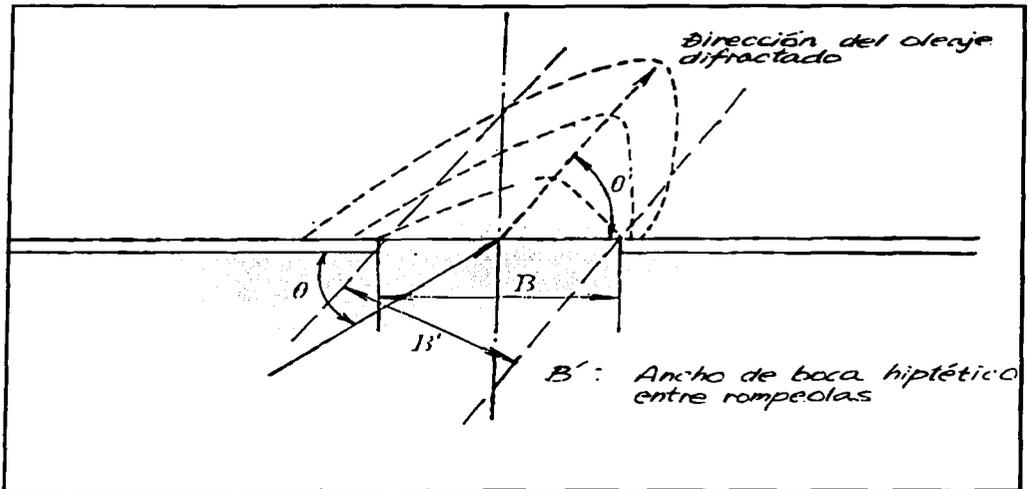


FIG.- 3.13 ANCHO DE BOCA HIPOTÉTICO ENTRE ROMPEOLAS (B') Y DIRECCIÓN DEL OLAJE DIFRACTADO (θ°)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA -3.1 DIRECCIÓN DEL OLAJE DIFRACTADO (*)

(a) $S_{m\acute{a}x} = 10$

B/L	Dirección del oleaje incidente (θ)			
	15°	30°	45°	60°
1.0	53°(38°)	58°(28°)	65°(20°)	71°(11°)
2.0	46°(31°)	53°(23°)	62°(17°)	70°(10°)
4.0	41°(26°)	49°(19°)	60°(15°)	70°(10°)

(b) $S_{m\acute{a}x} = 25$

B/L	Dirección del oleaje incidente (θ)			
	15°	30°	45°	60°
1.0	49°(34°)	52°(22°)	61°(16°)	70°(10°)
2.0	41°(26°)	47°(17°)	57°(12°)	67°(7°)
4.0	36°(21°)	42°(12°)	54°(9°)	65°(5°)

(c) $S_{m\acute{a}x} = 75$

B/L	Dirección del oleaje incidente (θ)			
	15°	30°	45°	60°
1.0	41°(26°)	45°(15°)	55°(10°)	66°(6°)
2.0	36°(21°)	41°(11°)	52°(7°)	64°(4°)
4.0	30°(15°)	36°(6°)	49°(4°)	62°(2°)

(*) los ángulos de desviación se presentan entre paréntesis.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

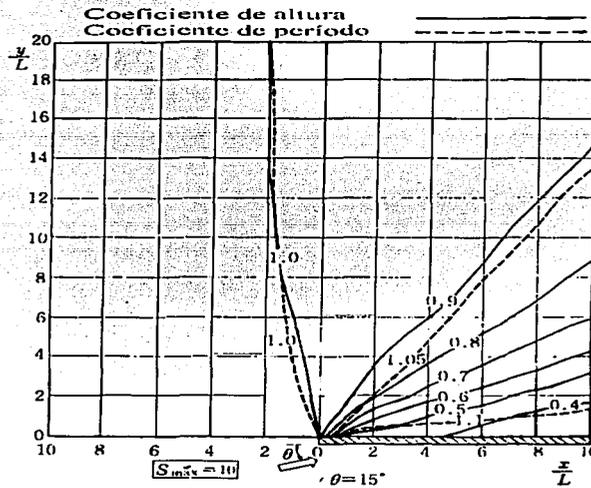
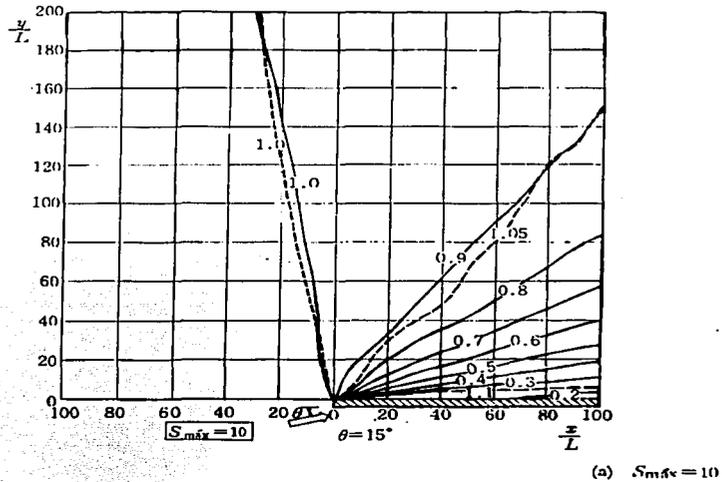


FIG.-3.2(a) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=15^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=10$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

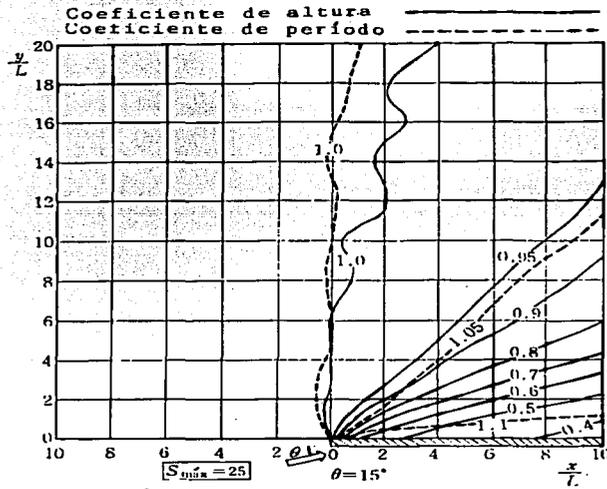
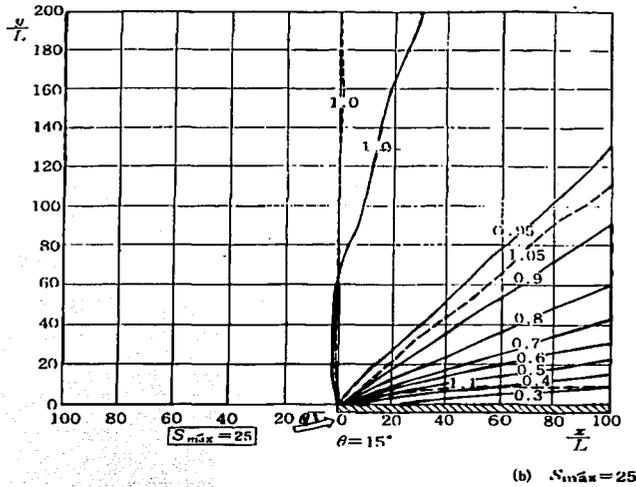
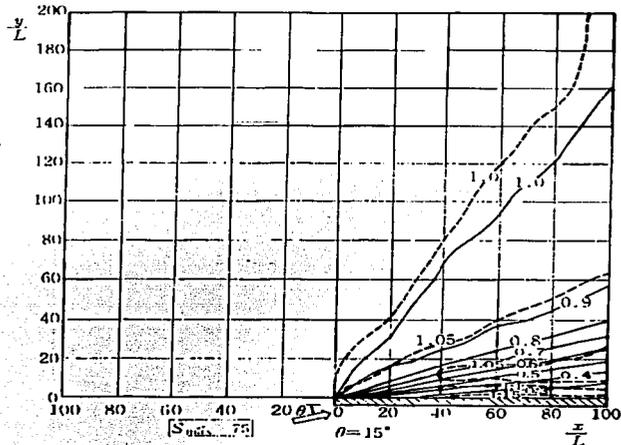


FIG.-3.2(b) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=15^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=25$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



(c) $S_{\text{máx}} = 75$

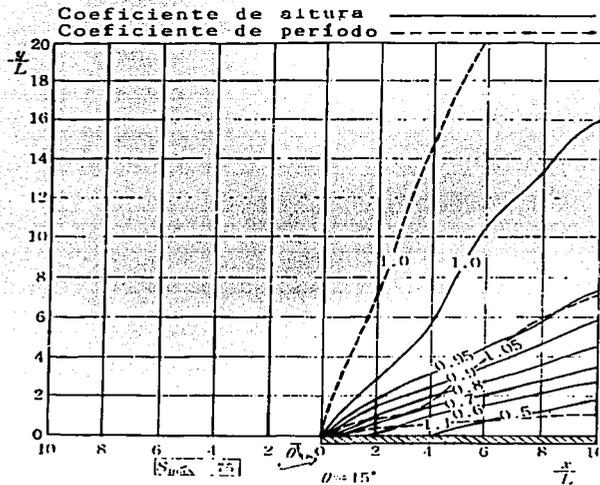


FIG.-3.2(c) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=15^\circ$ y $S_{\text{máx}}=75$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

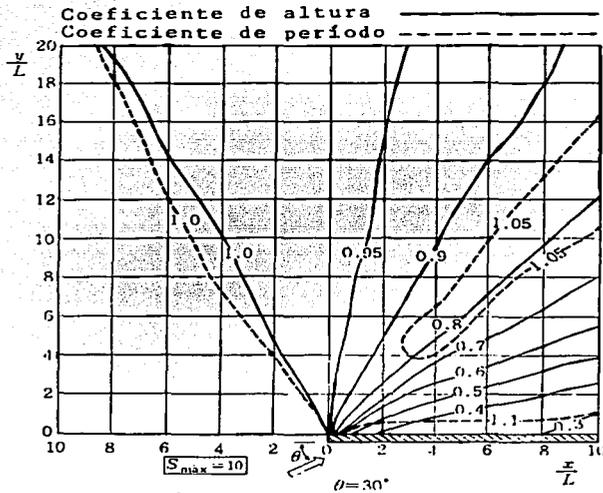
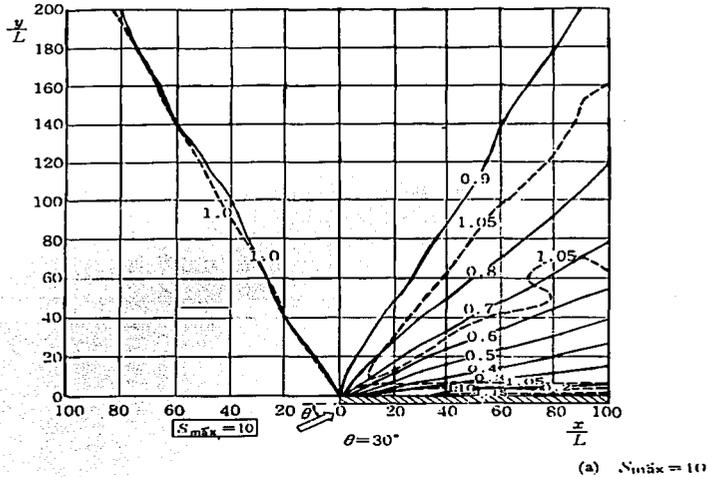


FIG.-3.3(a) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=30^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=10$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

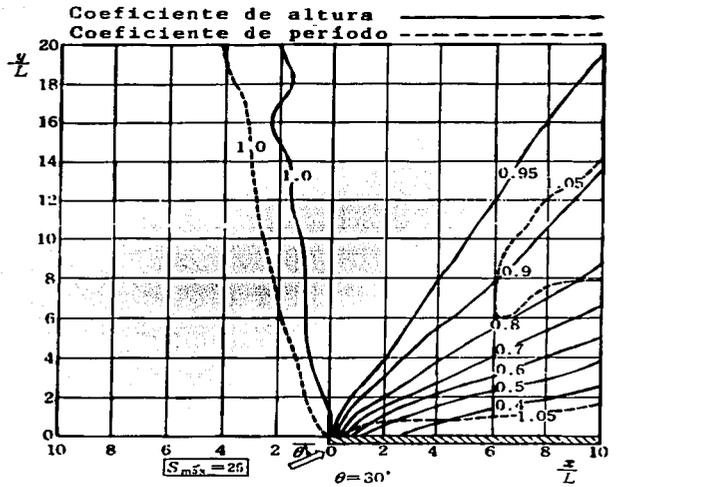
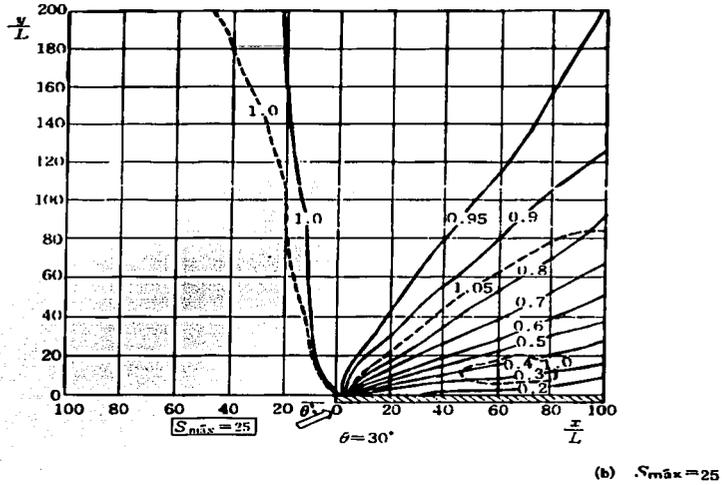
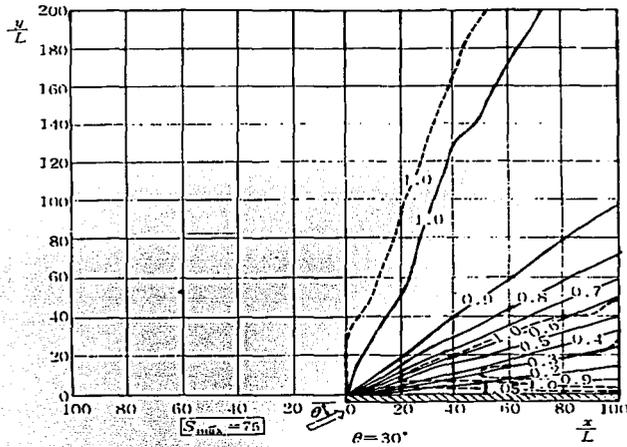


FIG.-3.3(b) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=30^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=25$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



(c) $S_{m\acute{a}x} = 75$

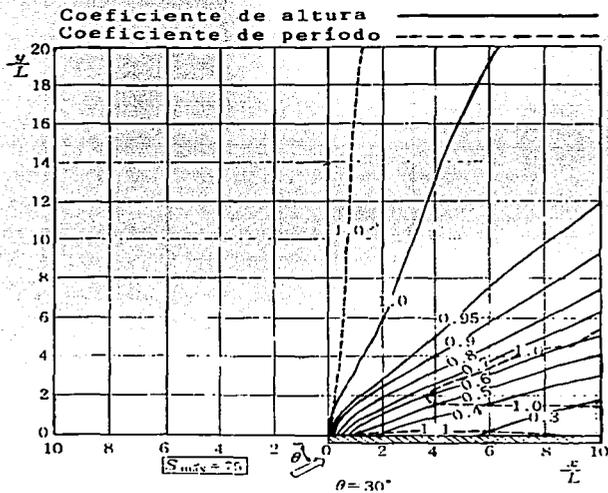


FIG.-3.3(c) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=30^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=75$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

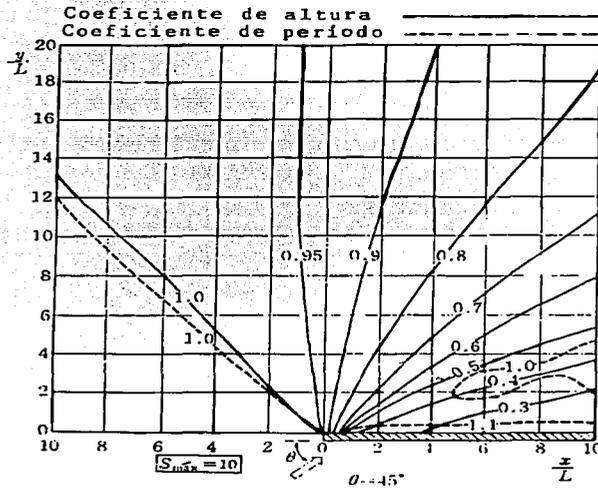
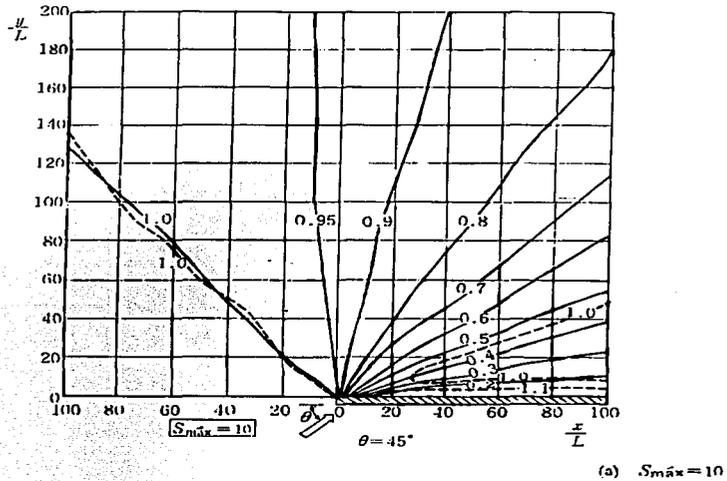
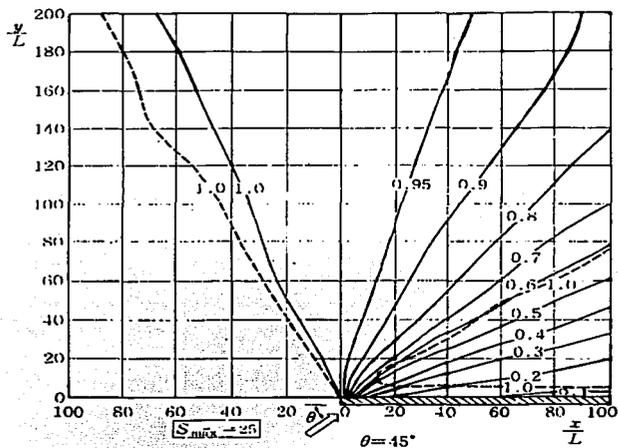


FIG.-3.4(a) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=45^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=10$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



(h) $S_{máx} = 25$

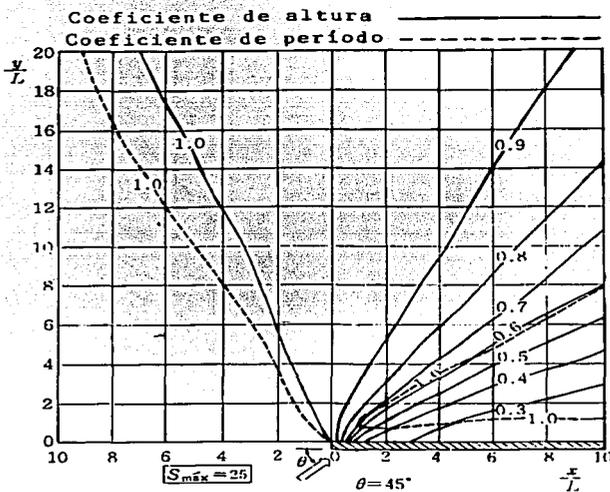


FIG.-3.4(b) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=45^\circ$ y $S_{máx}=25$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

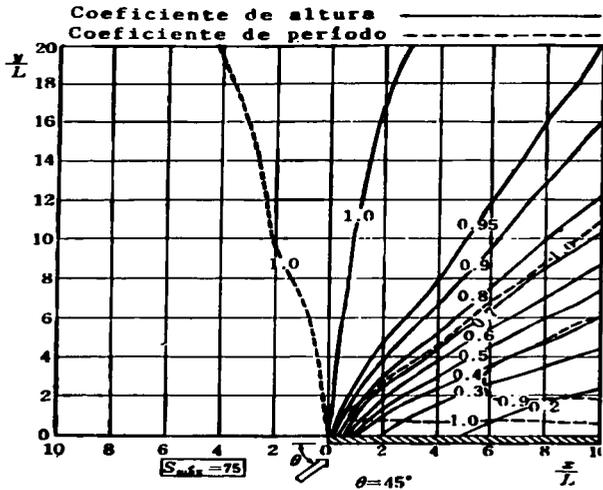
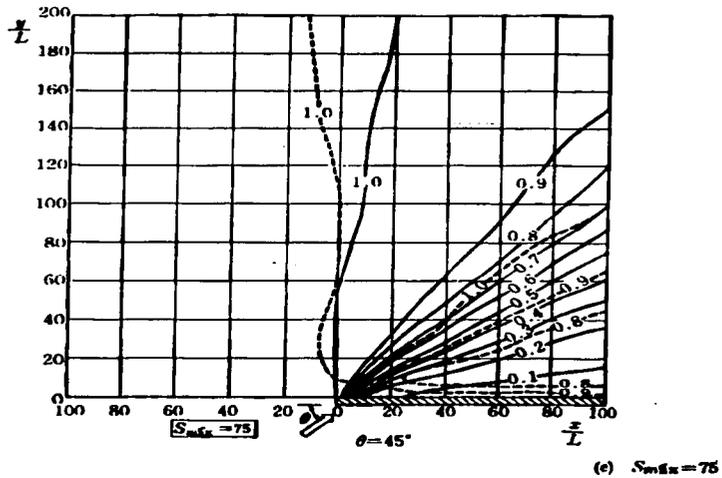
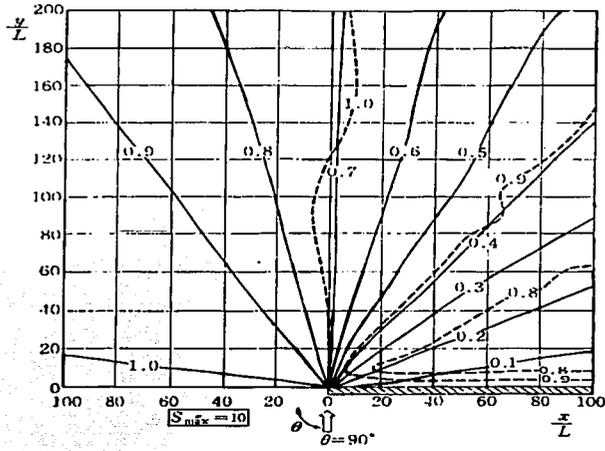


FIG.-3.4(c) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=45^\circ$ y $S_{máx}=75$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



(a) $S_{máx} = 10$

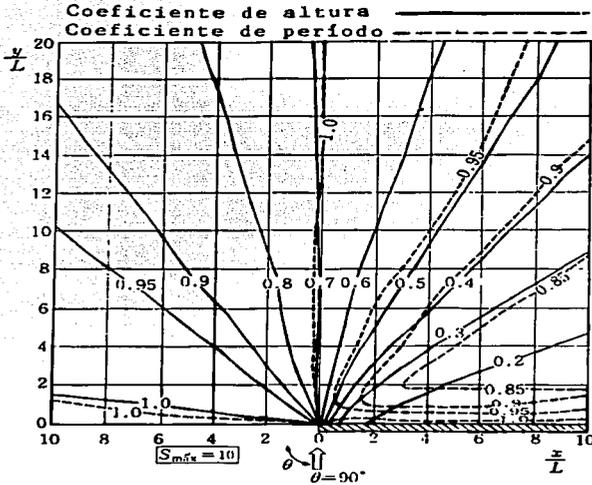
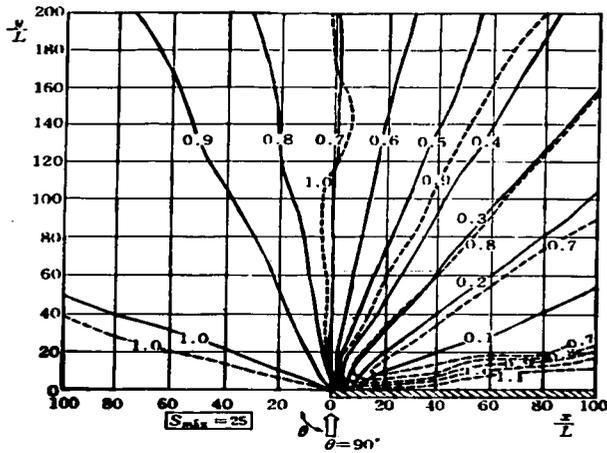


