



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
“ARAGON”

**TIPOS DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE
ESTRUCTURAS HIDRAULICO PORTUARIAS**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

EDGAR ANTONIO MORENO VELAZQUEZ

ASESOR: ING. VALENTE TORRES ORTIZ

SAN JUAN DE ARAGON, EDO DE MEXICO

2010





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

MI AGRADECIMIENTO:

AL ING. VALENTE TORRES ORTIZ,
POR BRINDARME SU APOYO PARA PODER REALIZAR ESTE TRABAJO.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO,
POR ABRIRME LAS PUERTAS Y DARME LOS CONOCIMIENTOS NECESARIOS
PARA SER UN ELEMENTO DE PROVECHO PARA LA SOCIEDAD.

A MI MADRE,
GRACIAS POR DARME TODO TU AMOR, CARIÑO Y APOYO INCONDICIONAL EN
TODOS LOS ASPECTOS. NO TENGO PALABRAS PARA AGRADECERTE TODO
LO QUE HAS HECHO POR MI. TU SABIAS QUE ALGUN DIA LO LOGRARIA.

A MI HERMANO,
GRACIAS POR TU APOYO Y POR AGUANTAR MI MAL HUMOR.

A MI FAMILIA,
GRACIAS A TODOS Y A CADA UNO DE USTEDES QUE CREYERON EN MI
DANDOME SU APOYO PARA PODER LOGRARLO.

A MI PADRE,
GRACIAS POR TU APOYO QUE DIRECTA O INDIRECTAMENTE SIEMPRE HA
ESTADO PRESENTE.

A MIS AMIGOS,
GRACIAS A TODOS POR DARME SU AMISTAD, SU APOYO Y POR COMPARTIR
CONMIGO SUS ALEGRIAS.

TIPOS DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS HIDRAULICO PORTUARIAS

INDICE

INTRODUCCION		1
CAPITULO 1	OLEAJE GENERAL	3
1	CONCEPTO DE OLEAJE EN EL DISEÑO	3
2	DEFINICION DEL OLEAJE	9
3	CARACTERISTICAS DE OLEAJE	10
CAPITULO 2	OLEAJE DE DISEÑO	30
1	OLEAJE DE DISEÑO EN AGUAS PROFUNDAS	30
2	PROCEDIMIENTO PARA DECIDIR EL OLEAJE DE DISEÑO	33
CAPITULO 3	DEFORMACION DE OLEAJE	34
1	GENERALIDADES	34
2	REFRACCION DEL OLEAJE	34
3	DIFRACCION DEL OLEAJE	48
4	REFLEXION DEL OLEAJE	82
5	DEFORMACION DEL OLEAJE POR EFECTO DEL FONDO	91
6	ROMPIENTE DE LA OLA	94
7	DISMINUCION DE LA ALTURA DE OLA POR LA FRICCION DEL FONDO	105

CAPITULO 4	ALCANCE, OVERTOPPING Y TRANSMISION DE OLAJE	112
1	ALCANCE (RELAMIDO) DE OLAJE	112
2	OVERTOPPING DE OLAJE	119
3	ALTURA DE OLA TRANSMITIDA DENTRO DEL PUERTO	126
CAPITULO 5	OLAJE EN EL PUERTO	130
1	TRANQUILIDAD EN EL PUERTO	130
2	PROCEDIMIENTO DE LA ESTIMACION DEL OLAJE EN EL PUERTO	131
CONCLUSIONES		135
BIBLIOGRAFIA		137

Introducción:

La ingeniería marítima se encarga del diseño y construcción de las estructuras de protección y operación de un puerto. Como ejemplos de ellas tenemos los rompeolas y los muros de muelle en puertos y astilleros, las paredes de los mares, los malecones, la protección en las playas, las plataformas marítimas de explotación petrolera, etc. Estas estructuras deben ser funcionales en un ambiente natural y estar sujetas a las hostilidades de los efectos de los vientos, oleaje, corrientes submarinas, maremotos y terremotos. Para asegurarse de su rendimiento, deben hacerse investigaciones profundas para conocer y comprender las condiciones ambientales a las que están sujetas. Estas investigaciones deben ser lo más exactas posibles para que su diseño sea lo más óptimo posible en las inclemencias del tiempo.

El oleaje es el fenómeno más importante que se debe considerar sobre las condiciones ambientales que afectan a las estructuras marítimas, porque ejerce la mayor influencia. La presencia de las olas hacen que el procedimiento para el cálculo de las estructuras marítimas sea diferente que el de las estructuras terrestres. Ya que, las olas son uno de los más complejos y cambiantes fenómenos de la naturaleza, no es sencillo tener un pleno conocimiento de sus características fundamentales y de su desarrollo.

Las olas tienen diferentes aspectos. Se forman cuando el viento sopla y se convierten en olas gigantes y complejas cuando hay tormentas, y desaparecen completamente después de que el viento deja de soplar. Estos cambios tan repentinos son tan solo uno de los aspectos de las olas. Un observador, en un bote en la playa reconoce fácilmente el patrón del oleaje que se compone de olas grandes y pequeñas que se mueven en muchas direcciones. Esta irregularidad de la ola es una característica importante, sin embargo tan pronto como llega a la playa este movimiento ondular se rompe en olas individuales dando la impresión de una repetición regular.

Esta generación de olas en la superficie del agua por el viento y su propagación han sido observadas a través de la historia. Sin embargo las fórmulas matemáticas de su movimiento fueron calculadas en el siglo XIX. En 1802, Gerstner, un matemático de Praga, República Checa, publicó la teoría trocoidal de las olas, para aguas profundas, y en 1844 Airy, en Inglaterra desarrolló una teoría de pequeñas amplitudes que cubre desde las aguas profundas hasta aguas poco profundas. Más adelante, en 1847, Stokes hace una teoría de amplitud finita en aguas profundas, que más tarde se extendería a aguas de profundidad intermedia. El resultado es conocido como la teoría "Stokes Wave". La existencia de una ola solitaria que tiene una cresta sencilla y que se propaga sin cambio de forma en aguas poco profundas fue reportada por Russell en 1844. Su descripción teórica fue atribuida a Boussinesq en 1871 y a Rayleigh en 1876. En 1895 Korteweg y de Vries derivaron una teoría de periodos permanentes de olas en amplitud finita en aguas poco profundas. Esta teoría es conocida como la teoría de olas cnoidal.

Así, las teorías fundamentales de las olas fueron establecidas en el siglo XIX. Sin embargo varias décadas pasaron antes de que los ingenieros civiles fueran capaces de hacer uso completo de estas teorías en aplicaciones de ingeniería.

Una excepción es la teoría de la presión estacionaria de las olas, derivada en 1928 por Sainflou, un ingeniero de Marsella, Francia. El trabajo de Sainflou atrajo la atención de los ingenieros portuarios después de su publicación; su fórmula de presión fue adoptada por muchas naciones para el diseño de rompeolas verticales. Debemos mencionar, sin embargo, que durante la segunda guerra mundial, la teoría matemática y la práctica de ingeniería fueron combinadas. Así fue como se formó la disciplina de ingeniero costero, que comenzó con el método de pronóstico introducido por Sverdrup y Munk; que más tarde se convirtió en el método sofisticado S-M-B, el cálculo de la difracción de las olas por un rompeolas desarrollado por Penny y Price, así como otros desarrollos.

A propósito de la fundación del presente método S-M-B, Sverdrup y Munk comprendieron claramente que el oleaje se compone de pequeñas y grandes olas. E introdujeron el concepto de oleaje significativo; la altura que es igual a la altura de un tercio de la ola más alta de un grupo de olas como representativa de un estado particular de mar. Por lo tanto el concepto significativo de las olas fue basado en el entendimiento de las olas como un proceso aleatorio. Sin embargo, la ola significativa fue expresada en términos de una sola ola en altura y periodo, generalmente no es comprendida por ingenieros para representar olas de una constante altura y periodo. La teoría monocromática de las olas y sus resultados experimentales se obtuvieron de un patrón regular de olas que fueron directamente aplicadas a problemas prototipos en un mar real, con la esperanza de que las olas regulares correspondieran exactamente como la ola típica.

A principios de 1952, un grupo de oceanógrafos americanos, comandados por Pierson, dieron el primer paso al reconocer que la irregularidad de las olas es una propiedad fundamental e incorporaron este hecho al proceso de diseño. El método P-N-J de pronóstico de oleaje, generalmente comparado con el método S-M-B, introdujo el concepto del espectro de oleaje; así como una herramienta básica que describe su irregularidad. La generación y desarrollo de olas de viento, la propagación de oleaje y los cambios de las olas cerca de la playa fueron explicados a detalle en el concepto del espectro. Aunque el concepto de espectro fue generalizado por los oceanógrafos, los ingenieros costeros en su mayoría lo consideraron muy complejo.

Con los avances de los estudios de las olas, sin embargo, los ingenieros se alertaron de la importancia de la irregularidad de las olas y de su relevancia en la ingeniería y sus aplicaciones. Ha sido demostrado muchas veces que el uso de patrones regulares de altura y periodo pueden dar resultados erróneos e inconsistentes en el análisis de la transformación de olas y sus efectos.

Así en esta tesis el concepto de aleatoriedad en las olas es tomado como fundamental en los procedimientos de diseños concernientes a las olas en el mar, también es presentado un sistema de procedimientos completos para el diseño de estructuras. Por lo que, su objetivo general es el de presentar los tipos de oleaje que se toman en cuenta para el diseño de las obras marítimas.

CAPITULO 1 OLEAJE GENERAL

Concepto de oleaje en el diseño

1.1 Oleaje en el diseño

El oleaje considerado para el diseño de las estructuras y para estimar la agitación en el atracadero se debe determinar basándose en los datos de oleaje actuales o los estimados estadísticamente y se debe determinar considerando la deformación del oleaje. El procedimiento para determinar el oleaje de diseño se presenta en la Fig.- 1.1

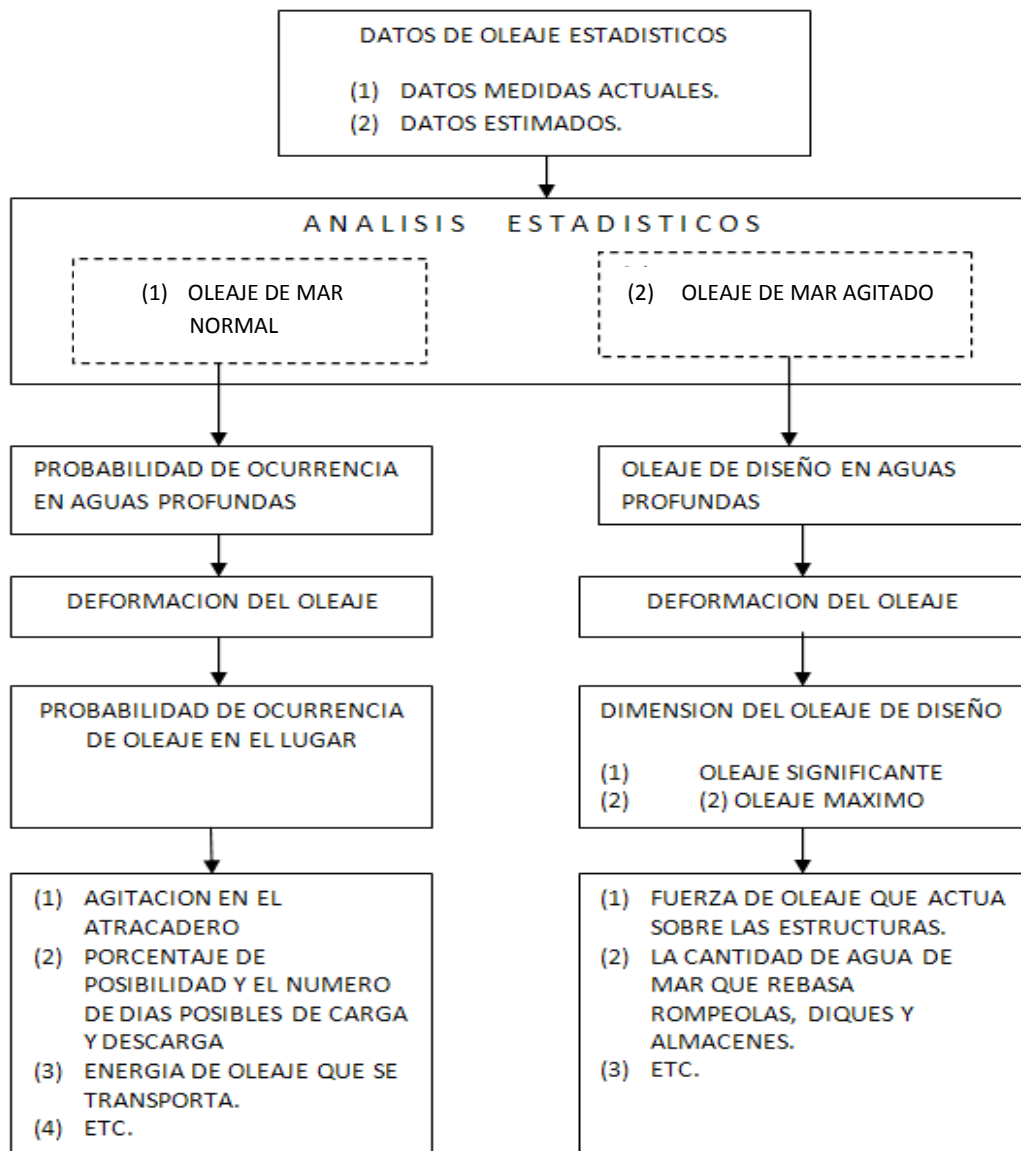


FIG.- 1.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL OLAJE DE DISEÑO

En esta figura, los datos de oleaje estimados son como los del mar agitado, los huracanes y los datos registrados en periodos largos. Las estadísticas del oleaje se deben analizar dividiéndolos en dos casos: del mar agitado y del mar normal utilizando métodos diferentes de análisis. El primer análisis es para el diseño de las estructuras y el segundo para estimar el número de días de menor agitación en el atracadero y el porcentaje de posibilidad de carga y descarga.

La deformación del oleaje significa transformar las condiciones de mar adentro de algún lugar en que se necesitan los datos del oleaje. Es decir, la deformación incluye la refracción, la difracción, la reflexión, el efecto del fondo y rompimiento del oleaje cuando se determina el oleaje de diseño basándose en el procedimiento presentado en la figura, se tiene que considerar la irregularidad del oleaje.

1.2 Irregularidad del oleaje

El oleaje actual en el mar es una continuación de las olas altas y bajas, largas y cortas. Hay dos procedimientos basándose en los diferentes conceptos para analizar las características de las olas irregulares, uno de los conceptos en cuestión es como sigue:

Primeramente se da una definición de altura y periodo para cada una de las olas y después se analizan las características de altura y periodo en el tren de oleaje basándose en la suposición de que el oleaje es la continuación de las olas que tiene muchas alturas que muchos periodos diferentes. El otro concepto se basa en que el oleaje actual en el mar es la acumulación de muchos oleajes regulares y los cuales tienen muchas alturas y muchos periodos diferentes. Las características del tren de oleaje se analizan basándose los resultados del análisis de oleaje regular individual.

(1) Método de Zero-Upcrossing

En este método la ola respectiva en el tren de oleaje regular está dado por el método de Zero-Upcrossing, el cual considera que el periodo de una ola se mide desde la hora que cruzan y del nivel medio del mar, elevándose la superficie del mar hasta la hora en que se presenta la misma condición, y la altura de una ola se define como la diferencia entre la altura máxima y la mínima de la superficie del mar en una ola que se acaba de determinar. Dicho método se explica en la Fig. 1.2.

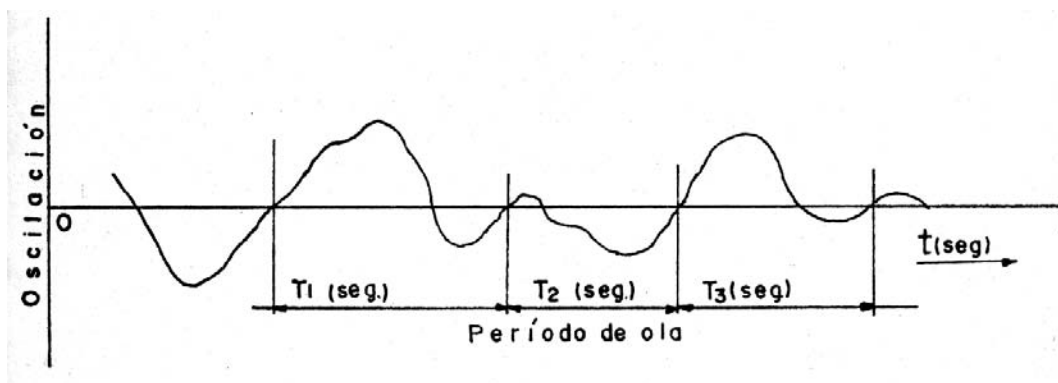


FIG.- 1.2 METODO DE ZERO - UPCROOSING

En un tren de oleaje irregular, la distribución de la probabilidad de ocurrencia de las alturas del oleaje se parece mucho a una distribución de Rayleig. La distribución de Rayleig generalmente se describe como una función de la altura de la ola respectiva. Generalmente se usa la altura máxima, la altura significativa y la altura media. La dirección de oleaje respectivo se determina como el oleaje dominante.

(2) Método del espectro de energía

En este segundo método el tren de oleaje se divide en los oleajes regulares que lo compone. La energía de los oleajes componentes se calcula dividiendo en periodos y direcciones, se puede trazar en una gráfica usando esta figura llamada distribución de energía de oleaje; se obtienen periodo, dirección dominante y proporción de los oleajes componentes.

La distribución de energía de la dirección del oleaje se llama espectro direccional y la del periodo se llama espectro secuencial o unidimensional. La distribución de energía, incluyendo las dos, se llama espectro bidimensional.

Este método es muy efectivo para analizar el oleaje regular en el mar. Sin embargo; éste método que se basa en la teoría lineal, no cubre todas las partes del fenómeno del oleaje en el mar. Por eso, el primer método también se tiene que aplicar a la teoría no lineal.

1.3 Método de cálculo del oleaje irregular

Existen cinco métodos para calcular el oleaje irregular

1) Método que utiliza solamente la ola significativa

En este método, la ola significativa representa el oleaje irregular. Varios valores del oleaje de diseño se calculan aplicando el periodo y la altura de la ola representativa en la teoría o en el resultado del experimento de oleaje regular. Este método se aplica de vez en cuando como un modo fácil que no presta atención a la irregularidad del oleaje.

2) Método que utiliza solamente la ola máxima.

La ola máxima representa el oleaje irregular en este método. Se aplica cuando el oleaje máximo es un factor importante en el diseño, es decir, se usa en caso de calcular la fuerza de oleaje que actúa en estructuras, tales como plataformas marinas.

3) Método de distribución de probabilidad.



En este método, las olas en un tren de oleaje irregular corresponden, cada una, a un oleaje regular. Los valores de diseño de oleaje irregular se calculan acumulando los resultados del oleaje regular tomando en consideración la probabilidad de ocurrencia del oleaje irregular. Este método se aplica a los fenómenos no lineales conocidos como la deformación y rompimiento del oleaje, por efecto del fondo y overtopping.

4) Método experimental usando modelo de oleaje irregular

Es una nueva técnica, aplicable al estudio de los fenómenos. Este método se usa para conocer los parámetros de diseño de dichos fenómenos.

5) Método de espectro de energía

Es un método en el que se usa el espectro de la energía del oleaje irregular. Se aplica frecuentemente al análisis cuando la dirección y la frecuencia del oleaje son factores importantes; o sea, el análisis del fenómeno lineal. También se aplica al deducir la ocurrencia del oleaje.

Estos métodos se tienen que aplicar conforme al fenómeno del oleaje. El proceso de cálculo de la deformación de oleaje y los métodos de cálculo se representan en la Fig.- 1.3. En estas figuras,  y  contienen el tipo de cálculo y el resultado respectivamente.

Los enunciados en la figura significa lo siguiente:

(2) : La disminución de la marejada indica el fenómeno cuando lo oleaje se propaga en aguas profundas alejándose de la zona de viento. La altura de oleaje disminuye gradualmente dispersándose la dirección y frecuencia del oleaje, sin recuperar la energía por viento.

(4) : Es el cálculo de la difracción en aguas profundas alrededor de islas, puntas y cabos.

(10) : La deformación del oleaje por rompiente incluye la elevación de nivel medio del mar, (surf-beat) y el cambio de altura de oleaje por rompiente.

(11) : Es la influencia del oleaje reflejado por las estructuras.

(15) : El oleaje en el puerto se calcula no sólo con el oleaje transmitido por los rompeolas y el oleaje refractado en los extremos de éstos, sino también con el oleaje reflejado por las estructuras en el puerto.

(19) : Para analizar el fenómeno de transporte litoral se necesitan otros procesos de cálculo. Estos se omiten en la figura.

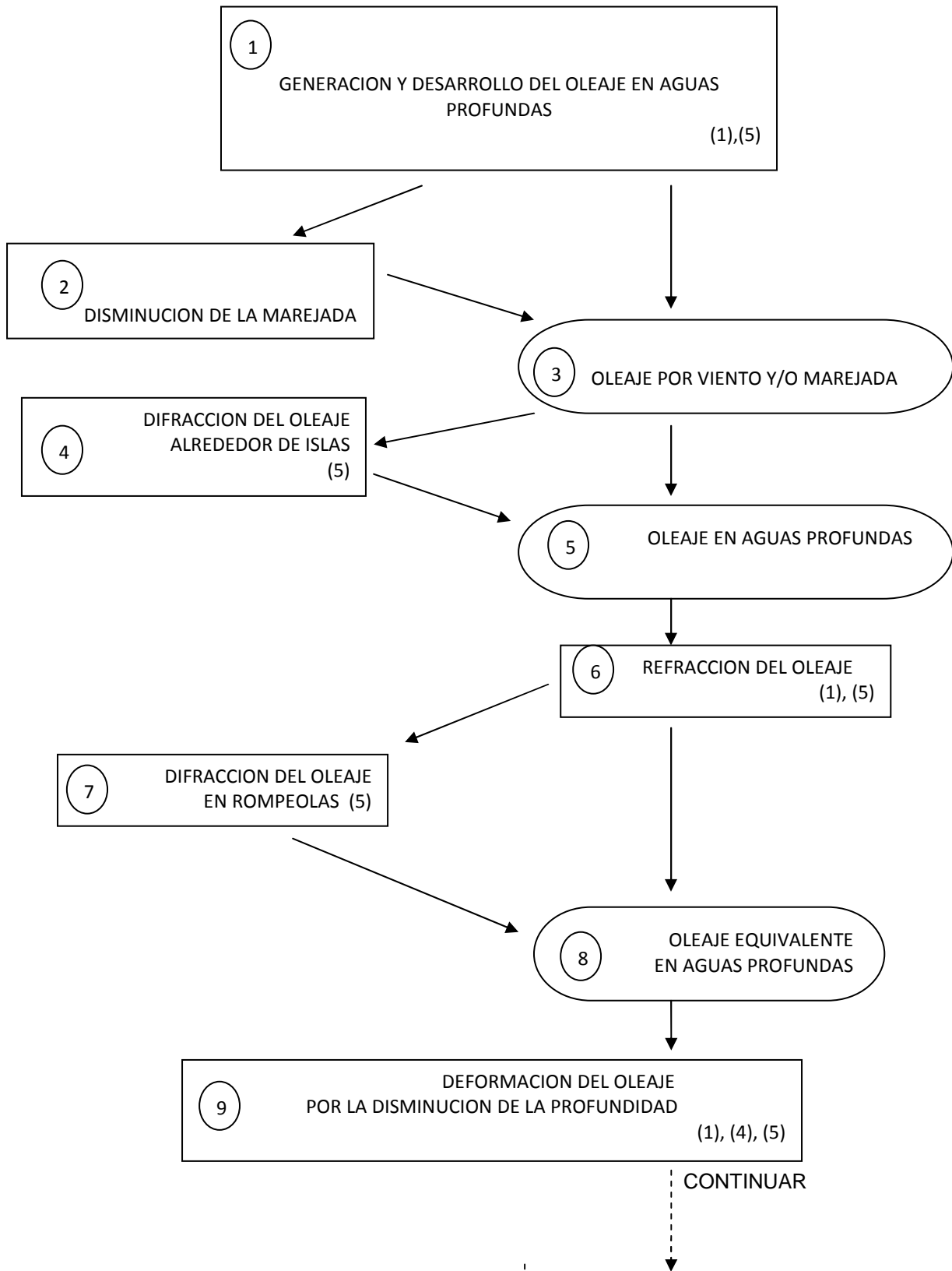
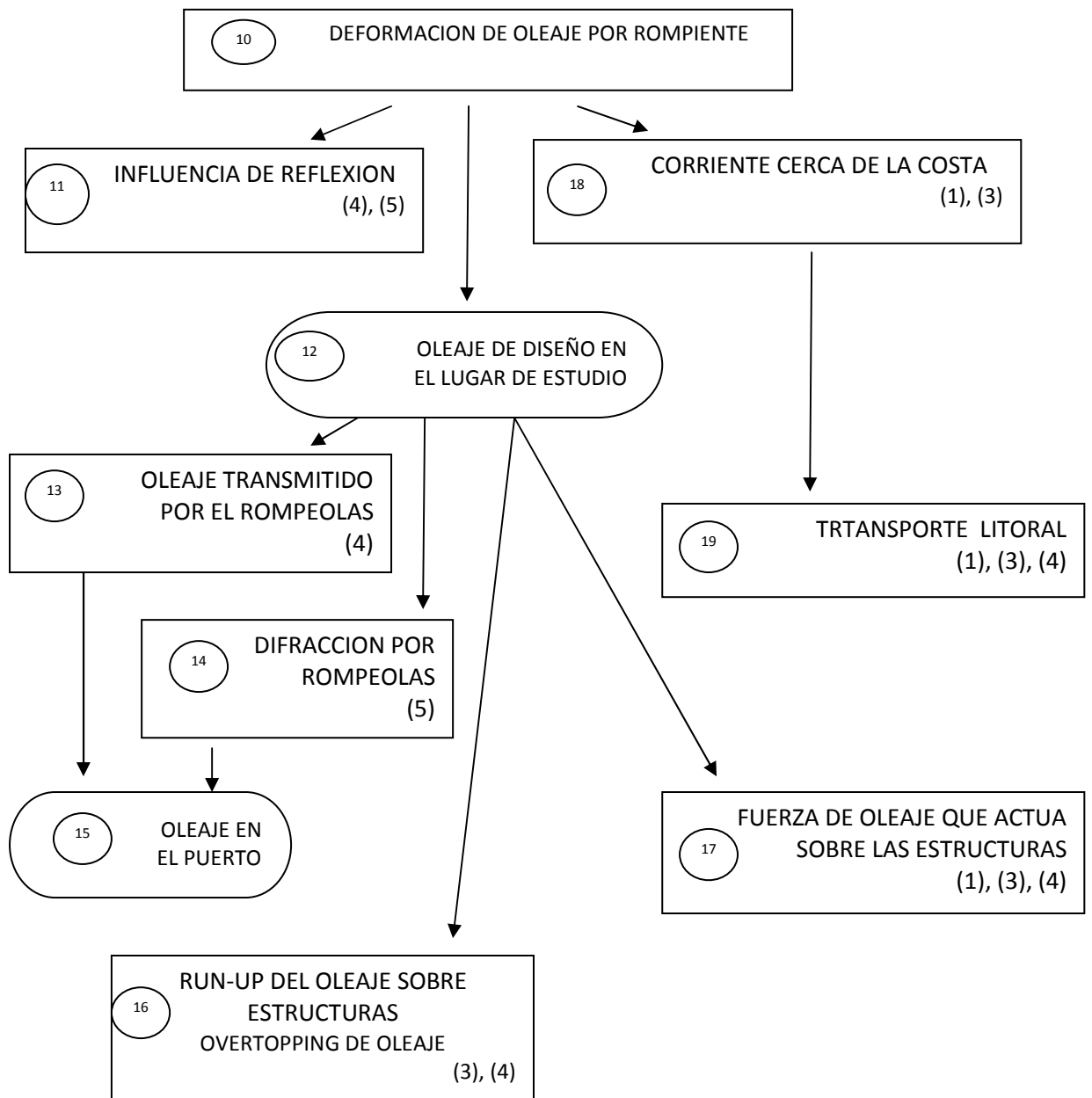


FIG.- 1.3 (a) PROCESO DE CALCULO DE LA DEFORMACION DEL OLAJE



NOTA: (1) a (5) Presentan los métodos de cálculo del oleaje irregular mencionados antes.