FIG.-3.5(a) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=90^\circ$ y $S_{máx}=10$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



(a) $S_{m\acute{a}x} = 25$

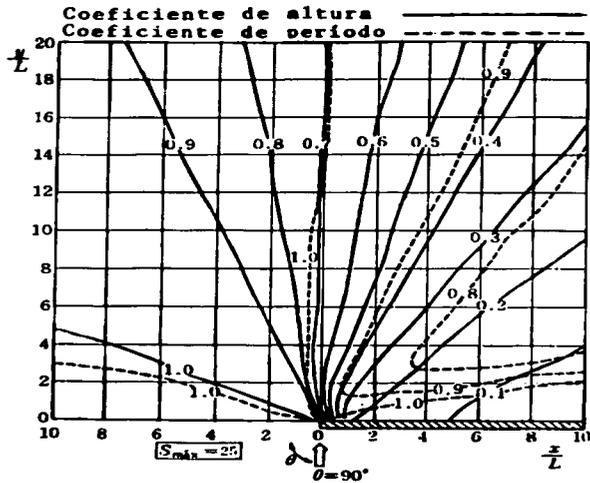


FIG.-3.5(b) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=90^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=25$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

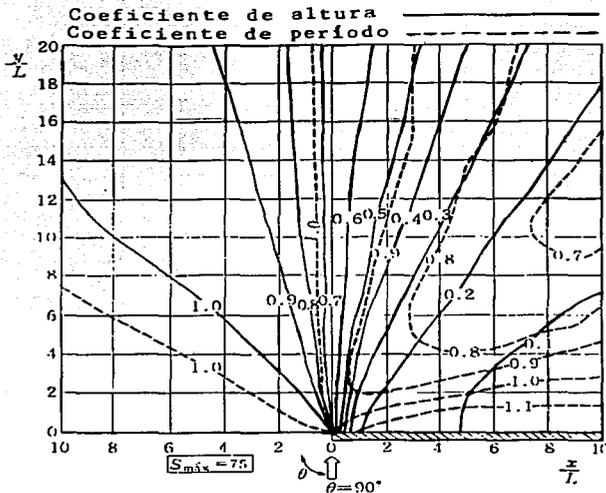
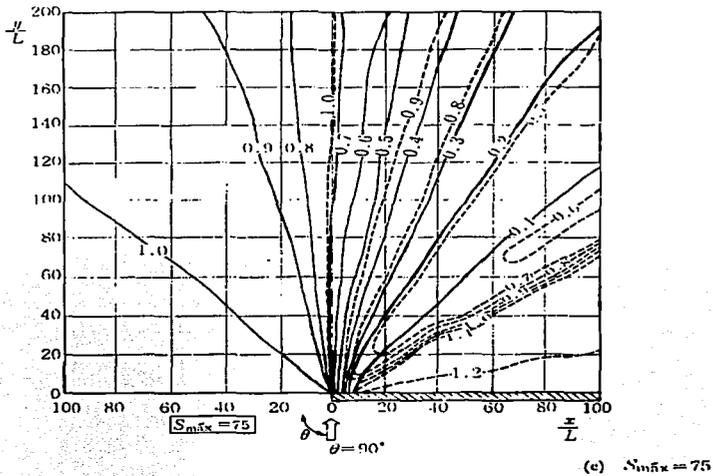
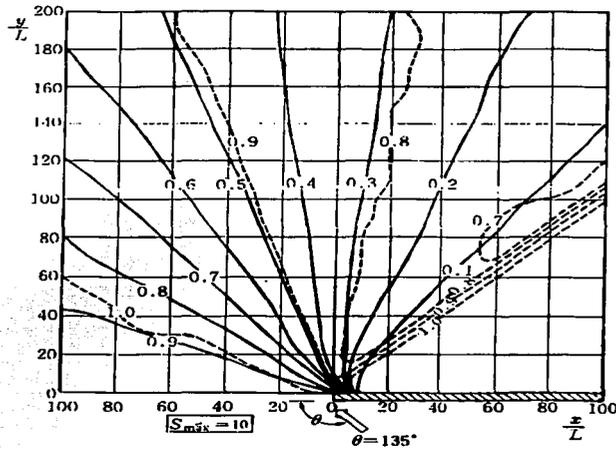


FIG.-3.5(c) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=90^\circ$ y $S_{máx}=75$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



(a) $S_{m\acute{a}x} = 10$

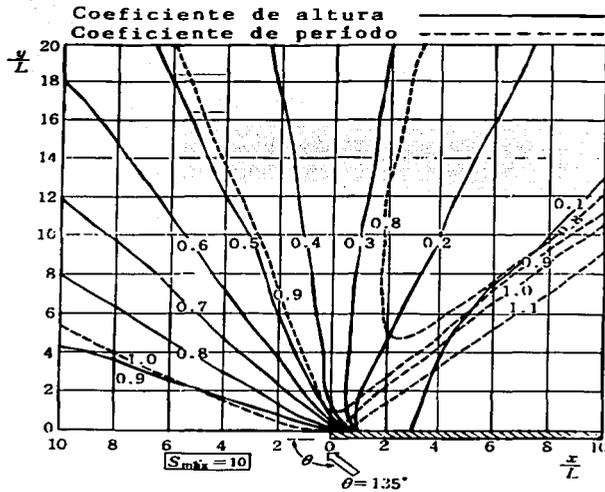
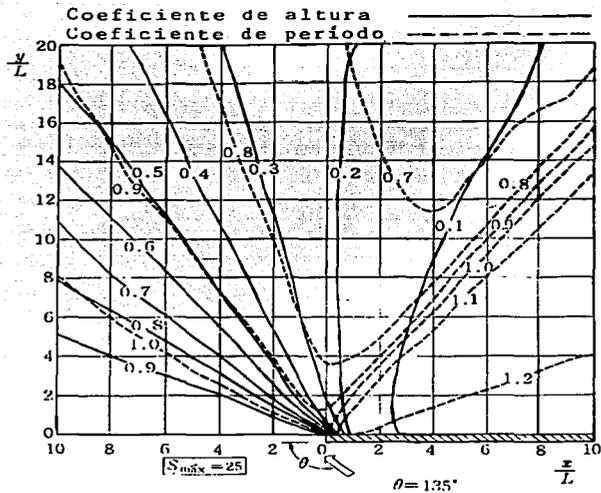
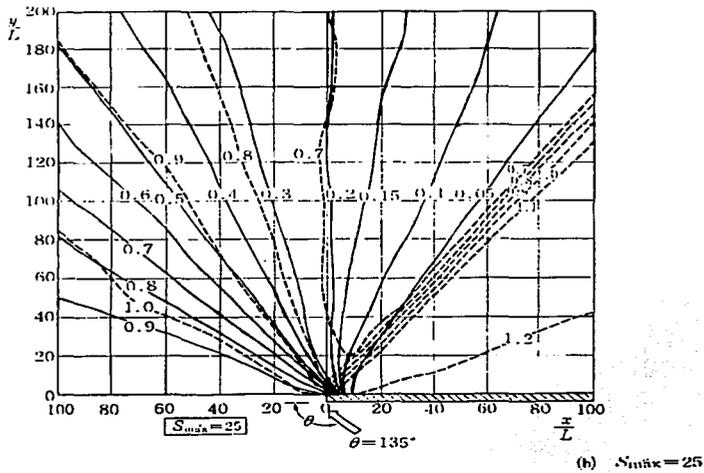


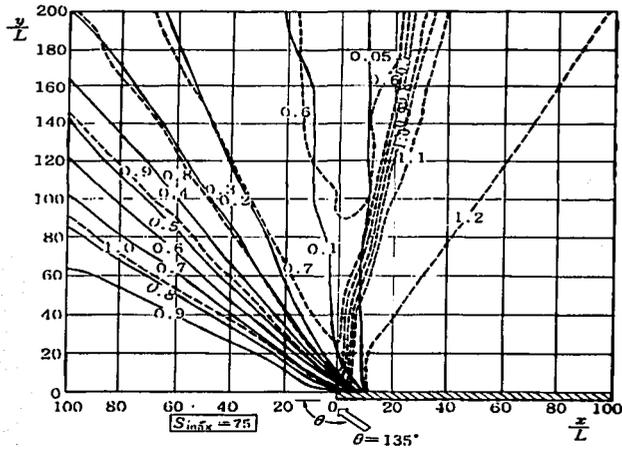
FIG.-3.6(a) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=135^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=10$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

FIG.-3.6(b) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=135^\circ$ y $S_{\text{máx}}=25$)



(a) $Smáx = 75$

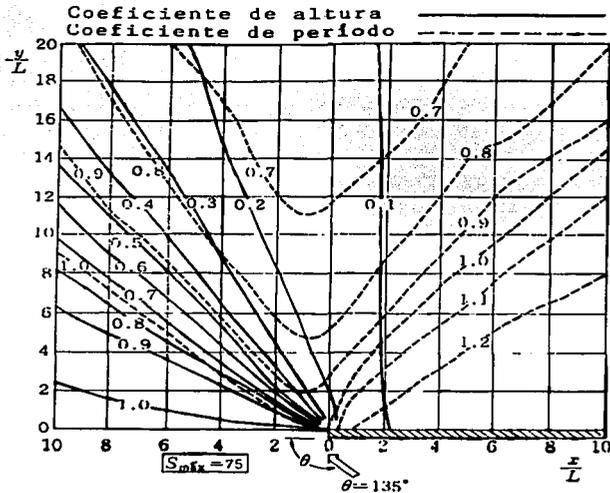


FIG.-3.6(c) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=135^\circ$ y $Smáx=75$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

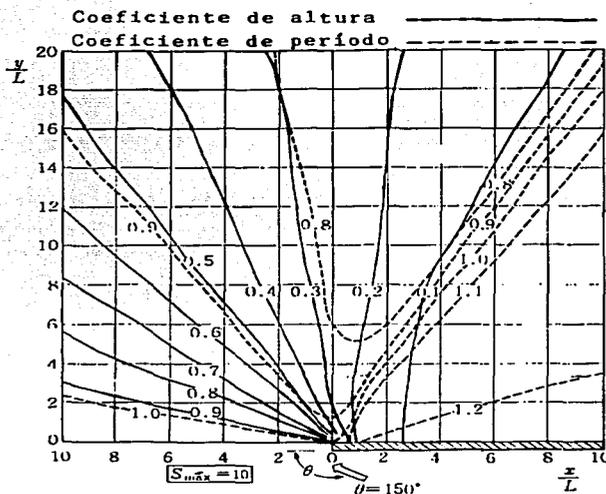
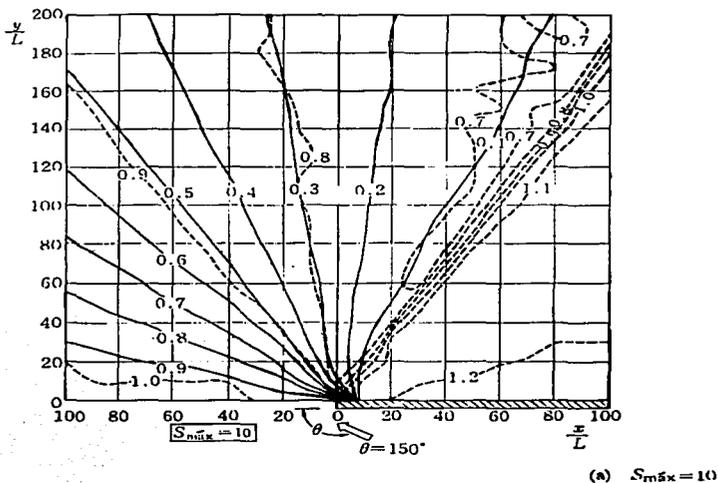
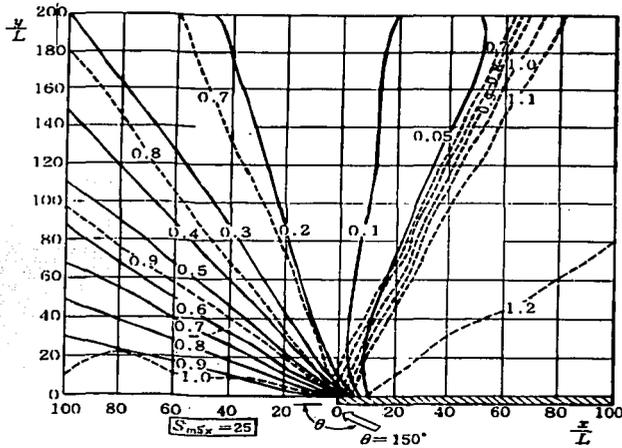


FIG.-3.7(a) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=150^\circ$ y $S_{máx}=10$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



(b) $S_{máx} = 25$

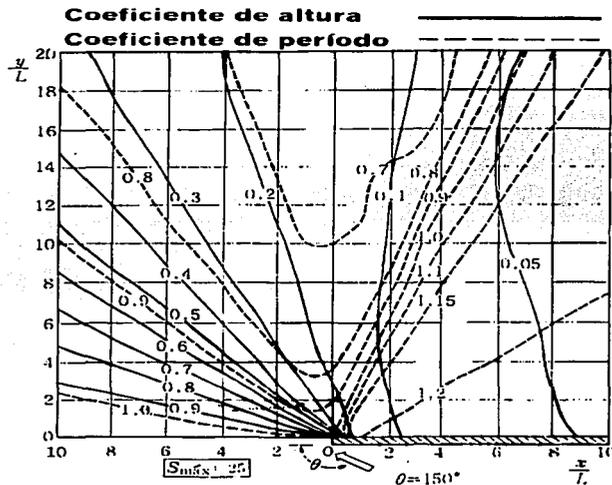
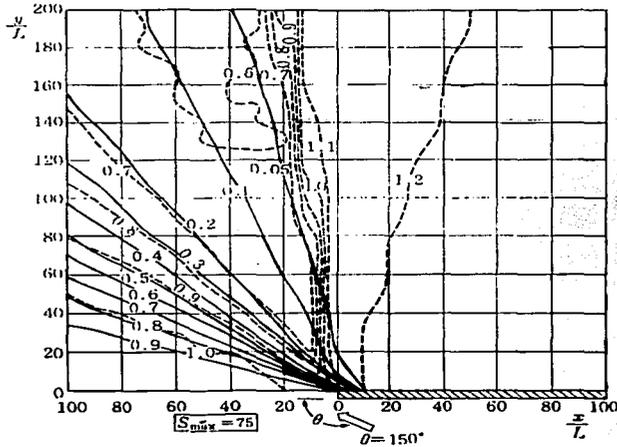


FIG.-3.7(b) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=150^\circ$ y $S_{máx}=25$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



(c) $S_{máx} = 75$

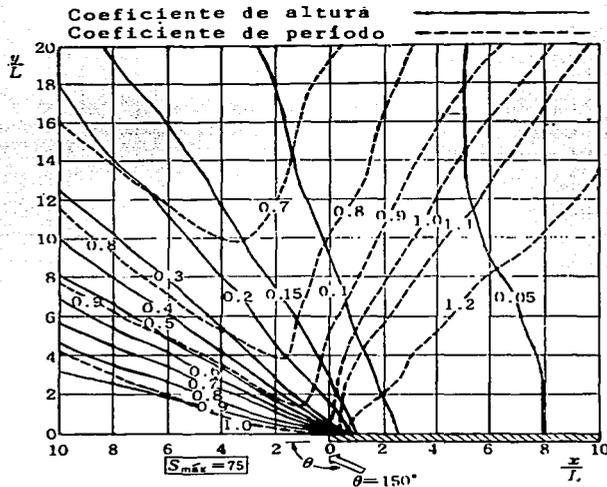
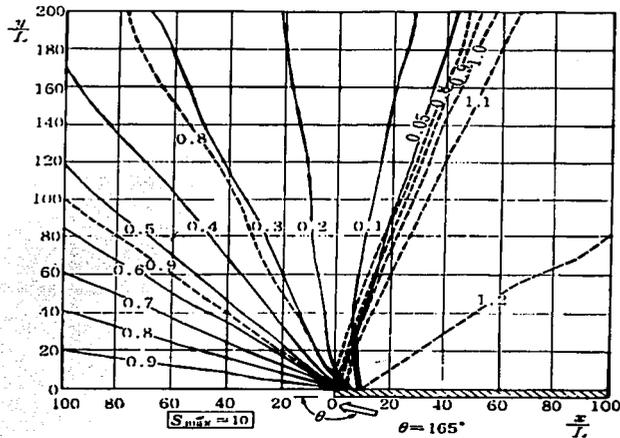


FIG.-3.7(c) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=150^\circ$ y $S_{máx}=75$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



(*) $S_{máx} = 10$

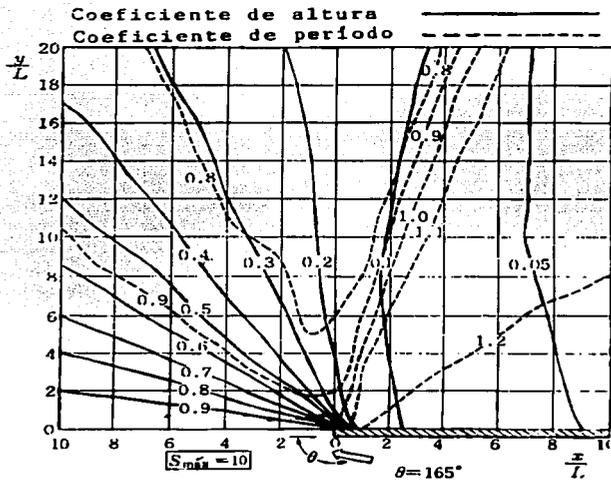
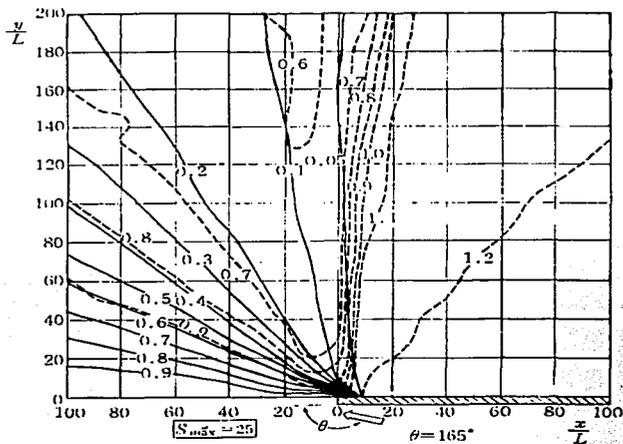


FIG.-3.8(a) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=165^\circ$ y $S_{máx}=10$)



(b) $S_{máx} = 25$

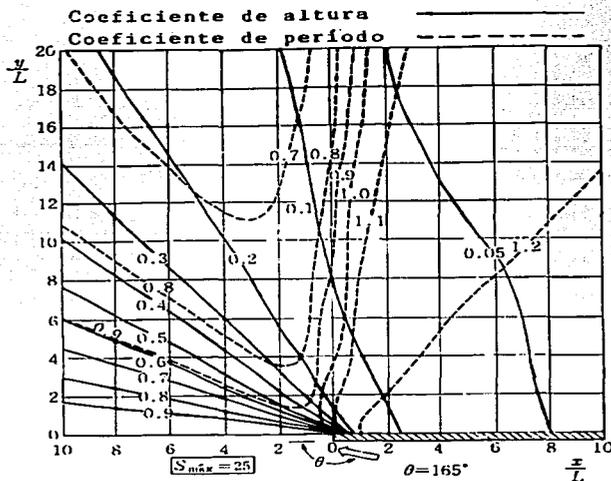


FIG.-3.8(b) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=165^\circ$ y $S_{máx}=25$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

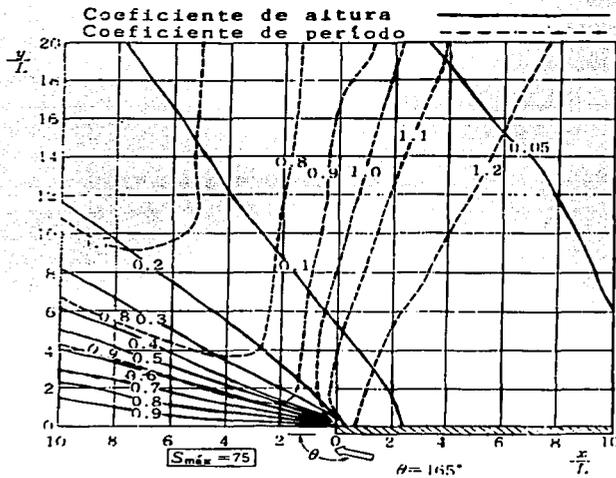
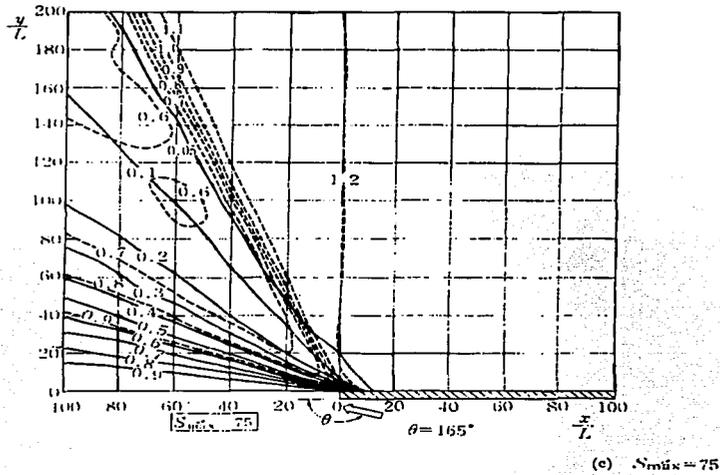


FIG.-3.8(c) DIFRACCIÓN EN UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO ($\theta=165^\circ$ y $S_{m\acute{a}x}=75$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

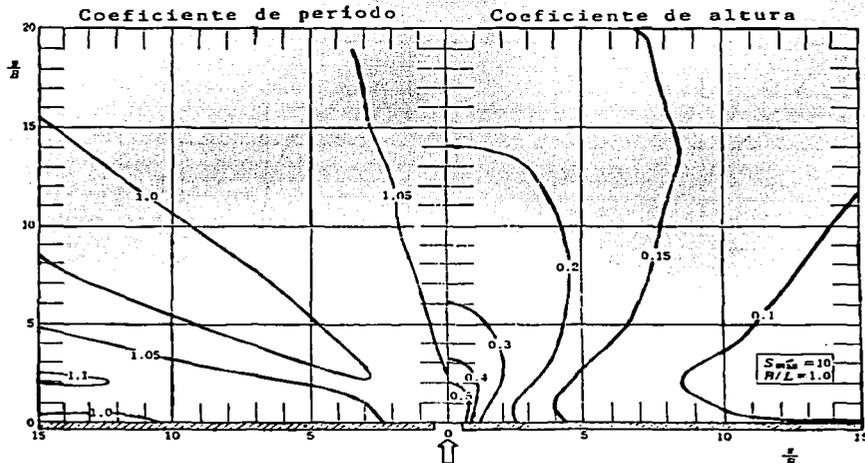
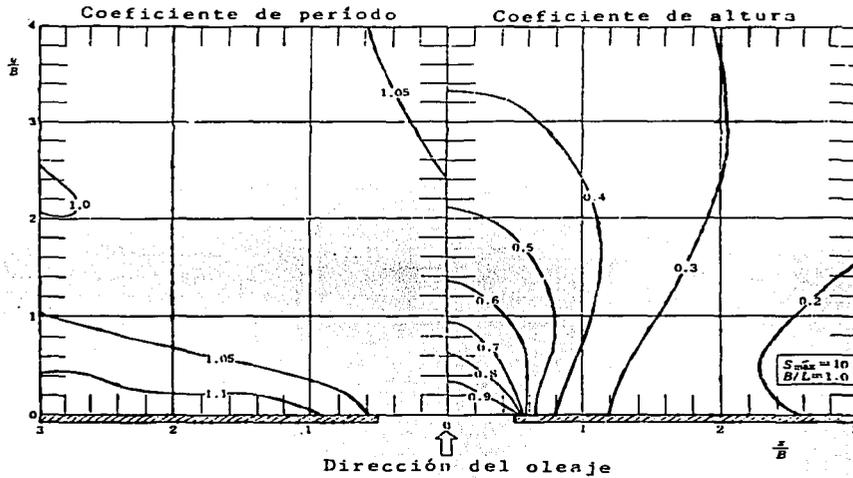


FIG.- 3.9(a) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 1.0$
 $S_{m\acute{a}x} = 10$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

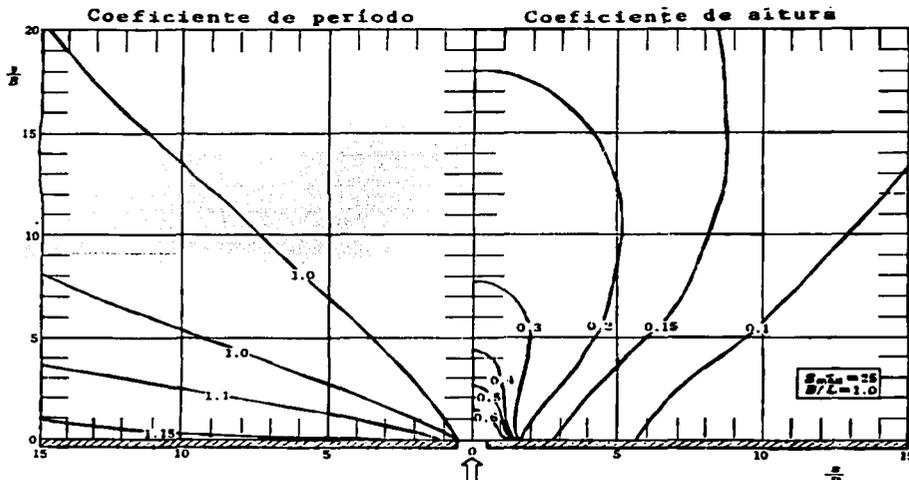
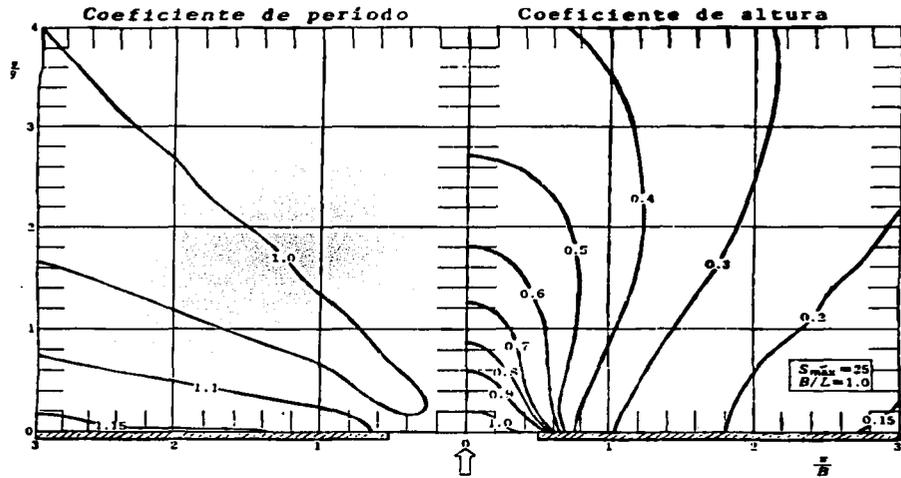


FIG.- 3.9(b) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 1.0$)

$S_{máx} = 25$
 TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

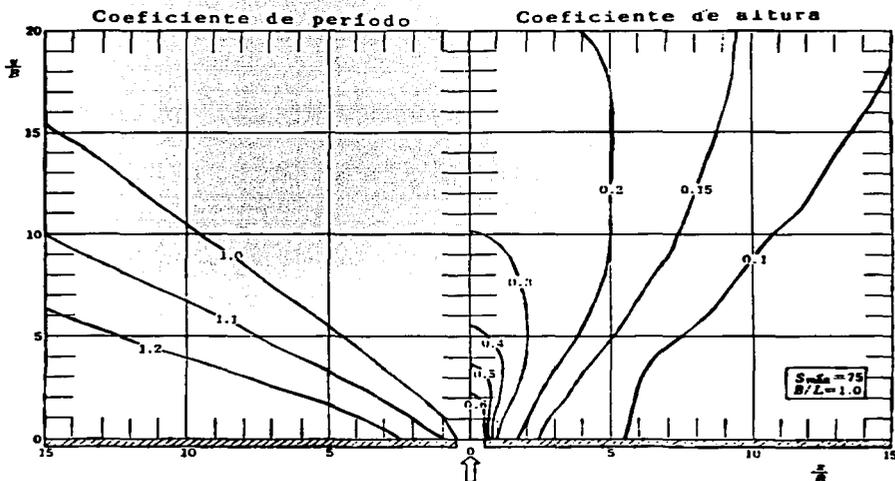
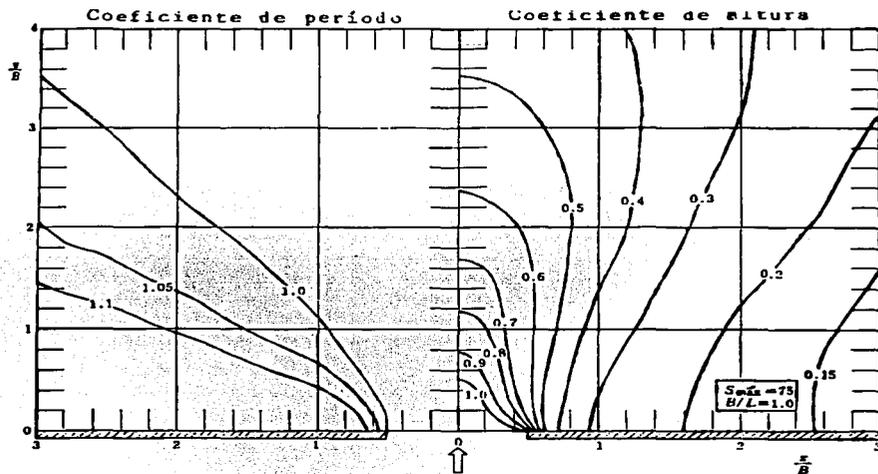


FIG.- 3.9(c) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 1.0$
 $S_{máx} = 75$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

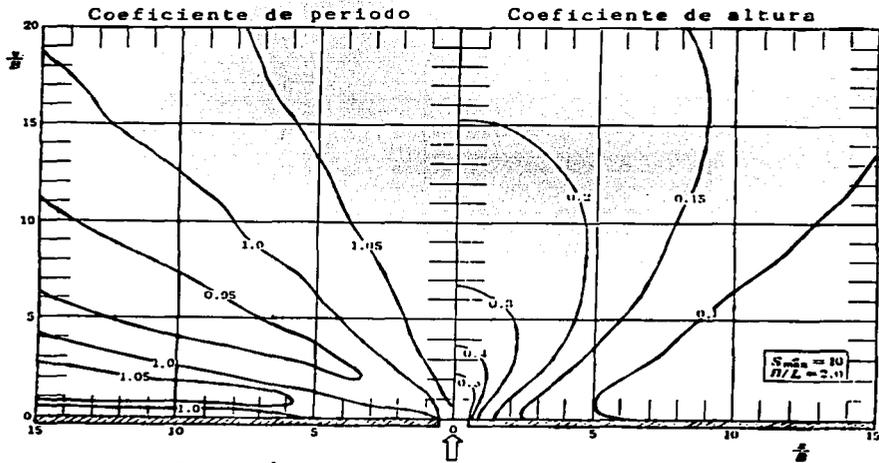
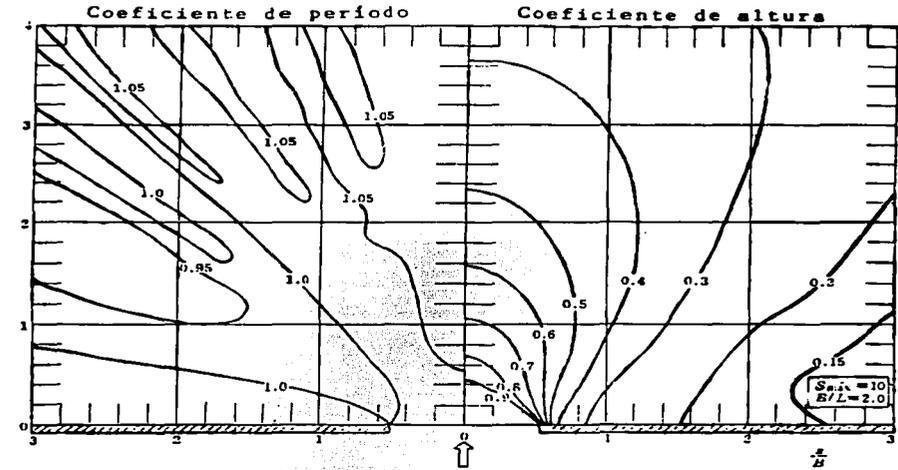


FIG.- 3.10(a) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 2.0$
 $Smáx = 10$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

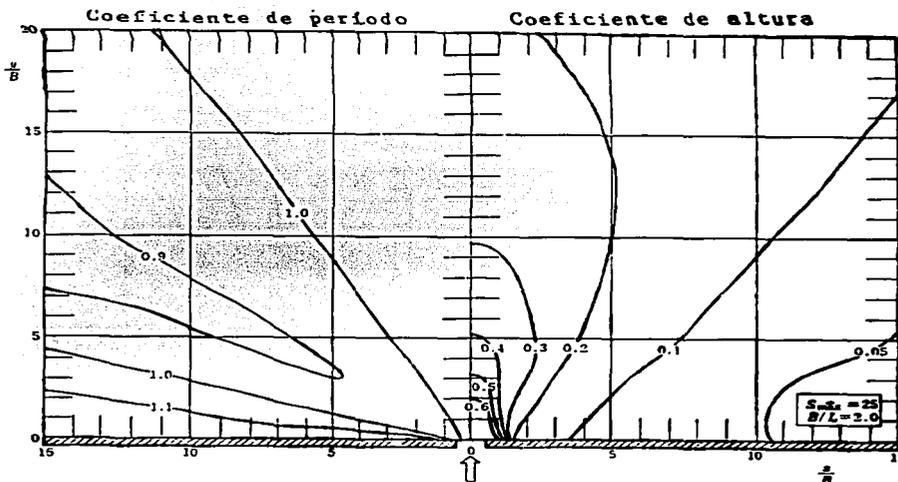
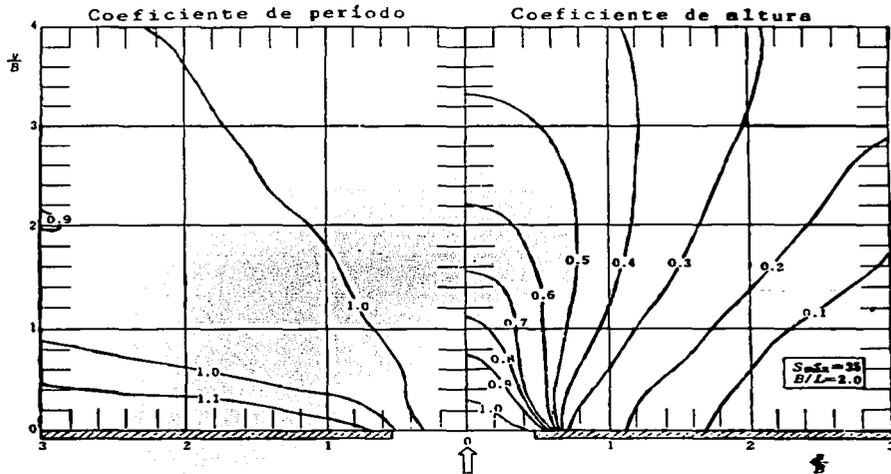


FIG.- 3.10 (b) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 2.0$
 $S_{máx} = 25$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

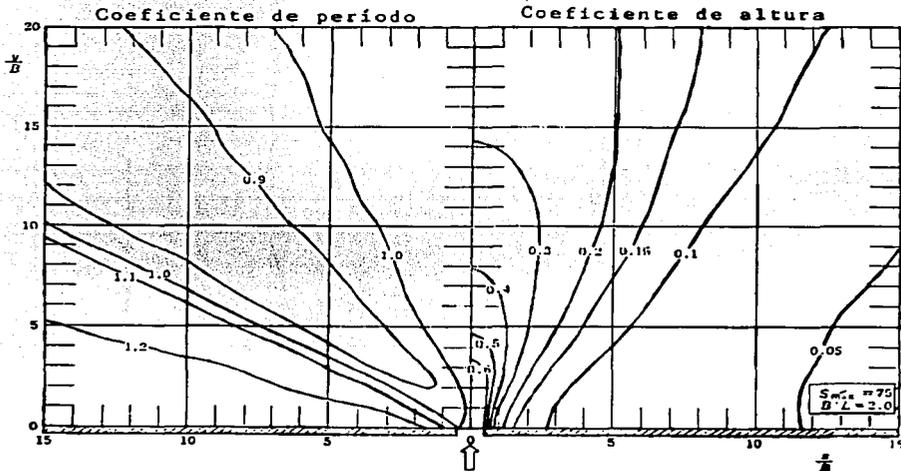
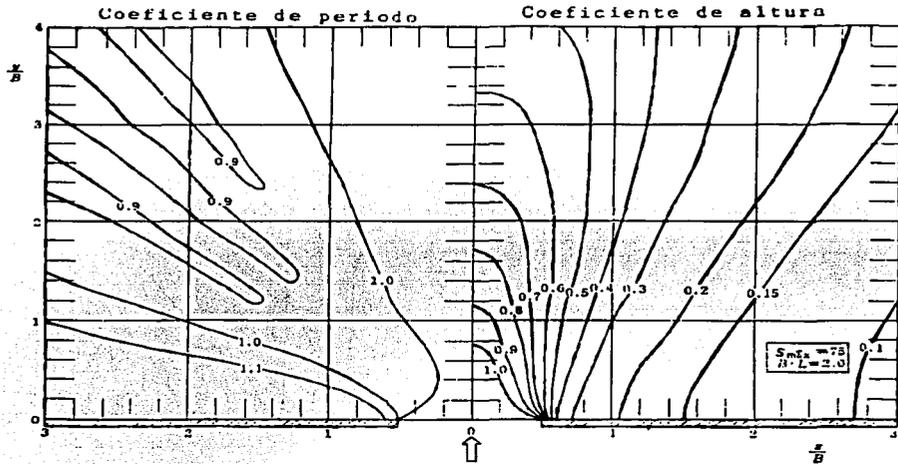


FIG.- 3.10 (c) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 2.0$
 $S_{máx} = 75$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

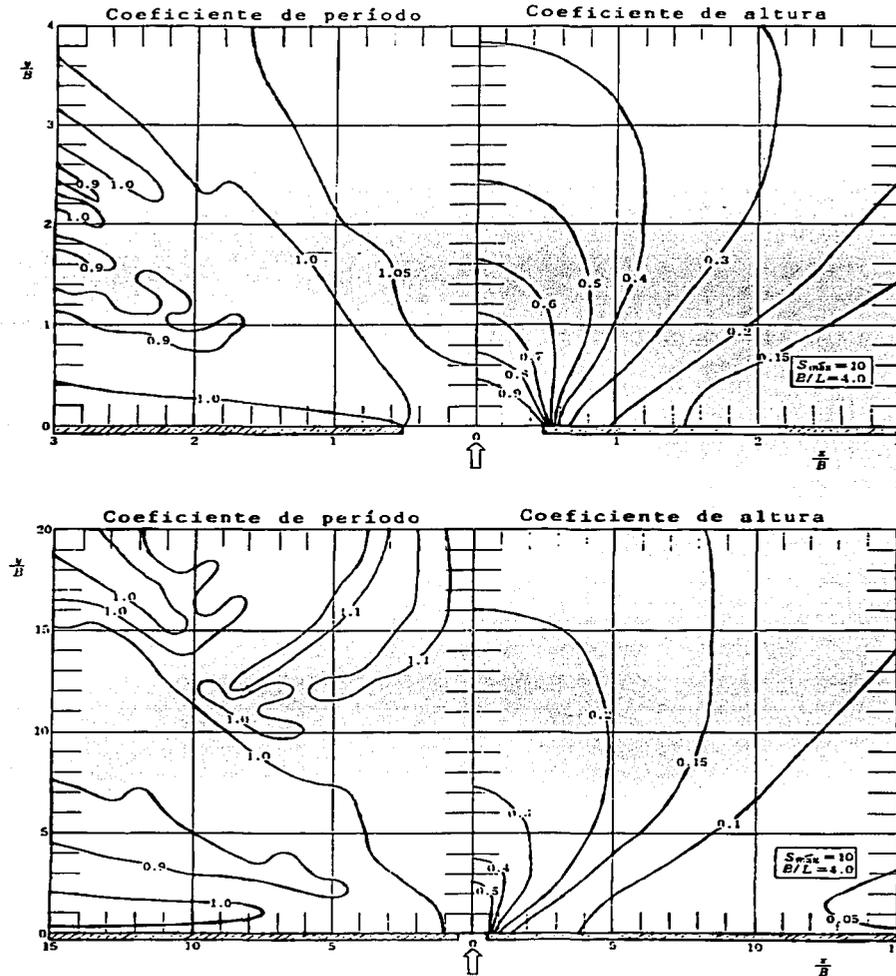


FIG.- 3.11 (a) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 4.0$
 $S_{máx} = 10$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

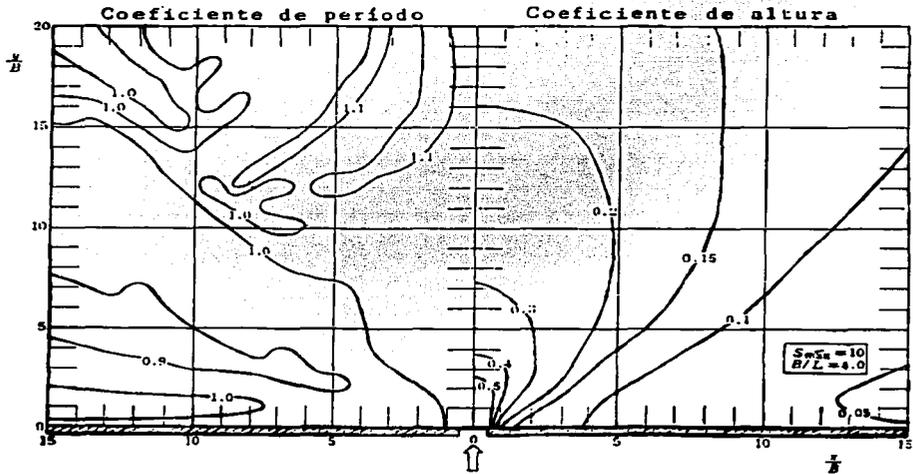
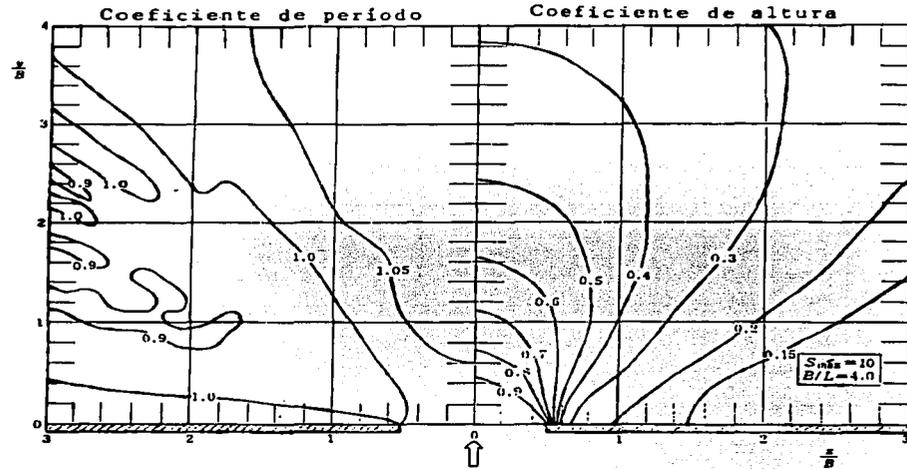


FIG. - 3.11 (b) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 4.0$
 $S_{\text{máx}} = 25$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

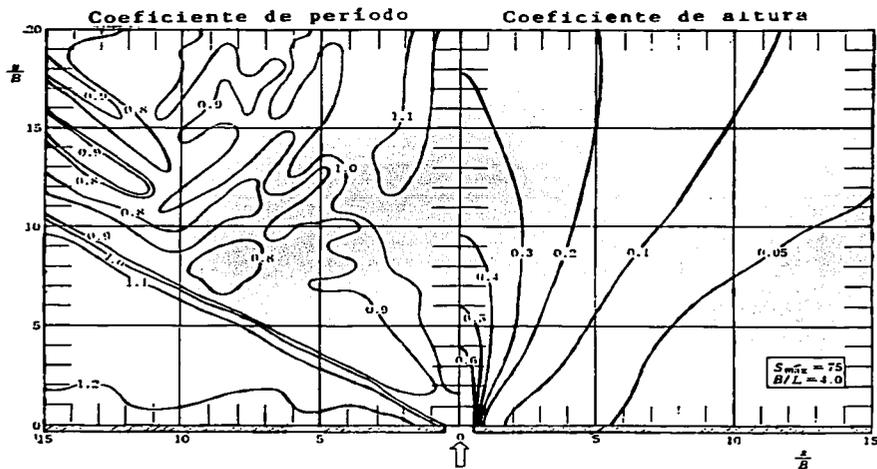
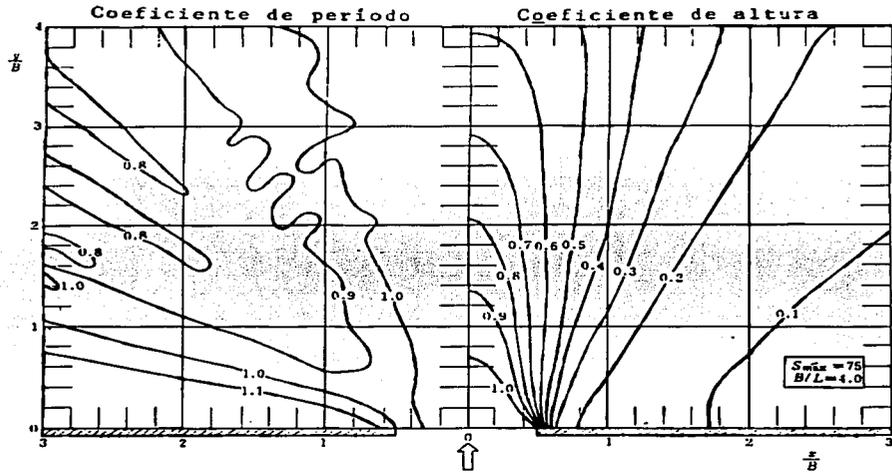


FIG.- 3.11 (c) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 4.0$
 $S_{máx} = 75$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

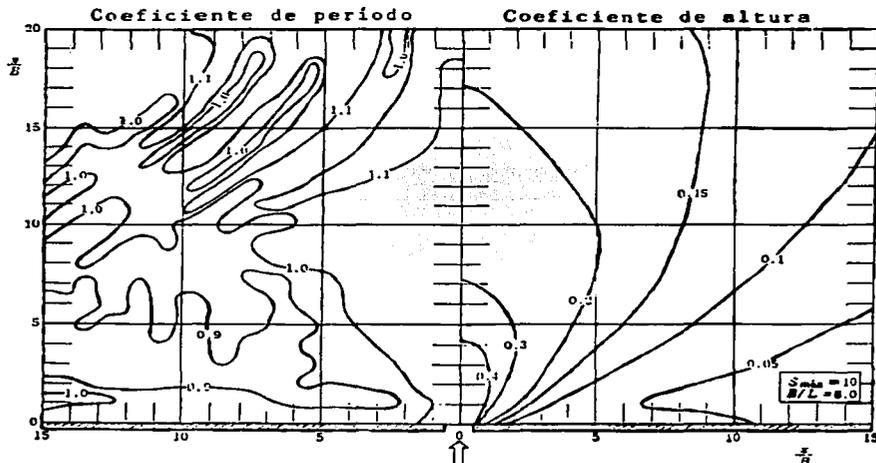
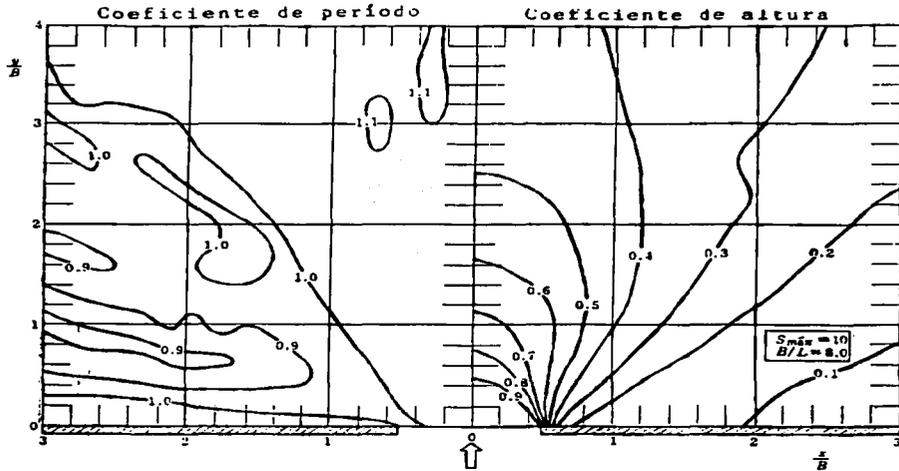