FIG.- 1.3 (b) PROCESO DE CALCULO DE LA DEFORMACION DEL OLAJE

2 DEFINICION DE OLEAJE.

El oleaje de diseño para las estructuras de cualquier puerto está dada por las siguientes definiciones:

2.1 Oleaje significativo

De un tren del oleaje irregular, primero se escoge el tercio de las olas más altas. Después de calcular los valores promedio de alturas y periodos de los que se llaman $H_{1/3}$ y $T_{1/3}$ respectivamente. La ola hipotética, que tienen los valores de $H_{1/3}$ y $T_{1/3}$, define al oleaje significativo. Por eso, el oleaje significativo es un índice estadístico del oleaje irregular. El oleaje significativo se aplica al deducir la ocurrencia del oleaje porque el valor de oleaje significativo es casi igual al valor observado visualmente en campo. Además, el periodo de oleaje significativo es casi igual al periodo en el punto más alto del espectro del oleaje. Por eso, el oleaje significativo generalmente se usa como el representativo de un tren del oleaje irregular.

2.2 Oleaje máximo

En un tren del oleaje irregular, las características del oleaje máximo se denominan $H_{m\acute{a}x}$ (altura máxima) y $T_{m\acute{a}x}$ (periodo máximo).

Los valores máximos del oleaje significativo observando durante un plazo de un día, un mes o un año, se llama oleaje máximo. Se debe indicar el periodo de observación para evitar confusiones. El valor máximo del oleaje significativo durante una tormenta o temporal, se conoce como oleaje extremal o de valor extremo.

2.3 Oleaje equivalente en aguas profundas

El oleaje significativo, en que la profundidad del mar es mayor que un medio de su longitud de ola, se denominan oleaje en aguas profundas y se indica como H_o y T_o . La altura de la ola en el lugar de estudio se determina con los resultados de las deformaciones del oleaje en aguas profundas por difracción, refracción, deformación de oleaje por disminución de profundidad y de oleaje por rompiente. Por otra parte, la deformación de oleaje horizontal no se considera en el análisis teórico bidimensional, ni en los ensayos del oleaje en modelo. Por eso, cuando los resultados del análisis teórico y de los ensayos se aplican al diseño en el lugar de estudio, se tiene que introducir previamente la influencia de la deformación como difracción y refracción del oleaje en aguas profundas. Es decir, el oleaje en aguas profundas se tiene que modificar para aplicar los resultados del análisis teórico y de los ensayos.

2.4 Otras definiciones de oleaje

Existen también otras definiciones de oleaje como las siguientes:

- (1) $H_{1/10}, T_{1/10}$ (Altura y periodo del oleaje de un décimo de las olas máximas).

De un tren de oleaje irregular se escoge 1/10 de las olas más altas. Después se calculan los valores promedio del periodos a los que se llaman $H_{1/10}$, $T_{1/10}$ respectivamente.

- (2) \bar{H}, \bar{T} (Altura y periodo del oleaje promedio)

\bar{H} es la altura de la ola que corresponde al promedio de todas las olas en un plan de oleaje registrado (m) y \bar{T} es el periodo de ola que corresponde al promedio de todas las olas en un tren de oleaje restringido (seg) y se llaman altura media (\bar{H}) y periodo medio (\bar{T}) respectivamente.

3 CARACTERISTICAS DE OLAJE

3.1 Características básicas de la ola

3.1.1 Generalidades

las características básicas de la ola, tales como: amplitud, frecuencia, celeridad, etc., se pueden calcular con base a la teoría de las olas de pequeña amplitud; cuando la precisión en el cálculo es insuficiente, éste se debe hacer considerando la influencia de amplitud finita. Cuando el oleaje irregular se presenta como la acumulación de las olas componentes, se puede calcular con la teoría de la ola de pequeña amplitud.

Las características básicas de la ola calculadas con la teoría de la ola de pequeña amplitud son como sigue. Las coordenadas de la ola se presentan en la Fig.-1.4.

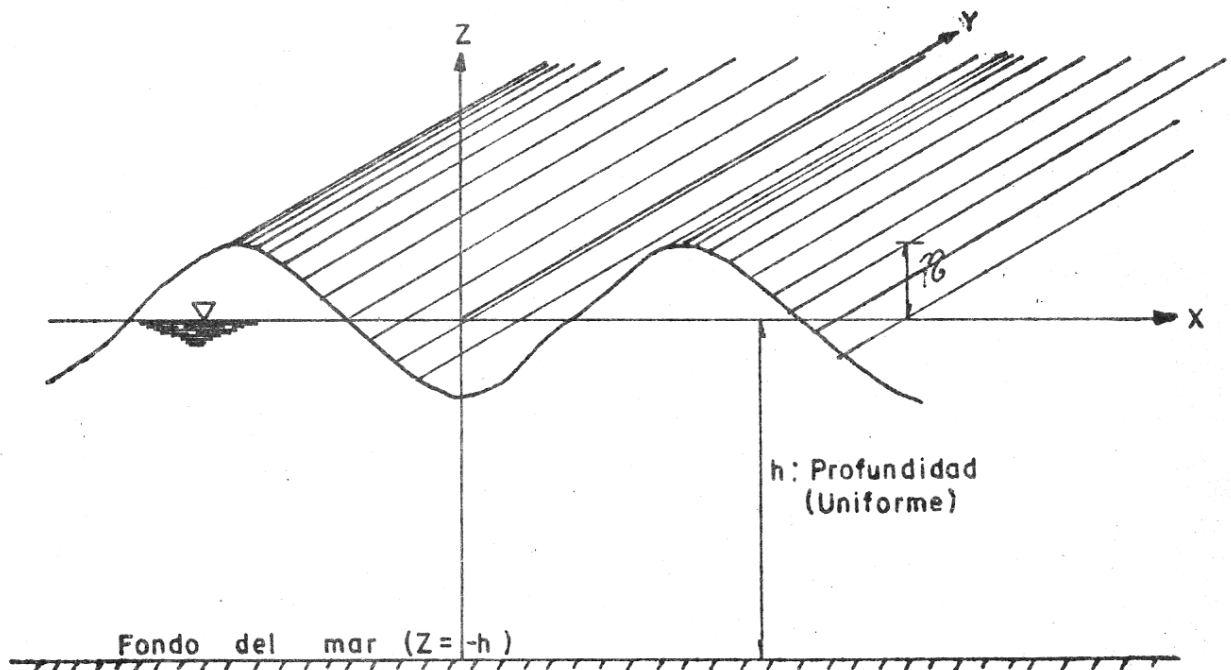


FIG .- 1.4 COORDENADAS DE LA OLA

(1) Perfil de la ola

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \right) \quad (1.1)$$

donde,

η : Perfil de la ola (m)
 H: Altura de la ola (m)
 t: Tiempo (seg)
 L: longitud de la ola (m)
 T: Período de la ola (seg)

(2) Longitud de la ola

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (1.2)$$

g: La aceleración de la gravedad (m/seg^2)

(3) Celeridad de la ola

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (1.3)$$

Donde,

c: Celeridad de la ola (m/seg)

(4) Velocidad de la partícula de agua

Las componentes u y w de la velocidad de las partículas de agua dentro del aula son como sigue:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t \right) \\ w &= \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \cos \left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t \right) \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

Donde,

u: velocidad en la dirección x.

w: velocidad en la dirección z.

(5) Aceleración de la partícula del agua

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \cos \left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t \right) \right\} \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh \frac{2\pi(z+h)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \sin \left(\frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \right)$$

Donde,

$\frac{\partial u}{\partial t}$: Aceleración en la dirección x.

$\frac{\partial w}{\partial t}$: Aceleración en la dirección z.

(6) Presión dentro del agua

$$p = \frac{1}{2} \omega_0 H \frac{\cosh \frac{2\pi(h+z)}{L}}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \sin \left(\frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \right) - \omega_0 z \quad (1.6)$$

Donde,

p : Presión dentro del agua (t/m^2)

ω_0 : Peso por unidad de agua de mar ($\cong 1.025 ton/m^3$)

(7) Energía de la ola media por unidad de superficie

$$\left. \begin{aligned} E &= E_k + E_p = \frac{1}{8} \omega_0 H^2 \\ E_k &= E_p \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

donde,

E : Energía de la ola media por unidad de superficie ($t \cdot m/m^2$)

E_k : Energía cinética de la ola ($t \cdot m/m^2$)

E_p : Energía potencial de la ola ($t \cdot m/m^2$)

(8) Propagación de la energía de la ola

La cantidad media de energía que se propaga por unidad de ancho, por unidad de tiempo (W) es:

$$W = C_G E = \eta C E \quad (1.8)$$

$$C_G = \eta C \quad (1.9)$$

Donde,

W : Cantidad media de energía ($t \cdot m / cm \cdot seg$)

C_G : Celeridad de grupo (m/seg)

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi}{L}} \right) \quad (1.10)$$

3.1.2 Características del oleaje en aguas profundas.

Se pueden calcular las características del oleaje en agua profundadas considerando h/L igual a ∞ en las formulas antes mencionadas. La longitud, celeridad y celeridad de grupo de olas en aguas profundas se calculan como sigue:

$$\left. \begin{aligned} L_o &= 1.56 T^2 \quad (\text{m}) \\ C_o &= 1.56 T \quad (\text{m/seg}) \\ C_G &= 0.78 T \quad (\text{m/seg}) \\ &= 1.52 T \quad (\text{kt}) \\ &= 2.81 T \quad (\text{km/hr}) \end{aligned} \right\} \quad (1.11)$$

El cambio de la longitud y la celeridad del oleaje por disminución de la profundidad se indica en la Tabla.- 1.1 con esta tabla también se puede calcular el oleaje que tiene un periodo menor a 2.0 seg.

3.1.3 Altura de la cresta de la ola

La altura de la cresta de la ola que se presenta en el mar a poca profundidad, es más alta que la altura de la ola teórica (pequeña amplitud) y se presenta en la Fig.- 4.5.

3.2 Oleaje estadístico.

(1) Distribución de Rayleigh

Se deben considerar las características estadísticas de oleaje tales como: la altura y el periodo para diseñar las instalaciones del puerto. Se aplica generalmente la distribución teórica según Rayleigh, que toma en cuenta la distribución de la probabilidad de ocurrencia de alturas de oleaje irregular.

Se introduce la teoría de distribución de Rayleigh basándose en la premisa de que la energía del oleaje irregular se distribuye en la banda de periodo estrecho. Sin embargo, se ha probado en muchas investigaciones que se puede aplicar la teoría al oleaje real, si se da la definición de oleaje con el método de zero-upcrossing. También, según Goda, se comprobó que se puede aplicar la teoría al oleaje con periodo de espectro de banda ancha.

T (s)	3.0		4.0		5.0		6.0		7.0		8.0		9.0		10.0	
	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)
0.5	6.39	2.13	8.67	2.17	10.92	2.18	13.16	2.19	15.39	2.20	17.62	2.20	19.84	2.20	22.06	2.21
1.0	8.69	2.90	11.99	3.00	15.23	3.05	18.43	3.07	21.61	3.09	24.78	3.10	27.94	3.10	31.09	3.11
1.5	10.21	3.40	14.37	3.59	18.40	3.68	22.36	3.73	26.29	3.76	30.19	3.77	34.08	3.79	37.95	3.80
2.0	11.30	3.77	16.22	4.05	20.94	4.19	25.57	4.26	30.14	4.31	34.67	4.33	39.18	4.35	43.68	4.37
2.5	12.09	4.03	17.71	4.43	23.08	4.62	28.31	4.72	33.46	4.78	38.56	4.82	43.62	4.85	48.67	4.87
3.0	12.67	4.22	18.95	4.74	24.92	4.98	30.71	5.12	36.39	5.20	42.01	5.25	47.58	5.29	53.13	5.31
3.5	13.09	4.36	19.98	5.00	26.52	5.30	32.84	5.47	39.02	5.57	45.13	5.64	51.18	5.69	57.19	5.72
4.0	13.39	4.46	20.85	5.21	27.93	5.59	34.75	5.79	41.42	5.92	47.98	6.00	54.48	6.05	60.92	6.09
4.5	13.60	4.53	21.57	5.39	29.18	5.84	36.49	6.08	43.61	6.23	50.61	6.33	57.53	6.39	64.40	6.44
5.0	13.75	4.58	22.18	5.55	30.29	6.06	38.07	6.34	45.63	6.52	53.05	6.63	60.38	6.71	67.64	6.76
6.0	13.91	4.64	23.11	5.78	32.17	6.43	40.84	6.81	49.24	7.03	57.47	7.18	65.57	7.29	73.58	7.36
7.0	13.99	4.66	23.75	5.94	33.67	6.73	43.19	7.20	52.39	7.48	61.37	7.67	70.20	7.80	78.92	7.89
8.0	14.02	4.67	24.19	6.05	34.86	6.97	45.19	7.53	55.16	7.88	64.86	8.11	74.38	8.26	83.77	8.38
9.0	14.03	4.68	24.47	6.12	35.81	7.16	46.91	7.82	57.61	8.23	68.01	8.50	78.19	8.69	88.22	8.82
10.0	14.03	4.68	24.65	6.16	36.56	7.31	48.37	8.06	59.78	8.54	70.85	8.86	81.68	9.08	92.32	9.23
11.0	14.04	4.68	24.77	6.19	37.15	7.43	49.62	8.27	61.72	8.82	73.44	9.18	84.89	9.43	96.12	9.61
12.0	14.04	4.68	24.84	6.21	37.60	7.52	50.69	8.45	63.44	9.06	75.80	9.48	87.85	9.76	99.67	9.97
13.0	14.04	4.68	24.89	6.22	37.95	7.59	51.60	8.60	64.98	9.28	77.96	9.74	90.59	10.07	102.98	10.30
14.0	14.04	4.68	24.91	6.23	38.22	7.64	52.38	8.73	66.35	9.48	79.93	9.99	93.14	10.35	106.07	10.61
15.0	14.04	4.68	24.93	6.23	38.42	7.68	53.03	8.84	67.58	9.65	81.73	10.22	95.51	10.61	108.98	10.90
16.0	14.04	4.68	24.94	6.23	38.57	7.71	53.58	8.93	68.66	9.81	83.39	10.42	97.71	10.86	111.71	11.17
17.0	14.04	4.68	24.95	6.24	38.68	7.74	54.04	9.01	69.63	9.95	84.90	10.61	99.77	11.09	114.29	11.43
18.0	14.04	4.68	24.95	6.24	38.77	7.75	54.42	9.07	70.49	10.07	86.29	10.79	101.68	11.30	116.71	11.67
19.0	14.04	4.68	24.95	6.24	38.83	7.77	54.74	9.12	71.25	10.18	87.56	10.95	103.47	11.50	119.00	11.90
20.0	14.04	4.68	24.95	6.24	38.87	7.77	55.00	9.17	71.92	10.27	88.72	11.09	105.14	11.68	121.16	12.12
22.0	14.04	4.68	24.95	6.24	38.93	7.79	55.39	9.23	73.03	10.43	90.76	11.35	108.14	12.02	125.12	12.51
24.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.96	7.79	55.65	9.28	73.89	10.56	92.46	11.56	110.76	12.31	128.66	12.87
26.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.98	7.80	55.83	9.30	74.54	10.65	93.86	11.73	113.04	12.56	131.83	13.18
28.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.98	7.80	55.94	9.32	75.03	10.72	95.02	11.88	115.01	12.78	134.66	13.47
30.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.99	7.80	56.02	9.34	75.40	10.77	95.97	12.00	116.72	12.97	137.19	13.72
35.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.99	7.80	56.11	9.35	75.96	10.85	97.64	12.20	120.03	13.34	142.38	14.24
40.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.99	7.80	56.14	9.36	76.22	10.89	98.61	12.33	122.26	13.58	146.25	14.63
50.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.99	7.80	56.15	9.36	76.39	10.91	99.46	12.43	124.71	13.86	151.16	15.12
60.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.99	7.80	56.15	9.36	76.42	10.92	99.72	12.46	125.71	13.97	153.68	15.37
70.0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.99	7.80	56.15	9.36	76.42	10.92	99.79	12.47	126.10	14.01	154.91	15.49
L_0, C_0	14.04	4.68	24.96	6.24	38.99	7.80	56.15	9.36	76.43	10.92	99.82	12.48	126.34	14.04	155.97	15.60

TABLA.- 1.1 (a) RELACION ENTRE LONGITUD, CELERIDAD, PERIODO DE OLA Y PROFUNDIDAD

T (s)	11.0		12.0		13.0		14.0		15.0		16.0		18.0		20.0	
	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)
1.0	34.2	3.11	37.4	3.12	40.5	3.12	43.7	3.12	46.8	3.12	50.0	3.12	56.2	3.12	62.5	3.13
2.0	48.2	4.38	52.6	4.39	57.1	4.39	61.6	4.40	66.0	4.40	70.5	4.40	79.4	4.41	88.2	4.41
3.0	58.6	5.33	64.2	5.35	69.6	5.36	75.1	5.37	80.6	5.37	86.1	5.38	97.0	5.39	107.9	5.39
4.0	67.3	6.12	73.7	6.14	80.1	6.16	86.5	6.18	92.8	6.19	99.1	6.20	111.8	6.21	124.4	6.22
5.0	74.9	6.81	82.0	6.84	89.2	6.86	96.3	6.88	103.4	6.90	110.5	6.91	124.7	6.93	138.8	6.94
6.0	81.5	7.41	89.4	7.45	97.3	7.48	105.1	7.51	113.0	7.53	120.8	7.55	136.3	7.57	151.8	7.59
7.0	87.6	7.96	96.1	8.01	104.7	8.05	113.2	8.08	121.6	8.11	130.1	8.13	146.9	8.16	163.7	8.19
8.0	93.1	8.46	102.3	8.52	111.4	8.57	120.6	8.61	129.6	8.64	138.7	8.67	156.7	8.71	174.7	8.74
9.0	98.1	8.92	108.0	9.00	117.7	9.05	127.4	9.10	137.1	9.14	146.7	9.17	165.9	9.22	185.0	9.25
10.0	102.8	9.35	113.2	9.44	123.6	9.50	133.8	9.56	144.1	9.60	154.2	9.64	174.5	9.69	194.7	9.73
12.0	111.3	10.12	122.8	10.24	134.2	10.33	145.6	10.40	156.8	10.45	168.0	10.50	190.3	10.57	212.5	10.63
14.0	118.8	10.80	131.3	10.95	143.8	11.06	156.1	11.15	168.3	11.22	180.5	11.28	204.7	11.37	228.7	11.44
16.0	125.5	11.41	139.0	11.58	152.4	11.72	165.7	11.83	178.8	11.92	191.9	11.99	217.9	12.11	243.7	12.18
18.0	131.4	11.95	145.9	12.16	160.3	12.33	174.4	12.46	188.5	12.57	202.4	12.65	230.1	12.78	257.6	12.88
20.0	136.8	12.44	152.3	12.69	167.5	12.88	182.5	13.04	197.4	13.16	212.2	13.26	241.5	13.42	270.6	13.53
22.0	141.7	12.89	158.1	13.17	174.1	13.39	190.0	13.57	205.7	13.72	221.3	13.83	252.2	14.01	282.8	14.14
24.0	146.2	13.29	163.4	13.61	180.3	13.87	197.0	14.07	213.5	14.23	229.9	14.37	262.3	14.57	294.3	14.72
26.0	150.2	13.66	168.3	14.02	186.0	14.31	203.5	14.53	220.8	14.72	237.9	14.87	271.8	15.10	305.3	15.26
28.0	153.9	13.99	172.8	14.40	191.3	14.72	209.6	14.97	227.6	15.17	245.5	15.34	280.8	15.60	315.7	15.78
30.0	157.3	14.30	176.9	14.74	196.2	15.10	215.3	15.38	234.1	15.60	252.7	15.79	289.4	16.08	325.6	16.28
35.0	164.4	14.95	186.0	15.50	207.2	15.94	228.1	16.29	248.7	16.58	269.0	16.81	309.1	17.17	348.6	17.43
40.0	170.1	15.46	193.5	16.12	216.5	16.65	239.1	17.08	261.4	17.43	283.4	17.71	326.7	18.15	369.3	18.46
45.0	174.5	15.86	199.6	16.64	224.4	17.26	248.7	17.76	272.6	18.17	296.2	18.51	342.6	19.03	388.1	19.41
50.0	178.0	16.18	204.7	17.06	231.0	17.77	256.9	18.35	282.5	18.83	307.6	19.23	357.0	19.83	405.4	20.27
55.0	180.7	16.42	208.8	17.40	236.6	18.20	264.1	18.86	291.1	19.41	317.8	19.86	370.1	20.56	421.3	21.06
60.0	182.7	16.61	212.1	17.68	241.4	18.57	270.3	19.31	298.8	19.92	326.9	20.43	382.0	21.22	435.9	21.80
70.0	185.5	16.86	216.9	18.08	248.7	19.13	280.3	20.02	311.6	20.77	342.4	21.40	403.0	22.39	462.1	23.10
80.0	187.0	17.00	220.0	18.33	253.7	19.52	287.7	20.55	321.5	21.43	354.9	22.18	420.5	23.36	484.6	24.23
90.0	187.8	17.07	221.9	18.49	257.2	19.78	293.1	20.93	329.1	21.94	364.9	22.80	435.3	24.19	504.2	25.21
100.0	188.3	17.11	223.0	18.58	259.5	19.96	297.0	21.21	334.9	22.32	372.8	23.30	447.8	24.88	521.2	26.06
120.0	188.6	17.15	224.1	18.67	261.9	20.15	301.6	21.54	342.5	22.83	383.9	23.99	466.9	25.94	548.8	27.44
140.0	188.7	17.15	224.4	18.70	262.9	20.23	303.8	21.70	346.6	23.11	390.6	24.41	480.1	26.67	569.5	28.48
160.0	188.7	17.16	224.5	18.71	263.3	20.26	304.9	21.78	348.7	23.25	394.4	24.65	489.1	27.17	585.0	29.25
180.0	188.7	17.16	224.6	18.72	263.5	20.27	305.3	21.81	349.8	23.32	396.6	24.79	495.0	27.50	596.4	29.82
200.0	188.7	17.16	224.6	18.72	263.6	20.27	305.5	21.82	350.4	23.36	397.8	24.87	498.8	27.71	604.6	30.23
L_0, C_0	188.7	17.16	224.6	18.72	263.6	20.28	305.7	21.84	350.9	23.40	399.3	24.96	505.3	28.07	623.9	31.19