FIG.- 3.12 (a) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 8.0$
 $S_{máx} = 10$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

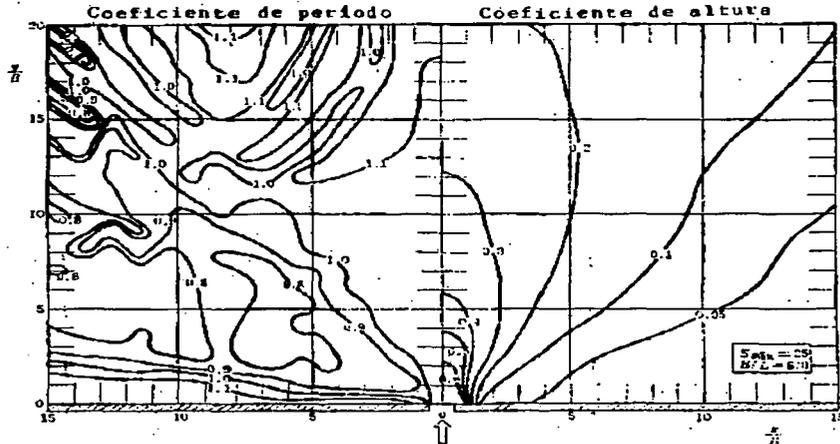
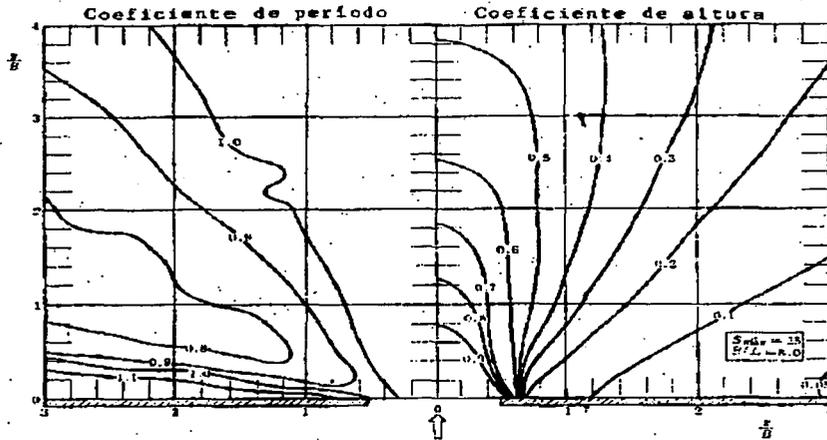


FIG.- 3.12 (b) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 8.0$
 $S_{máx} = 25$)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

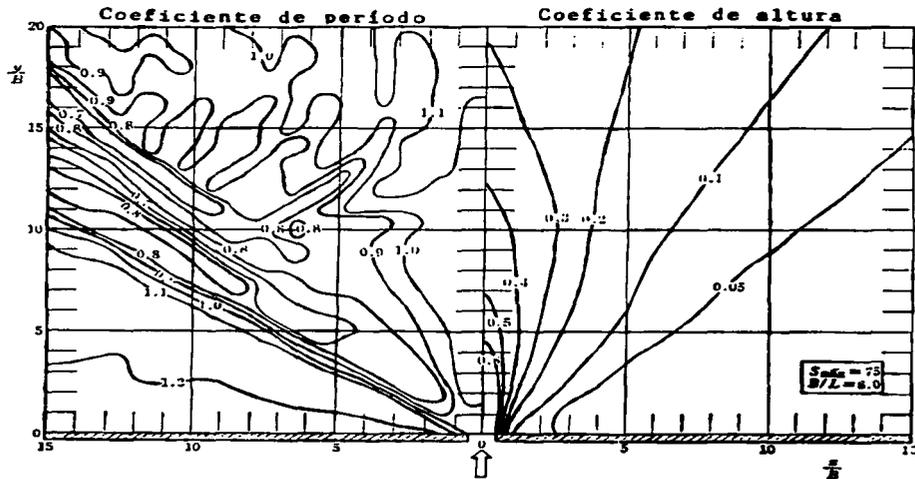
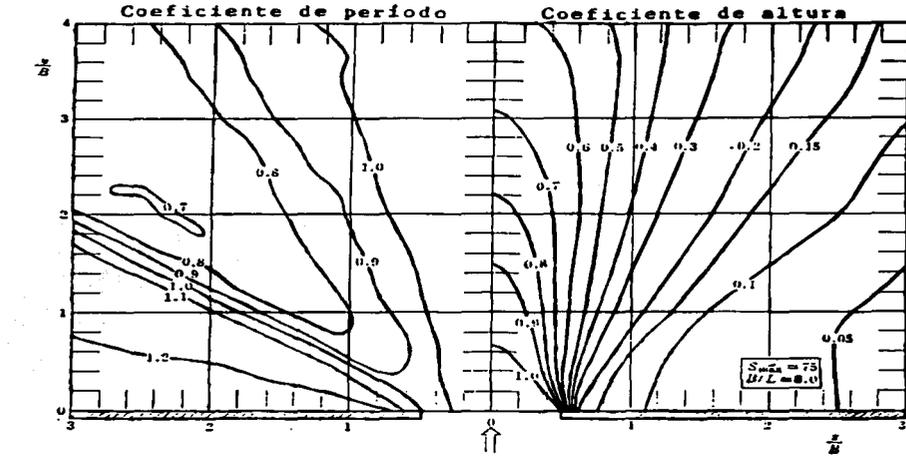


FIG.- 3.12 (c) DIFRACCIÓN EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS ($B/L = 8.0$
 $S_{máx} = 75$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

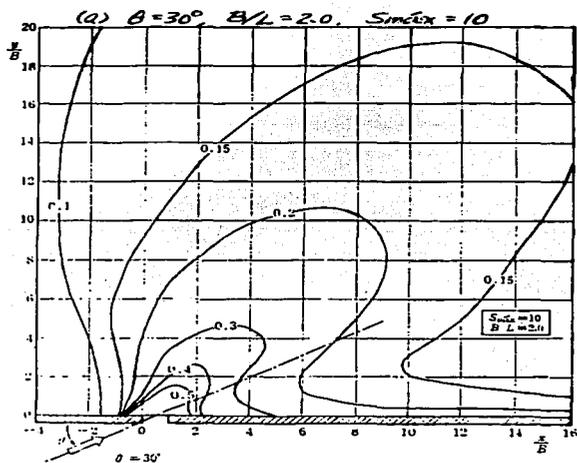
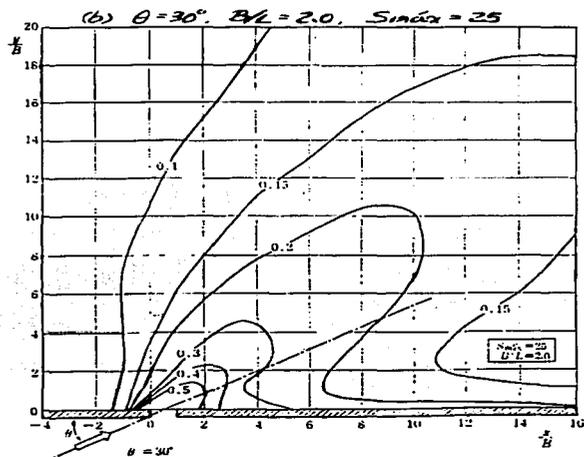


FIG.- 3.14 DIFRACCIÓN EN EL CASO DE QUE EL OLAJE INCIDA OBLICUAMENTE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

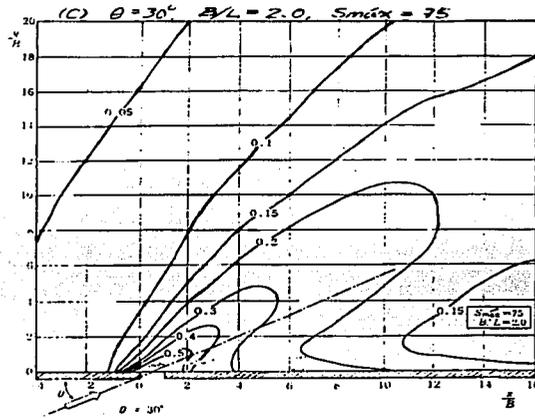


FIG.- 3.14 DIFRACCIÓN EN EL CASO DE QUE EL OLAJE INCIDA OBLICUAMENTE

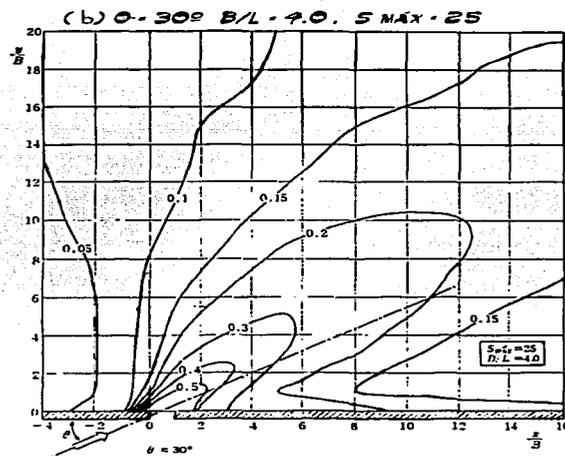
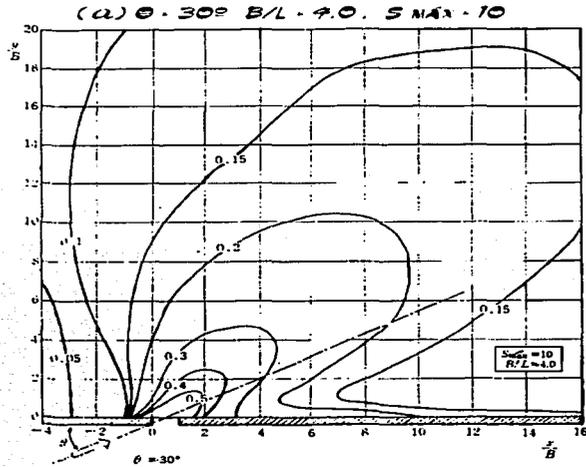


FIG.- 3.15 DIFRACCIÓN EN EL CASO DE QUE EL OLAJE INCIDA OBLICUAMENTE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

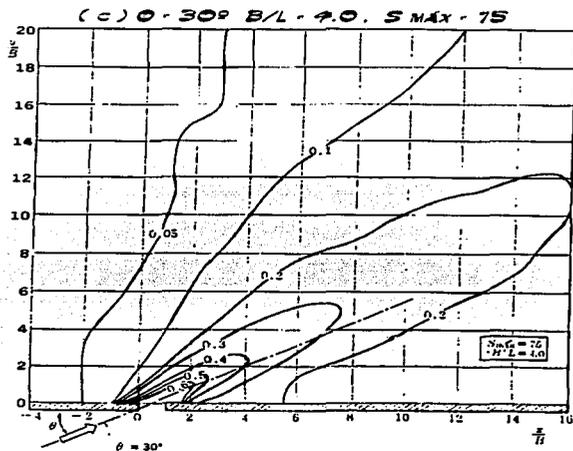
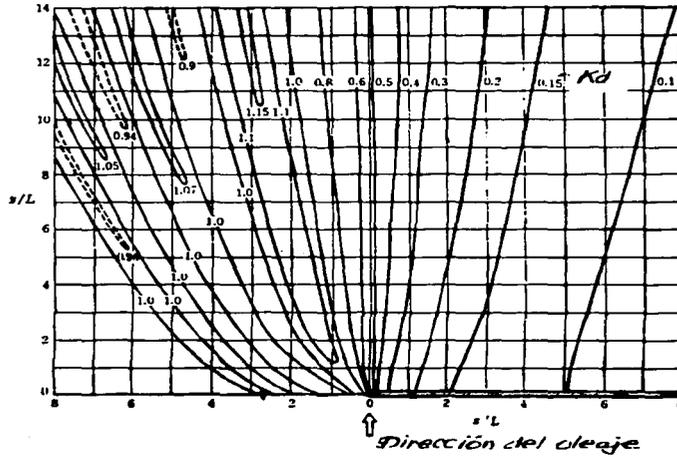
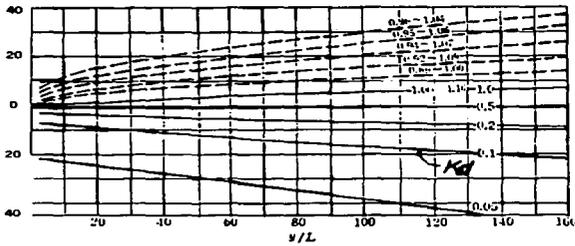


FIG.- 3.15 DIFRACCIÓN EN EL CASO DE QUE EL OLAJE INCIDA OBLICUAMENTE

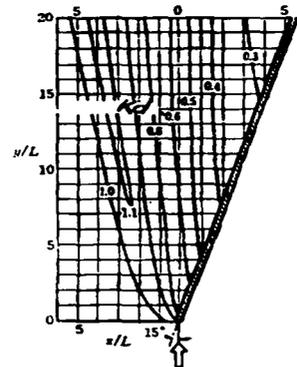
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



(a) $\theta_0 = 90^\circ$



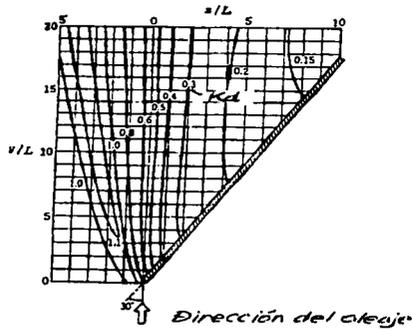
(b) $\theta_0 = 90^\circ$



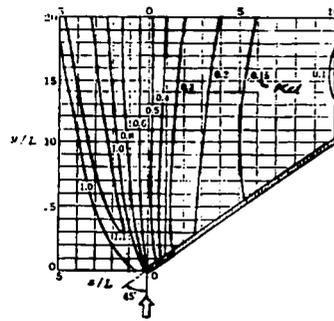
(c) $\theta_0 = 15^\circ$

FIG.- 3.16 DIFRACCIÓN DEL OLAJE REGULAR DE UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO

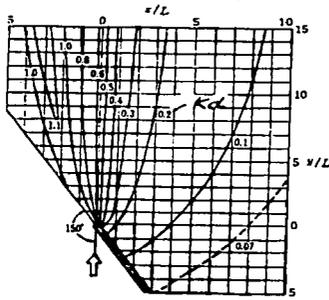
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



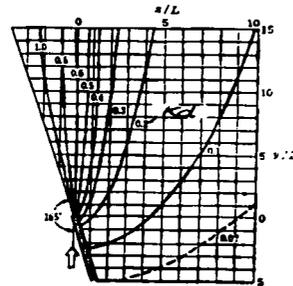
(d) $\theta_0 = 30^\circ$



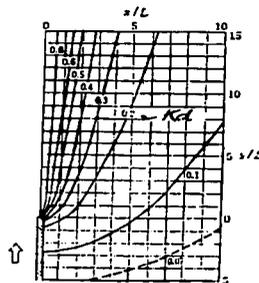
(e) $\theta_0 = 45^\circ$



(f) $\theta_0 = 150^\circ$



(g) $\theta_0 = 165^\circ$



(h) $\theta_0 = 180^\circ$

FIG.- 3.16 DIFRACCIÓN DEL OLAJE REGULAR DE UN ROMPEOLAS SEMI-INFINITO

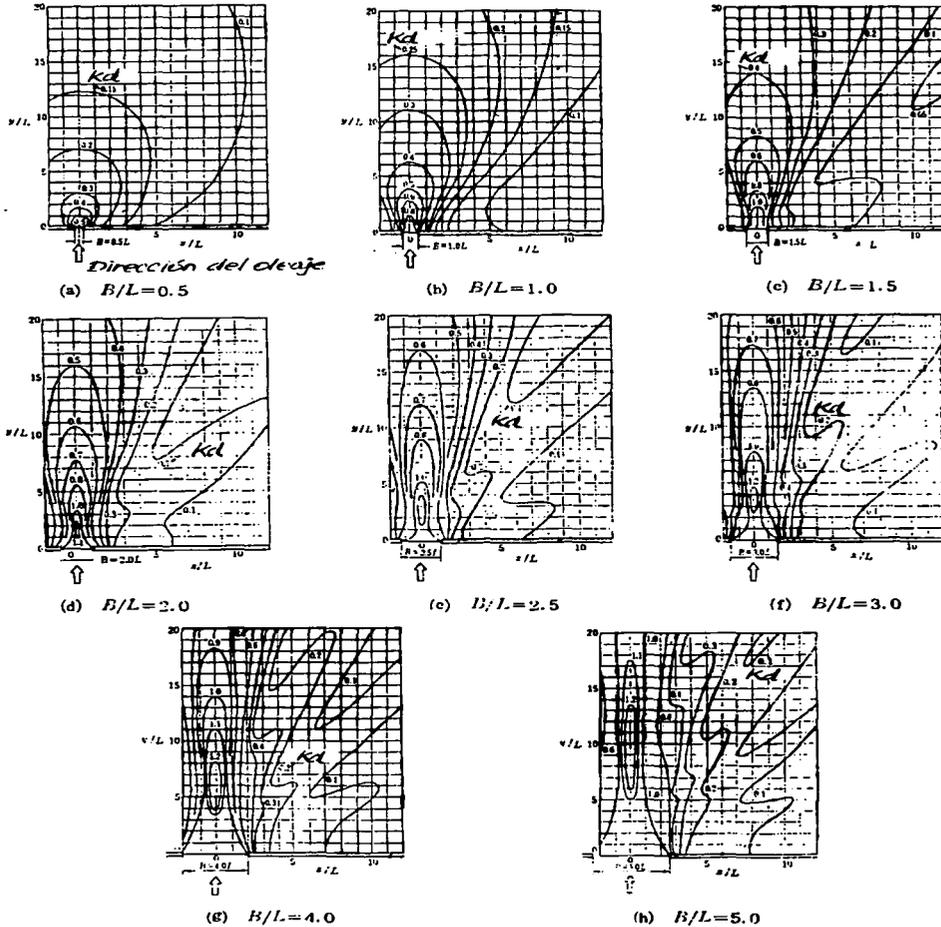


FIG.- 3.17 DIFRACCIÓN DEL OLAJE REGULAR EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS

FALLA DE ORIGEN

3.2 Método de planos dobles de la difracción del oleaje

Este método se utiliza para estimar la altura aproximada del oleaje dentro del puerto, cuando el oleaje difractado es reflejado por los muelles. Por ejemplo: Considerando el puerto que se presenta en la fig. 3.18. Al fondo del puerto, hay un puerto viejo. El puerto viejo está protegido por un rompeolas de enrocamiento. Hay una estructura enfrente de la boca del puerto para disminuir la energía del oleaje que entra por la boca.

Supongamos que el oleaje no se refleja en estas estructuras y considerando que el oleaje viene de la dirección SSW y que tiene un período de 9 seg.

- (a) Se calcula la longitud de la ola (L) en la boca del puerto y el valor de B/L : donde B es el ancho de la boca, $T = 9$ seg., $B = 300$ m, $L = 95.5$ m y $B/L = 3.0$.
- (b) Se traza el plano de difracción de $B/L = 3.0$ en el plano del puerto dibujando la cuadrícula.
- (c) Se calca la geometría simplificada del puerto y el plano de difracción como se presenta en la fig. 3.7. En este caso, se supone que no hay reflexión desde el fondo del puerto y se escogen de antemano los lugares en que se calculará la proporción de la altura de la ola.
- (d) Se considera que la superficie en que se refleja el oleaje es como un espejo, y se calca la figura y los lugares en que se calcula la proporción de la altura de la ola, reflejadas en el espejo.

En la fig. 3.19, los números I a VII son las áreas que se indica a continuación:

- I Área de difracción primaria
- II Área de reflexión por $b_1 c_1 d_1$
- III Área de reflexión del oleaje reflejado por $b_1 c_1 d_1$ en $e_1 f_1$

- IV Área de reflexión del oleaje reflejado por $c_1 d_1$ (considerando que $c_1 d_1$ refleja dos veces el oleaje)
- V Área de reflexión por $h_1 g_1$
- VI Área de reflexión del oleaje reflejado por $h_1 g_1$ en $i_1 j_1$
- VII Área de reflexión por $h_1 j_1$

- (e) Se calcula el plano de difracción sobreponiendo la figura en la línea que se toma como espejo.
- (f) El coeficiente de difracción en el punto A en la fig. 3.19 se calcula como sigue:

$$(K_d)_A = \sqrt{0.3^2 + 0.3^2 + 0.29^2 + 0.19^2} = 0.55$$

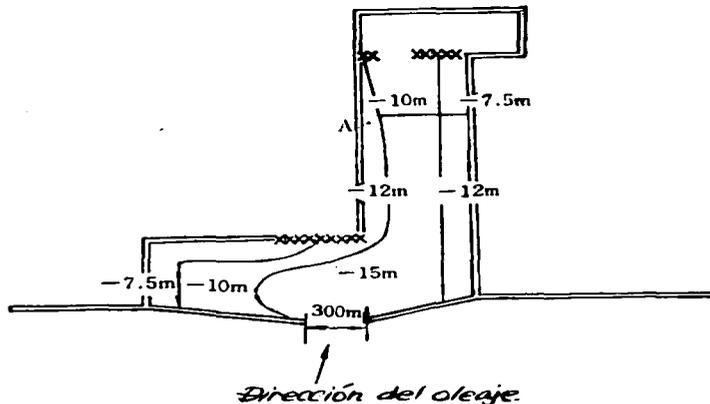


FIG.- 3.18 PUERTO HIPOTÉTICO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

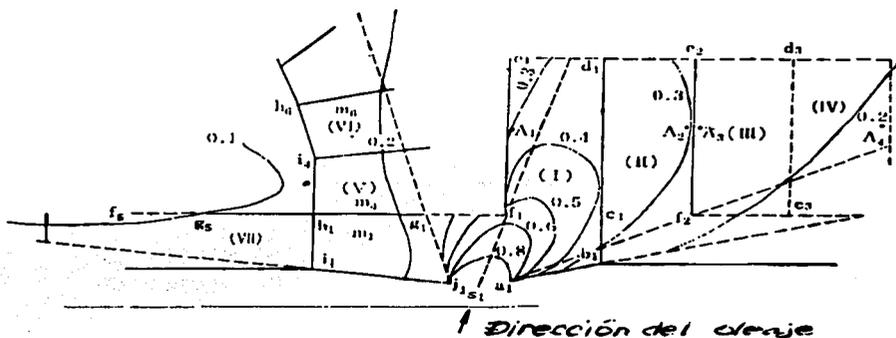


FIG.- 3.19 DIFRACCIÓN DOBLE

3.3 Combinación de la difracción y la refracción

Cuando cambia la profundidad en el cálculo de la difracción, se debe considerar también la refracción. En este caso, la altura y la dirección del oleaje se deduce aproximadamente como sigue:

- (a) Trazar el plano de refracción hasta el rompeolas
- (b) Trazar el plano de difracción de tres a cuatro longitudes de ola desde la boca del puerto.
- (c) Se decide la nueva dirección del oleaje después de la difracción con la última línea de la cresta del oleaje. Se traza el plano de refracción con la dirección nueva como se presenta en la Fig. 3.20.
- (d) La altura y la dirección del oleaje en el lugar de estudio se calcula con los planos correspondientes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La difracción del oleaje regular, donde la profundidad cambia, puede calcularse numéricamente con ayuda de la computadora. Puede aplicarse este cálculo para el oleaje irregular con el método de los oleajes componentes.