TABLA.- 1.1 (b) RELACION ENTRE LONGITUD, CELERIDAD, PERIODO DE OLA Y PROFUNDIDAD

h (m)	2.2		2.4		2.6		2.8		3.0		3.2		3.5		4.0	
	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)	L (m)	C (m/s)
0.1	2.15	0.976	2.35	0.978	2.55	0.980	2.75	0.981	2.95	0.983	3.15	0.983	3.45	0.985	3.94	0.986
0.2	2.99	1.361	3.28	1.367	3.57	1.372	3.85	1.376	4.14	1.379	4.42	1.382	4.85	1.385	5.55	1.388
0.3	3.61	1.643	3.97	1.655	4.32	1.663	4.68	1.670	5.03	1.676	5.38	1.681	5.90	1.686	6.77	1.693
0.4	4.11	1.870	4.53	1.887	4.94	1.901	5.35	1.912	5.76	1.921	6.17	1.928	6.78	1.936	7.79	1.947
0.5	4.53	2.059	5.00	2.084	5.47	2.103	5.93	2.118	6.39	2.131	6.85	2.141	7.53	2.153	8.67	2.167
0.6	4.89	2.222	5.41	2.255	5.93	2.280	6.44	2.300	6.95	2.316	7.45	2.329	8.21	2.345	9.45	2.364
0.7	5.20	2.364	5.77	2.404	6.33	2.436	6.89	2.462	7.45	2.482	8.00	2.499	8.81	2.518	10.17	2.542
0.8	5.47	2.488	6.09	2.538	6.70	2.577	7.30	2.607	7.90	2.632	8.49	2.653	9.37	2.677	10.82	2.706
0.9	5.72	2.598	6.38	2.657	7.03	2.703	7.67	2.740	8.31	2.770	8.94	2.794	9.88	2.823	11.43	2.857
1.0	5.93	2.695	6.63	2.764	7.33	2.818	8.01	2.861	8.69	2.896	9.36	2.924	10.35	2.958	11.99	2.999
1.1	6.12	2.782	6.87	2.861	7.60	2.923	8.32	2.973	9.04	3.013	9.75	3.045	10.80	3.085	12.52	3.131
1.2	6.29	2.859	7.08	2.949	7.85	3.019	8.61	3.075	9.36	3.121	10.11	3.158	11.21	3.203	13.02	3.256
1.3	6.44	2.928	7.27	3.028	8.08	3.107	8.88	3.170	9.66	3.222	10.44	3.264	11.60	3.314	13.50	3.374
1.4	6.58	2.989	7.44	3.100	8.29	3.188	9.12	3.258	9.95	3.316	10.76	3.363	11.97	3.419	13.94	3.486
1.5	6.70	3.044	7.60	3.165	8.48	3.262	9.35	3.340	10.21	3.403	11.06	3.455	12.31	3.517	14.37	3.592
1.6	6.80	3.092	7.74	3.225	8.66	3.331	9.56	3.416	10.46	3.486	11.34	3.543	12.64	3.611	14.77	3.693
1.7	6.90	3.135	7.87	3.278	8.82	3.394	9.76	3.487	10.69	3.562	11.60	3.625	12.95	3.700	15.16	3.789
1.8	6.98	3.173	7.99	3.327	8.97	3.452	9.95	3.552	10.90	3.635	11.85	3.703	13.24	3.784	15.53	3.881
1.9	7.05	3.206	8.09	3.371	9.11	3.505	10.12	3.614	11.11	3.702	12.08	3.776	13.52	3.864	15.88	3.970
2.0	7.12	3.236	8.19	3.411	9.24	3.554	10.28	3.670	11.30	3.766	12.30	3.845	13.79	3.940	16.22	4.054
L_0, C_0	7.55	3.431	8.98	3.743	10.54	4.055	12.23	4.367	14.04	4.679	15.97	4.991	19.11	5.459	24.96	6.239

L : Longitud de la ola (m)

V : Celeridad de la ola (m/seg)

T : Período de la ola (seg)

h : Profundidad (m)

TABLA.- 1.1 (c) RELACION ENTRE LONGITUD, CELERIDAD, PERIODO DE OLA Y PROFUNDIDAD

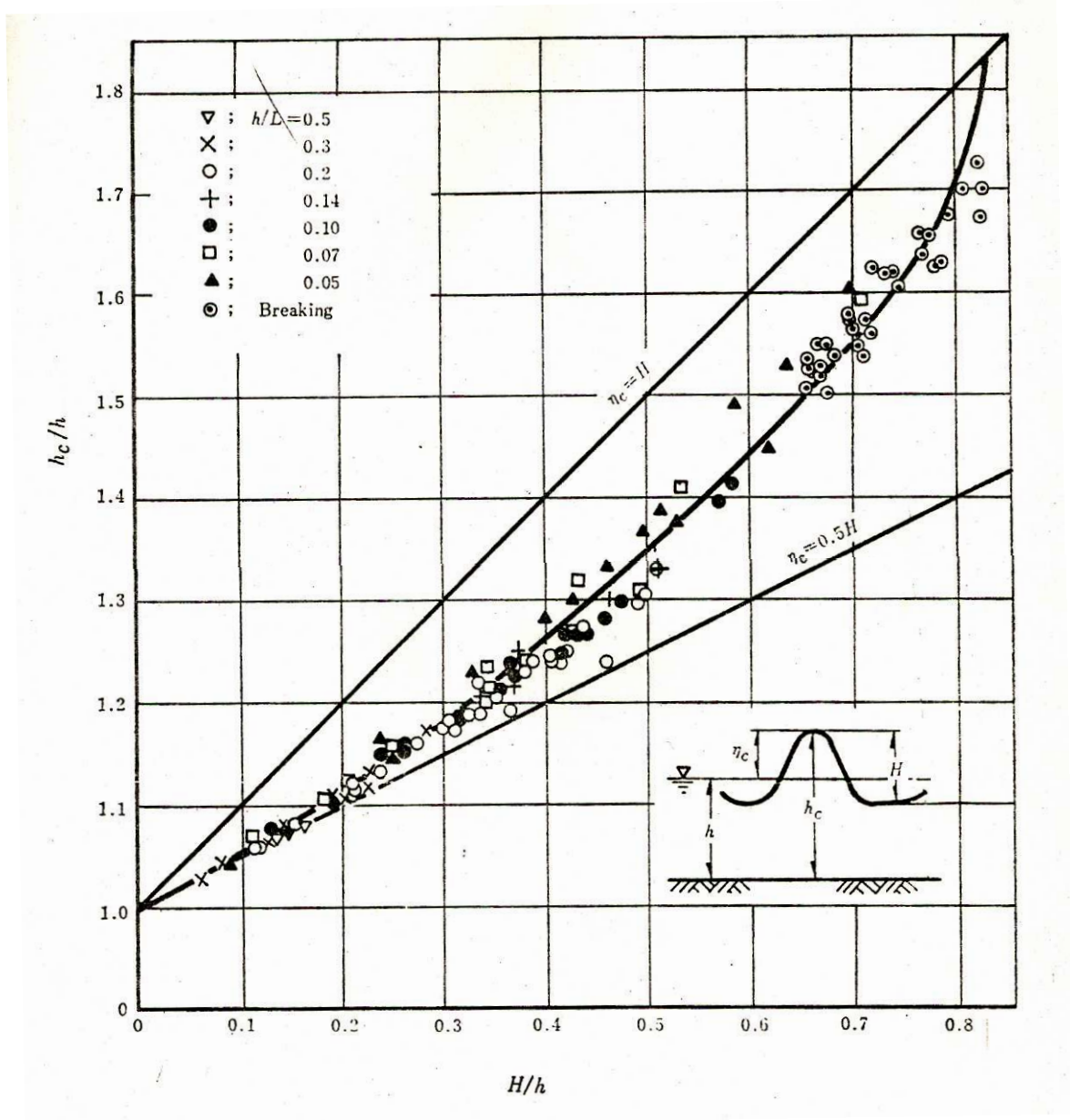


FIG. - 1.5 ALTURA DE LA CRESTA DEL OLAJE REAL

La Fig.- 1.6 presenta la distribución de ocurrencia de altura de ola que resulta de los datos observados en campo. La curva en la figura presenta la distribución de Rayleigh. Se puede ver que la distribución de altura de ola en campo está acorde con la de Rayleigh. La formula de la distribución de Rayleigh se presenta como sigue:

$$p\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)d\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi H}{2\bar{H}} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right]d\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) \quad (1.12)$$

Donde,

p(H): Función de densidad de probabilidad de altura de ola

\bar{H} : Altura de la ola corresponde al promedio de todas las olas en un tren de olas restringidos (m).

En la Tabla.- 1.2 se presentan los resultados de cálculo de la probabilidad de ocurrencia de excedencia con la formula siguiente:

$$P\frac{H}{\bar{H}} = \int_{\frac{H}{\bar{H}}}^{\infty} p(x)dx = \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right] \quad (1.13)$$

Con esta tabla se puede calcular, por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia de altura de $1.0\bar{H}$ a $1.2\bar{H}$ que es:

$$P(1.0)-P(1.2)=0.4559-0.3227=0.1332$$

La probabilidad de ocurrencia de excedencia (P(H))significa la probabilidad de que la altura de ola tenga un valor mayor de H arbitrario. Cuando la distribución de la probabilidad de ocurrencia de la altura del oleaje irregular corresponde a la fórmula de la distribución de Rayleigh, la relación entre altura media (\bar{H}), la significante (H1/3) y la H 1/10 será:

$$\left. \begin{aligned} H_{1/10} &= 1.27 \bar{H} \\ H_{1/3} &= 2.03 \bar{H} \\ H_{1/3} &= 1.60 \bar{H} \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

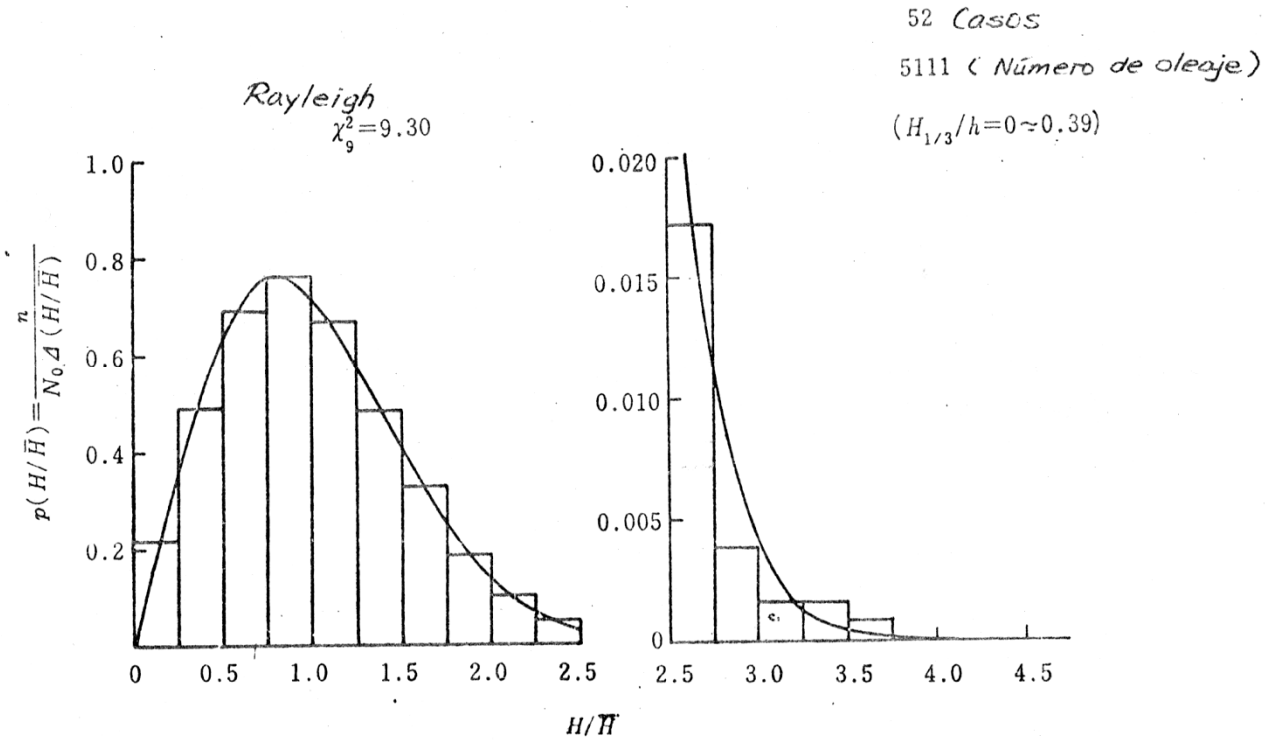


FIG .- 1.6 DISTRIBUCION DE OCURRENCIA DE ALTURA DE LA OLA

H/\bar{H}	$P(H/\bar{H})$	H/\bar{H}	$P(H/\bar{H})$	H/\bar{H}	$P(H/\bar{H})$	H/\bar{H}	$P(H/\bar{H})$
0	1.0000	1.0	0.4559	2.0	0.0432	3.0	0.00085
0.1	0.9922	1.1	0.3866	2.1	0.0313	3.1	0.00053
0.2	0.9691	1.2	0.3227	2.2	0.0223	3.2	0.00032
0.3	0.9318	1.3	0.2652	2.3	0.0157	3.3	0.00019
0.4	0.8819	1.4	0.2144	2.4	0.0108	3.4	0.00011
0.5	0.8217	1.5	0.1708	2.5	0.00738	3.5	0.000066
0.6	0.7537	1.6	0.1339	2.6	0.00495	3.6	0.000038
0.7	0.6806	1.7	0.1033	2.7	0.00326	3.7	0.000021
0.8	0.6049	1.8	0.0785	2.8	0.00211	3.8	0.000012
0.9	0.5293	1.9	0.0587	2.9	0.00135	3.9	0.0000065
1.0	0.4559	2.0	0.0432	3.0	0.00085	4.0	0.0000035

TABLA .- 1.2 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE EXCEDENCIA

(2) Altura máxima (Hmáx)

La altura máxima (Hmáx) es un valor estadístico. Por eso, no puede definirse como una cantidad definitiva. Es la función del número de la ola (N) que se presenta en la Fórmula-1.15.

$$H_{máx} = 0.706 \left(\sqrt{\ln N} + \frac{0.5772}{2\sqrt{\ln N}} \right) H_{1/3} \quad (1.15)$$

En esta fórmula, Hmáx significa el valor esperado de Hmáx. La relación entre el número de la ola (N) y Hmáx se presenta en la Tabla.- 4.3

TABLA.-1.3 RELACION ENTRE EL VALOR N y $\bar{H}_{máx} / H_{1/3}$

N	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
$\bar{H}_{máx} / H_{1/3}$	1.32	1.50	1.61	1.72	1.84	1.94	2.02	2.12	2.19

Se aplican generalmente los valores de 1.6 H_{1/3} a 2.0 H_{1/3} para el valor de Hmáx de diseño.

(3) Distribución de oleaje en la zona rompiente

Cuando las olas se encuentran en zonas donde la profundidad es pequeña, cuando las olas rompen este lugar se le denomina como zona rompiente. En esta zona la distribución de Rayleigh ya no puede aplicarse.

(4) Distribución del periodo de ola

La distribución de periodo de cada ola entre un tren de oleaje, varía en la etapa de generación del oleaje. En caso de oleaje desarrollado suficientemente por el viento, la densidad de probabilidad de los cuadrados de los periodos se pueden representar por la distribución de Rayleigh con la fórmula.-1.16

$$p(T)dT = 2.7 \frac{T^3}{\bar{T}^4} \exp \left\{ -0.675 \left(\frac{T}{\bar{T}} \right)^4 \right\} dT \quad (1.16)$$

Donde,

$p(T)dT$: Función de densidad de probabilidad de los periodos de ola.

Sin embargo, en caso de que el ' Swel ' propagado por el huracán en el océano se superponga al "wind wave" generado por el viento local, hace que coexistan las olas de periodo largo y olas de periodo corto resultando su distribución más ancha que la fórmula.-1.16. en la fig.-1.7 se presentan los resultados analíticos de los datos observados en campo.

Generalmente la relación entre $T_{m\acute{a}x}$, $T_{1/3}$ y T es como sigue:

$$T_{m\acute{a}x} \approx T_{1/10} \approx T_{1/3} \approx 1.1 T \quad (1.17)$$

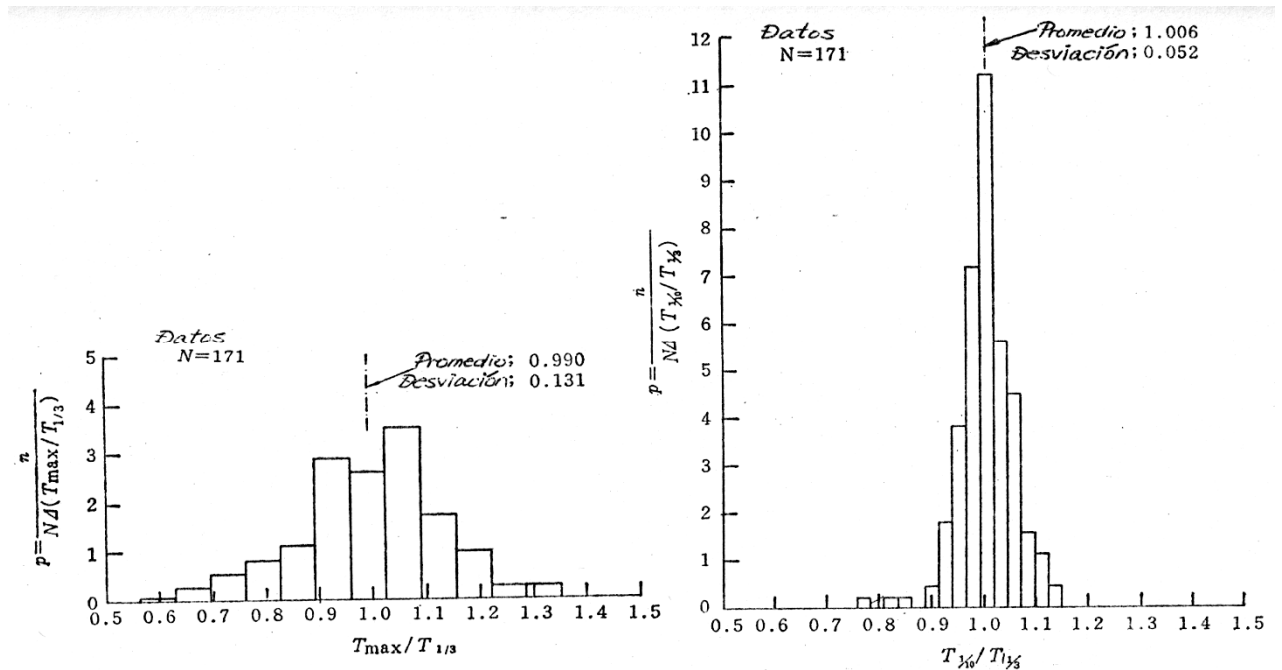


FIG .- 1.7 DISTRIBUCION DEL PERIODO DE OLA

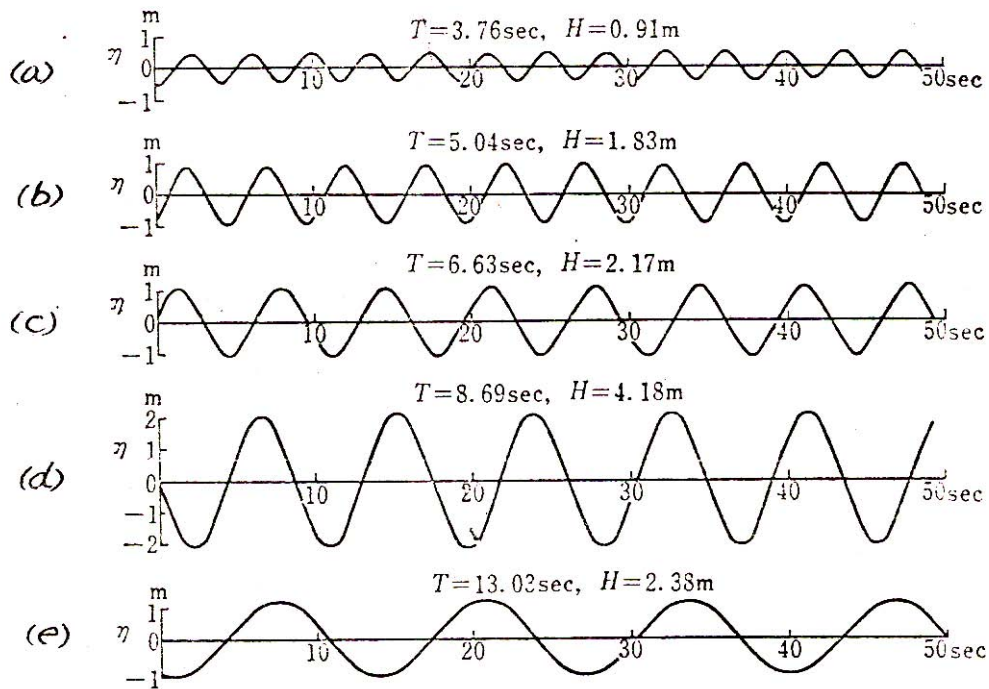
3.3 Espectro del oleaje

Para diseñar las estructuras del puerto se debe considerar el espectro del oleaje usando la distribución adecuada del espectro que incluye no solo el espectro de frecuencia sino también el espectro de dirección.

(a) Concepto del espectro del oleaje

El oleaje irregular se puede presentar por la superposición de oleajes regulares tal como se presenta en la fig.-1.8. se generan de cinco trenes de olas componentes con $T= 3.76, 5.04, 6.63, 8.69$ y 13.03 seg. Respectivamente, superponiéndolos una sobre la otra, se obtiene el oleaje irregular que se indica en la fig.-1.8 (f)

OLEAJE COMPONENTE



OLEAJE SUPERPUESTO

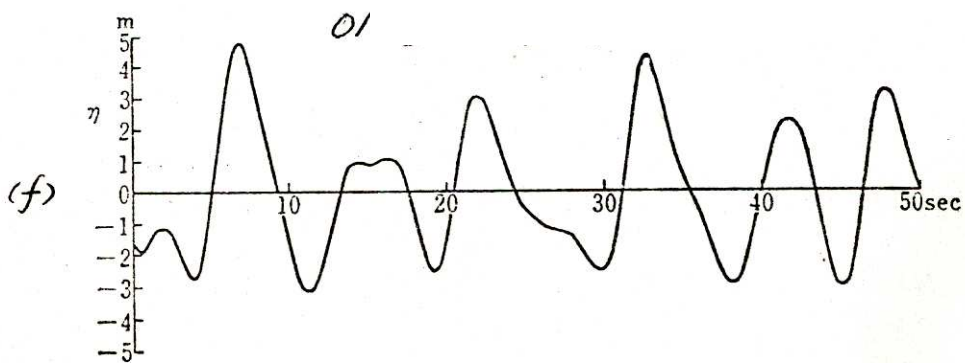


FIG.- 1.8 OLAJE COMPONENTE Y SUPERPOSICION

Por eso, el perfil de la superficie se puede presentar con la fórmula siguiente:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi fnt + En) \quad (1.18)$$

Donde,

a_n : Amplitud del oleaje componente

fn : Frecuencia del oleaje componente

En : Diferencia de fase del oleaje componente

La suma de energía de los oleajes componentes que tienen las frecuencias entre frecuencia f y $f + \Delta f$ se presenta con la función $s(f)$ como sigue:

$$s(f)d(f) = \sum_{n=n_{\text{m\u00e1x}}}^{n=n_{\text{m\u00e1x}}} \frac{1}{2} a_n^2 \quad (1.19)$$

Es decir, la función $s(f)$ expresa la distribución de energía de oleaje componente, llamándose densidad de espectro de oleaje.

La Fórmula – 1.19 no incluye la dirección de oleaje. En realidad, se incluyen los oleajes componentes de todas las direcciones. Por eso, la fluctuación de superficie de mar se puede presentar con la fórmula siguiente, suponiendo los oleajes componentes.

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} a_{nm} \cos[(kn \cos \theta m)x + (kn \sin \theta m)y - 2\pi fnt + Enm] \quad (1.20)$$

donde,

a_{nm} : Amplitud del oleaje componente que tiene frecuencia n ésima y dirección m ésima

kn : Número de oleaje componente n ésimo ($kn = 2\pi / Ln$)

θm : Dirección de oleaje componente m ésima

La suma de la energía de los oleajes componentes que se tienen las frecuencias entre f y $f + \Delta f$ y las direcciones entre θ y $\theta + \delta\theta$ se presenta con la fórmula siguiente:

$$s(f, \theta)dfd\theta = \sum_{n=n_{\text{m\u00edn}}}^{n_{\text{m\u00e1x}}} \sum_{m=m_{\text{m\u00edn}}}^{m_{\text{m\u00e1x}}} \frac{1}{2} a_{nm}^2 \quad (1.21)$$

Es decir, el espectro bidimensional $s(f, \theta)$ presenta la distribución frecuencial y direccional de los oleajes componentes.

(b) Forma de espectro de oleaje

Generalmente la forma del espectro del oleaje se presenta como sigue:

$$S(f, \theta) = S(f) \cdot G(f, \theta) \tag{1.22}$$

Donde,

f : Frecuencia

θ : Grado de desviación con respecto a la dirección mayor

$S(f)$: Espectro frecuencial que presenta la distribución de energía de las componentes frecuenciales.

$G(f, \theta)$: Función direccional que presenta la distribución de energía del oleaje.

Las fórmulas de $S(f)$ y $G(f, \theta)$ se dan como sigue:

$$S(f) = 0.257 \left(\frac{H}{T^2} \frac{1}{3} \right)^2 f^{-5} \exp \left[-1.03 \left(T \frac{1}{3} f \right)^4 \right] \tag{1.23}$$

$$G(f, \theta) = g \left(\cos^{2S} \frac{\theta}{2} \right) \tag{1.24}$$

La constante de proporcionalidad en la fórmula- 1.24 se deduce por la relación siguiente:

$$\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} G(f, \theta) d\theta = 1 \tag{1.25}$$

Donde,

θ_{\max} y θ_{\min} : son el grado de desviación máxima y mínima respectivamente de la dirección mayor.

S en la fórmula.- 1.24 es el parámetro que representa el grado de concentración direccional de los oleajes componentes y se da con las formulas siguientes:

$$\left. \begin{aligned} \text{Cuando } f \gg fm : S &= Smáx \left(\frac{f}{fm} \right)^{-2.5} \\ \text{Cuando } f \leq fm : S &= Smáx \left(\frac{f}{fm} \right)^5 \end{aligned} \right\} \tag{1.26}$$

Donde, f_m es la frecuencia pico que tiene la energía máxima de los oleajes componentes y se da con la fórmula siguiente:

$$f_m \cong \frac{1}{1.05T^{1/3}} \quad (1.27)$$

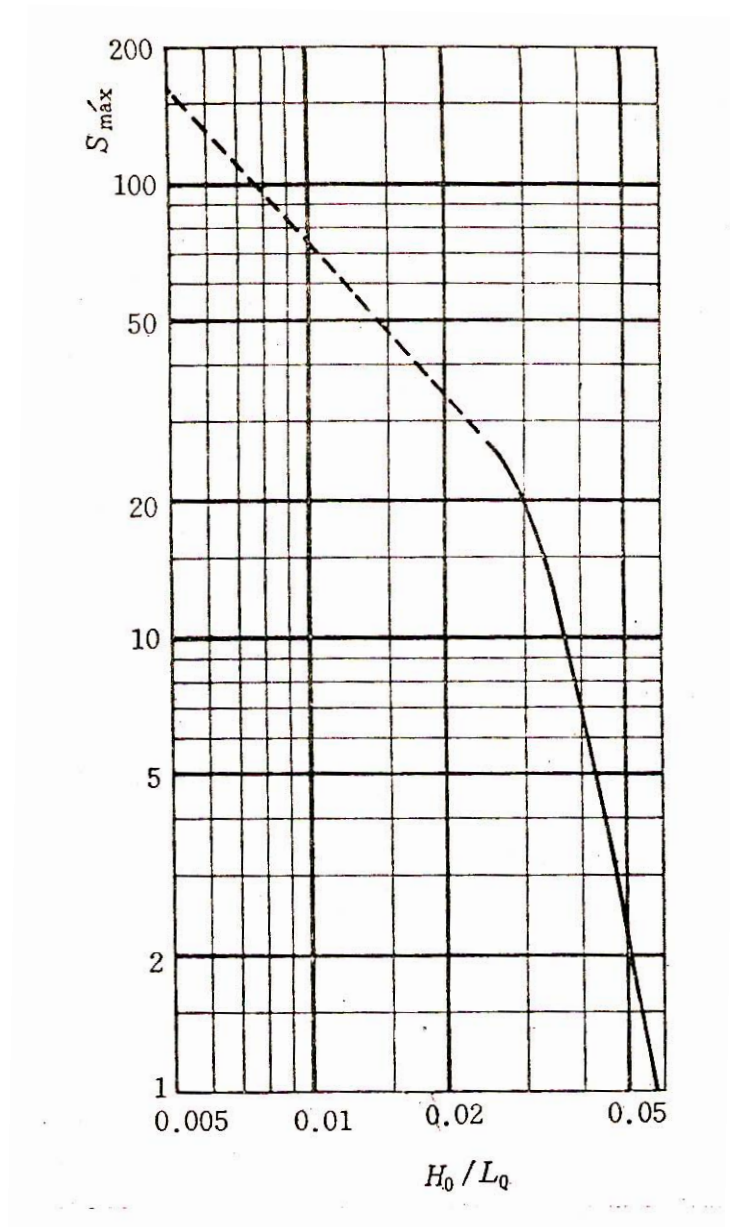
Las unidades de la función $S(f, \theta)$ se dan en ($m^2 \cdot \text{seg}$); si las unidades de $H_{1/3}$ y $T_{1/3}$ son (m) y (seg) respectivamente, $S_{\text{máx}}$ tiene normalmente los siguientes valores:

- (1) Para oleaje de superficie (wind wave): $S_{\text{máx}}=10$
- (2) Para swell con la distancia de decaimiento corta (esbeltez comparativamente grande) : $S_{\text{máx}} = 25$

- (3) Para swell con distancia de decaimiento larga (esbeltez pequeña) : $S_{\text{máx}} = 75$

$$\left. \begin{array}{l} S_{\text{máx}}=10 \\ S_{\text{máx}} = 25 \\ S_{\text{máx}} = 75 \end{array} \right\} \quad (1.28)$$

Los valores anteriores se presentan en la fig.- 1.9 que indican la relación entre H_o/L_o y $S_{\text{máx}}$.

FIG.- 1.9 RELACION ENTRE H_0/L_0 Y $S_{m\acute{a}x}$

Espectro direccional.

El valor estimado de $S_{m\acute{a}x}$ corresponde al oleaje profundo. En la zona somera donde se construyen estructuras, por la influencia de refracción, las direcciones de oleaje tienden a uniformarse y las líneas de cresta a unirse lateral y longitudinalmente, cuya transformación varía conforme a la batimetría del fondo del mar, lo que se conoce como la transformación del espectro direccional.

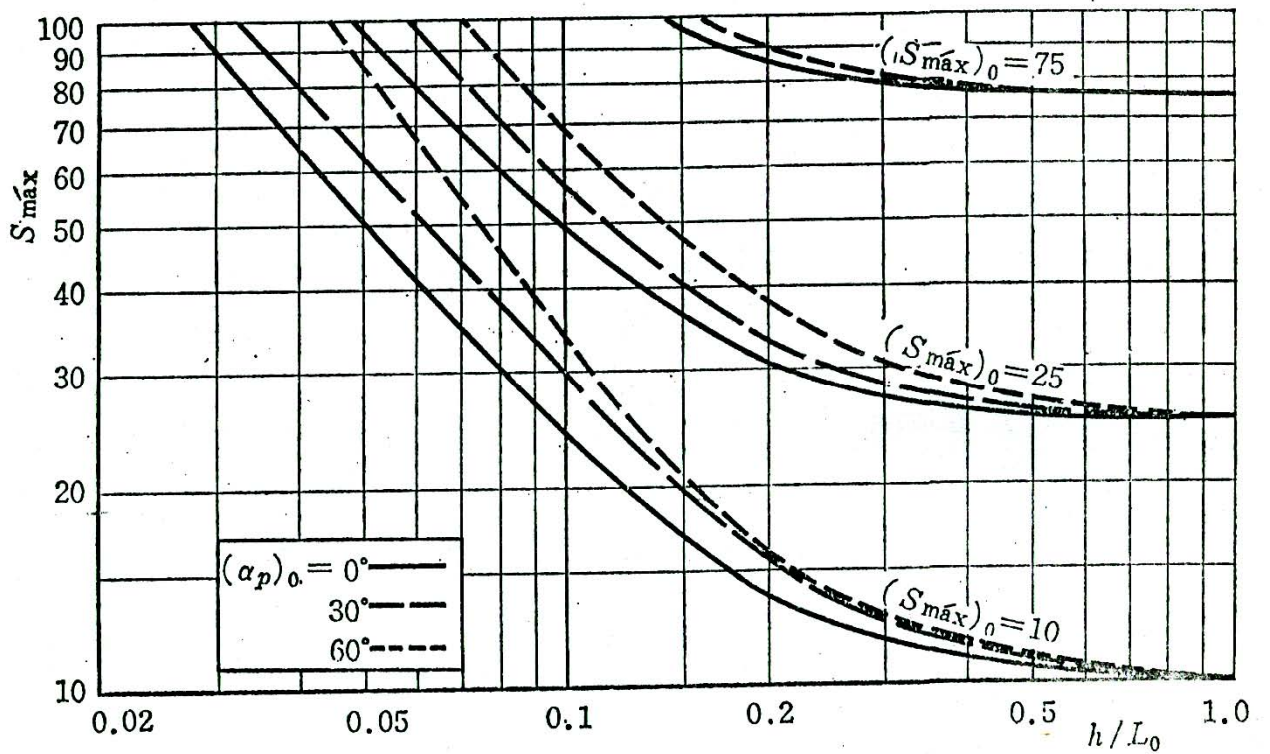


FIG.- 1.10 ESTIMACION DE S_{\max} EN AGUAS SOMERAS (SEGÚN GODA Y SUZUKI)

En caso de que la configuración del fondo del mar varíe en forma regular, la transformación de la función direccional por traslación de oleaje a la zona somera, se puede expresar como un incremento aparente de S_{\max} como se muestra en la fig.- 1.10. Donde $(\alpha_p)_0$ es el ángulo incidente del oleaje con respecto a la línea perpendicular a la playa y L_0 escrito en el eje de las abscisas, es la longitud de la ola en aguas profundas correspondiente al periodo de oleaje significativo.

El resultado de este cálculo indica que la influencia del ángulo incidente $(\alpha_p)_0$ del oleaje en aguas profundas de S_{\max} es pequeña.

$$P_E(\theta) = \frac{1}{m_0} \int_{-\pi/2}^{\theta} S(f, \theta) df d\theta \quad (1.29)$$

Donde,

$P_E(\theta)$: Valor acumulado en porcentaje de energía

m_0 : Valor representativo de la energía total del oleaje y se define como sigue:

$$m_0 = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S(f, \theta) \cdot df d\theta \quad (1.30)$$

La razón de que la extensión de la dirección de la componente del oleaje está entre $-\frac{\pi}{2}$ y $\frac{\pi}{2}$ en la definición de mo , es debido a que, en el diseño se anula el componente cuya dirección es contraria a la principal.

La Fig.-4.11 es el resultado del cálculo sobre el valor acumulado de la proporción de la energía usando la Formula - 4.29 para espectro frecuencial $S(f)$ y el parámetro de grado de concentración direccional, donde se grafican las curvas acumuladas en la función direccional de $S_{m\acute{a}x}= 5,10,25,75$ y de SWOP que será mencionado después.

(e) Relación entre espectro y altura o periodo de ola

Se integra la densidad espectral de energía de oleaje para todas las extensiones de frecuencia, expresando a mo :

$$mo = \int_0^{\infty} S(f)df \quad (1.31)$$

De las definiciones de las Formulas -4.18 y 4.19 hay la relación siguiente:

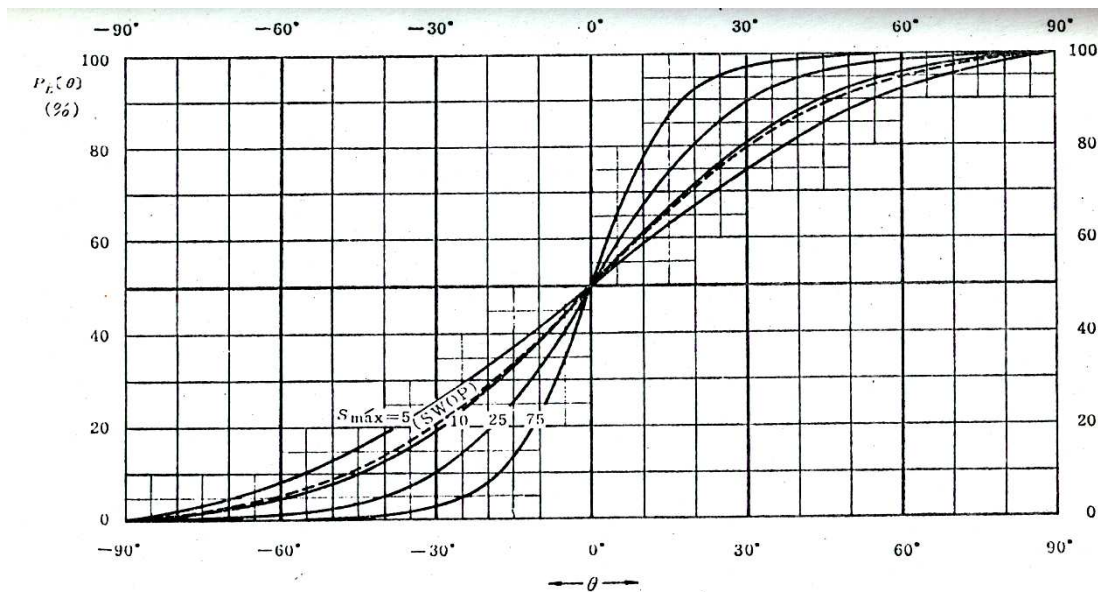


FIG.- 1.11 CURVA ACUMULADA DE ENERGIA DE OLAJE (SEGÚN GODA Y SUZUKI, 1975)

$$mo = \lim_{t_o \rightarrow \infty} \frac{1}{t_o} \int_0^{t_o} \eta^2 dt = \overline{\eta^2} \quad (1.32)$$

Es decir, mo es una cantidad que proporciona a la energía total de oleaje y tiene unidades de m^2, cm^2 , etc.

La energía de oleaje es proporcional al cuadro de perfil de la ola. Por lo tanto, se puede relacionar con la altura de ola.

Considerando teóricamente y comparando con los datos obtenidos por observación, se da la relación siguiente:

$$H \frac{1}{3} = 4.0 \sqrt{m_0} \quad (1.33)$$

Esta relación es casi válida mientras que se defina la ola por el método de "zero-upcrossing", aún cuando la forma espectral del oleaje sea considerablemente diferente de la fórmula -1.23.

Por otra parte, el periodo definido por el método de "zero-upcrossing" se calcula con la fórmula -1.34 basado en la teoría estadística.

$$\bar{T} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (1.34)$$

Donde,

$$m_2 = \int_0^{\infty} f^2 S(f) df \quad (4.35)$$

No obstante al calcularse \bar{T} , sobre el espectro real observado, usando la fórmula – 1.34, da un valor entre 10% y 25%, que el obtenido directamente en las observaciones en campo.

Respecto al oleaje de mar el período medio tendrá un valor aproximadamente mayor en un 20% del obtenido en la fórmula – 1.34. Mientras, la frecuencia, en donde el espectro tiene su valor máximo, es aproximadamente el valor recíproco del período de la ola significativa $T_{1/3}$ ó un poco más pequeño.

La relación de las fórmulas – 1.33 y 1.34 se usan cuando se estima la altura y el período de oleaje, el espectro en que se ha transformado por refracción, dirección, etc.

CAPITULO 2**OLEAJE DE DISEÑO****1. OLEAJE DE DISEÑO EN AGUAS PROFUNDAS****1.1 Generalidades**

El oleaje en aguas profundas que se usará para diseñar las instalaciones en el puerto se debe determinar con cualquiera de los tres métodos siguientes:

- Datos de oleaje observados por períodos largos de tiempo
- Oleaje estimado con datos meteorológicos
- Oleaje estimado basándose en huracanes hipotéticos

Se deben considerar los siguientes aspectos:

- (1) Es preferible contar con datos de oleaje observado el período largo (mínimo de 10 años). Cuando faltan datos, se puede usar el oleaje estimado por los datos meteorológicos por más de 30 años.
- (2) En este caso, el valor del oleaje estimado se tiene que corregir con los datos observados. Si, se tiene el dato de oleaje extraordinario y este valor es más grande que el estimado, se puede usar como oleaje de diseño.
- (3) Cuando no hay datos de oleaje observado, se pueden usar los de otro lugar cercano que tenga condiciones naturales semejantes.
- (4) Cuando se tengan datos de oleaje extraordinario registrados, antes del período de observación, los datos de oleaje extraordinario tiene que ser considerados.
- (5) Cuando se usan los datos de oleaje estimado con los datos de huracanes hipotéticos, se tiene que considerar la escala y la trayectoria de los huracanes y la probabilidad de ocurrencia de éstos.
- (6) Cuando el valor de la altura del oleaje significativo es mayor que un medio de la profundidad donde es observado el oleaje, se puede considerar que los datos están afectados por la rompiente del oleaje. Por eso, se tienen que comparar los datos medidos y los datos estimados con el valor estimado de oleaje en aguas profundas.
- (7) Es deseable que el oleaje de diseño se decida basándose en el período de retorno y la probabilidad de encuentro que está relacionada con la vida útil de la instalación. La probabilidad de encuentro significa que; la altura de oleaje mayor que la del período de retorno supuesto ocurra más de una vez durante la vida útil de la instalación. La probabilidad de encuentro está afectada por: la función de la instalación, su importancia y factores económicos. Por eso se determina de acuerdo al criterio del ingeniero responsable.
- (8) Cuando se determina el oleaje de diseño, es necesario tomar en cuenta la fuerza exterior que actúa sobre la instalación existente y los antecedentes de comportamiento de instalaciones contiguas.

- (9) La altura y el período del oleaje de diseño en aguas profundas normalmente se supone cada dirección dividida en 16 direcciones que influyen en la instalación. Entre estas 16 direcciones, se puede omitir las direcciones en que la altura de oleaje es pequeña. En este caso, la dirección del oleaje es la que tiene más energía entre los oleajes componentes, es decir, la dirección mayor.

1.2 Período de retorno y probabilidad de encuentro

El oleaje que destruye las instalaciones y daña su función no siempre actúa sobre ellos. Ocurre repentinamente y no se puede determinar el tiempo y tamaño del oleaje. Por eso, se debe introducir el concepto de probabilidad para determinar la ocurrencia de este oleaje.

(1) Período de retorno

Es el intervalo promedio de años en que ocurre una fuerza exterior mayor que la supuesta. Por ejemplo, cuando ocurre una altura de oleaje mayor de 10 m una vez cada 10 años como promedio, se dice que su período de retorno es de 10 años.

Cuando la profundidad de desplante de las instalaciones es poco profunda, la altura del oleaje tiene un límite. En este caso, las alturas del oleaje que tienen período de retorno diferente son casi iguales. La altura de oleaje que llega a la zona de rompiente es casi igual. Por eso, el valor de esta altura límite será el oleaje de diseño. O sea, cuando la fuerza exterior tiene un límite y el período de retorno es corto, el oleaje de diseño se decidirá por el valor límite. Antes, generalmente el oleaje de diseño se decidía por este valor. Sin embargo, en estos últimos años, las instalaciones se desplantan en lugares más profundos de vez en cuando. Por eso el valor límite de la fuerza exterior es más grande. En este caso, no se puede usar el método tradicional por razones económicas. Es decir, se hace necesario el concepto de probabilidad. La probabilidad de encuentro da un punto de referencia para decidir el período de retorno.

(2) Probabilidad de encuentro

Se da la probabilidad de encuentro en la fórmula -2.1 .

$$E_1 = 1 - \left(1 - \frac{1}{\bar{T}_1}\right)^{L_1} \quad (2.1)$$

Donde:

E_1 : Probabilidad de encuentro

L_1 : Vida útil de la instalación

\bar{T}_1 : Período de retorno

El resultado de cálculo se presenta en la Tabla.-2.1. El significado de la probabilidad de encuentro se puede explicar como sigue: Primero, se meten unos papeles que tengan escritos los valores de altura de oleaje significativo máximo de cada año en una caja. De esta caja se sacan L_1 papeles. Cuando el valor de oleaje significativo es mayor que el de \bar{T}_1 , se indicará como "Hay". Cuando no, se indicará como "No hay". Cuando se prueban N veces y se registran P veces como "Hay", la probabilidad de la altura de oleaje del período de retorno (\bar{T}_1) en la vida útil (L_1) será P/N. Si N es muy grande, el valor de P/ N tiende a un valor. Este valor es la probabilidad de encuentro.

Por ejemplo, cuando una instalación tiene una vida útil de 30 años y se diseña para un oleaje que tiene período de retorno de 30 años, la probabilidad de encuentro o de que el oleaje que exceda el oleaje de diseño más de una vez en 30 años es 0.638 como se ve en la Tabla - 2.1.

Es decir, la probabilidad de encuentro es mayor que la probabilidad de no encuentro. Para determinar la probabilidad de encuentro, se tiene que elegir el oleaje de período de retorno más largo. Por ejemplo, cuando se diseña con el oleaje de período de retorno de 60 años, la probabilidad de encuentro es de 0.396.

El valor de la probabilidad de encuentro se debe decidir considerando factores como la importancia de la instalación, la economía, etc..

$L_1 \backslash \bar{T}_1$	5	10	15	20	25	30	40	50	60
1	0.200	0.100	0.067	0.050	0.040	0.033	0.025	0.020	0.017
2	0.360	0.190	0.129	0.098	0.078	0.066	0.049	0.040	0.033
3	0.488	0.271	0.187	0.143	0.115	0.097	0.073	0.059	0.049
4	0.590	0.344	0.241	0.185	0.151	0.127	0.096	0.078	0.065
5	0.672	0.410	0.292	0.226	0.185	0.156	0.119	0.096	0.081
6	0.738	0.469	0.339	0.265	0.217	0.184	0.141	0.114	0.096
7	0.790	0.522	0.383	0.302	0.249	0.211	0.162	0.132	0.111
8	0.832	0.570	0.424	0.337	0.279	0.238	0.183	0.149	0.126
9	0.866	0.613	0.463	0.370	0.307	0.263	0.204	0.166	0.140
10	0.893	0.651	0.498	0.401	0.335	0.288	0.224	0.183	0.155
12	0.931	0.718	0.563	0.460	0.387	0.334	0.262	0.215	0.183
14	0.956	0.771	0.619	0.512	0.435	0.378	0.298	0.246	0.210
16	0.972	0.815	0.668	0.560	0.480	0.419	0.333	0.276	0.236
18	0.982	0.850	0.711	0.603	0.520	0.457	0.366	0.305	0.261
20	0.988	0.878	0.748	0.642	0.558	0.492	0.397	0.332	0.285
25	0.996	0.928	0.822	0.723	0.640	0.572	0.469	0.397	0.343
30	0.999	0.958	0.874	0.785	0.706	0.638	0.532	0.455	0.396
35	0.999+	0.975	0.911	0.834	0.760	0.695	0.588	0.507	0.445
40	0.999+	0.985	0.937	0.871	0.805	0.742	0.637	0.554	0.489
45	0.999+	0.991	0.955	0.901	0.841	0.782	0.680	0.597	0.531
50	0.999+	0.955	0.968	0.923	0.870	0.816	0.718	0.636	0.568

TABLA.- 2.1 PROBABILIDAD DE ENCUENTRO

	80	100	120	160	200	250	300	400	500
1	0.012	0.010	0.008	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.002
2	0.025	0.020	0.017	0.012	0.010	0.008	0.007	0.005	0.004
3	0.037	0.030	0.025	0.019	0.015	0.012	0.010	0.007	0.006
4	0.049	0.039	0.033	0.025	0.020	0.016	0.013	0.010	0.008
5	0.061	0.049	0.041	0.031	0.025	0.020	0.017	0.012	0.010
6	0.073	0.059	0.049	0.037	0.030	0.024	0.020	0.015	0.012
7	0.084	0.068	0.057	0.043	0.034	0.028	0.023	0.017	0.014
8	0.096	0.077	0.065	0.049	0.039	0.032	0.026	0.020	0.016
9	0.107	0.086	0.073	0.055	0.044	0.035	0.030	0.022	0.018
10	0.118	0.096	0.080	0.061	0.049	0.039	0.033	0.025	0.020
12	0.140	0.114	0.096	0.072	0.058	0.047	0.039	0.030	0.024
14	0.161	0.131	0.111	0.084	0.068	0.055	0.046	0.034	0.028
16	0.182	0.149	0.125	0.095	0.077	0.062	0.052	0.039	0.032
18	0.203	0.165	0.140	0.107	0.086	0.070	0.058	0.044	0.035
20	0.222	0.182	0.154	0.118	0.095	0.077	0.065	0.049	0.039
25	0.270	0.222	0.189	0.145	0.118	0.095	0.080	0.061	0.049
30	0.314	0.260	0.222	0.171	0.140	0.113	0.095	0.072	0.058
35	0.356	0.297	0.254	0.197	0.161	0.131	0.110	0.084	0.068
40	0.395	0.331	0.284	0.222	0.182	0.148	0.125	0.095	0.077
45	0.432	0.364	0.314	0.246	0.202	0.165	0.140	0.107	0.086
50	0.467	0.395	0.342	0.269	0.222	0.182	0.154	0.118	0.095

TABLA.- 5.1 PROBABILIDAD DE ENCUENTRO

2. PROCEDIMIENTO PARA DECIDIR EL OLEAJE DE DISEÑO

Para diseñar la instalación, se debe elegir el oleaje más desfavorable para la instalación basándose en el oleaje de diseño de aguas profundas y considerando la deformación del oleaje como difracción, refracción y efecto de fondo. El procedimiento es como sigue:

- (1) Determinar el oleaje equivalente en aguas profundas basándose en el oleaje en aguas profundas y considerando su difracción y refracción.
- (2) Determinar el oleaje de diseño en el lugar de interés, basándose en el oleaje equivalente en aguas profundas considerando la deformación del oleaje por el efecto de fondo y por rompiente.
- (3) Se deben considerar las condiciones especiales en el lugar de interés, como la influencia de la reflexión de otro lugar y la amplificación del oleaje de deflexiones de los rompeolas.
- (4) Usando el oleaje de diseño determinado por el método descrito arriba, se calcula la acción del oleaje como la fuerza del oleaje que actúa en estructuras, el volumen que rebasa las estructuras, etc..
- (5) De vez en cuando, la acción del oleaje sobre la instalación será máxima cuando la marea está baja. En este caso, se tiene que examinar la acción del oleaje durante varias mareas.
- (6) De vez en cuando, el período y la dirección del oleaje serán más importantes que la altura del oleaje. Por eso, se tiene que analizar la influencia del período del oleaje.
- (7) El oleaje más desfavorable que actúa sobre la instalación se elige como oleaje de diseño. Después de determinar la dirección del oleaje de diseño, se determinan direcciones entre 15° eligiendo como dirección de oleaje de diseño a la más desfavorable.