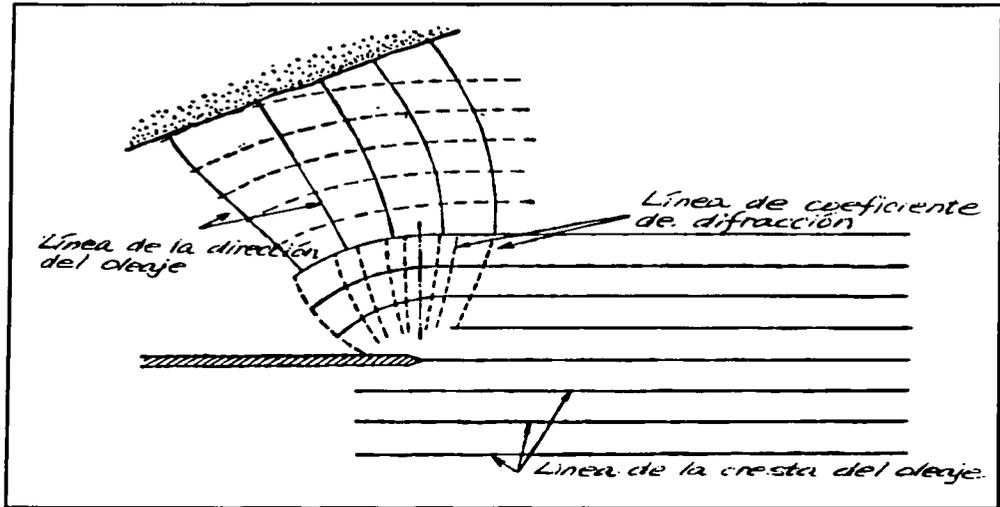


FIG.- 3.20 EJEMPLO DE COMBINACIÓN DE LA DIFRACCIÓN Y LA REFRACCIÓN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPÍTULO

4

REFLEXIÓN DEL OLEAJE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

4. REFLEXIÓN DEL OLAJE

4.1 Generalidades

Para diseñar las estructuras de un puerto, se deben considerar la influencia del oleaje reflejado de las estructuras contiguas y la influencia de las estructuras del puerto a las estructuras adyacentes.

Cuando hay varios grupos de oleaje incluyendo el oleaje reflejado, la altura de ola se puede calcular con la fórmula siguiente:

$$H_s = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2} \quad (\text{fórmula. 4.1})$$

donde,

H_s : Altura del oleaje significativo de todos los grupos de oleaje

H_1, H_2, \dots, H_n : Altura del oleaje significativo de cada grupo de oleaje

Se debe considerar que el oleaje reflejado causa, de vez en cuando, la agitación en el puerto e influye en la navegación de barcos o en la carga y descarga de mercancías.

En el caso del oleaje regular, la altura de ola compuesta del oleaje incidente y el oleaje reflejado se calcula por la superposición de los oleajes siendo las alturas diferentes en cada lugar. Sin embargo, en caso del oleaje irregular la distribución de altura es uniforme por la presencia de muchos oleajes componentes. Por eso, la altura del oleaje que incluye el oleaje reflejado puede calcularse con la fórmula 4.1.

Hay un método simple para consultar la influencia del oleaje reflejado por la estructura. Cuando el oleaje incide de la dirección, de α grados, a un rompeolas aislado como se presenta en la Fig. 4.1, la altura de ola en el punto A se calcula como sigue:

Primero se supone que no existe el rompeolas aislado y que hay dos rompeolas, los que se representan en la figura con línea punteada. Después se traza el plano de difracción, como se muestra en la figura, pensando que el oleaje incide de la dirección contraria de α grados a la boca hipotética. El área de influencia del oleaje reflejado puede representarse con este plano de difracción. Cuando el coeficiente de difracción en el lugar del punto A es 0.68, la proporción de la altura de ola del oleaje reflejado por el oleaje incidente es como sigue :

$$\frac{H_A}{H_I} = \sqrt{1 + 0.68^2} = 1.21$$

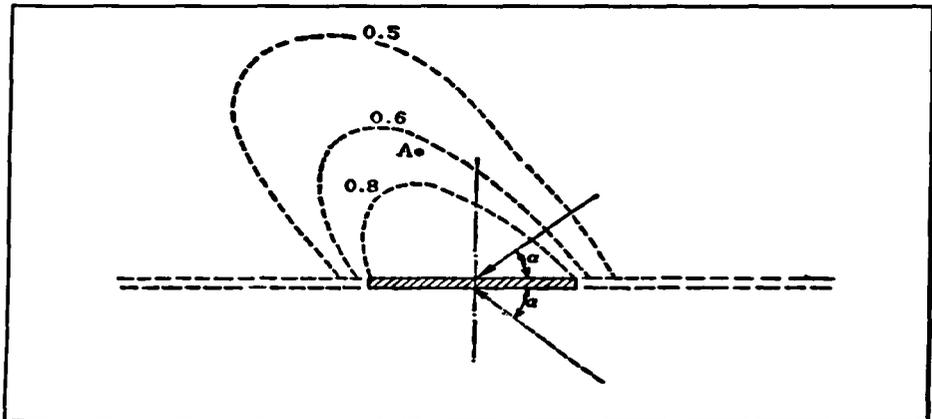


FIG.- 4.1 INFLUENCIA DEL OLAJE REFLEJADO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sin embargo, en el área cercana al rompeolas, o sea en la zona menor de una longitud de oleaje del rompeolas, no puede usarse este método porque hay un error bastante grande. Si la estructura del rompeolas es de elementos sueltos, como piedra, y el coeficiente de reflexión es 40%, la proporción de la altura de ola será como sigue:

$$\frac{H_A}{H_I} = \sqrt{1 + (0.4 \times 0.68)^2} = 1.04$$

4.2 Reflexión en un talud uniforme

El oleaje que tiene los valores de H_o/L_o más pequeños que los que se obtienen con la fórmula 4.2 se refleja completamente.

$$\left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{crit} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \cdot \frac{\text{sen}^2\alpha}{\pi} \quad (\text{fórmula. 4.2})$$

donde:

α : Angulo del talud con respecto a la horizontal dado en radianes

La fórmula propuesta por Miche, en oleaje irregular, fue comprobada por Murota con sus ensayos. El oleaje que tiene los valores de H_o/L_o mayores que los obtenidos por la fórmula 4.2 disminuyen su energía por rompiente, fricción, remolino y turbulencia. Por eso, generalmente la energía del oleaje reflejado será menor que la energía del oleaje incidente. Es decir, el oleaje se refleja parcialmente.

La proporción del oleaje reflejado por el oleaje incidente, es decir el coeficiente de reflexión, cambia por la inclinación del talud, la esbeltez de la ola (H_o/L_o), la rugosidad del talud y el porcentaje de vacíos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Miche da la fórmula siguiente para el coeficiente de reflexión:

$$K_R = \frac{H_R}{H_I} = \rho \left(\frac{L_0}{H_0} \right) \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{\pi} \quad (\text{fórmula. 4.3})$$

donde,

H_R : Altura de ola reflejada (m)

H_I : Altura de ola incidente (m)

H_0' : Altura equivalente del oleaje en aguas profundas (m)

L_0 : Longitud de ola en aguas profundas (m)

ρ : Coeficiente que cambia por la rugosidad del talud y el porcentaje de vacíos

α : Talud

La fórmula 4.3 se presenta en la Fig. 4.2. El valor de ρ se da como sigue:

Talud impermeable

Talud liso : $\rho = 1.0$

Talud rugoso : $\rho = 0.7$ a 0.9

El valor de ρ cambia por la rugosidad del talud

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Talud permeable : $\rho = 0.3$ a 0.6

(piedra o elementos artificiales de concreto)

el valor de ρ cambia por el porcentaje de vacíos

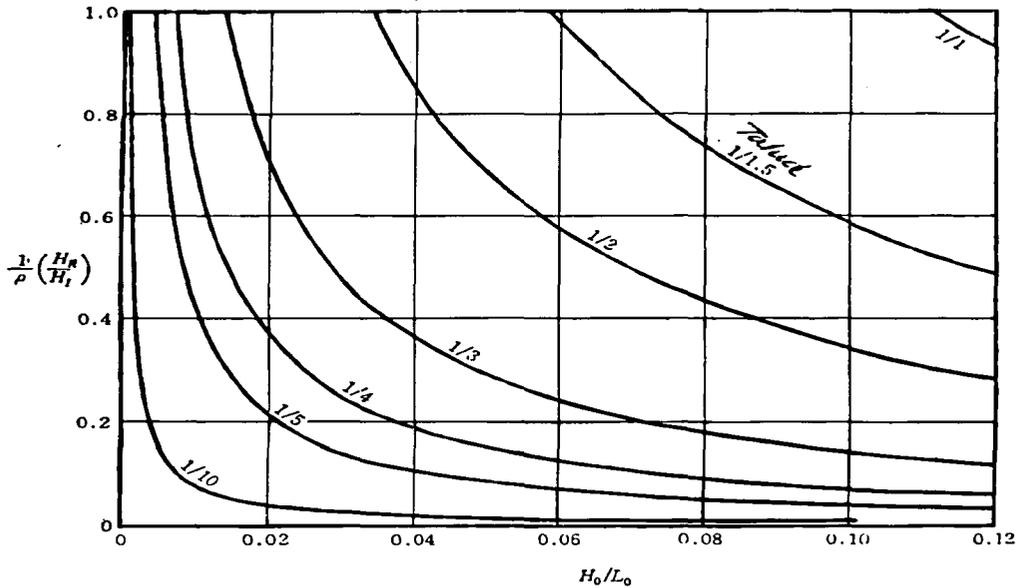


FIG.- 4.2 COEFICIENTE DE REFLEXIÓN (SEGÚN MICHE)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3 Estimación del coeficiente de reflexión

Es deseable que el coeficiente de reflexión se estime por medio de la observación en el campo. Sin embargo, cuando la observación es difícil el coeficiente de reflexión normalmente se estima teniendo en cuenta los resultados de ensayos en modelo. Hay dos métodos para estimar el coeficiente de reflexión: el método de Healy y el método de separación del oleaje incidente y reflejado.

Los valores aproximados del coeficiente de reflexión de varias estructuras se dan como sigue:

- Pared vertical 0.7 - 1.0

(cuando la corona de una estructura es baja y hay sobre elevación del oleaje (overtopping) , el valor será 0.7)

- Pared vertical sumergida 0.5 - 0.7
- Rompeolas de enrocamiento en la corona 0.3 - 0.6
- Rompeolas formados con elementos artificiales de concreto en la coraza 0.3 - 0.5
- Estructuras verticales con elementos artificiales de concreto 0.3 - 0.6
- Playa 0.05 - 0.2

Entre los intervalos anteriores el valor mayor corresponde al oleaje que tiene suave pendiente y el menor corresponde al de pendiente fuerte. Además el coeficiente de reflexión de las estructuras verticales con elementos artificiales de concreto cambia por: la longitud de ola, medidas y configuraciones de las estructuras.

4.4 Deformación por reflexión de oleaje alrededor del morro del rompeolas y en sus deflexiones

(1) Generalidades

Alrededor del morro del rompeolas y de las deflexiones de la estructura, las alturas del oleaje serán mayores. Se debe estimar la distribución de las alturas del oleaje considerando la irregularidad del mismo.

La distribución de las alturas máximas del oleaje se presenta de la Fig. 4.3 (a) a 4.3 (g). La distribución se calcula con ayuda de la computadora considerando que el oleaje se refleja completamente por el rompeolas. En la figura, K_d es la proporción de la altura de ola a lo largo del rompeolas por la altura de ola incidente. Para el oleaje irregular se usa el valor de $S_{máx}$ de 75 en este cálculo. También se presenta el valor de K_d que se obtiene por el método aproximado y se indica con la línea discontinua.

Cuando el rompeolas es de enrocamiento o completamente de elementos artificiales de concreto, y el coeficiente de reflexión del rompeolas es menor de 40%, el aumento de las alturas del oleaje será casi nulo.

(2) Método aproximado para calcular la distribución de las alturas del oleaje a lo largo de la deflexión del rompeolas

Suponiendo el rompeolas que se presenta en la Fig. 4.4. En esta figura α es el ángulo del oleaje incidente al rompeolas (II). Se supone que el oleaje se refleja completamente y se calcula como sigue:

La proporción de la altura de ola por la altura incidente (K_c) en la esquina será:

$$K_c = \frac{360^\circ}{\beta}$$

(fórmula. 4.4)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

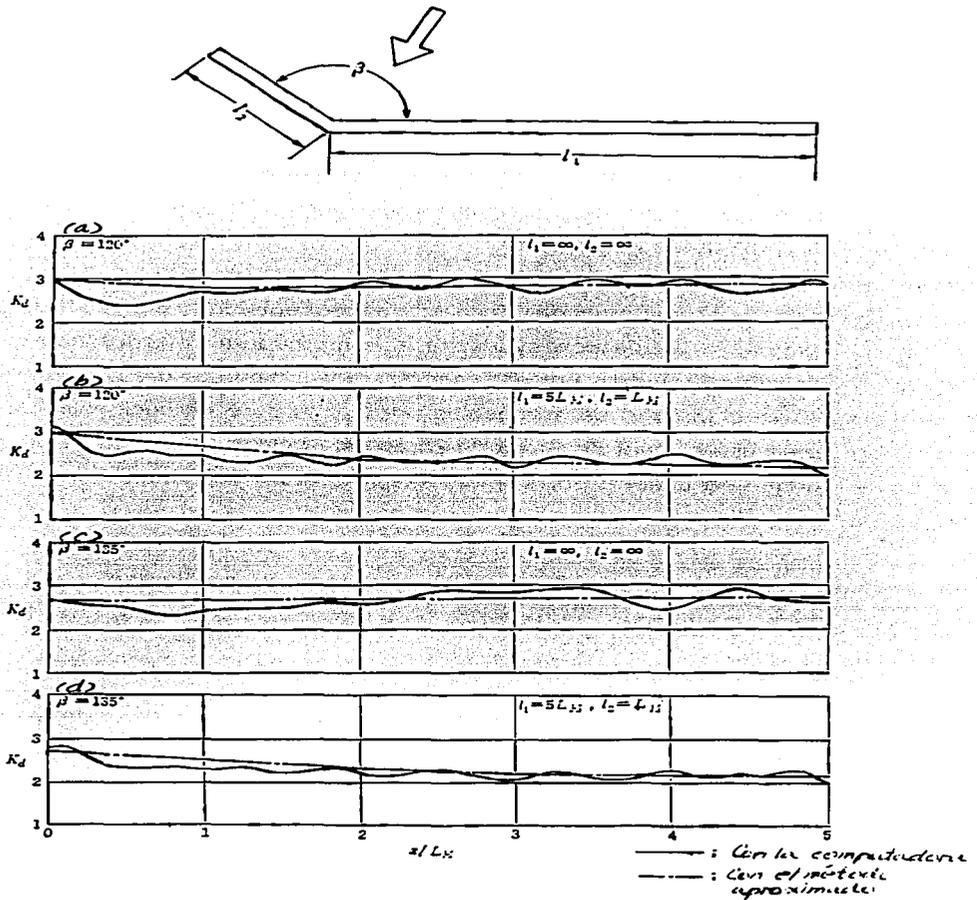


FIG.- 4.3 (a) a (d) DISTRIBUCIÓN DE ALTURAS DEL OLAJE MÁXIMO A LO LARGO DE UN ROMPEOLAS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

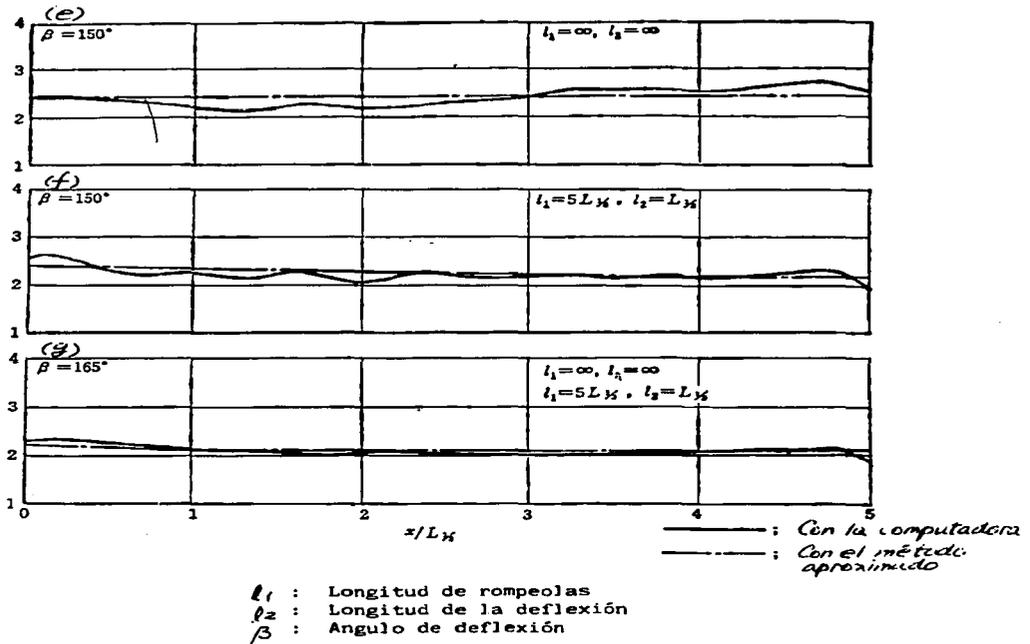


FIG.- 4.3 (e) a (g) DISTRIBUCIÓN DE ALTURAS DEL OLAJE MÁXIMO A LO LARGO DE UN ROMPEOLAS

donde, β es el ángulo de deflexión entre rompeolas (I) y (II). Cuando $\beta = 120^\circ$, el valor de K_c será 3. Si el oleaje no se refleja completamente el coeficiente de difracción hipotético (\bar{K}_c) se calcula con la fórmula siguiente:

$$\bar{K}_c = \sqrt{\left(\frac{K_c}{2}\right)^2 - 1}$$

(fórmula. 4.5)

Cuando el coeficiente de reflexión de los rompeolas (I) y (II) son r_I y r_{II} respectivamente, la proporción de la altura de ola por la altura incidente en la esquina del rompeolas será como sigue:

$$K = (1 + r_{II}) \bar{K}_0 \quad (\text{fórmula. 4.6})$$

donde, \bar{K}_0 es el coeficiente de incremento de altura de ola y está dado con la fórmula siguiente:

$$\bar{K}_0 = \sqrt{1 + (r_I \bar{K}_C)^2} \quad (\text{fórmula. 4.7})$$

Por ejemplo, en caso de $\beta = 120^\circ$, $r_I = 0.3$, $r_{II} = 1.0$, la proporción de altura de la ola por la altura incidente en la esquina del rompeolas será:

$$\begin{aligned} \bar{K}_C &= \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 - 1} = 1.12 \\ \bar{K}_0 &= \sqrt{1 + (0.3 \times 1.12)^2} = 1.05 \\ K &= 2 \times 1.05 = 2.10 \end{aligned}$$

Después se piensa en la proporción de la altura de ola a una distancia de una longitud de ola a partir de la esquina a lo largo del rompeolas (II). Se supone el rompeolas (I) como una boca del puerto como se mencionó anteriormente y se describe un plano de difracción como se presenta en la Fig. 4.4. El coeficiente de difracción en el punto A será \bar{K}_A y los coeficientes de reflexión de los rompeolas (I) y (II) serán r_I y r_{II} , respectivamente. La proporción de la altura de ola por la altura incidente (K_A) será como sigue:

$$K_A = (1 + r_{II}) \bar{K}_{0A} \quad (\text{fórmula. 4.8})$$

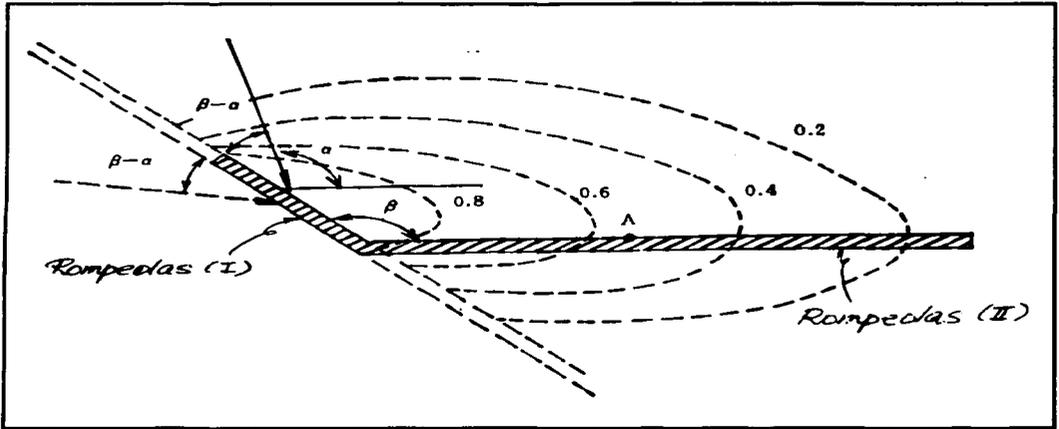


FIG.- 4.4 DISTRIBUCIÓN DE LA ALTURA DE OLA A LO LARGO DE LA DEFLECCIÓN DEL ROMPEOLAS

donde, \bar{K}_{0A} es el coeficiente de incremento de la altura de ola y se da con la fórmula siguiente:

$$\bar{K}_{0A} = \sqrt{1 + (r_I \bar{K}_A)^2} \quad (\text{fórmula. 4.9})$$

Por ejemplo, en caso de $r_I = 0.3$, $r_{II} = 1.0$, $\bar{K}_A = 0.55$, los valores de \bar{K}_{0A} y \bar{K}_A son como sigue:

$$\bar{K}_{0A} = \sqrt{1 + (0.3 \times 0.55)^2} = 1.01$$

$$\bar{K}_A = (1.0 + 1.0) \times 1.01 = 2.02$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se puede calcular el valor de K en caso de lugares distantes mayores a una longitud de ola, a partir de la esquina a lo largo de rompeolas (II) de la misma manera . En caso de lugares menores de una longitud de ola, se estima interpolando los valores de K entre los valores de K en la esquina y los de K a una longitud de ola.

Con estos métodos se puede estimar la distribución de la altura de ola enfrente del rompeolas . Se presentan los valores de \bar{K}_0 y K_{0A} en la tabla 4.1. Con esta tabla podemos estimar el coeficiente de incremento de la altura de ola en casos de varias condiciones de rompeolas (I). Por ejemplo, en caso de $\beta = 150^\circ$, longitud de rompeolas (I) igual a una longitud de ola significativa ($L/3$) y el coeficiente de reflexión del rompeolas es 0.5, los valores de \bar{K}_0 y K_{0A} son 1.05 y 1.03, respectivamente.

TABLA - 4.1 VALORES DE K_0 Y K_{0A}

r_I	β°	\bar{K}_0	\bar{K}_{0A}		
			1 (cos)	2 (cos)	∞ (cos)
1.0	120	1.5	1.17	1.35	1.41
	135	1.35	1.15	1.35	1.35
	150	1.2	1.13	1.23	1.23
	165	1.1	1.07	1.07	1.07
0.8	120	1.34	1.11	1.24	1.28
	135	1.24	1.10	1.24	1.24
	150	1.13	1.08	1.15	1.15
	165	1.07	1.04	1.04	1.04
0.5	120	1.15	1.05	1.10	1.12
	135	1.10	1.04	1.10	1.10
	150	1.05	1.03	1.06	1.06
	165	1.03	1.02	1.01	1.01
0.3	120	1.05	1.02	1.04	1.04
	135	1.04	1.01	1.04	1.04
	150	1.02	1.01	1.02	1.02
	165	1.01	1.01	1.01	1.01

(*) LONGITUD DEL ROMPEOLAS (I) PRESENTADAS EN UNIDADES DE LONGITUDES DE OLA SIGNIFICANTE ($L/3$)

4.5 Deformación del oleaje por efecto del fondo

En caso de que el oleaje se propague en aguas bajas se debe considerar no solo refracción y difracción sino también la deformación del oleaje por efecto del fondo. Para estimar el coeficiente de la deformación por aguas bajas (K_s) se debe considerar la no-linealidad del oleaje.

El coeficiente de fondo (K_s) se presenta en la Fig. 4.5.

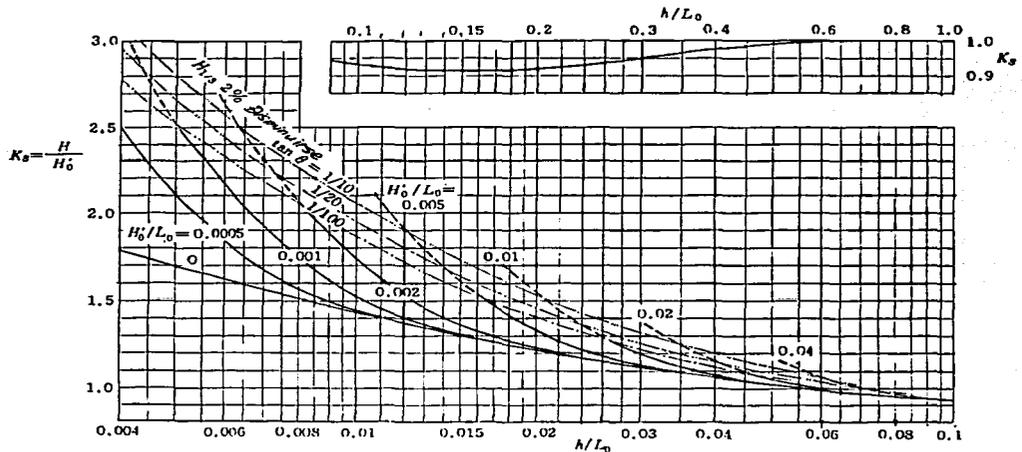


FIG.- 4.5 COEFICIENTE DE FONDO (K_s) SEGÚN SHUTO

Esta figura se calcula con la teoría de la onda larga no-lineal según Shuto. La figura incluye la solución de la teoría del oleaje de pequeña amplitud y también se puede estimar la deformación del oleaje en aguas bajas. Por eso, se usa normalmente para estimar la deformación del oleaje. En esta figura K_s es el coeficiente de fondo, H_0 es

la altura equivalente de la ola en aguas profundas, H es la altura de ola a la profundidad h y L_0 es la longitud de la ola en aguas profundas. En la zona del oleaje con gran longitud de ola (o sea en la zona de aguas bajas donde el valor de la profundidad (h) es menor de $1/20$ de la longitud de ola en aguas profundas, es decir $h \leq L_0/20$, las celeridades de las componentes del oleaje irregular convergen a la celeridad de la ola larga. En este caso se puede aplicar la teoría de la onda larga no-lineal al oleaje irregular. Además el error del coeficiente de fondo para aguas bajas cuando se usa el coeficiente (K_s) del oleaje regular de pequeña amplitud en vez del de oleaje irregular es menor del 5% en la zona de $h/L_0 > 0.05$.