CAPITULO 3

DEFORMACION DE OLAJE

1. GENERALIDADES

Para diseñar las instalaciones del puerto, se deben considerar las deformaciones del oleaje cuando éste avanza en el mar. Las deformaciones del oleaje son: difracción, refracción, reflexión, deformación por efecto de fondo y deformación por rompiente. En aguas profundas, donde la profundidad es mayor que un medio de la longitud de la ola, el oleaje avanza sin deformación o sea, la profundidad no afecta al oleaje. Cuando el oleaje avanza en zonas, donde la profundidad es menor que un medio de la longitud de la ola, éste es afectado por la profundidad. La celeridad del oleaje será menor y su longitud será más corta y también la altura cambiará.

Por esta razón, la zona donde la profundidad es mayor que un medio de la longitud de la ola, se le conoce como zona de aguas profundas. Por otra parte, la zona que tiene profundidad menor que un medio de la longitud de la ola será la zona de aguas someras.

Para el oleaje irregular la condición de aguas profundas o aguas someras se establece por el valor de un medio de L_0 , donde; $L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2$ y T_0 es el período significativo del oleaje irregular. En aguas profundas,

se debe considerar el fenómeno de difracción por islas, cabos, etc, y la reflexión por el efecto de grandes instalaciones en aguas profundas.

Cuando las instalaciones están en aguas someras, se debe estimar la deformación del oleaje si no existen observaciones directas. En aguas someras se debe considerar el cambio de la distribución de la altura de ola.

2. REFRACCION DEL OLAJE

En la zona de aguas someras, el fenómeno de refracción ocurre por el cambio local de la celeridad del oleaje correspondiendo a un cambio en la profundidad. Por eso, se debe 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 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.-3.1). Si, el intervalo entre dos líneas de la dirección del oleaje cambia de b_1 a b_2 y si se puede considerar que la energía del oleaje 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 representan con la fórmula siguiente por la cantidad de la energía transportada:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{C_{G1}}{C_{G2}}} \cdot \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad (3.1)$$

Donde:

C_{G1} , C_{G2} : Celeridad de grupo en la profundidad h_1 y h_2 , respectivamente.

b_1 , b_2 : Intervalo de línea u ortogonal de la dirección del oleaje en la profundidad h_1 y h_2 , respectivamente.

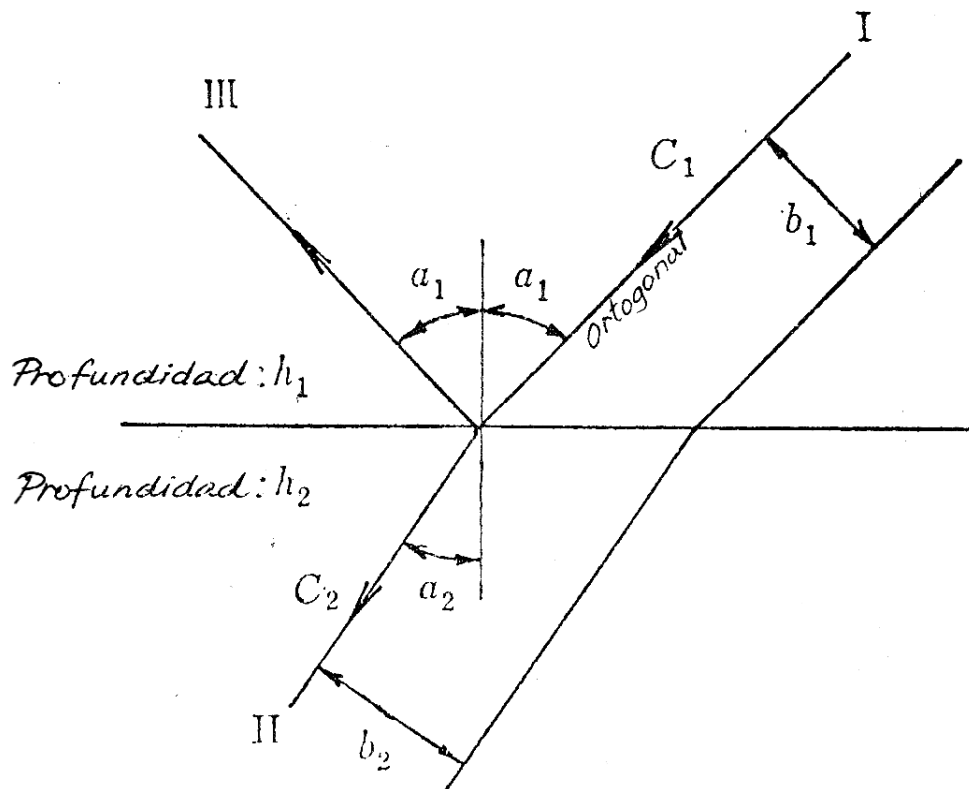


FIG.-6.1 REFRACCION DEL OLEAJE

En esta fórmula, $\sqrt{b_1/b_2}$ y $\sqrt{C_{G1}/C_{G2}}$ representan el efecto de la refracción y el efecto de fondo, respectivamente. $\sqrt{C_{G1}/C_{G2}}$ se puede presentar como el coeficiente de fondo.

$$\sqrt{\frac{C_{G1}}{C_{G2}}} = \frac{K_{S1}}{K_{S2}} \quad (3.2)$$

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 bo 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 (Kr) se da con la fórmula siguiente:

$$Kr = \sqrt{\frac{bo}{b}} \quad (3.3)$$

2.2 Método de cálculo de refracción de oleaje regular

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

- (1) Método con la línea de la dirección del oleaje
- (2) El método uno 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 la refracción en caso de que las curvas batimétricas sean rectas y paralelas a la costa, se calculan con las fórmulas siguientes:

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } \alpha_0 \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (3.4)$$

$$Kr = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}} \quad (3.5)$$

donde, L , α , α_0 son la longitud de 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.-3.2 (a) y 3.2 (b) aplicando las fórmulas – 3.4 y 3.5.

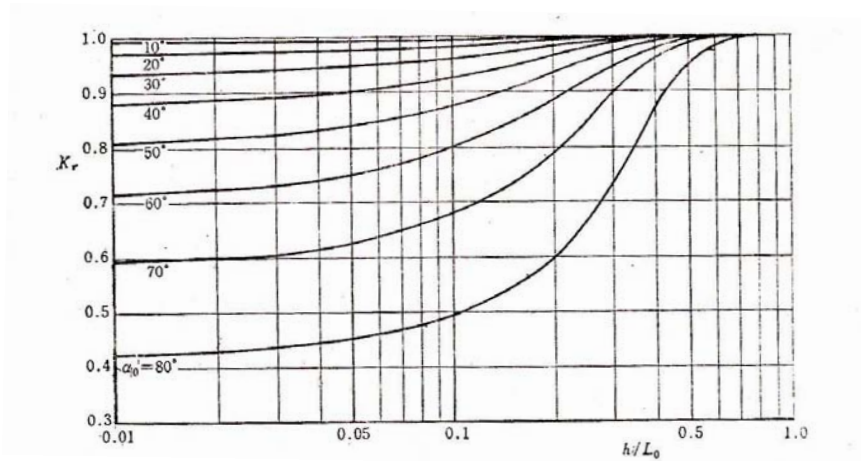


FIG.- 3.2(a) COEFICIENTE DE REFRACCION EN CASO DE QUE LAS LINEAS BATIMETRICAS SEAN RECTAS Y PARALELAS A LA COSTA

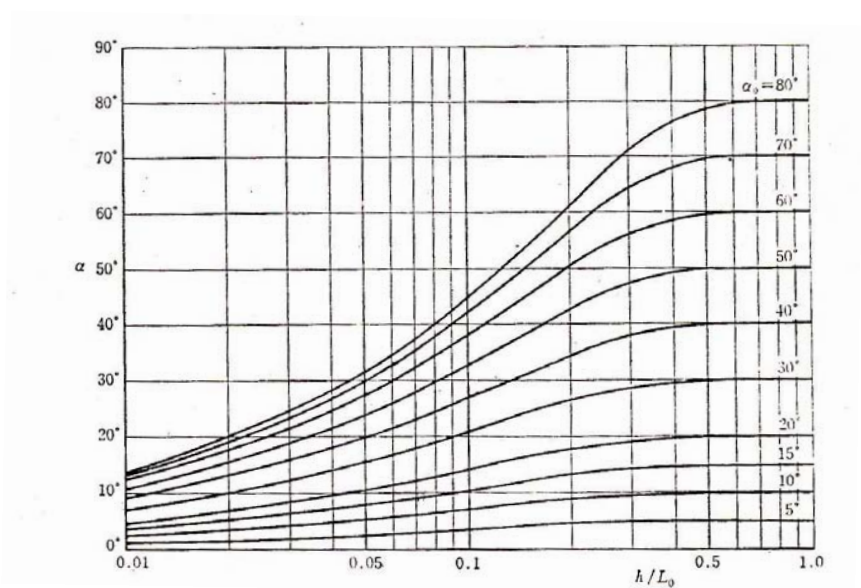


FIG.- 3.2(b) CAMBIO DE DIRECCION DE OLEAJE REGULAR EN CASO DE QUE LAS LINEAS BARIMETRICAS SEAN RECTAS Y PARALELAS A LA COSTA

2.2.1 Método con la línea de la dirección de oleaje (método gráfico por ortogonales).

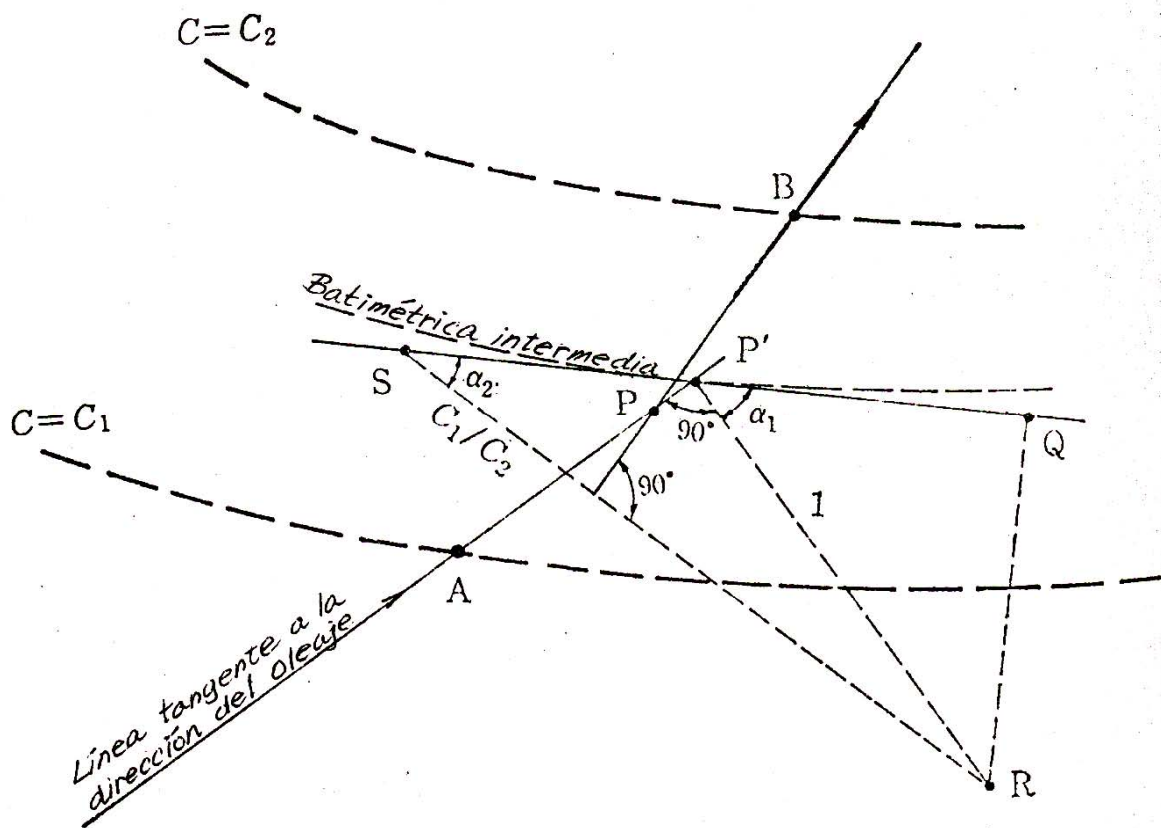
(a) En el caso de que el ángulo de incidencia del oleaje sea menor de 80° (Fig.-3.3)

FIG.-3.3 METODO GRAFICO DE REFRACCION

- 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.
- 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 $\overline{P'R} \times (C_1/C_2)$ e intersectar la línea tangente al punto P' localizando el punto S siendo $\angle \theta SR$ 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) Repitiendo el mismo procedimiento para cada línea batimétrica.

El procedimiento de 6) a 9) puede simplificarse si se usa una regla especial llamada regla de refracción y que se presenta en la Fig.-3.4

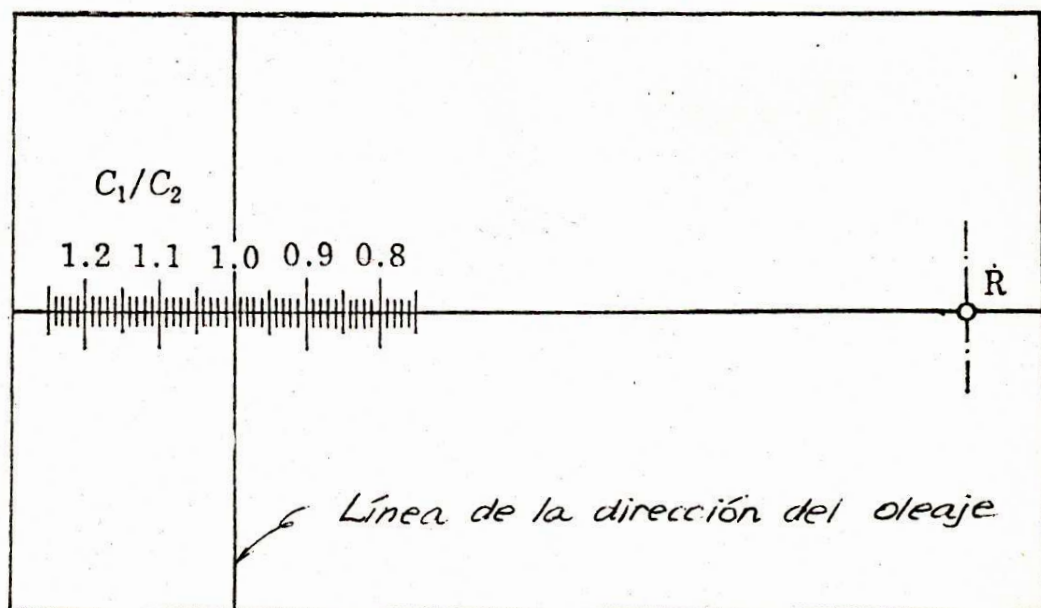


FIG.-3.4 REGLA DE REFRACCION

(b) En el caso de que el ángulo de incidencia del oleaje sea mayor de 80° (Fig.-3.5)

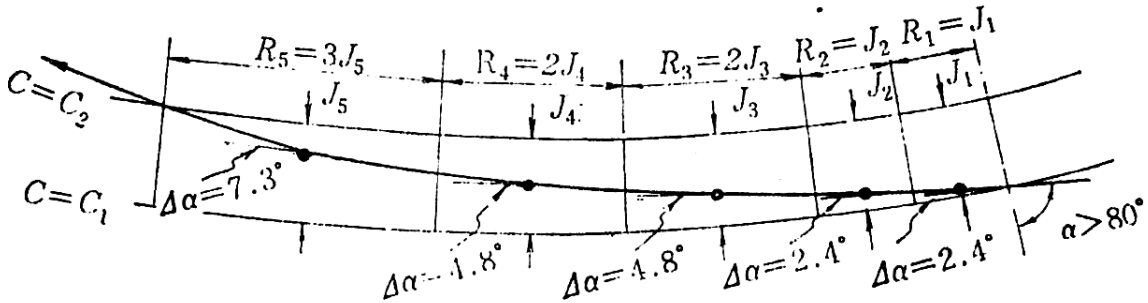


FIG.- 3.5 FORMA DE DIBUJAR EL METODO GRAFICO DE REFRACCION CUANDO α ES MAYOR QUE 80°

- 1) En este caso, primero se divide en intervalos arbitrarios las dos líneas batimétricas.
- 2) Calcular el nuevo ángulo con la Fig.-3.6 en el punto intermedio de cada intervalo.

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

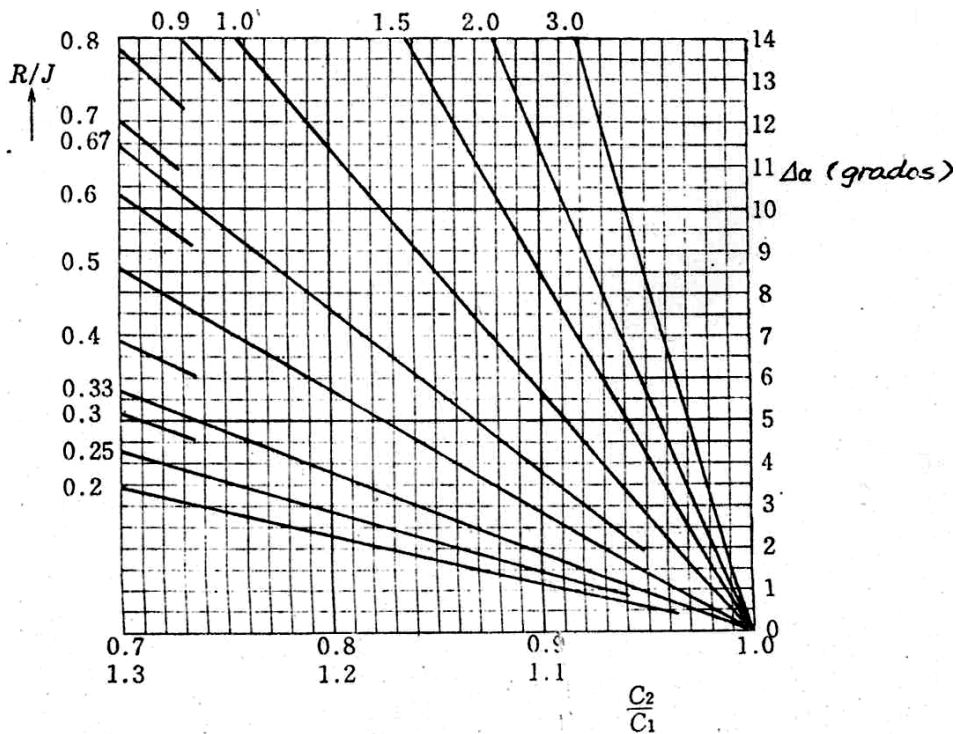


FIG.-3.6 CAMBIO DEL ANGULO DE LA DIRECCION DEL OLEAJE

2.2.2 Método gráfico por ortogonales con computadora

Este método es básicamente el mismo del método de la figura 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.-3.7

$$\frac{D\alpha}{DS} = \frac{1}{c} \left(\text{sen}\alpha \frac{\partial c}{\partial x} - \text{cos}\alpha \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{D^2\beta}{DS^2} + p(s) \frac{D\beta}{DS} + q(s)\beta = 0 \quad (3.7)$$

$$p(s) = \frac{1}{c} \left\{ -\text{cos}\alpha \frac{\partial c}{\partial x} - \text{sen}\alpha \frac{\partial c}{\partial y} \right\} \quad (3.8)$$

$$g(s) = \frac{\text{sen}^2\alpha}{c} \frac{\partial^2 c}{\partial X^2} - 2\text{sen}\alpha \text{cos}\alpha \frac{\partial^2 c}{\partial x \partial y} + \frac{\text{cos}^2\alpha}{c} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (3.9)$$

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:

$$\beta = \frac{b}{b_0} = \frac{1}{Kr^2} \quad (3.10)$$

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

2.2.3 Análisis del oleaje numérico 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.

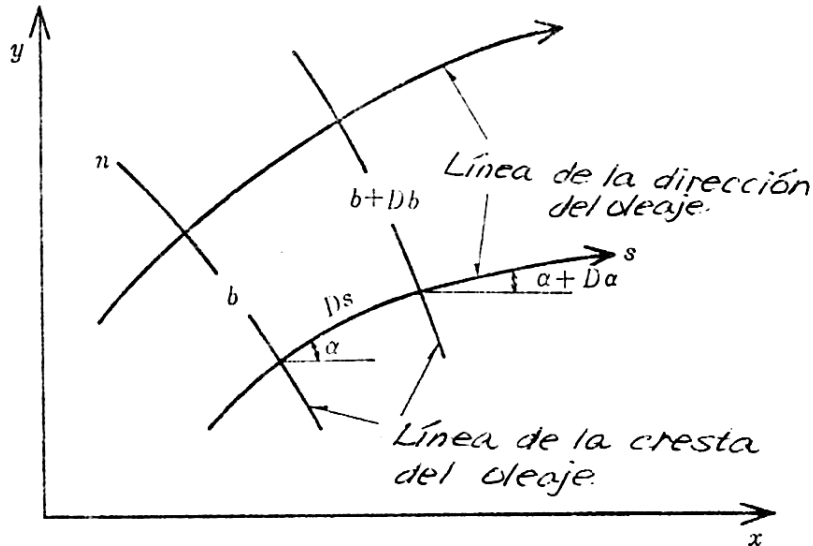


FIG.-3.7 LINEAS DE LA DIRECCION DEL OLEAJE Y SUS COORDENADAS

2.2.4 Problemas en el método de 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, y en este punto, se ensancha el intervalo de las líneas de la dirección del oleaje o se iguala energéticamente las alturas de la ola que se calcula como oleaje incidental 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.-3.8(a) y 3.8(b) presentan los coeficientes de la refracción y el cambio de la dirección en caso del oleaje irregular cuando las líneas batimétricas son rectas y paralelas a la costa. Comparando las Figs.-3.2(a) y 3.8(a) o las Figs.-3.2(b) y 3.8(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.

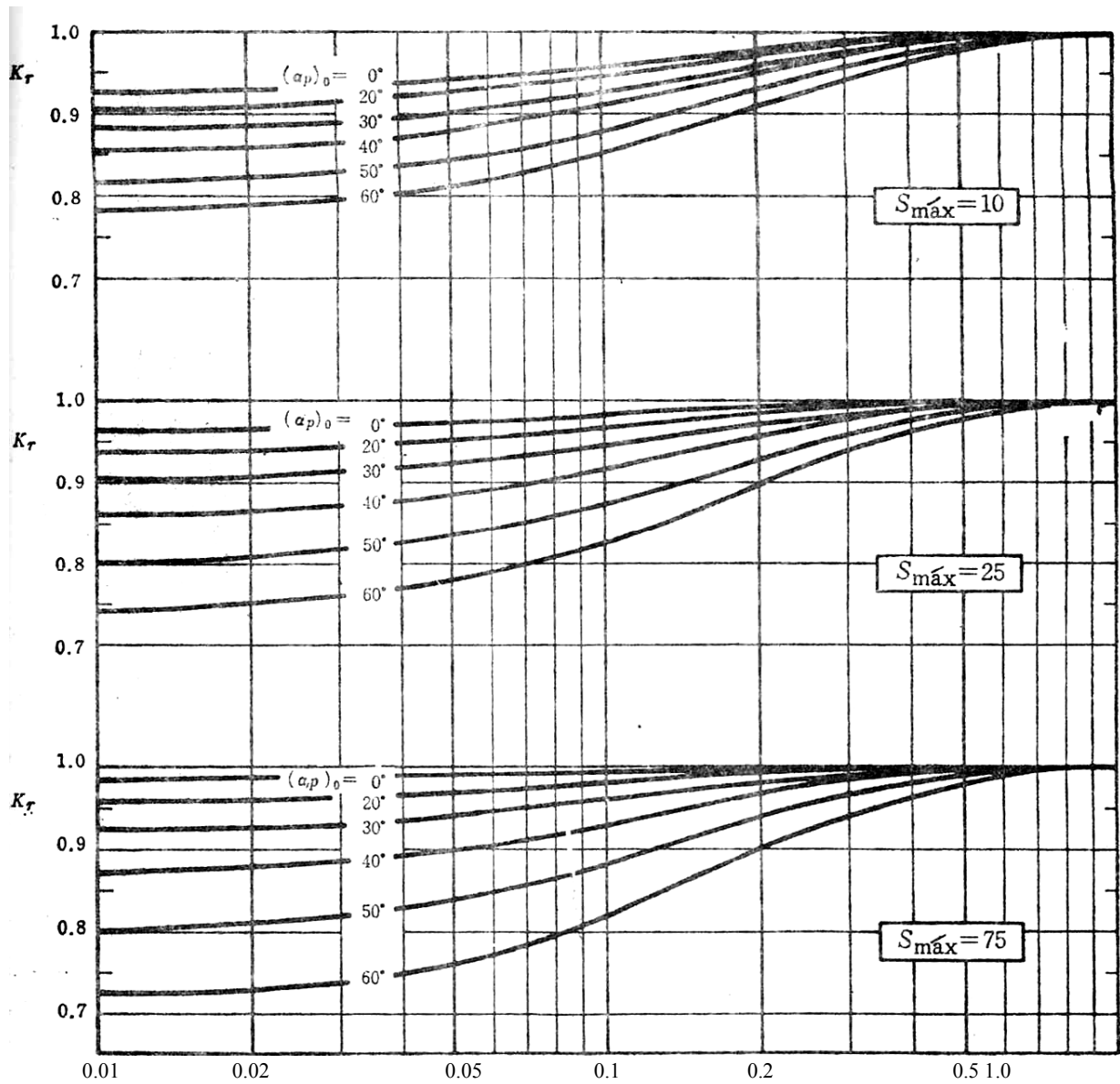


FIG.-3.8(a) COEFICIENTE DE REFRACCION DEL OLEAJE IRREGULAR EN CASO DE QUE LAS LINEAS BATIMETRICAS SEAN RECTAS Y PARALELAS A LA COSTA

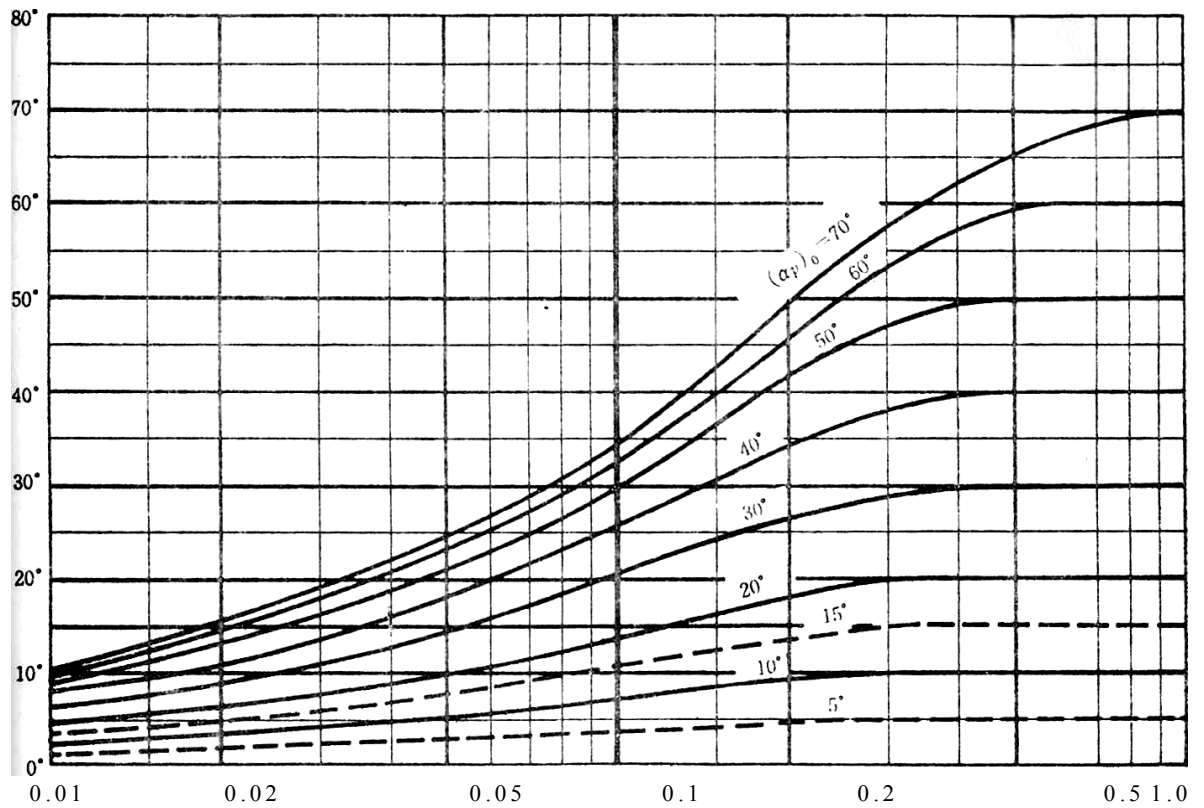


FIG.-3.8(b) CAMBIO DE DIRECCION DEL OLAJE IRREGULAR EN CASO DE QUE LAS LINEAS BATIMETRICAS SEAN RECTAS Y PARALELAS A LA COSTA

2.3 Cálculo de refracción del oleaje irregular

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

(1) Método del oleaje componente

En este método, primero 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.

(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 en la dirección del oleaje que se cruzan.

El método del oleaje componente es el 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 dir ección mayor del oleaje se divide en M direcciones de $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots a \theta_M$. La frecuencia $(fm)_i$ 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 olaje componente son como sigue:

$$(fm)^*_i = \frac{1}{0.9} \sqrt{2.9124N \left[\phi \left(\sqrt{2 \ln \left(\frac{N}{i-1} \right)} \right) - \phi \left(\sqrt{2 \ln \left(\frac{N}{i} \right)} \right) \right]} \quad (3.11)$$

$$(\theta m)_j = \frac{\theta_{j+1} + \theta_j}{2} \quad (3.12)$$

donde,

$$\theta(x) = \int_0^x \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi}} dz \quad (3.13)$$

$$(fm)^*_i = (fm)_i \cdot T1/3 \quad (3.14)$$

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

Los resultados del cálculo de $(fm)^*_i$ se presentan en la Tabla – 6.1. Después del cálculo de $(fm)^*_i$, el coeficiente de refracción del oleaje irregular se puede calcular como sigue:

$$(Kr)_{eff} = \sum_{j=i}^M \sum_{i=1}^{N_j} (Kr)^2_{ij} \quad (3.15)$$

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" ésima 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.-3.9 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 desviándose de la dirección centro.

Por ejemplo, vamos a calcular el coeficiente de refracción del oleaje con el método del oleaje componente cuando el período del oleaje por viento en aguas profundas será 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 - 6.2. $Smáx$ será 10 porque el oleaje es por viento.

El valor de b_j se calcula con la Fig.-3.9 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_j se calculan como se presentan en la Tabla-

3.2. Después se calculan los valores de $\sum_1 (Kr)^2 ij, \frac{1}{N} B_j \sum (Kr^2) ij$. Por eso, el valor de

$\sum_1 \frac{1}{N_j} B_j \sum_1 (Kr)^2 ij$ será 0.924 como se presenta en la Tabla-3.2 y finalmente, el valor del coeficiente de refracción por el oleaje irregular en aguas profundas que tiene 8 segundos de período

$(Kr)_{eff}$ será 0.96. significante

TABLA -3.1 RESULTADOS DEL CALCULO DE $(fm)_i^*$

N^D	$(fm)_i^* = (fm)_i T_{1/8}$								
	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.

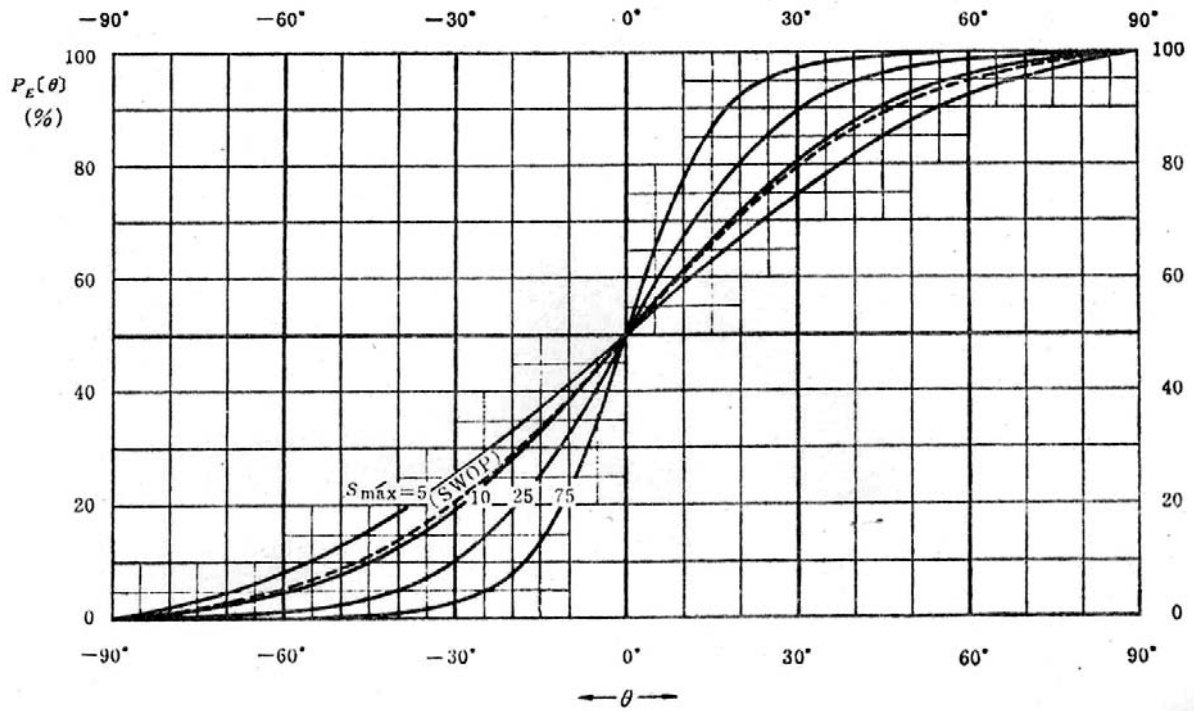


FIG.-3.9 CURVA DE ACUMULACION DE ENERGIA DEL ESPECTRO DEL OLEAJE

Dirección Frecuencia		j=1		2		3		4		5		6		7		8		
		$(\theta_m)_j = -78.75^\circ$		-56.25°		-33.75°		-11.25°		11.25°		33.75°		56.25°		78.75°		
i	$(J_m)_i$	$(T_m)_i$ (sec)	$(K_r)_{i1}^2$	$(K_r)_{i1}^2$	$(K_r)_{i2}^2$	$(K_r)_{i2}^2$	$(K_r)_{i3}^2$	$(K_r)_{i3}^2$	$(K_r)_{i4}^2$	$(K_r)_{i4}^2$	$(K_r)_{i5}^2$	$(K_r)_{i5}^2$	$(K_r)_{i6}^2$	$(K_r)_{i6}^2$	$(K_r)_{i7}^2$	$(K_r)_{i7}^2$	$(K_r)_{i8}^2$	$(K_r)_{i8}^2$
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
B_j			0.029		0.071		0.155		0.245		0.245		0.155		0.071		0.029	
$\frac{1}{N_j} B_j \sum_i (K_r)_{ij}^2$			0.017		0.047		0.112		0.227		0.254		0.171		0.073		0.023	
																	$\sum_j \frac{1}{N_j} B_j \sum_i (K_r)_{ij}^2$	
																	$(K_r)_{eff}$	
																	0.924	
																	0.96	

FIG.-3.2 RESULTADO DE CALCULO

3 DIFRACCION DEL OLAJE

3.1 Difracción del oleaje

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 difracción o ensayo en modelo. En caso de estimación de difracción, generalmente se considera el espectro del oleaje.

Las figuras de la difracción de rompeolas semi infinito se presentan en las Figs.- 3.10 a 3.16. En estas figuras las líneas continuas son las curvas de igual coeficiente de proporción de la altura del oleaje y las líneas punteadas son las curvas del período. $Smáx = 10, 25$ y 75 corresponden a oleaje por viento, swell disminuido y swell, respectivamente. En aguas someras se debe considerar el cambio de $Smáx$. La proporción entre la altura de ola difractada y la ola incidente es el coeficiente de difracción y se presenta como Kd . θ es la dirección de mayor ocurrencia del oleaje. Los ejes se presentan en longitudes adimensionales. En estas figuras, el oleaje reflejado detrás de rompeolas no se toma en cuenta.

Las Figs.- 3.17 a 3.20 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 período. Si se desea calcular la difracción del mismo caso de arriba cuando el oleaje incide en dirección oblicua, el cálculo numérico se hace con 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.- 3.21. Los resultados del cálculo se presentan en la Figs.- 3.22 (a) a (c) y 3.23 (a) a (c). La dirección del oleaje difractado (θ') y la dirección del oleaje incidente se presentan en la Tabla -,3.3. Con esta tabla, puede calcularse el valor de B'/L como sigue:

$$\frac{B'}{L} = \frac{B}{L} \text{sen} \theta' \quad \text{-----} \quad (3.16)$$

Después, con las Figs.- 3.17 a 3.20 se elige la que tenga el mismo valor de B'/L y utilizando la Tabla-6.3 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 - 6.3. 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 antes de la difracción. Cuando se refleja el oleaje difractado en el muelle, se debe considerar la influencia del oleaje reflejado. Cuando el valor de H_o/L_o es menor que 0.005, puede aplicarse las figuras de difracción del oleaje regular que se presentan en las Figs.- 3.24 (a) a (h) y 3.25 (a) a (h).

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

$$(Kd)_{eff} = \sqrt{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \frac{B_j}{N_j} (Kd)^2_{ij}} \quad (3.17)$$

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" éxima del oleaje

B_j : Coeficiente de energía del oleaje correspondiente a cada división de la dirección del oleaje:

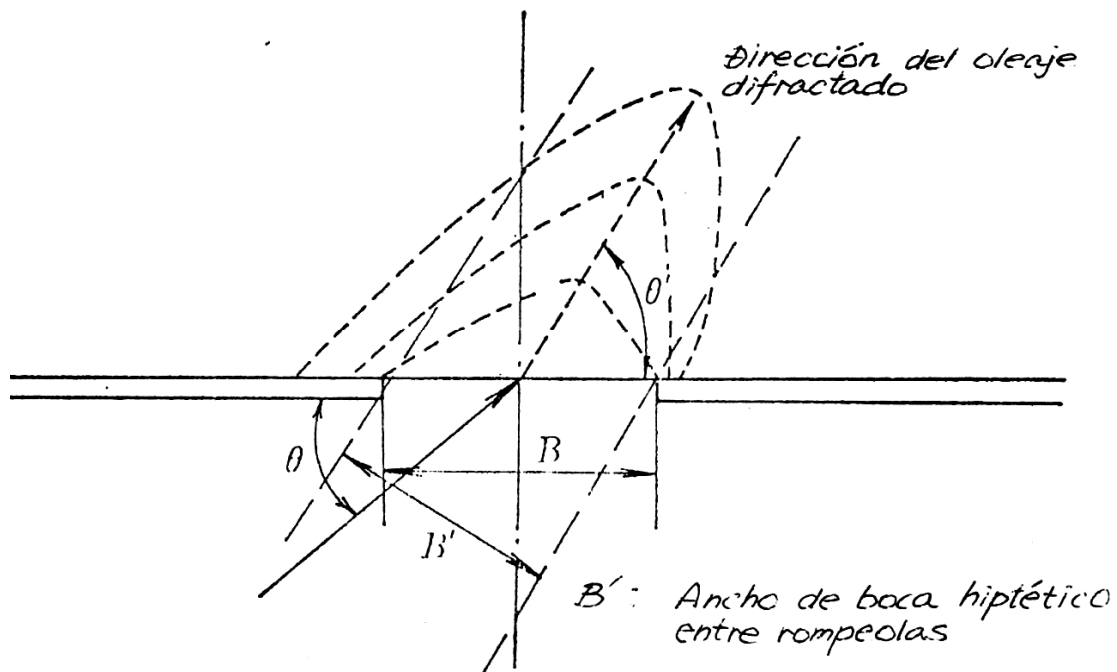


FIG.- 3.21 ANCHO DE BOCA HIPOTETICO ENTRE ROMPEOLAS (B') Y DIRECCION DEL OLAJE DIFRACTADO (θ')

TABLA -3.3 DIRECCION DEL OLEAJE DIFRACTADO

(a) $S_{\text{máx}}=10$

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°)

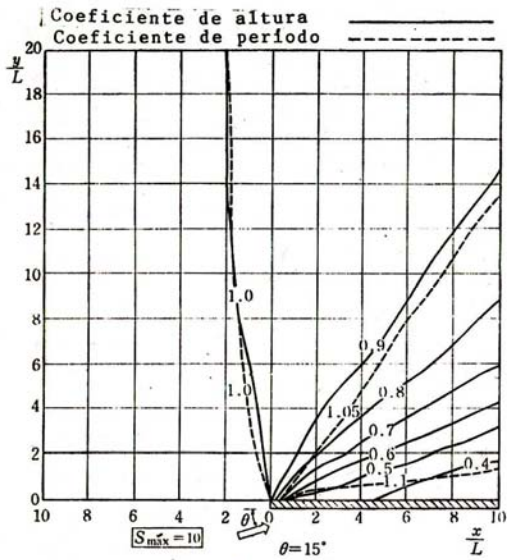
(b) $S_{\text{máx}}=25$

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) $S_{\text{máx}}=75$

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°)

(*) Se presentan los ángulos de desviación en los paréntesis



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

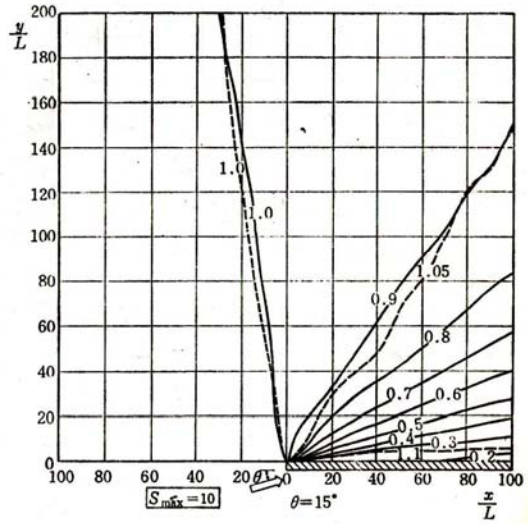
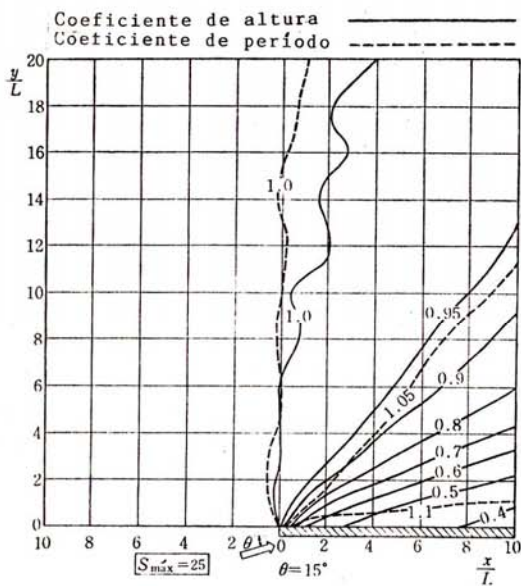


FIG.- 3.10 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 15^\circ$)



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

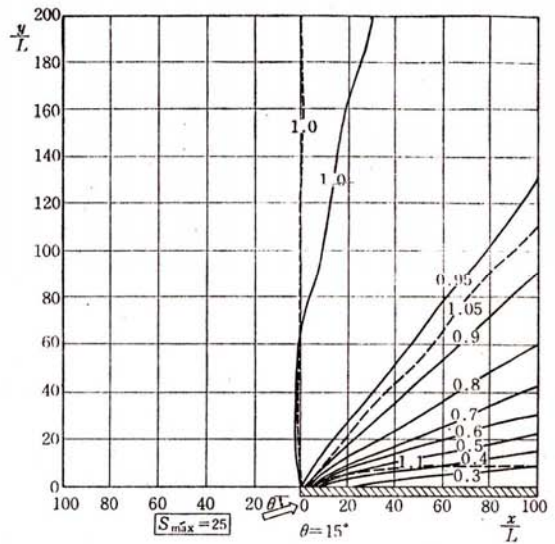
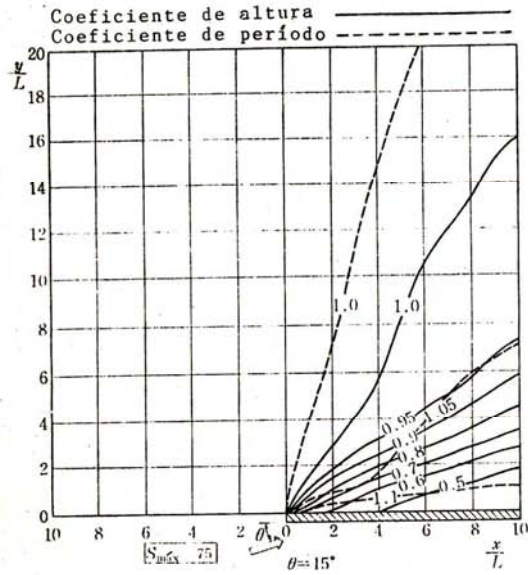


FIG.- 3.10 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 15^\circ$)



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

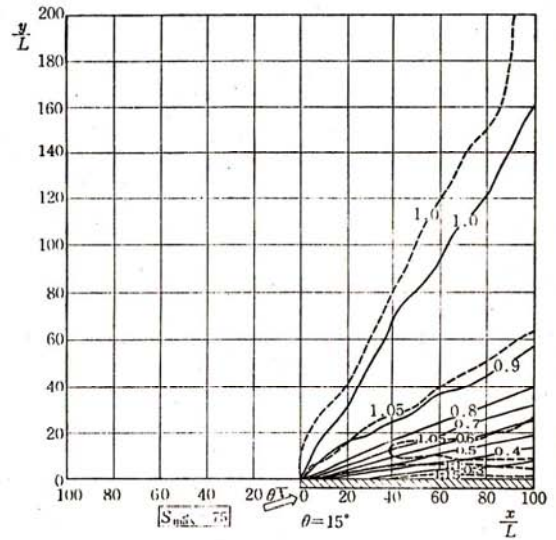
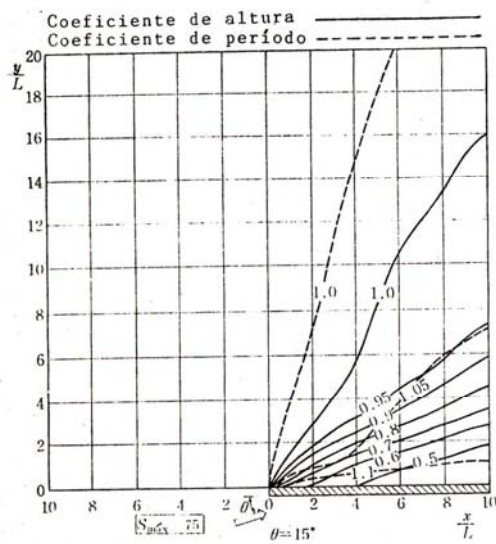


FIG.- 3.10 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 15^\circ$)



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

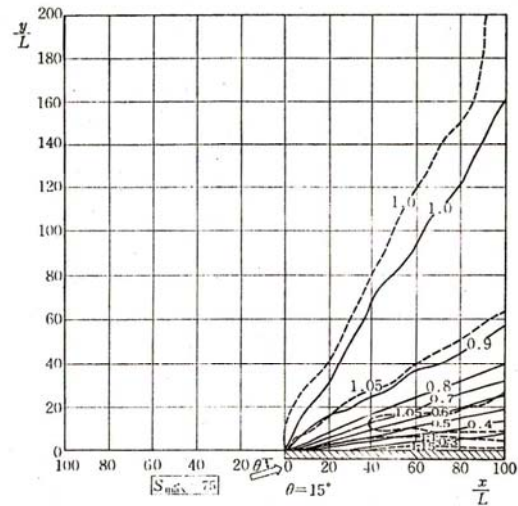
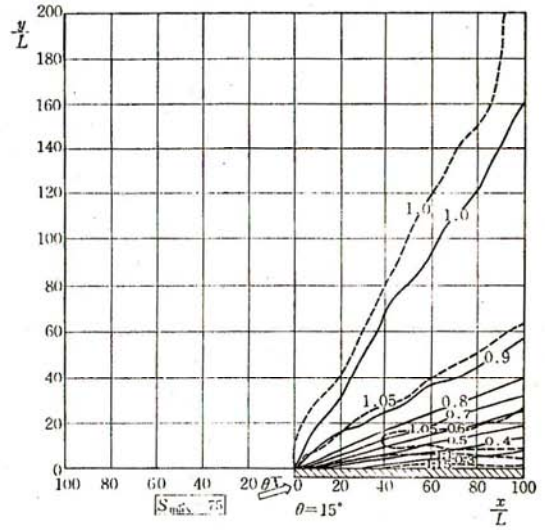
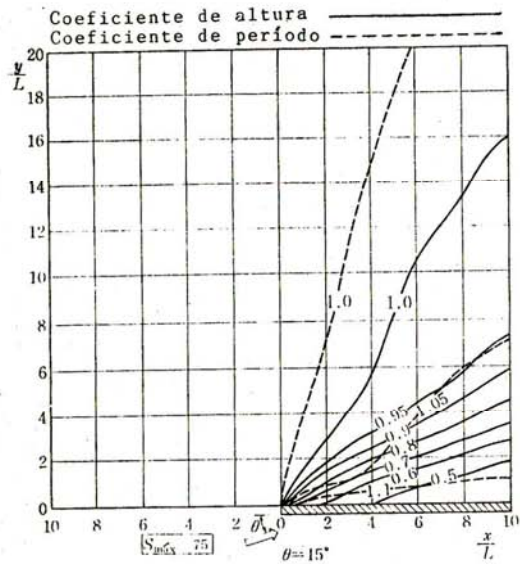
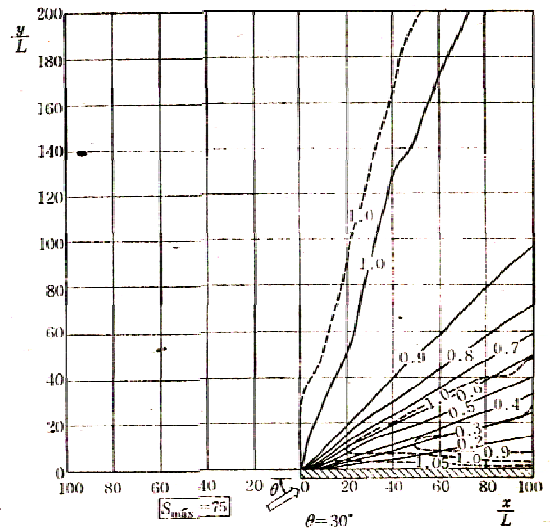
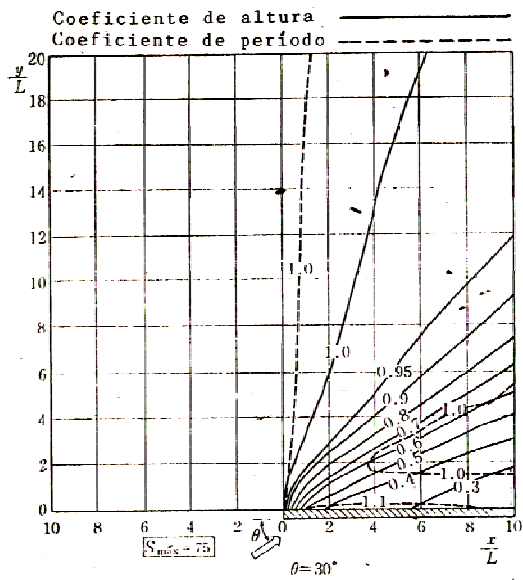