Por eso la figura del coeficiente de aguas bajas para oleaje regular (es decir Fig. 4.5) se puede aplicar a la deformación por aguas bajas del oleaje irregular. En este caso, se representa el oleaje irregular por el oleaje significativo.

En la figura, la parte de la línea H_0/L_0 que sobresale de la línea de pendiente considerada significa el punto en que la altura de ola disminuye más de 2% por el efecto de rompiente . Por eso, en este punto no se puede estimar la deformación de la altura de ola solo con el efecto de aguas bajas.

Como se dijo anteriormente, la deformación en aguas bajas del oleaje de pequeña amplitud se da con la fórmula siguiente:

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{H_0} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \frac{C_0}{C}} = K_s \\ n &= \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{4\pi h/L_0}{\sinh \frac{4\pi h}{L}} \right\} \end{aligned} \right\} \text{(fórmula. 4.10)}$$

donde,

H : Altura de ola a la profundidad h

H_0 : Altura de ola equivalente en aguas profundas

C_0 : Celeridad de ola en aguas profundas

C : Celeridad de ola a la profundidad h

K_s : Coeficiente de fondo

h : Profundidad

L : Longitud de ola a la profundidad h

El valor de K_s en la fórmula 4.10 está dado en la parte baja de la curva con valor de $H_0/L_0 = 0$ de la Fig. 4.5.

La fórmula de la distribución en aguas bajas con efecto de la no linealidad de la onda larga infinita según Shuto es como sigue:

$$K_s = \sqrt{2n \tanh(2\pi h/L)}, \quad \left(\frac{9HT^2}{h^2} \leq 30 \right)$$

$$Hh^2 = \text{const.}, \quad \left(30 \leq \frac{9HT^2}{h^2} < 50 \right)$$

$$Hh^{2/5} = \left[\sqrt{\frac{9HT^2}{h^2}} - 2\sqrt{5} \right] = \text{const.}, \quad \left(50 \leq \frac{9HT^2}{h^2} \right)$$

(fórmula. 4.11)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

donde,

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{4\pi h}{L} \operatorname{senh} \left(\frac{4\pi h}{L} \right) \right\}$$

H : Altura de ola a la profundidad h

T : Período de la ola

L : Longitud de ola a la profundidad h

CAPÍTULO

5

**SIMULACIÓN NUMÉRICA
DE LA DIFRACCIÓN**

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DIFRACCIÓN

5.1 Antecedentes

La difracción del oleaje es un fenómeno que se presenta cuando la propagación de las olas es interrumpida por un obstáculo (por ejemplo: un rompeolas, un espigón, una isla, etc.). Las crestas del oleaje difractado, toman la forma de curvas casi iguales a los arcos circulares con centro en el punto final del obstáculo.

Debido a que el oleaje en el mar es de naturaleza irregular, se presenta la necesidad de calcular la difracción tomando en cuenta los efectos de dicho fenómeno.

El objetivo del capítulo es calcular la difracción causada por el oleaje irregular en el interior de un puerto protegido por dos rompeolas.

TEORÍA

5.1 Expresión compleja del coeficiente de difracción, $\Phi(x, Y)$.

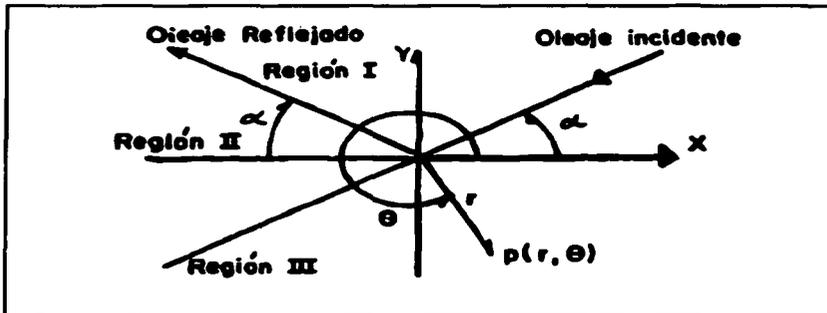


FIG. 5.1 REGIONES DEL CÁLCULO

Cuando una ola incide sobre un rompeolas semi-infinito, ubicado en el eje X como se muestra en la figura 5.1; la velocidad potencial Φ , generada por este oleaje en las zonas aledañas del rompeolas, se expresa con la siguiente ecuación:

$$\Phi = - \frac{igH}{2\sigma} \phi(X, Y) \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \exp(i\sigma t) \quad (\text{Ecuación. 5.1})$$

Donde:

H : Altura del oleaje incidente

σ : Frecuencia angular

k : Número del oleaje

h : Profundidad del agua

g : Aceleración de la gravedad (980 cm² / seg)

i : Número imaginario [$\sqrt{-1}$]

$\Phi(X, Y)$: Expresión compleja del coeficiente de difracción

El coeficiente de difracción K_D , está dado por la siguiente ecuación:

$$K_D = | \Phi(X, Y) | \quad (\text{Ecuación. 5.2})$$

El valor de Φ se calcula con la teoría de Sommerfeld, usando coordenadas polares, en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta) = & \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(krcos(\theta-\alpha) + \frac{\pi}{4}\right)\right] \left\{ \left[C(\gamma_1) + \frac{1}{2} \right] - i \left[S(\gamma_1) + \frac{1}{2} \right] \right\} \\ & + K_R \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(krcos(\theta+\alpha) + \frac{\pi}{4}\right)\right] \left\{ \left[C(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right] - i \left[S(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (\text{Ecuación. 5.3})$$

Donde; K_R es el coeficiente de reflexión del rompeolas.

$$\gamma_1 = \sqrt{4 k r / \pi} \cos\left(\frac{\theta - \alpha}{2}\right) \quad (\text{Ecuación. 5.4})$$

$$\gamma_2 = \sqrt{4 k r / \pi} \cos\left(\frac{\theta + \alpha}{2}\right) \quad (\text{Ecuación. 5.5})$$

$$C(\gamma) = \int_0^\gamma \cos\left(\frac{\pi}{2} x^2\right) dx \quad (\text{Ecuación. 5.6})$$

$$S(\gamma) = \int_0^\gamma \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} x^2\right) dx \quad (\text{Ecuación. 5.7})$$

Los coeficientes $C(\gamma)$ y $S(\gamma)$ se conocen como coeficientes de la integral de Fresnel, y tienen los siguientes valores:

$$C(0) = S(0) = 0$$

$$C(\infty) = S(\infty) = 0.5$$

(Ecuación. 5.8)

$$C(\gamma) > 0 \text{ y } S(\gamma) > 0 \text{ para } \gamma > 0$$

$$C(-\gamma) = -C(\gamma) \text{ y } S(-\gamma) = -S(\gamma)$$

Por otro lado, las relaciones entre (X, Y) y (r, θ) se expresa como sigue:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

$$X = r \text{ COS } \theta$$

$$Y = r \text{ SEN } \theta$$

(Ecuación. 5.9)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

5.2 Regiones de cálculo del coeficiente de difracción, $|\Phi(X, Y)|$

como se muestra en la figura 5.1, el área de influencia del oleaje se divide en las tres regiones siguientes:

- a) **REGIÓN I** $(0 \leq \theta \leq \pi - \alpha)$
- b) **REGIÓN II** $(\pi - \alpha \leq \theta \leq \pi + \alpha)$
- c) **REGIÓN III** $(\pi + \alpha \leq \theta \leq 2\pi)$

El valor de $\phi(r, \theta)$ de la ecuación (5.3) se descompone en ϕ_A y ϕ_B de la forma siguiente:

$$\phi_A = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4}\right)\right] \left[\left[C(\gamma_1) + \frac{1}{2}\right] - i\left[S(\gamma_1) + \frac{1}{2}\right]\right] \quad (\text{Ecuación. 5.10})$$

$$\phi_B = \frac{K_R}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left(kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4}\right)\right] \left[\left[C(\gamma_2) + \frac{1}{2}\right] - i\left[S(\gamma_2) + \frac{1}{2}\right]\right] \quad (\text{Ecuación. 5.11})$$

Para conocer las características de $\phi(r, \theta)$, es necesario estudiar los valores de ϕ_A y ϕ_B en cada una de las regiones de cálculo mencionadas anteriormente.

Primeramente; los signos de $C(\gamma_1)$, $S(\gamma_1)$, $C(\gamma_2)$, $S(\gamma_2)$ cambian en cada región, como se muestra en la tabla 5.1, cuando $(0 < \alpha < \pi)$, según la ecuación (5.8). Por ejemplo en la **REGIÓN I**, los valores mínimo y máximo de $\frac{(\theta-\alpha)}{2}$ ocurren en el caso de que $\theta=0$ y $\alpha=\pi$, y en el caso de que $\theta=\pi-\alpha$ y $\alpha=0$, respectivamente; por eso, $\cos \frac{(\theta-\alpha)}{2}$ siempre es positivo. En la misma región, los valores mínimo y máximo de $\frac{(\theta+\alpha)}{2}$ ocurren en el caso de que $\theta=0$ y $\alpha=0$, y en el caso de que $\theta=\pi-\alpha$, respectivamente; por eso, $\cos \frac{(\theta+\alpha)}{2}$ es siempre positivo. Por lo tanto, en la **REGIÓN I**; $C(\gamma_1)$, $S(\gamma_1)$, $C(\gamma_2)$ y $S(\gamma_2)$ son positivos según la ecuación (5.8).

α	$0 - \pi$						
	0	REGION I	$\pi - \alpha$	REGION II	$\pi + \alpha$	REGION III	2π
$\frac{\theta - \alpha}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} - \alpha$	$-\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} - \pi$	$\pi - \frac{\pi}{2}$
$\cos \left(\frac{\theta - \alpha}{2} \right)$		> 0		> 0		< 0	
$\frac{\theta + \alpha}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$0 - \frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2} - \frac{3}{2}\pi$	$\frac{\pi}{2} + \alpha$	$\frac{\pi}{2} - \frac{3}{2}\pi$	$\pi + \frac{\pi}{2}$
$\cos \left(\frac{\theta + \alpha}{2} \right)$		> 0		< 0		< 0	
$C(\gamma_1)$		> 0		> 0		< 0	
$S(\gamma_1)$		> 0		> 0		< 0	
$C(\gamma_2)$		> 0		< 0		< 0	
$S(\gamma_2)$		> 0		< 0		< 0	

TABLA.-5.1 SIGNOS DE $C(\gamma)$ y $S(\gamma)$ EN CADA REGIÓN

A continuación se consideran las características de $\phi(r, \theta)$ en cada región, teniendo en cuenta la tabla 5.1.

(1) En la REGIÓN I.

$$\begin{aligned} \phi_A &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i(krcos(\theta-\alpha) + \frac{\pi}{4})\right] \left[\left\{C(\gamma_1) + \frac{1}{2}\right\} - i\left\{S(\gamma_1) + \frac{1}{2}\right\}\right] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[i(krcos(\theta-\alpha))] e^{i\frac{\pi}{4}} \left[1 - i + \left\{C(\gamma_1) - \frac{1}{2}\right\} - i\left\{S(\gamma_1) - \frac{1}{2}\right\}\right] \end{aligned}$$

Como:

$$1 - i = \sqrt{2} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} - i \frac{1}{\sqrt{2}} \right] = \sqrt{2} \left[\cos \frac{\pi}{4} - i \sin \frac{\pi}{4} \right] = \sqrt{2} e^{-i\frac{\pi}{4}}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \phi_A &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[i(krcos(\theta-\alpha))] e^{i\frac{\pi}{4}} \left[\sqrt{2} e^{-i\frac{\pi}{4}} + \left\{C(\gamma_1) - \frac{1}{2}\right\} - i\left\{S(\gamma_1) - \frac{1}{2}\right\} \right] \\ &= \exp[i(krcos(\theta-\alpha))] + \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i(krcos(\theta-\alpha) + \frac{\pi}{4})\right] \\ &\quad \cdot \left[\left\{C(\gamma_1) - \frac{1}{2}\right\} - i\left\{S(\gamma_1) - \frac{1}{2}\right\} \right] \end{aligned}$$

En esta región los valores de $C(\gamma_1)$ y $S(\gamma_1)$ son siempre positivos, como se indica en la tabla 5.1. Cuando γ_1 se acerca a valor infinito (∞), dichos valores se acercan al valor de 0.5, y el segundo término de ϕ_A se aproxima al valor de cero. Por lo tanto, este segundo miembro expresa el oleaje dispersado del oleaje incidente. Además, el primer miembro corresponde al oleaje incidente. Es decir:

$$\begin{aligned}
 & \exp [i(k r \cos (\theta-\alpha))] \exp (i \sigma t) \\
 = & \exp [i(k r \cos \theta \cos \alpha + k r \sin \theta \sin \alpha)] \exp (i \sigma t) \\
 = & \exp [i(k \cos \alpha r \cos \theta + k \sin \alpha r \sin \theta)] \exp (i \sigma t) \\
 & = \exp [i(k_x \cdot x+k_y \cdot y)] \exp (i \sigma t) \\
 & = \exp [i(k_x x+k_y y)+i \sigma t] \\
 & = \exp [i(k_x x+k_y y+\sigma t)] \\
 = & \cos (k_x x+k_y y+\sigma t)+i \sin (k_x x+k_y y+\sigma t)
 \end{aligned}$$

Entonces, lo anterior indica el oleaje incidente en el caso de que OX sea un rompeolas, como se muestra en la figura 5.2. Porque los signos de x y y son iguales a los de t.

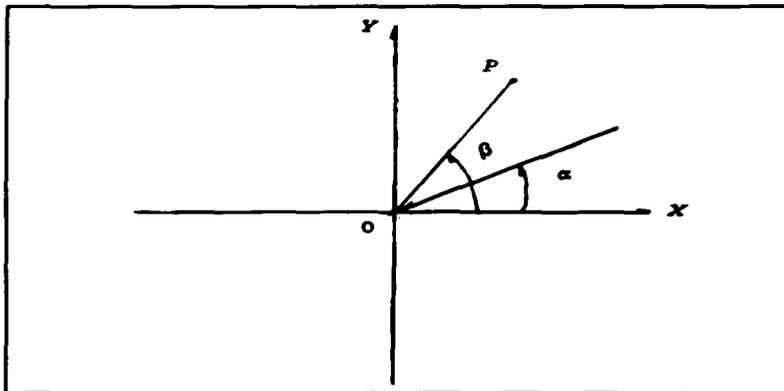


FIG.-5.2 OLAJE INCIDENTE EN EL CASO DE QUE OX SEA UN ROMPEOLAS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Del mismo modo ϕ_B se cambia como sigue:

$$\phi_B = K_R \exp[i(krcos(\theta+\alpha))] + \frac{K_R}{\sqrt{2}} \exp\left[i(krcos(\theta+\alpha) + \frac{\pi}{4})\right] \\ + \left[\left\{ C(\gamma_2) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_2) - \frac{1}{2} \right\} \right]$$

De igual forma γ_2 se acerca a infinito, los valores de $C(\gamma_2)$ y $S(\gamma_2)$ se acercan al valor de 0.5, y el segundo término de ϕ_B se hace también cero. Por lo tanto, este segundo miembro expresa el oleaje dispersado del oleaje reflejado y el primer miembro expresa la ola reflejada.

De lo anterior, se dice que $\phi(r,\theta)$ es la suma del oleaje incidente (ϕ_I), el oleaje reflejado (ϕ_R) y el oleaje dispersado por los oleajes incidente y reflejado ($\phi_D = \phi_{ID} + \phi_{RD}$), como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\phi = \phi_I + \phi_R + \phi_{ID} + \phi_{RD} \quad \text{(Ecuación. 5.12)} \\ = \phi_I + \phi_R + \phi_D$$

(2) REGIÓN II.

Si solo se cambia ϕ_A , de la misma manera que en la REGION I, el valor de $\phi(r,\theta)$ se expresa como sigue:

$$\phi(r,\theta) = \exp[i(krcos(\theta-\alpha))] + \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i(krcos(\theta-\alpha) + \frac{\pi}{4})\right] \\ + \left[\left\{ C(\gamma_2) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_2) - \frac{1}{2} \right\} \right] + \frac{K_R}{\sqrt{2}} \exp\left[i(krcos(\theta+\alpha) + \frac{\pi}{4})\right] \\ + \left[\left\{ C(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_2) + \frac{1}{2} \right\} \right]$$

En la REGIÓN II, γ es infinito $C(\gamma_1)$ y $S(\gamma_1)$ son igual a 0.5; por eso el segundo término de $\phi(r, \theta)$ expresa, igualmente, el oleaje dispersado del oleaje incidente.

Por otro lado, $C(\gamma_2)$ y $S(\gamma_2)$ son negativos en la REGION II. Por lo tanto; $C(\gamma_2)$ y $S(\gamma_2)$ toman el valor de -0.5 cuando γ_2 es infinito; por eso, el tercer término expresa el oleaje dispersado del oleaje reflejado. Es decir; el valor de $\phi(r, \theta)$, es la suma que se indica a continuación:

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_I + \phi_{ID} + \phi_{RD} \\ &= \phi_I + \phi_D\end{aligned}\tag{Ecuación. 5.13}$$

(3) REGIÓN III.

Todos los valores de $C(\gamma_1)$, $S(\gamma_1)$, $C(\gamma_2)$ y $S(\gamma_2)$ son negativos; por eso, cuando γ se hace infinito todos ellos toman el valor de -0.5. Por lo tanto; ϕ_A y ϕ_B , de las ecuaciones (5.10) y (5.11), son oleajes dispersados de los oleajes incidente y reflejado, respectivamente. Es decir:

$$\begin{aligned}\phi &= \phi_{ID} + \phi_{RD} \\ &= \phi_D\end{aligned}\tag{Ecuación. 5.14}$$

5.3 Difracción del oleaje por dos rompeolas semi-infinitos sin reflexión en el lado interior de estos

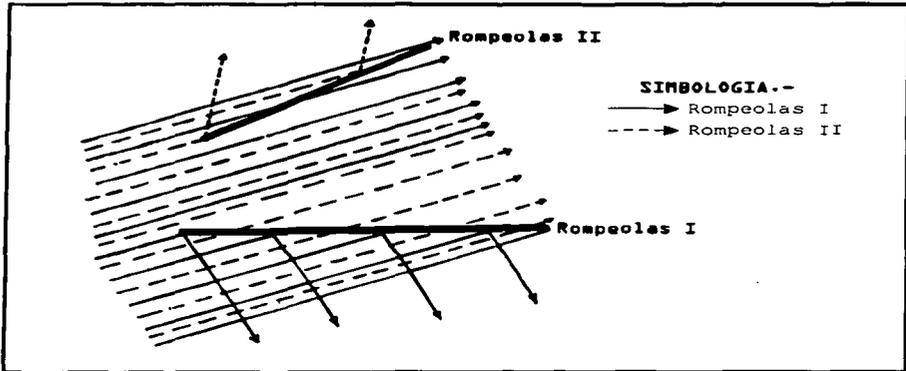


FIG.-5.3 PASO DE LA OLA PARA CADA ROMPEOLAS CUANDO SE ENCUENTRAN SOLOS

El fenómeno de la difracción del oleaje, por dos rompeolas semi-infinitos, se puede considerar como la combinación de las difracciones en el caso de que cada rompeolas se encuentre solo. La figura 5.3 indica la trayectoria de la ola en la combinación mencionada anteriormente. Donde; la línea continua indica la trayectoria de la ola para el ROMPEOLAS I y la línea punteada para el ROMPEOLAS II. Por lo que, la ola incidente se duplica; por lo tanto, una ola incidente se tiene que eliminar en todas las regiones de la figura 5.3. Es decir; la expresión compleja del coeficiente de difracción $\phi(r, \theta)$, en el caso de que los dos rompeolas semi-infinitos existan, se expresa como sigue:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \phi_x$$

(Ecuación. 5.15)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Donde:

- Φ_1 : ϕ de la ecuación (5.3) sin el ROMPEOLAS II.
- Φ_2 : ϕ de la ecuación (5.3) sin el ROMPEOLAS I.
- ϕ_1 : ϕ del oleaje incidente que es igual a ϕ_1 en las ecuaciones (5.12) y (5.13)

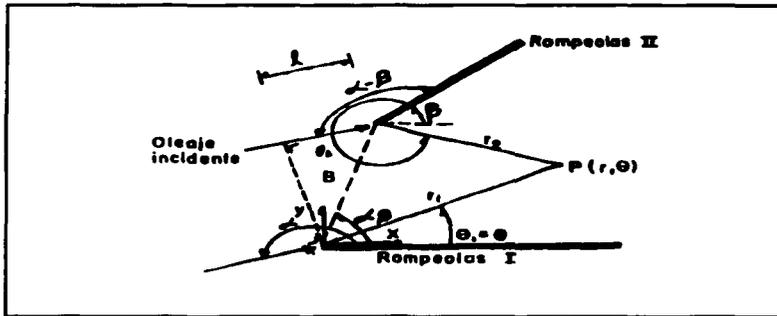


FIG.- 5.4 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Para expresar el valor de ϕ , de la ecuación (5.15), usando las variables indicadas en la figura 5.4, y tomando el ROMPEOLAS I sobre el eje X, se tiene lo siguiente:

El valor de ϕ_1 se expresa como sigue, en base a lo explicado en la sección anterior.

$$\phi_1(x, \theta) = \exp [i k x \cos(\theta - \alpha)] \quad \text{(Ecuación. 5.16)}$$

El valor de $\phi_1(r_1, \theta_1)$, por el ROMPEOLAS I, se expresa según la ecuación (5.3) como sigue:

$$\begin{aligned} \phi_1(r_1, \theta_1) = & \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left\{k r_1 \cos(\theta_1 - \alpha) + \frac{\pi}{4}\right\}\right] \left[\left\{C(\gamma_{11}) + \frac{1}{2}\right\} - i\left\{S(\gamma_{11}) + \frac{1}{2}\right\}\right] \\ & + \frac{K_{R1}}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left\{k r_1 \cos(\theta_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4}\right\}\right] \left[\left\{C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2}\right\} - i\left\{S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2}\right\}\right] \end{aligned}$$

(Ecuación. 5.17)

Donde:

$$\gamma_{11} = \sqrt{4 \frac{k r_1}{\pi} \cos\left(\frac{\theta_1 - \alpha}{2}\right)} \quad \text{(Ecuación. 5.18)}$$

$$\gamma_{12} = \sqrt{4 \frac{k r_1}{\pi} \cos\left(\frac{\theta_1 + \alpha}{2}\right)} \quad \text{(Ecuación. 5.19)}$$

Para calcular el valor de $\phi_2(r_2, \theta_2)$, por el ROMPEOLAS II, hay que tomar en cuenta la diferencia de fase del oleaje. La que se obtiene en la forma siguiente:

La distancia l , que se muestra en la figura 5.4, se expresa como sigue:

$$l = B \operatorname{sen}\left(\alpha - \alpha_\beta - \frac{\pi}{2}\right) = -B \cos(\alpha - \alpha_\beta)$$

$$l = -B \cos(\alpha_\beta - \alpha)$$

Por lo que el atraso ε sobre la fase del oleaje, en el morro del ROMPEOLAS II contra el ROMPEOLAS I, se expresa en la forma siguiente:

$$\varepsilon = -k \ell = k B \cos(\alpha_p - \alpha) \quad \text{(Ecuación. 5.20)}$$