FIG.- 3.11 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 30^\circ$)



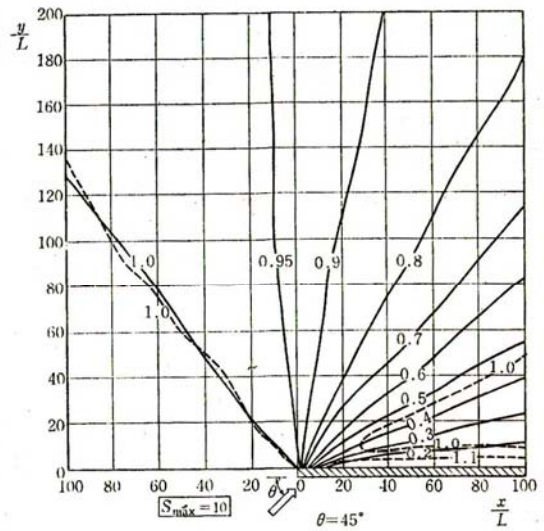
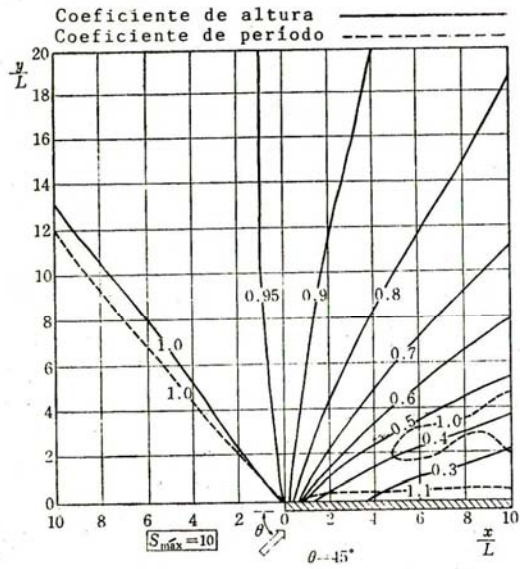
(c) $S_{m\acute{a}x} = 75$

FIG.- 3.11 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 30^\circ$)



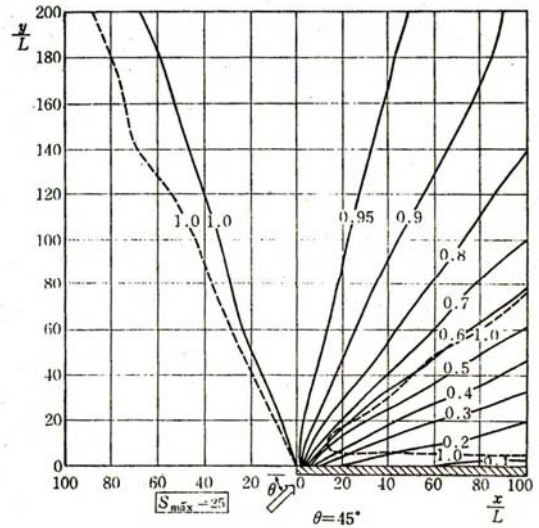
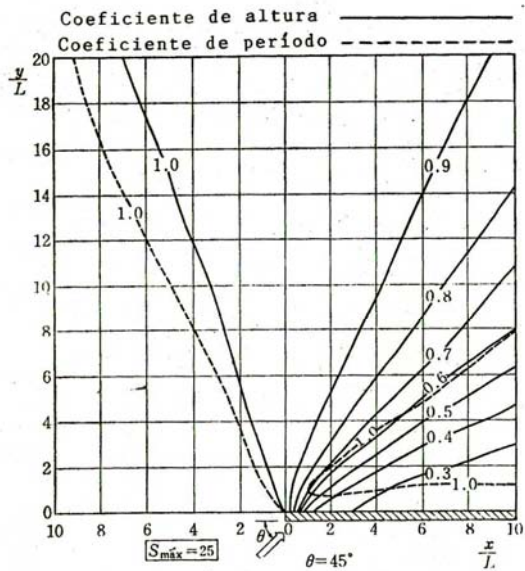
(c) $S_{m\acute{a}x} = 75$

FIG.- 3.11 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 30^\circ$)



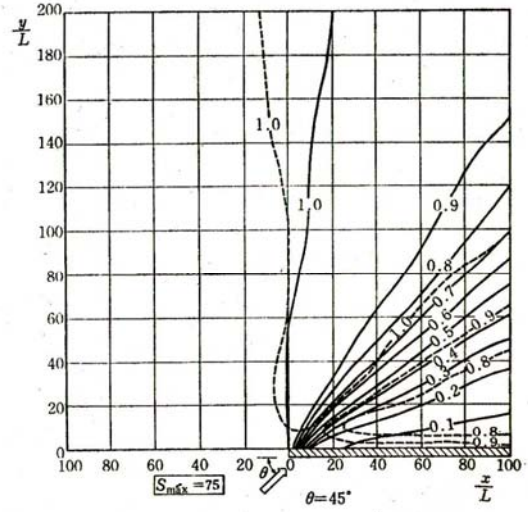
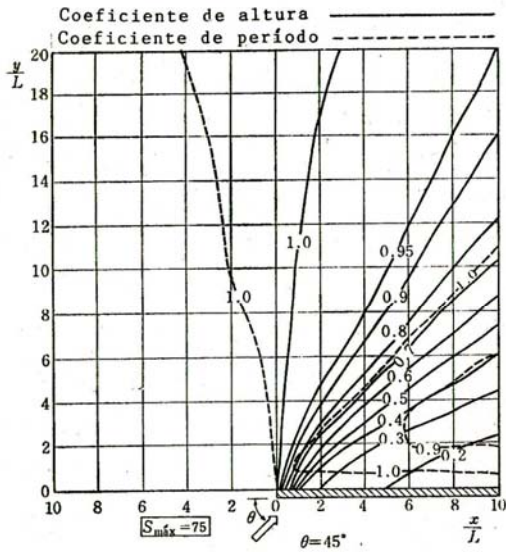
(a) $S_{m\acute{a}x}=10$

FIG.- 3.12 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 45^\circ$)



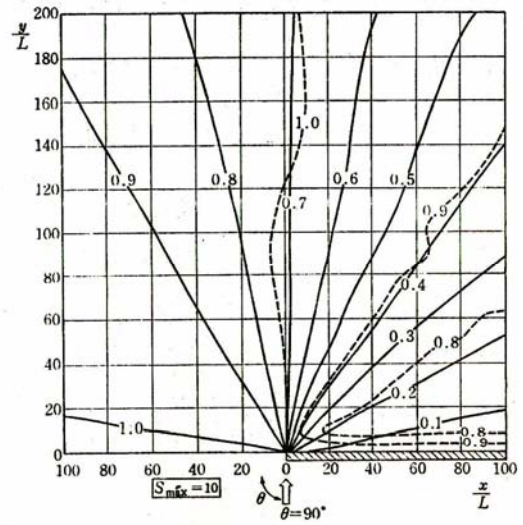
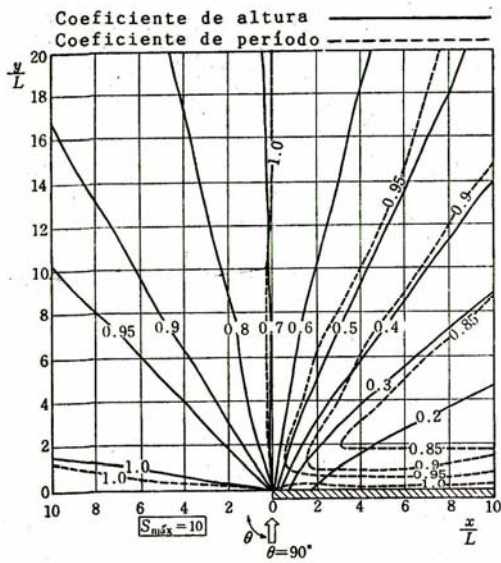
(b) $S_{m\acute{a}x}=25$

FIG.- 3.12 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 45^\circ$)



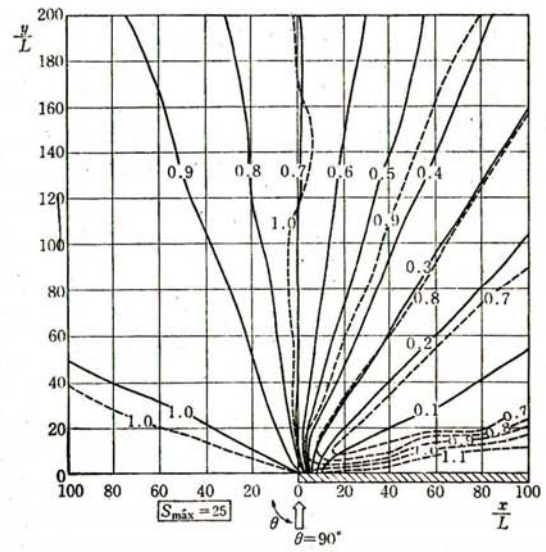
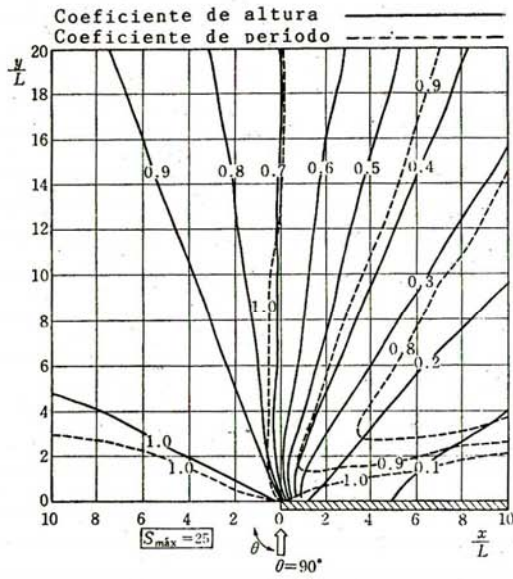
(e) $S_{m\acute{a}x} = 75$

FIG.- 3.12 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 45^\circ$)



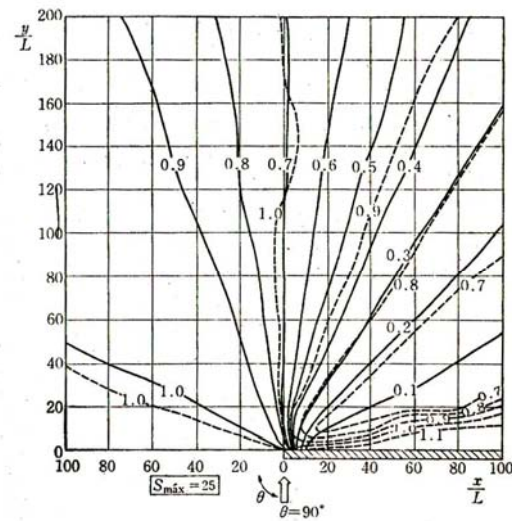
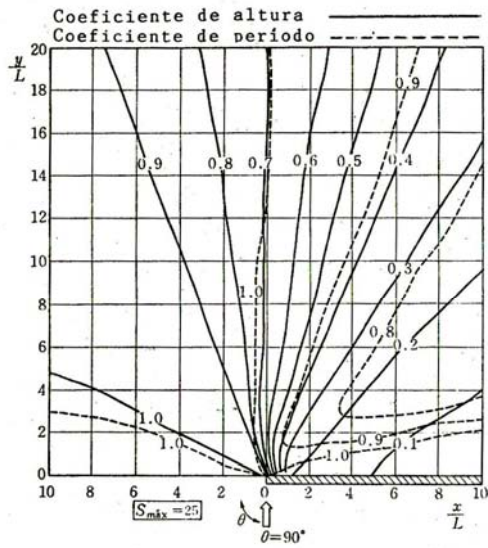
(a) $S_{m\acute{a}x} = 10$

FIG.- 3.13 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 90^\circ$)



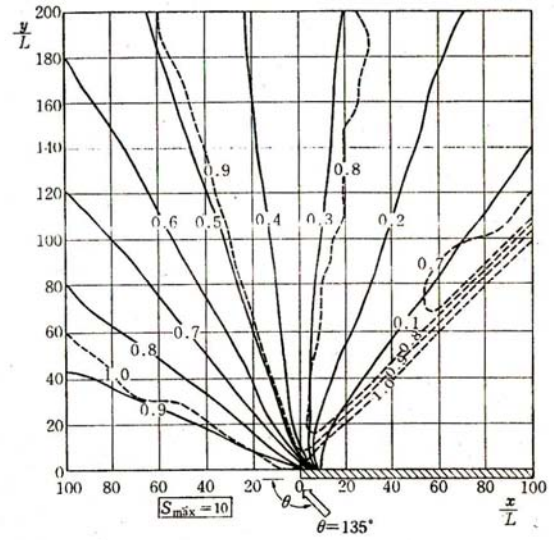
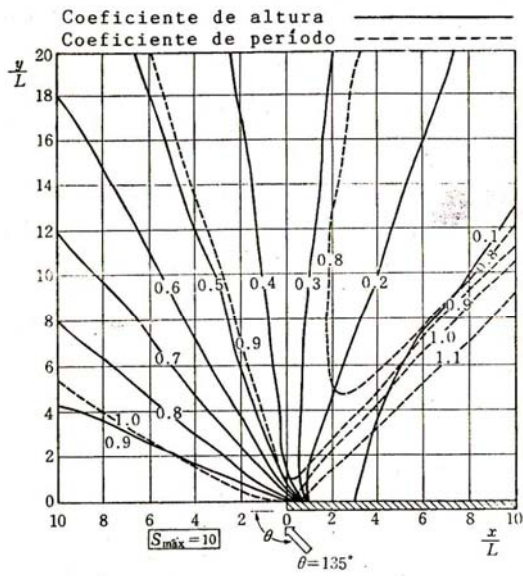
(b) $S_{m\acute{a}x} = 25$

FIG.-3.13 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 90^\circ$)



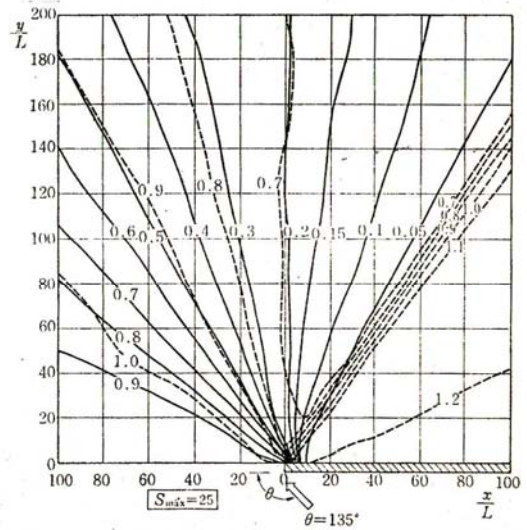
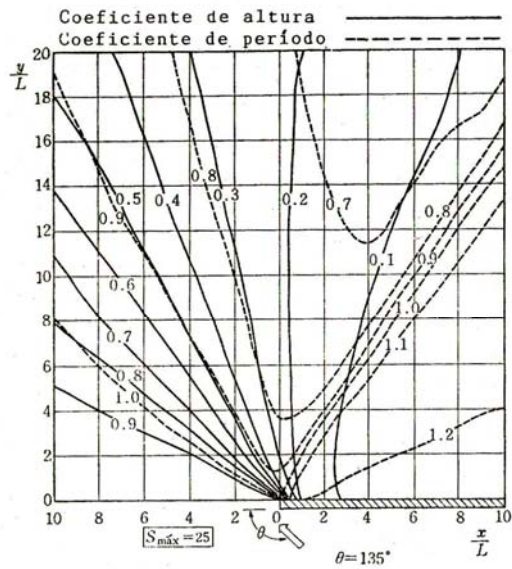
(b) $S_{m\acute{a}x} = 25$

FIG.- 3.13 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 90^\circ$)



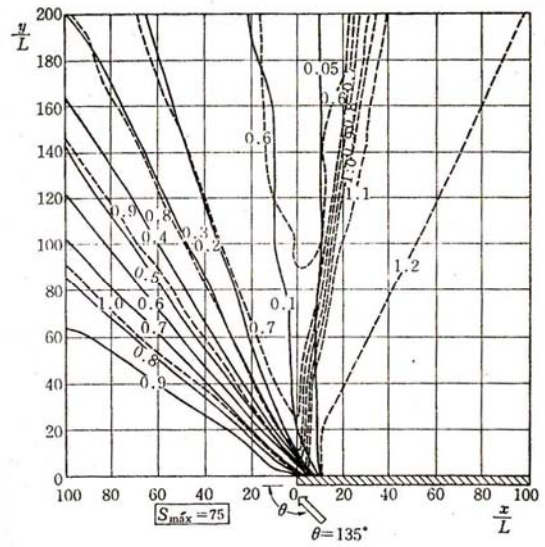
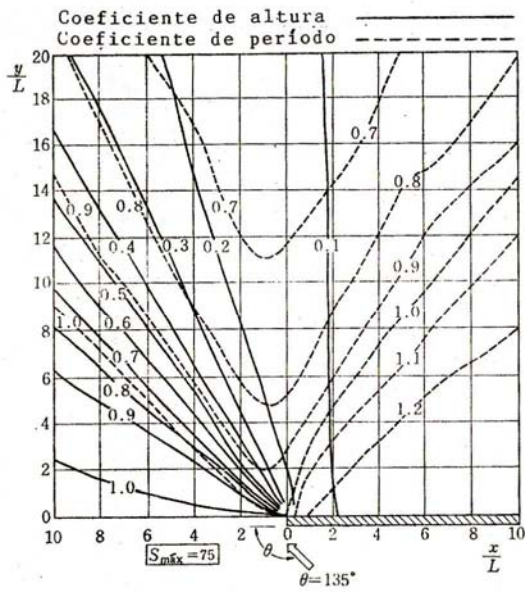
(a) $S_{m\acute{a}x}=10$

FIG.- 3.14 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 135^\circ$)



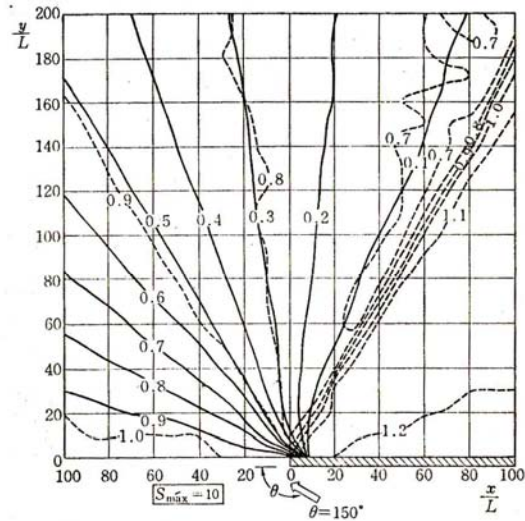
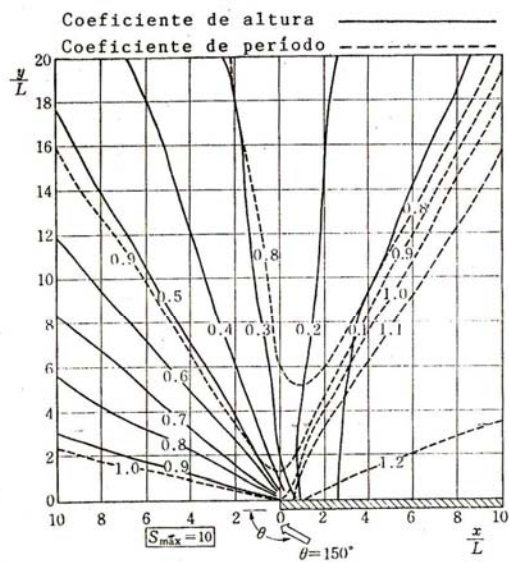
(b) $S_{m\acute{a}x}=25$

FIG.- 3.14 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 135^\circ$)



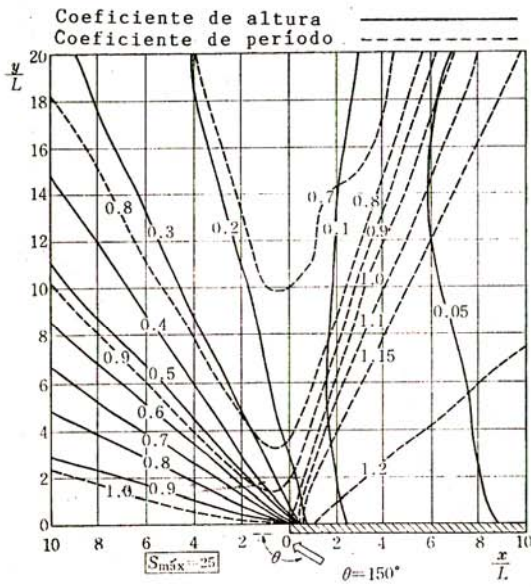
(c) $S_{máx} = 75$

FIG.- 3.14 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 135^\circ$)

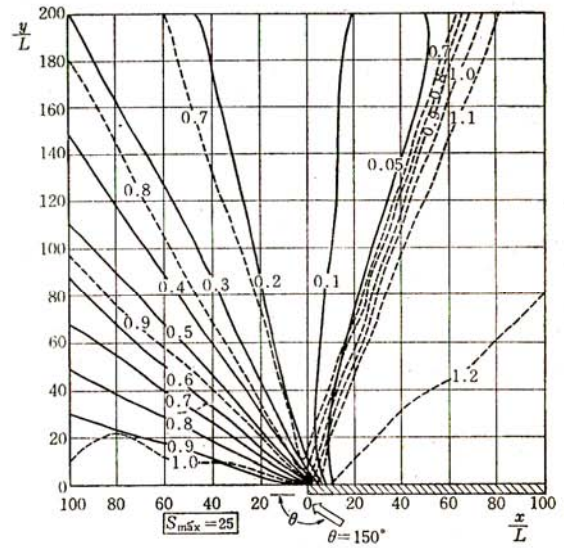


(a) $S_{máx} = 10$

FIG.- 3.15 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 150^\circ$)



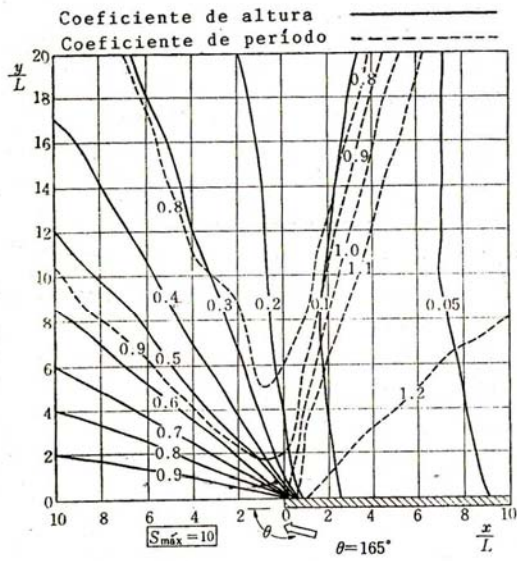
(b) $S_{m\acute{a}x}=25$



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

FIG.- 3.15 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 150^\circ$)

FIG.- 3.15 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 150^\circ$)



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

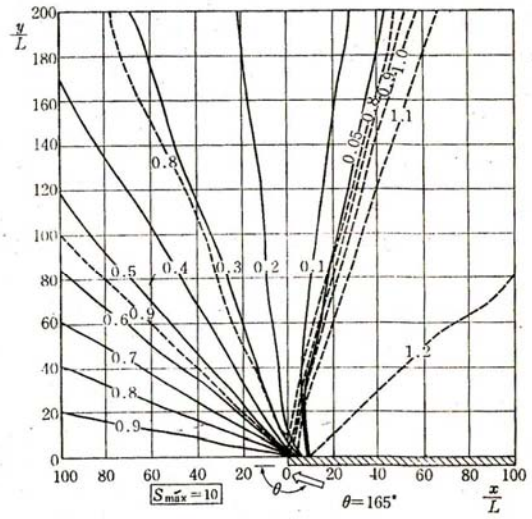
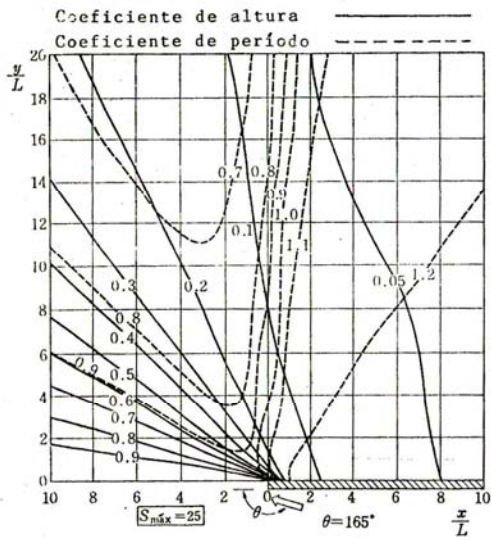


FIG.- 3.16 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 165^\circ$)



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

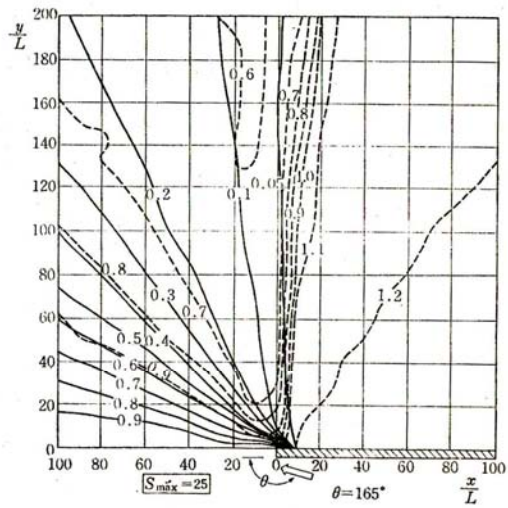


FIG.- 3.16 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 165^\circ$)

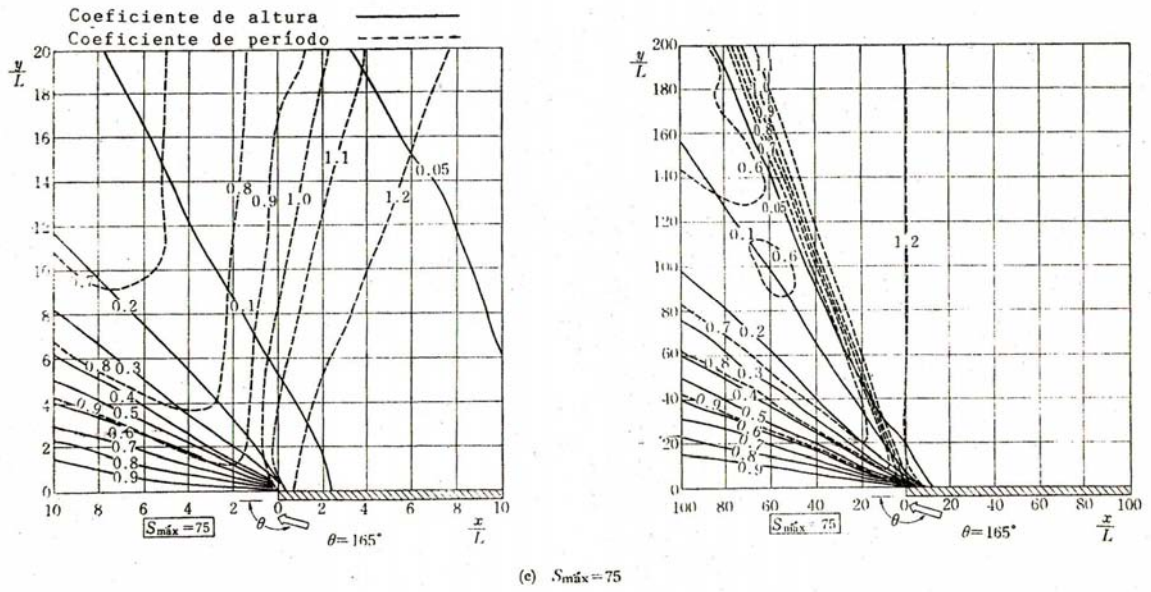


FIG.- 3.16 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UN ROMPEOLAS SEMI INFINITO ($\theta = 165^\circ$)

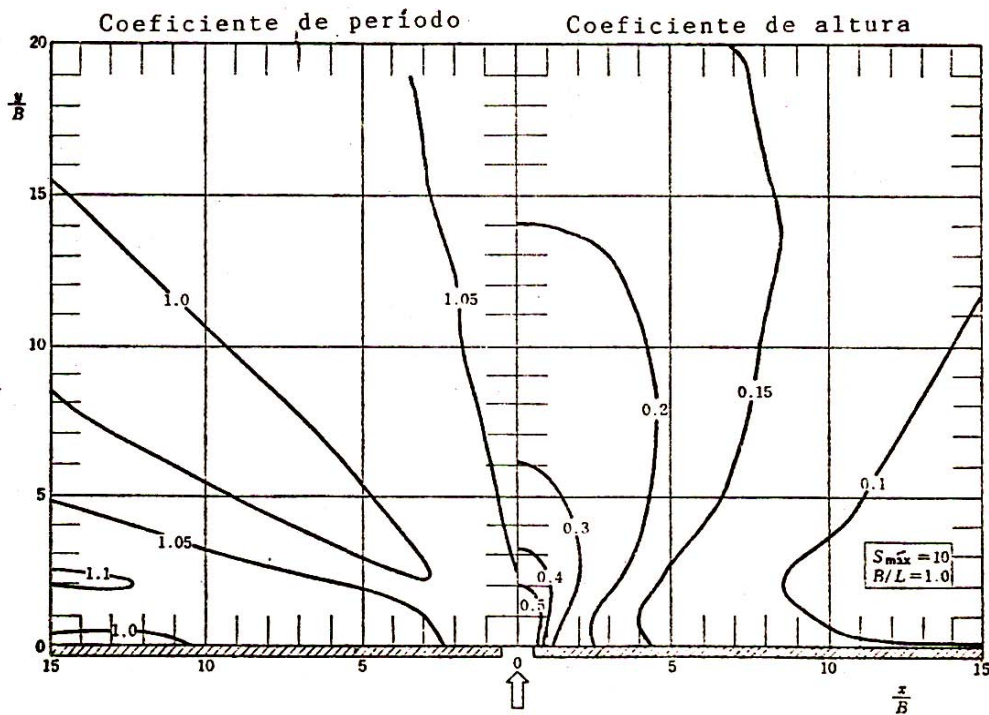
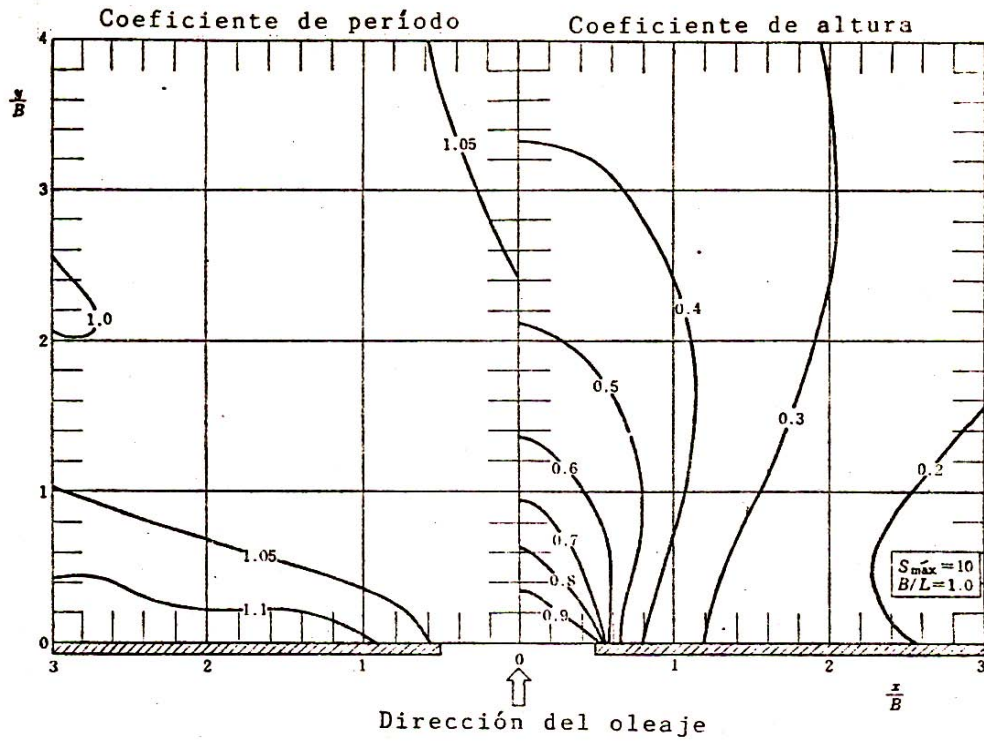


FIG.- 3.17 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS
($B/L = 1.0$. $S_{m\acute{a}x} = 10$)

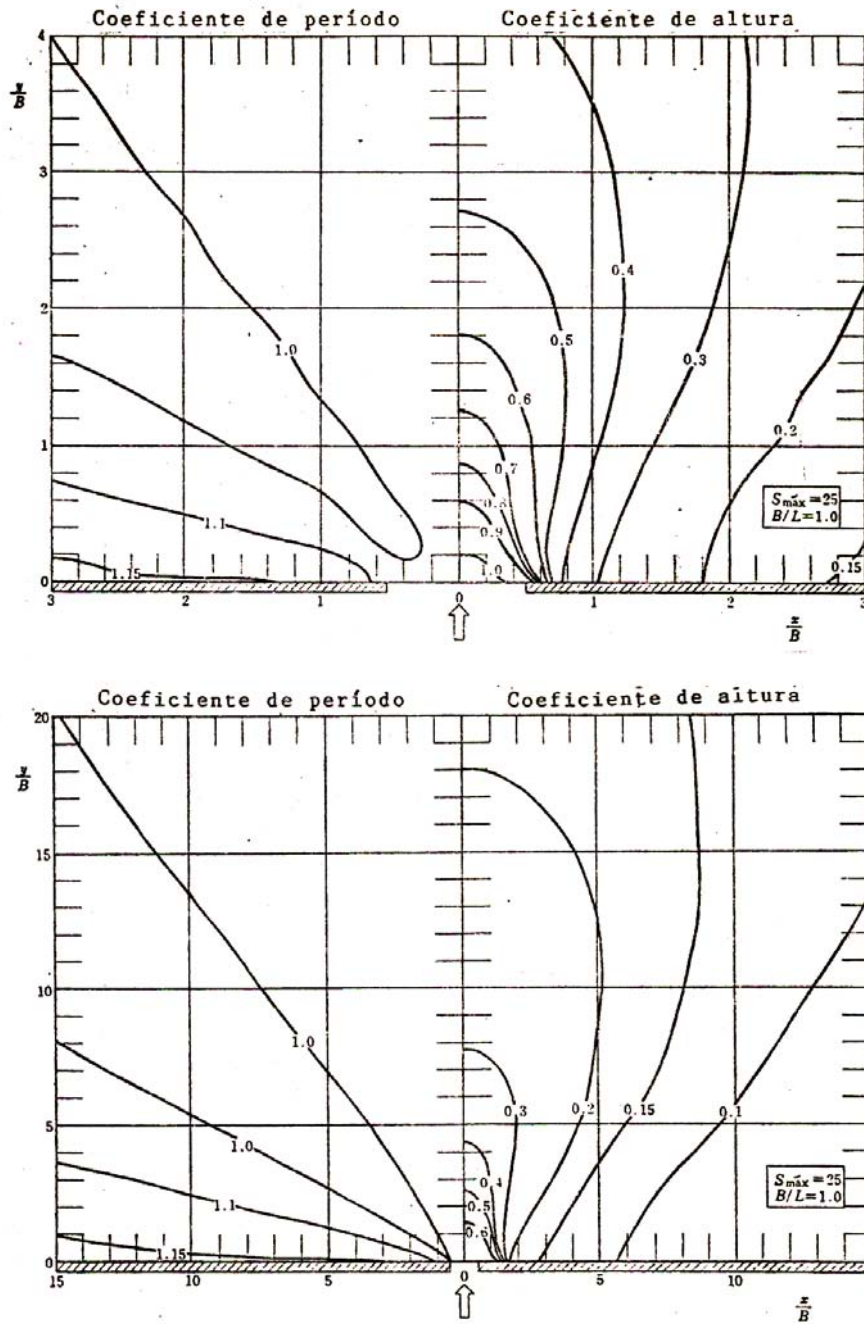


FIG.- 3.17 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS
(B/L) = 1.0. Smáx = 25)

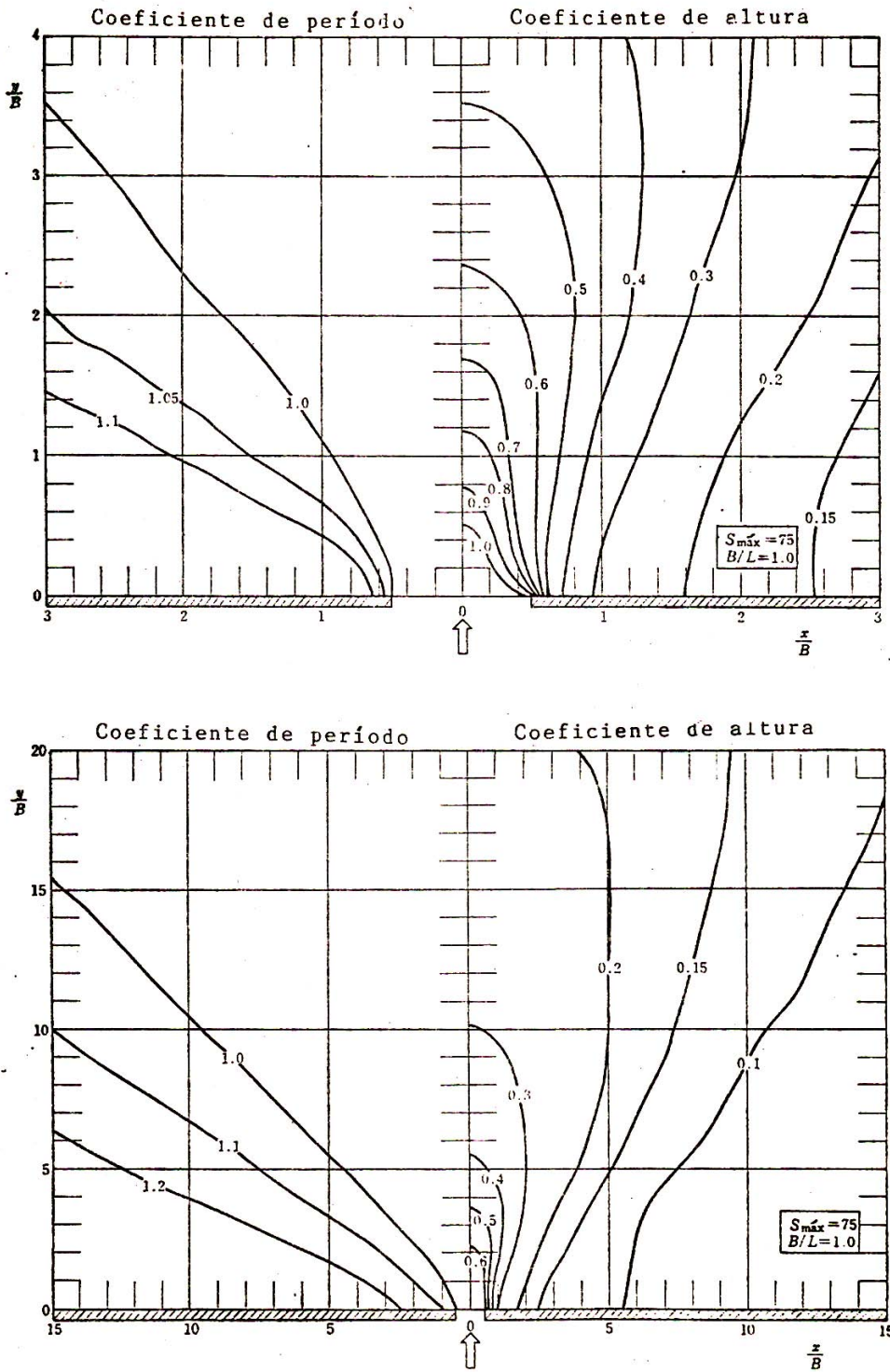


FIG. - 3.17 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS
(B/L) = 1.0. $S_{máx}$ = 75

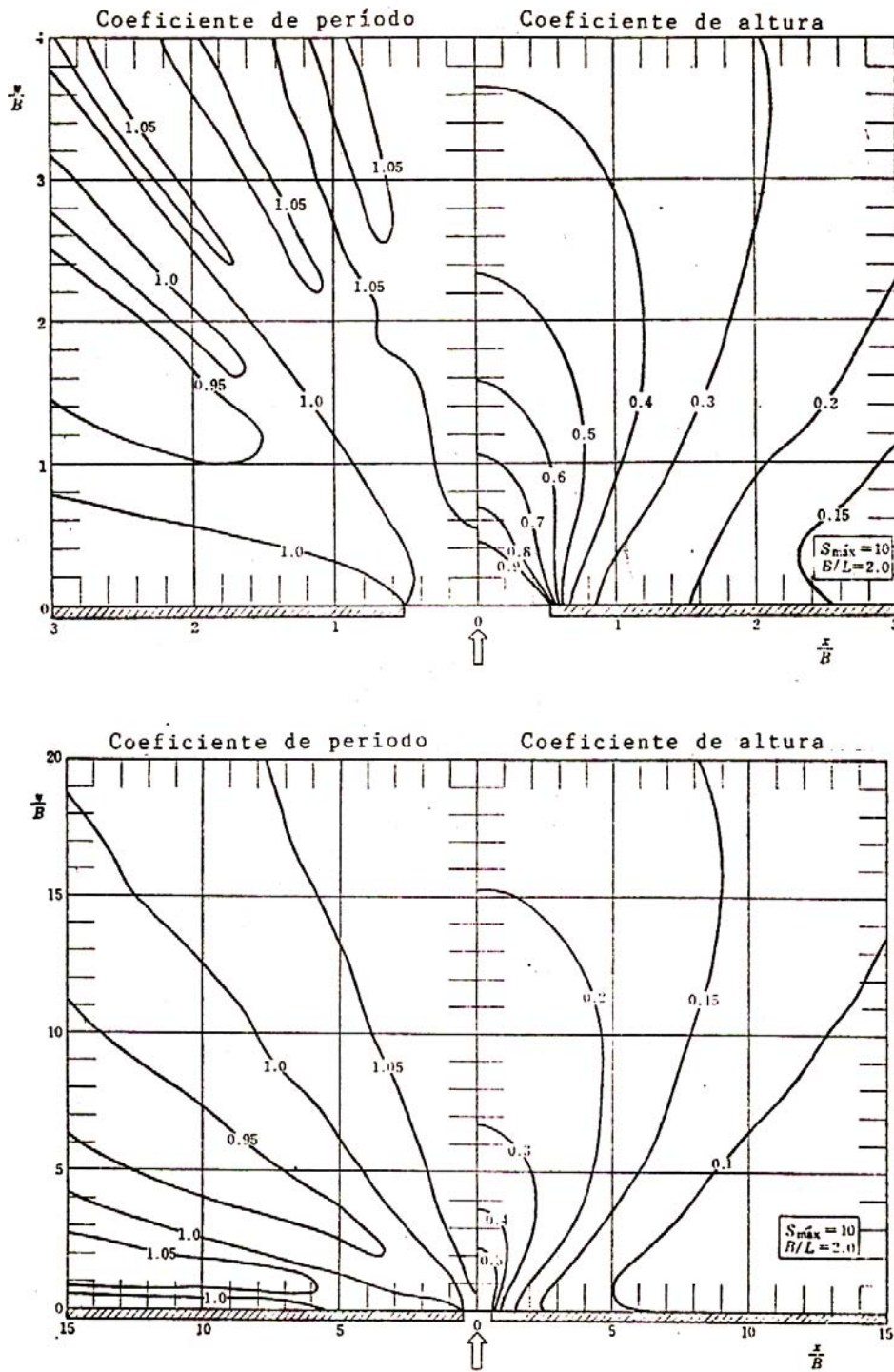


FIG.- 3.18 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS
(B/L) = 2.0. $S_{m\acute{a}x} = 10$

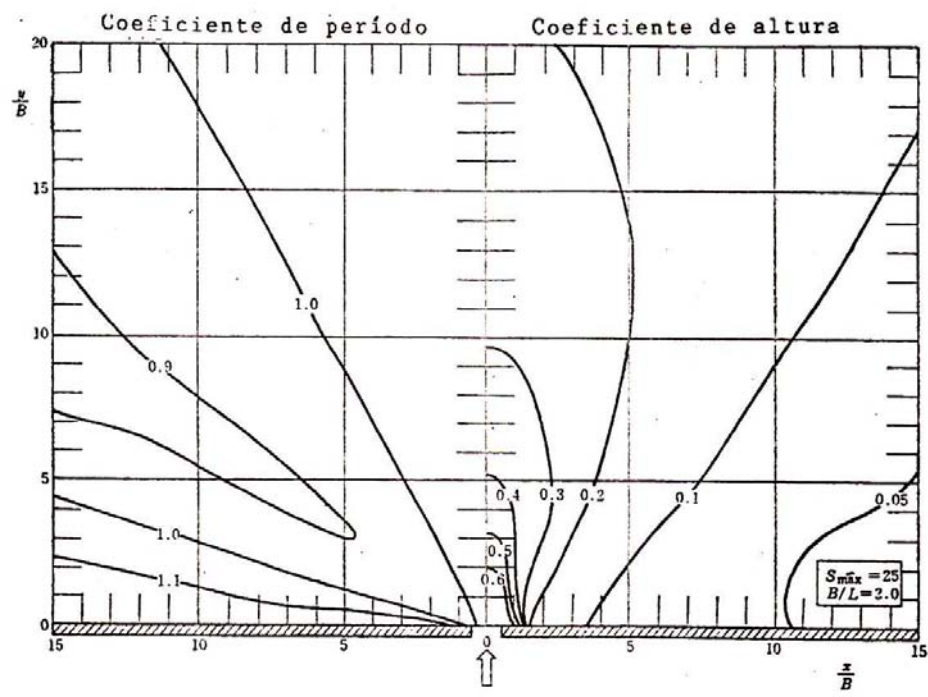
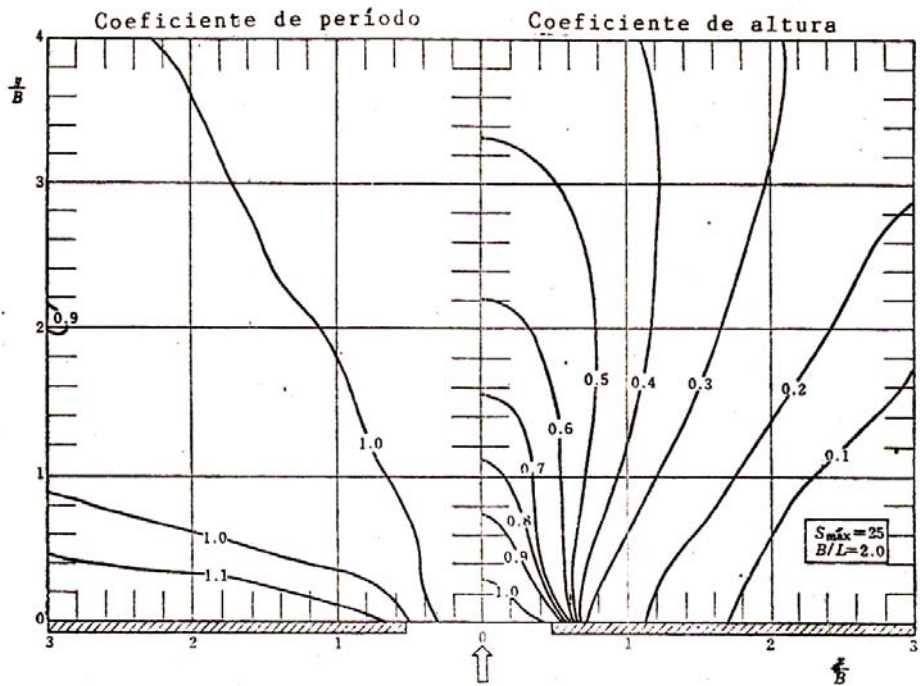


FIG.- 3.18 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS (B/L) = 2.0. $S_{m\acute{a}x} = 25$