Entonces, el valor de ϕ_2 está dado en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \phi_2(r_2, \theta_2) = & \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left\{kr_2 \cos(\theta_2 - \alpha + \beta) + \frac{\pi}{4} + \varepsilon\right\}\right] \left\{ \left\{C(\gamma_{21}) + \frac{1}{2}\right\} - i\left\{S(\gamma_{21}) + \frac{1}{2}\right\} \right\} \\ & + \frac{K_{R2}}{\sqrt{2}} \exp\left[i\left\{kr_2 \cos(\theta_2 + \alpha - \beta) + \frac{\pi}{4} + \varepsilon\right\}\right] \left\{ \left\{C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2}\right\} - i\left\{S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2}\right\} \right\} \end{aligned}$$

(Ecuación. 5.21)

Donde:

$$\gamma_{21} = \sqrt{4 \frac{kr_2}{\pi}} \cos\left(\frac{\theta_2 - \alpha + \beta}{2}\right) \quad \text{(Ecuación. 5.22)}$$

$$\gamma_{22} = \sqrt{4 \frac{kr_2}{\pi}} \cos\left(\frac{\theta_2 + \alpha - \beta}{2}\right) \quad \text{(Ecuación. 5.23)}$$

Por lo tanto, el valor de ϕ está dado como sigue:

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_1 + \phi_2 - \phi_r \\ &= \phi_1 + \phi_2 - \exp[i(k r \cos(\theta - \alpha))] \end{aligned}$$

Como:

$$\begin{aligned}
 \exp [i(k r \cos (\theta-\alpha))] &= \exp [i(k r \cos (\theta-\alpha))] \exp^{i \frac{\pi}{4}} \exp^{-i \frac{\pi}{4}} \\
 &= e^{-i \frac{\pi}{4}} \exp [i(k r \cos (\theta-\alpha) + \frac{\pi}{4})] \\
 &= (\cos \frac{\pi}{4} - i \sin \frac{\pi}{4}) \exp [i(k r \cos (\theta-\alpha) + \frac{\pi}{4})] \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} (1 - i) \exp [i(k r \cos (\theta-\alpha) + \frac{\pi}{4})]
 \end{aligned}$$

Entonces:

$$\begin{aligned}
 \phi(r, \theta) &= \phi_1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r \cos (\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] (1-i) + \phi_2 \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right\} \right] \\
 &+ \frac{K_{R1}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right\} \right] \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_2 \cos (\theta_2 - \alpha + \beta) + \frac{\pi}{4} + \epsilon \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} \right\} \right] \\
 &+ \frac{K_{R2}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_2 \cos (\theta_2 + \alpha - \beta) + \frac{\pi}{4} + \epsilon \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right\} \right]
 \end{aligned}$$

(Ecuación. 5.24)

Es decir; la expresión compleja del coeficiente de difracción se expresa por la ecuación (5.24), para toda la región.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.4 Difracción del oleaje por dos rompeolas semi-infinitos con reflexión en el lado interior de estos

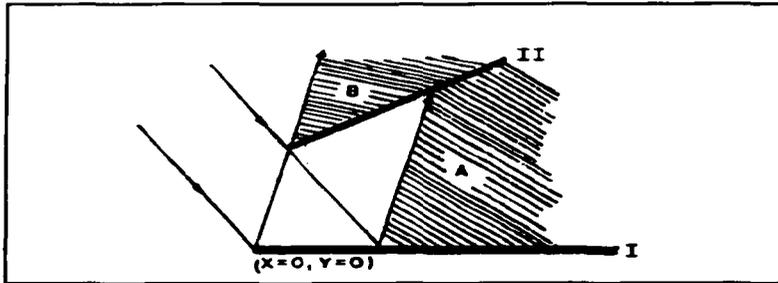


FIG.-5.5 REFLEXIÓN EN EL LADO INTERIOR DEL ROMPEOLAS I

En el caso de la figura 5.5, donde se encuentra la reflexión en el lado interior, no se puede aplicar la ecuación (5.24) sin ningún cambio para las áreas A y B. Aunque la ecuación (5.24) se aplica para la otra área. Es decir, no se calculan las olas reflejadas por los lados interiores del ROMPEOLAS I en A y B. Por lo tanto, el valor de ϕ de las áreas A y B tiene que expresarse como sigue:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \phi_{I1} - \phi_{R1} \quad (\text{Ecuación. 5.25})$$

Donde:

ϕ_{R1} : ola reflejada por el lado interior del ROMPEOLAS I.

ϕ_{I1} : ola incidente al ROMPEOLAS I.

El valor de ϕ_{R1} se expresa en la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
 \phi_{R1} &= K_{R1} \exp [i \{ k r_1 \cos (\theta_1 + \alpha) \}] \\
 &= K_{R1} \exp [i \{ k r_1 \cos (\theta_1 + \alpha) \}] e^{i \frac{\pi}{4}} e^{-i \frac{\pi}{4}} \\
 &= \frac{K_{R1}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] (1-i)
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación. 5.26}$$

Por lo tanto; teniendo en cuenta la ecuación (5.24), el valor de ϕ de la ecuación (5.25) se expresa en la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \phi(r, \theta) &= \phi_1 - \phi_{I1} - \phi_{R1} + \phi_2 \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right\} \right] \\
 &+ \frac{K_{R1}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right\} \right] \\
 &- \frac{K_{R1}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] (1-i) \\
 &+ \phi_2 \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right\} \right] \\
 &+ \frac{K_{R1}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{12}) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{12}) - \frac{1}{2} \right\} \right] \\
 &+ \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_2 \cos (\theta_2 - \alpha + \beta) + \frac{\pi}{4} + \epsilon \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} \right\} \right] \\
 &+ \frac{K_{R2}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_2 \cos (\theta_2 + \alpha - \beta) + \frac{\pi}{4} + \epsilon \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} \right\} \right]
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación. 5.27}$$

Es decir; lo anterior se puede entender como sigue:

- (1) Para eliminar el oleaje incidente al ROMPEOLAS I, $[C(\gamma_{11}) + \frac{1}{2}]$ se cambia por $[C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2}]$ y $[S(\gamma_{11}) + \frac{1}{2}]$ se cambia a $[S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2}]$.
- (2) Para eliminar la ola reflejada en el ROMPEOLAS I, $[C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2}]$ se cambia por $[C(\gamma_{12}) - \frac{1}{2}]$ y $[S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2}]$ se cambia a $[S(\gamma_{12}) - \frac{1}{2}]$.
- (3) Referente al ROMPEOLAS II, los cambios se hacen en la misma forma que para el ROMPEOLAS I.

La ecuación (5.27), en comparación con la ecuación (5.24), difiere sólo en el signo del número $[1/2]$ del segundo término.

En el caso de la figura 5.6, donde la ola incidente se refleja en el lado interior del ROMPEOLAS II, las áreas A y B no tienen la influencia de esa ola reflejada. Aunque la ecuación (5.24) contiene ese oleaje reflejado en toda el área.

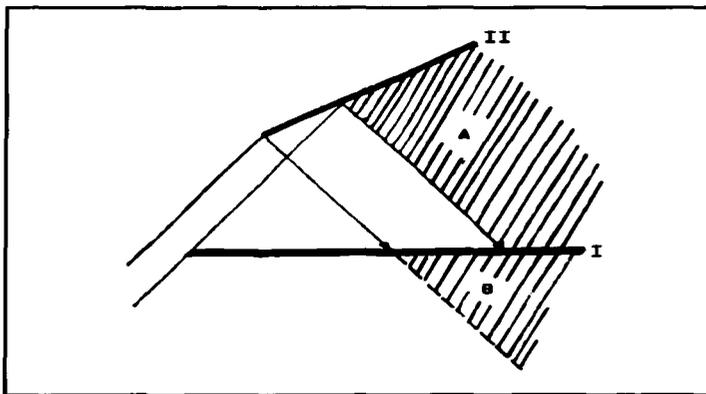


FIG.- 5.6 REFLEXIÓN EN EL LADO INTERIOR DEL ROMPEOLAS II

Por lo tanto, el valor de ϕ de las áreas A y B es como sigue:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \phi_{I2} - \phi_{R2} \quad \text{(Ecuación. 5.28)}$$

Donde; ϕ_{R2} corresponde a la ola reflejada por el ROMPEOLAS II que se expresa en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \phi_{R2} &= K_{R2} \exp [i (k r_2 \cos (\theta_2 + \alpha - \beta) + \epsilon)] \\ &= \frac{K_{R2}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left(k r_2 \cos (\theta_2 + \alpha - \beta) + \frac{\pi}{4} + \epsilon \right) \right] (1-i) \end{aligned}$$

El valor de ϕ_{I2} es la expresión referente al ROMPEOLAS II de la ola incidente y es igual que ϕ_{I2} . Expresándose como sigue:

$$\begin{aligned} \phi_{I2} &= \exp [i (k r_2 \cos (\theta_2 - \alpha + \beta) + \epsilon)] \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left(k r_2 \cos (\theta_2 - \alpha + \beta) + \frac{\pi}{4} + \epsilon \right) \right] (1-i) \end{aligned}$$

Por lo tanto; la ecuación (5.28) se expresa en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \phi (r, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{11}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{11}) + \frac{1}{2} \right\} \right] \\ &+ \frac{K_{R1}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_1 \cos (\theta_1 + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right\} \right] \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_2 \cos (\theta_2 - \alpha + \beta) + \frac{\pi}{4} + \epsilon \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{21}) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{21}) - \frac{1}{2} \right\} \right] \\ &+ \frac{K_{R2}}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ k r_2 \cos (\theta_2 + \alpha - \beta) + \frac{\pi}{4} + \epsilon \right\} \right] \left[\left\{ C(\gamma_{22}) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(\gamma_{22}) - \frac{1}{2} \right\} \right] \end{aligned}$$

(Ecuación. 5.29)

Las ecuaciones (5.24) y (5.29) son diferentes entre si, por el signo del número $[1/2]$; en relación al primero, tercero y cuarto miembros.

5.5 Cambio del valor de ϕ por las posiciones de los rompeolas

En esta sección, el cambio del valor de ϕ se estudia teniendo en cuenta los conceptos que se han mencionado en las secciones 5.3 y 5.4.

5.5.1 caso de $0 \leq \alpha_\beta \leq \pi$.

5.5.1.1 caso de $\beta < \alpha_\beta$.

Existen varios casos para la posición de dos rompeolas. Primero se tomará en cuenta, el caso en que $\beta < \alpha_\beta$, como se muestra en la figura 5.4. En esta situación, la reflexión ocurre en los siguientes casos:

- 1) Caso de $\alpha_\beta < \alpha < \pi$: La reflexión ocurre en el ROMPEOLAS I. (es la región (1) mostrada en la fig. 5.7).
- 2) Caso de $\pi + \beta < \alpha < \pi + \alpha_\beta$: La reflexión ocurre en el ROMPEOLAS II. (es la región (2) mostrada en la fig. 5.7).

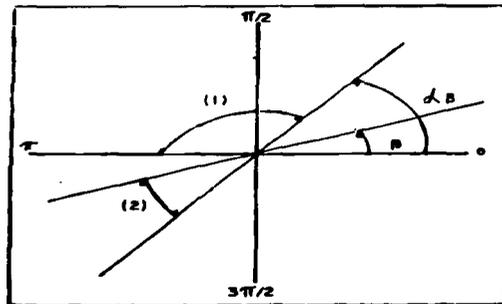


FIG.-5.7 RANGOS DE α EN QUE SE PRESENTA LA REFLEXIÓN

Entonces; se considera la variación del valor de ϕ cuando α cambia desde 0 a 2π , tomando en cuenta los siguientes casos:

1) caso de $\alpha \leq \beta$.

Este caso se muestra en la figura 5.8.

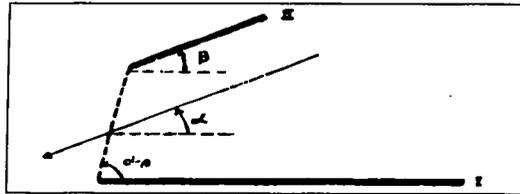


FIG.-5.8 EL CASO DE $\alpha \leq \beta$

Para este caso, no es necesario considerar la ola que se observa en la fig 5.8, ya que, por lo general los oleajes inciden desde el exterior del puerto.

2) caso de $\beta \leq \alpha \leq \alpha\beta$.

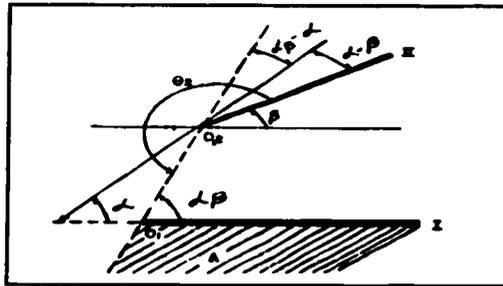


FIG.- 5.9 EL CASO DE $\beta \leq \alpha \leq \alpha\beta$

como se observa en la figura 5.9, el valor de ϕ de toda el área excepto el área A, se puede expresar solo por el valor de ϕ_2 .

En el área A la ola dispersada al punto O₂, del oleaje incidente, se dispersa desde el punto O₁.

Si el valor de ϕ de la ola que incide al punto O₁ con la dirección α_β , se define por ϕ_{01} . Este se puede obtener de la ecuación (5.24) con el siguiente cambio:

$$\begin{aligned} \left[C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right] &= 0 & ; & & \left[C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right] &= 0 \\ \left[S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} \right] &= 0 & ; & & \left[S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} \right] &= 0 & \quad \text{(Ecuación. 5.30)} \\ r_2 &= \overline{O_1 O_2} \\ \theta_2 &= (\alpha_\beta - \alpha) + (\alpha - \beta) + \pi = \alpha_\beta - \beta + \pi \end{aligned}$$

Considerando que esta ola incide en el ROMPEOLAS I con la dirección α_β , el valor de ϕ del área A se puede obtener multiplicando el valor de ϕ_{01} a ϕ de la ecuación (5.24) con el cambio siguiente:

$$\begin{aligned} C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} &= C(\gamma_{11}) + \frac{1}{2} \\ S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} &= S(\gamma_{11}) + \frac{1}{2} \\ C(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} &= 0 & ; & & S(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} &= 0 & \quad \text{(Ecuación. 5.31)} \\ C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} &= 0 & ; & & S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} &= 0 \\ \alpha &= \alpha_\beta \end{aligned}$$

3) caso de $\alpha_\beta < \alpha \leq \pi/2$.



FIG.-5.10 EL CASO DE $\alpha_\beta < \alpha \leq \pi/2$

El área A mostrada en la figura 5.10, no tiene la ola reflejada por el ROMPEOLAS I. Por eso; el valor de ϕ para el área A se puede expresar con el valor de $\phi(r, \theta)$, de la ecuación (5.24), con el siguiente cambio:

$$C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} = C(\gamma_{12}) - \frac{1}{2}$$

$$S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} = S(\gamma_{12}) - \frac{1}{2}$$

(Ecuación. 5.32)

4) caso de $\pi/2 < \alpha < \pi$.

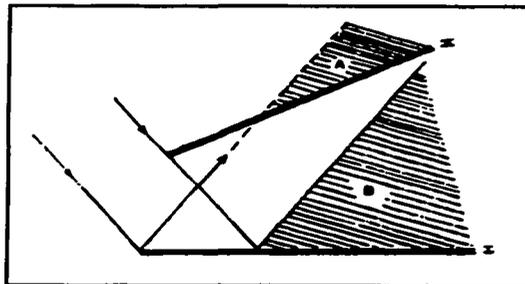


FIG.- 5.11 EL CASO DE $\pi/2 < \alpha < \pi$

En las áreas A y B, mostradas en la figura 5.11, no hay oleaje reflejado por el ROMPEOLAS I. Por lo tanto; el valor de ϕ , en esas áreas, se calcula con el mismo cambio realizado en el caso 3.

5) caso de $\pi < \alpha < (\pi + \beta)$.

No ocurre ninguna reflexión. Por lo que el valor de $\phi(r, \theta)$, de la ecuación (5.24), puede usarse sin ningún cambio.

6) caso de $(\pi + \beta) < \alpha < (\pi + \alpha\beta)$.

Este caso se muestra en la figura 5.12.

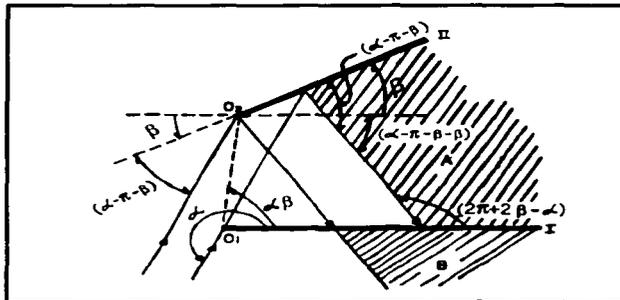


FIG.- 5.12 EL CASO DE $(\pi + \beta) < \alpha < (\pi + \alpha\beta)$

El valor de ϕ , en las áreas A y B, se debe calcular de $\phi(r, \theta)$ de la ecuación (5.24), con el siguiente cambio:

$$C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = C(\gamma_{22}) - \frac{1}{2}$$

(Ecuación. 5.33)

$$S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = S(\gamma_{22}) - \frac{1}{2}$$

También ; $\phi(r, \theta)$, de la ecuación (5.29), se usa para las áreas A y B, por que las figuras 5.6 y 5.12 son iguales.

7) caso de $(\pi + \alpha\beta) < \alpha < 2\pi$.

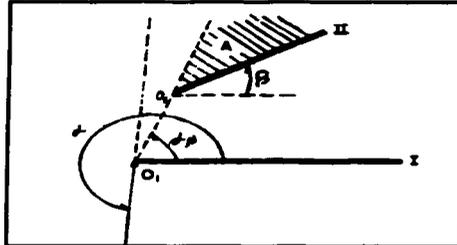


FIG.- 5.13 EL CASO DE $(\pi + \alpha\beta) < \alpha < 2\pi$

Toda el área, excepto el área A, puede calcularse según $\phi(r, \theta)$, de la ecuación (5.24), con el siguiente cambio:

$$C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} = C(\gamma_{11}) + \frac{1}{2}$$

$$S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} = S(\gamma_{11}) + \frac{1}{2}$$

$$C(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} = 0 ; S(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} = 0$$

$$C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = 0 ; S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = 0$$

(Ecuación. 5.34)

En cuanto al área A, igualmente que el caso 2), la ola dispersada al punto O_1 , de la ola incidente, se dispersa al punto O_2 .

Si el valor de ϕ , de la ola que incide al punto O_2 se define por ϕ_{O_2} . Este se puede calcular de la ecuación (5.24) con el siguiente cambio:

$$C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} = C(\gamma_{11}) + \frac{1}{2}$$

$$S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} = S(\gamma_{11}) + \frac{1}{2}$$

$$C(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} = 0 ; S(\gamma_{21}) + \frac{1}{2} = 0$$

$$C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = 0 ; S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = 0$$

$$\theta_1 = \alpha\beta ; r_1 = \overline{O_1 O_2}$$

(Ecuación. 5.35)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Además el valor de ϕ , del área A, se puede obtener multiplicando el valor de ϕ_{02} a ϕ de la ecuación (5.24), con el cambio siguiente:

$$\begin{aligned}
 C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} &= 0 & ; & & S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} &= 0 \\
 C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} &= 0 & ; & & S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} &= 0 \\
 \alpha &= \alpha_{\beta} + \pi
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación. 5.36}$$

5.5.1.2 Caso de $\beta > \alpha_{\beta}$.

En esta sección se toma en cuenta el caso de $\beta > \alpha_{\beta}$.

8) Caso de $\alpha < \beta$.

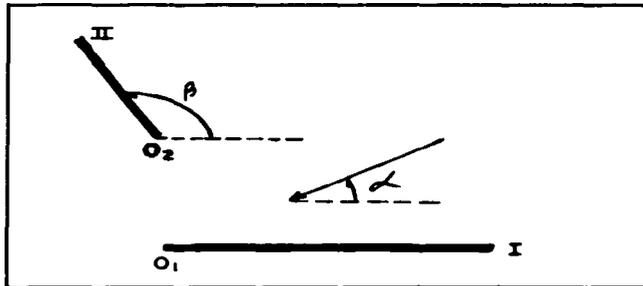


FIG.- 5.14 EL CASO DE $\alpha < \beta$

Para este caso, no se necesita considerar esa dirección de ola, como se observa en la figura 5.14.

8') Caso de $\beta < \alpha < \pi/2$ y $\beta < \pi/2$.

Este caso es igual al que se presenta en la figura 5.10

9) Caso de $\pi/2 < \beta < \alpha < \pi$.

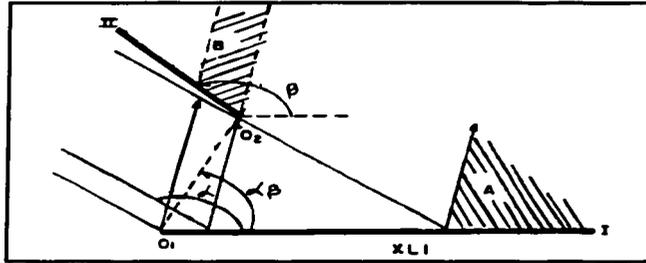


FIG.- 5.15 EL CASO DE $\pi/2 < \beta < \alpha < \pi$

En este caso, la ola se refleja sobre el ROMPEOLAS I, en la figura 5.15, se observa que las áreas A y B no tienen oleaje reflejado por el ROMPEOLAS I. Por eso ; el valor de $\phi(r, \theta)$, para esas áreas , de la ecuación (5.24) , debe cambiarse como sigue:

$$C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} = C(\gamma_{12}) - \frac{1}{2} \quad \text{(Ecuación. 5.37)}$$

$$S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} = S(\gamma_{12}) - \frac{1}{2}$$

Pero, cuando el oleaje reflejado por el ROMPEOLAS I desde el punto O_1 , no se cruza con el ROMPEOLAS II, no existe el área B.

9*) Caso de $\pi < \alpha < (\alpha + \beta)$.

El valor de $\phi(r, \theta)$, de la ecuación (5.24), se utiliza para toda el área.

10) Caso de $[\pi \leq \alpha < (\beta + \pi)]$.

Este caso se muestra en la figura 5.16.

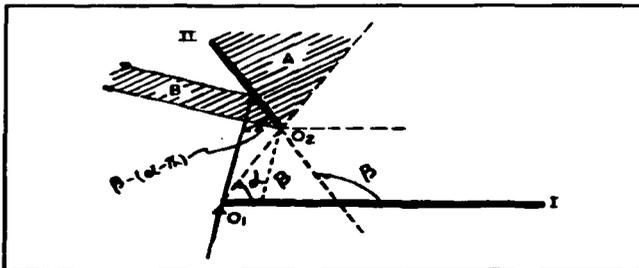


FIG.- 5.16 CASO DE $[\pi \leq \alpha < (\beta + \pi)]$ con $[\alpha\beta < (\alpha - \pi)]$

Cuando $[\alpha\beta \geq (\alpha - \pi)]$, el valor de $\phi(r, \theta)$ de la ecuación (5.24) se puede usar sin ningún cambio.

Cuando $[\alpha\beta < (\alpha - \pi)]$, la ecuación (5.24), para el área B, necesita el siguiente cambio:

$$C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = C(\gamma_{22}) - \frac{1}{2}$$

$$S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = S(\gamma_{22}) - \frac{1}{2} \quad \text{(Ecuación. 5.38)}$$

El área A necesita el mismo cálculo que el que se utilizó para el área A de la figura 5.13.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

11) Caso de $(\beta + \pi) \leq \alpha < 2\pi$.

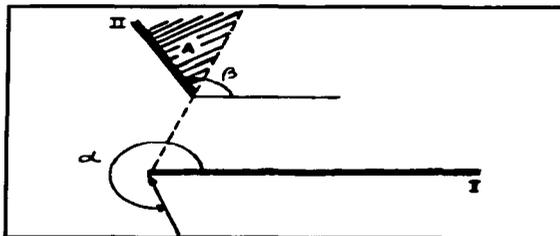


FIG.-5.17 EL CASO DE $(\beta + \pi) \leq \alpha < 2\pi$

El área A de la figura 5.17, necesita el mismo cálculo que se realizó para el área A de la figura 5.16.

5.5.2 Caso de $\alpha > \pi$.

En este caso se observa lo siguiente:

1) Caso de $\alpha \leq \beta$.

No se necesita tomar en cuenta este caso, porque no existe ese oleaje incidente.

2) Caso de $\beta < \alpha < \pi$.

Este caso se muestra en la figura 5.18.

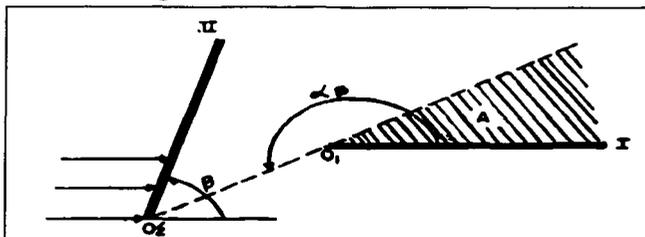


FIG.- 5.18 CASO CUANDO $\beta < \alpha < \pi$

Para el área A, se tiene en cuenta la ola dispersada desde el punto O_1 , de la ola dispersada en el punto O_2 . Para otra área, la ecuación (5.24) se usa con el siguiente cambio:

$$\begin{aligned} C(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} = 0 & ; S(\gamma_{11}) - \frac{1}{2} = 0 \\ C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} = 0 & ; S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} = 0 \end{aligned} \quad \text{(Ecuación. 5.39)}$$

3) Caso de $\pi < \alpha \leq \alpha\beta$.

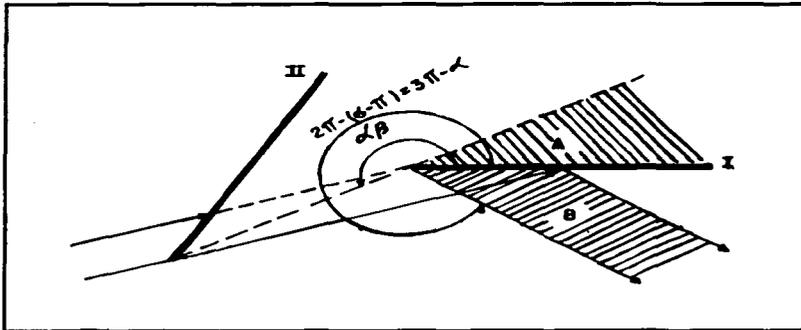


FIG.-5.19 CASO CUANDO $\pi < \alpha \leq \alpha\beta$

El área A, se calcula del mismo modo que el área A de la figura 5.18.

Para el área B, se utiliza la ecuación (5.24) con el siguiente cambio:

$$\begin{aligned} C(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} = C(\gamma_{12}) - \frac{1}{2} \\ S(\gamma_{12}) + \frac{1}{2} = S(\gamma_{12}) - \frac{1}{2} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación. 5.40)}$$

4) Caso de $\alpha\beta < \alpha \leq (\beta + \pi)$.

Se puede usar la ecuación (5.24) para toda el área.

5) Caso de $(\beta + \pi) < \alpha \leq 2\pi$.

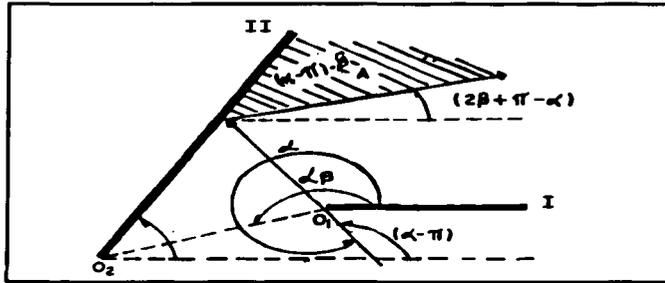


FIG.-5.20 CASO CUANDO $(\beta + \pi) < \alpha \leq 2\pi$

Para el área A, se utiliza la ecuación (5.24), con el siguiente cambio:

$$C(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = C(\gamma_{22}) - \frac{1}{2}$$

$$S(\gamma_{22}) + \frac{1}{2} = S(\gamma_{22}) - \frac{1}{2}$$

(Ecuación. 5.41)

Para toda el área se puede usar la ecuación (5.24), excepto el área A.

5.6 Reflexión del oleaje originada por muros y el paso de oleajes dentro de una dársena secundaria.

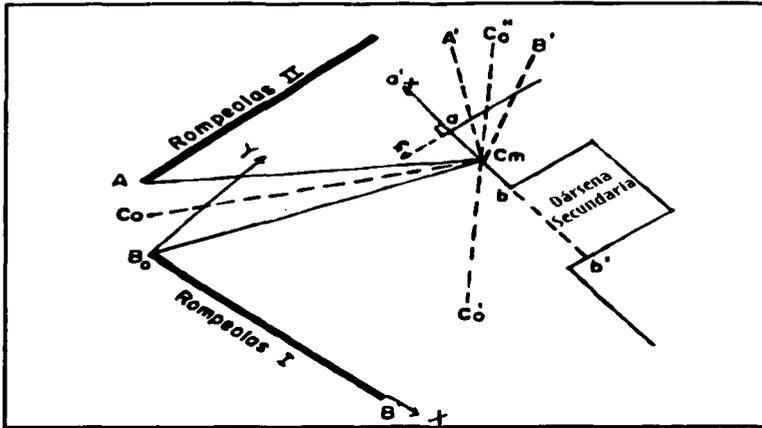


FIG.-5.21 REFLEXIÓN DEL OLAJE

Los oleajes que penetran desde la boca del puerto, se reflejan sobre el muro o pasan dentro de una dársena secundaria, como se muestra en la figura 5.21. En esa figura; el oleaje que penetra en la dirección de $(Co-Cm)$, se refleja en la dirección $(Cm-Co')$ por el muelle (a-b). Donde: Co y Cm , son el centro de la boca (A-B) y el centro del muro (ab), respectivamente.

Para calcular ese oleaje reflejado; se imaginan dos rompeolas, $(a'-a)$ y $(b'-b)$, y se supone que el oleaje de $(Co''-Co')$ pasa entre a y b. El rango de la dirección del oleaje, existe entre $(A'-Cm)$ y $(B'-Cm)$.

Donde: $(\angle a'Cm A')$ es igual a $(\angle a'Cm A)$ y $(\angle B'Cm a')$ es igual a $(\angle B_0 Cm a')$.

El cálculo se realiza solamente en la sección que parte desde $(a'-b')$ hacia la boca del puerto. En este caso; los coeficientes de reflexión de $(a'-a)$ y $(b - b')$, se toman como cero y las coordenadas, para el cálculo, tienen al eje x sobre $(a-a')$ y al eje y hacia la boca del puerto, como se indica en la figura 5.21.

Por lo tanto; si (a-b) es paralelo con B-B₀, que corresponde al eje X de las coordenadas principales, el eje x tiene un ángulo de 180° con respecto a ese eje.

En el cálculo; la altura del oleaje reflejado que pasa entre (a-b), se toman como el promedio del oleaje incidente sobre (a-b) multiplicado por el coeficiente de reflexión de (a-b).

La figura 5.22 muestra el rango de la dirección del oleaje, que pasa por la boca de la dársena, y éste se toma entre (A-C_d) y (B-C_d). La dirección principal del oleaje es (C₀- C_d); Donde: C₀ y C_d son el centro de la boca del puerto y de la dársena, respectivamente.

Para el cálculo en la dársena ; (b-b') se supone como el ROMPEOLAS I y (a-a') como el ROMPEOLAS II. En este caso, el eje x tiene un ángulo de 45° con respecto al eje X , de las coordenadas principales.

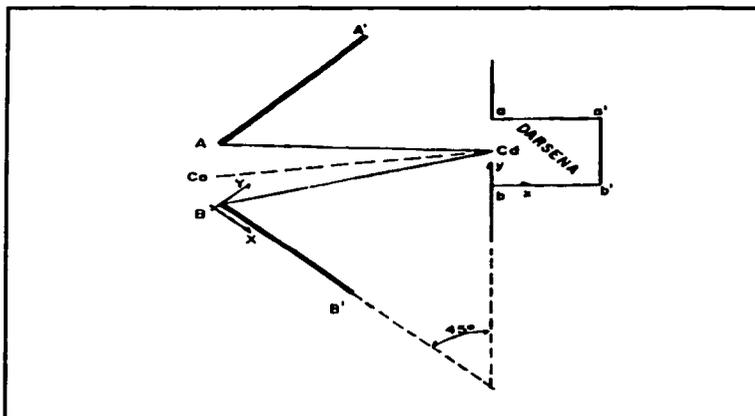


FIG.-5.22 DIRECCIÓN DEL OLAJE QUE PASA POR LA BOCA DE UNA DÁRSENA

5.7 cálculo de la altura del oleaje en el área dentro del puerto

5.7.1 Teoría

La altura de la ola significativa del oleaje incidente, $(H_{1/3})$, se puede expresar como sigue:

$$H_{1/3} = 4 \sqrt{\sum_{n,m} S(f_n, \alpha_m) \delta f_n \delta \alpha_m} \quad (\text{Ecuación. 5.42})$$

La altura de la ola significativa, $[(H_{1/3})_d]$ de un punto (X,Y) , dentro del puerto, se expresa como sigue:

$$(H_{1/3})_d = 4 \sqrt{\sum_{n,m} S_d(f_n, \alpha_m) |\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)|^2 \delta f_n \delta \alpha_m} \quad (\text{Ecuación. 5.43})$$

Por lo tanto; el coeficiente de difracción K_d , en el punto (X,Y) , es:

$$K_d = \frac{(H_{1/3})_d}{H_{1/3}} = \sqrt{\frac{\sum_{n,m} S_d(f_n, \alpha_m) |\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)|^2 \delta f_n \delta \alpha_m}{\sum_{n,m} S(f_n, \alpha_m) \delta f_n \delta \alpha_m}} \quad (\text{Ecuación. 5.44})$$

Utilizando el espectro direccional, definido por Mitsuyasu, y expresado como sigue:

$$S_d(f_n, \alpha_m) = S_d(f_n) * G(f_n, \alpha_m) \quad (\text{Ecuación. 5.45})$$

$$\sum_{n,m} S_d(f_n, \alpha_m) \delta f_n \delta \alpha_m = \sum_n S_d(f_n) \delta f_n = S_o$$

Si; $S_d(f_n) \delta f_n = S_0/N$,

Donde: N es el número de f. Entonces, la ecuación (5.44) cambia como sigue:

$$\begin{aligned} K_d &= \sqrt{\frac{\sum_{n,m} S_d(f_n) \delta f_n G(f_n, \alpha_m) \delta \alpha_m |\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)|^2}{S_0}} \\ &= \sqrt{\frac{\sum_{n,m} S_0/N G(f_n, \alpha_m) \delta \alpha_m |\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)|^2}{S_0}} \\ &= \sqrt{\sum_{n,m} \frac{1}{N} G(f_n, \alpha_m) \delta \alpha_m |\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)|^2} \end{aligned}$$

Por lo anterior:

$$\begin{aligned} (H_{1/3})_d &= H_{1/3} \sqrt{\sum_{n,m} \frac{1}{N} G(f_n, \alpha_m) \delta \alpha_m |\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)|^2} \\ &= \sqrt{\sum_{n,m} (H_{1/3})^2 \frac{1}{N} G(f_n, \alpha_m) \delta \alpha_m |\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)|^2} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación. 5.46)}$$

Utilizando el espectro direccional de Mitsuyasu:

$$G(f_n, \alpha_m) = G_0 \cos^2 \theta_m \quad \text{(Ecuación. 5.47)}$$

Donde:

$$G_0 = \left[\sum_m \cos^2 \theta_m \Delta \theta_m \right]^{-1} \quad \text{(Ecuación. 5.48)}$$

$$s = \begin{cases} S_{máx} (f/f_p)^5 & ; f \leq f_p \\ S_{máx} (f/f_p)^{-1.5} & ; f \geq f_p \end{cases} \quad \text{(Ecuación. 5.49)}$$

θ_m = Desviación de cada componente α_m , desde la dirección principal del oleaje.

Por lo tanto; si $\delta\alpha_1 = \delta\alpha_2 = \delta\alpha_3 = \dots = \delta\alpha_M = \Delta\theta$, como se indica en la figura 5.23.

$$(H_{1/3})_d = \sqrt{\sum_{n,m} (H_{1/3})^2 \frac{1}{N} \frac{\cos^{2s}(\frac{\theta_m}{2}) \Delta\theta}{\sum_n (\frac{\cos\theta_m}{2})^{2s} \Delta\theta} |\Phi(X, Y, f_n, \alpha_m)|^2} \quad (\text{Ecuación. 5.50})$$

$$= \sqrt{\sum_{n,m} \left[H_{1/3} \left(\frac{1}{N} \frac{(\cos \frac{\theta_m}{2})^{2s}}{\sum_n (\cos \frac{\theta_m}{2})^{2s}} \right)^{1/2} \Phi(X, Y, f_n, \alpha_m) \right]^2}$$

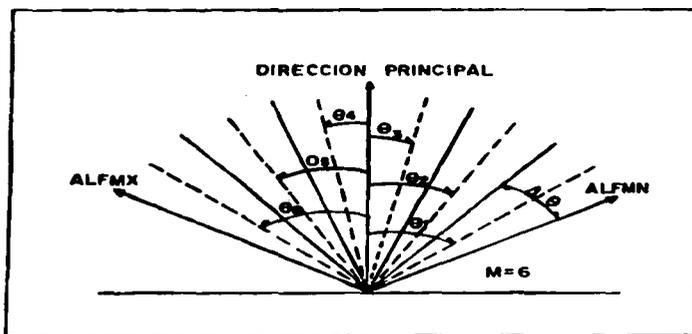


FIG.- 5.23 DESVIACIÓN DE CADA COMPONENTE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.7.2 Método de cálculo

El cálculo de $[(H_{1/3})_d]$, en cualquier punto (X,Y), según la ecuación (5.50), se hace como sigue:

- a) El espectro frecuencial se divide en N partes. Como cada parte tiene el mismo espectro, es decir; $S_d(f_n) = S_d/N$, en tales circunstancias, $H_{1/3}$ del oleaje incidente, se descompone en las componentes de oleaje regular, que son:

$$\begin{aligned}
 H_n &= \sqrt{8 S_d(f)} = \sqrt{8 \frac{S_d}{N}} = \sqrt{\frac{8}{N} * (H_{1/3}^2/16)} \\
 &= \frac{H_{1/3}}{\sqrt{2 N}}
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación. 5.51}$$

$$f_n = [b/\ln(2N/(2n-1))]^{1/4}$$

Donde:

$$a = 0.257 H_{1/3}^2 * T_{1/3}^{-4} \text{ y } b = 1.03 T_{1/3}^{-4}$$

- b) El rango de "α" se divide en "M" partes. Como cada valor de $\delta\alpha_m (= \Delta\alpha)$ es igual, y el rango de "α" variará según el valor de $S_{m\max}$, como se indica en la figura 5.24.

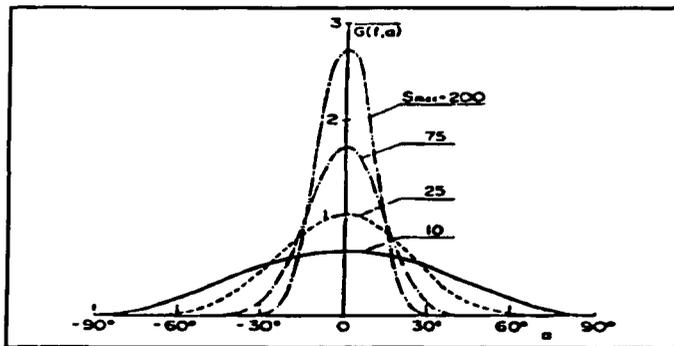


FIG.- 5.24 RANGO DE α SEGÚN $S_{m\max}$

Cuando; $S_{\text{máx}} = \infty$, corresponde al caso de oleaje regular.

El rango de la dirección, donde más del 90 % de la energía se incluye, es como sigue:

- 60° < α < 60° para $S_{\text{máx}} = 10$
- 30° < α < 30° para $S_{\text{máx}} = 75$
- 15° < α < 15° para $S_{\text{máx}} = 200$

- c) Por lo anterior, el oleaje incidente se divide en el número de $N \times M$ de componentes del oleaje regular.
- d) El valor de $f_n(n=1, \dots, N)$, se calcula con la ecuación (5.51).
- e) El valor de $\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)$, se calcula en el punto (X, Y) para: $m= 1, 2, \dots, M$ con $n=1$, según lo mencionado en la sección 2.
- f) Los valores de $\left(\cos\left(\frac{\theta_n}{2}\right)\right)^{2n}$ y $\sum \left(\cos\left(\frac{\theta_n}{2}\right)\right)^{2n}$, se calculan para; $m=1, 2, \dots, M$ con $n=1$.
- g) El valor de $\phi(X, Y, f_n, \alpha_m)$, se calcula en el punto (X, Y) para: $m= 1, 2, \dots, M$, creciendo el valor de n hasta N .
- h) Los valores de $\left(\cos\left(\frac{\theta_n}{2}\right)\right)^{2n}$ y $\sum \left(\cos\left(\frac{\theta_n}{2}\right)\right)^{2n}$, se calculan para; $m=1, 2, \dots, M$, creciendo el valor de n hasta N .
- i) El valor de $(H_{1/3})_d$, en el punto (X, Y) , se calcula según la ecuación (5.50)

NOTA: En general, se toman valores de 3 a 5 para N y de 6 a 15 para M .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.8 Estructura del programa

El programa consiste de ocho subrutinas, además del programa principal, las cuales se explican a continuación:

1) Programa principal (AGITACU).

En este programa, se dan las siguientes condiciones:

- a) Características del oleaje irregular.
- b) Forma y colocación de los rompeolas y los muelles.
- c) Los puntos donde se calculan los coeficientes de difracción del oleaje.
- d) Otras condiciones de cálculo.

Después se calculan los coeficientes de difracción del oleaje, incluyendo el efecto de reflexión solo una vez. Al final se imprimen los valores de los coeficientes de difracción para cada punto.

2) Subrutina SEDIF2IR.

Con esta subrutina, se calculan los coeficientes de difracción para cada punto de coordenadas (X,Y).

3) Subrutina LLAMA.

Los valores de $C(\gamma)$ $S(\gamma)$, de las ecuaciones (5.6) y (5.7), se calculan utilizando la subrutina CALFRE para cualquier valor de γ .

4) Subrutina CALFRE.

Los valores de $C(\gamma)$ $S(\gamma)$, se calculan a intervalos de 0.01 en γ .

5) Subrutina ESPEC.

Los valores de la frecuencia y de la dirección, de cada componente de oleaje irregular, se calculan. También, se calculan los valores de la función distribuida de la dirección, para cada dirección de la componente.

6) Subrutina ANGULO (X, Y, HHH).

El ángulo θ , para cada punto de coordenadas (X,Y), en la figura 5.1, se calcula como HHH.

7) Subrutina WAVE (D,X).

El valor X, d $\frac{2\pi h}{L}$, se calcula para $D = \frac{h \sigma^2}{g} = \frac{2\pi h}{L_0}$

8) Subrutina SEMIDIF2 (X, Y,....,CKD, CKDI, CKDR).

Se calculan los coeficientes de difracción para cada una componente del oleaje, en el punto (X,Y). Estos coeficientes son los siguientes:

- CKDI** = Coeficiente de difracción del oleaje incidente.
- CKDR** = Coeficiente de difracción del oleaje reflejado.
- CKD** = La suma de los coeficientes de difracción del oleaje.

9) Subrutina SELEC (X,Y,....,IPR).

La selección de IPR, que es el cambio del valor de ϕ explicado en la sección 5.5, para el punto (X,Y), se hace como sigue:

- IPR. = 1** : Se elimina el oleaje reflejado por el rompeolas I
- = 2** : Se elimina el oleaje reflejado por el rompeolas II.
- = 3** : No se necesita el cálculo.
- = 4** : Existe difracción por el rompeolas II del oleaje difractado por el rompeolas I.

- = 5** : Existe difracción por el rompeolas I del oleaje difractado por el rompeolas II.
- = 11** : Se elimina el oleaje del rompeolas I.
- = 22** : Se elimina el oleaje del rompeolas II.
- = 12 ó 21** : Se utiliza el valor de ϕ , de la ecuación (5.24).

10) Subrutina INTAS (X1,Y1,T1,X2,Y2,T2,XX,YY).

Se calculan las coordenadas (XX,YY), del punto donde se intersectan dos líneas rectas.

11) Subrutina TRANS (X,Y,X03,Y03,ALF03).

Las coordenadas anteriores de (X,Y), se cambian a las nuevas coordenadas de (x,y). Que tienen las coordenadas originales de (X03,Y03).

La figura 5.25 es el diagrama de flujo del programa principal.

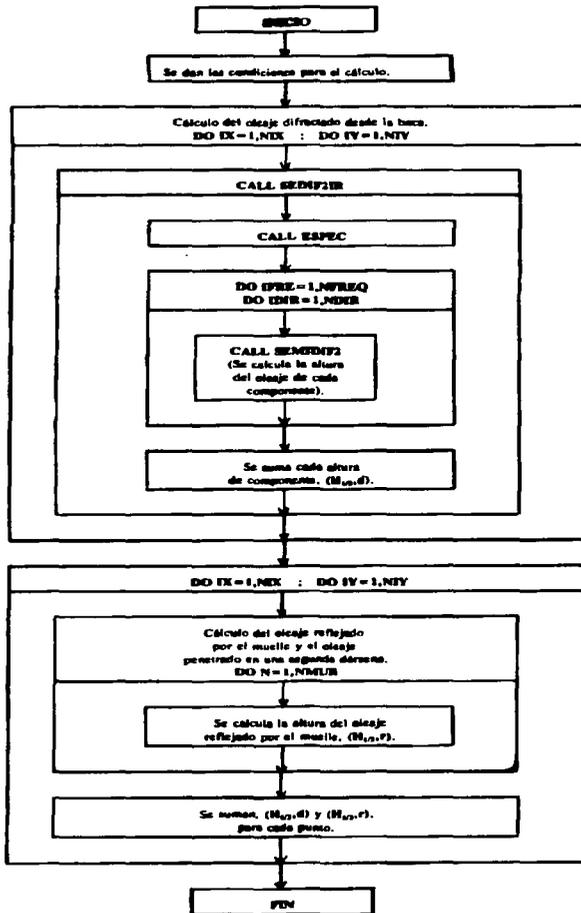


FIG.- 5.25 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PRINCIPAL

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE CUBEN

CAPÍTULO

6

CONCLUSIONES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

6. CONCLUSIONES

Del presente trabajo, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El oleaje sufre considerables cambios en sus características (altura, dirección, período, etc.) durante su generación. Por lo que, esas características ya no son iguales al llegar el oleaje a la costa. Dichos cambios en las características del oleaje, se les conoce como deformaciones del oleaje.

El estudio de las deformaciones del oleaje es muy útil en el diseño de las instalaciones de un puerto, ya que, en el diseño se requiere información específica del sitio de estudio.

Se puede inferir, el efecto que se tendrá en las estructuras del puerto, con ayuda de las gráficas que presentan las diversas formas en que se presenta el fenómeno de la difracción, ya sea en un rompeolas semi-infinito o cuando se tienen dos rompeolas.

El efecto de reflexión dentro del puerto afecta las operaciones de carga y descarga de las embarcaciones. La magnitud de la reflexión del oleaje, depende del material y la inclinación de las paredes.

La utilización de modelos matemáticos, para simular y analizar las deformaciones del oleaje, son una ayuda muy valiosa, ya que el uso de éstos baja el costo y tiempo que se pudiera tener en el análisis de éstos fenómenos.

A pesar de que se ha realizado, una investigación descriptiva de las deformaciones del oleaje, como el reconocer el comportamiento de cada uno de los fenómenos presentados, se debe tomar en cuenta que existen muchos factores que pueden modificar los resultados de la investigación; por lo tanto, es recomendable comparar los resultados obtenidos numéricamente con datos obtenidos en laboratorio, para así tener un mejor resultado y más confiable en cuanto a la realidad.

Este trabajo da la oportunidad de seguir investigando los fenómenos de la deformación del oleaje, porque al ser tan amplio el tema no es posible abarcarlo en una sola edición.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se puede concluir que los resultados obtenidos en este trabajo fueron buenos, ya que, el sólo hecho de haber planteado al inicio del trabajo el objetivo de conocer las deformaciones del oleaje y el presentar lo que conlleva un modelo matemático, nos llevo a investigar a fondo el proceso de cada una de las deformaciones. Sin embargo, espero que este trabajo sea de gran ayuda para toda persona que desee saber el comportamiento de los fenómenos del oleaje; así como de ser participes en un trabajo que puede ser la base de investigaciones futuras y que pueda ser de mucha ayuda.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

Para la elaboración de este trabajo, se consultaron los siguientes libros:

Asociación del puerto de Japón: Manual del diseño de las estructuras portuarias.

Dr. Shoji Sato y Dr. Yoshimi Goda: Harbours and Coast, 1982, Shokokusha.

Yoshimi Goda: Random Seas and Design of Marine Structures, University of Tokio Press, 1985.

Kiyoshi Horikawa: COAST ENGINEERING-An introduction to Ocean ENGINEERING, University of Tokio Press, 1978.

Takayama Tomotsuka: Wave Diffraction and Wave Height Distribution inside a Harbor, Technical note of The Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport, Japan, No. 367, Mar. 1981.

Goda Yoshimi: Random Seas and Design of Marine Structures, University of Tokio Press, Japan, 1985.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN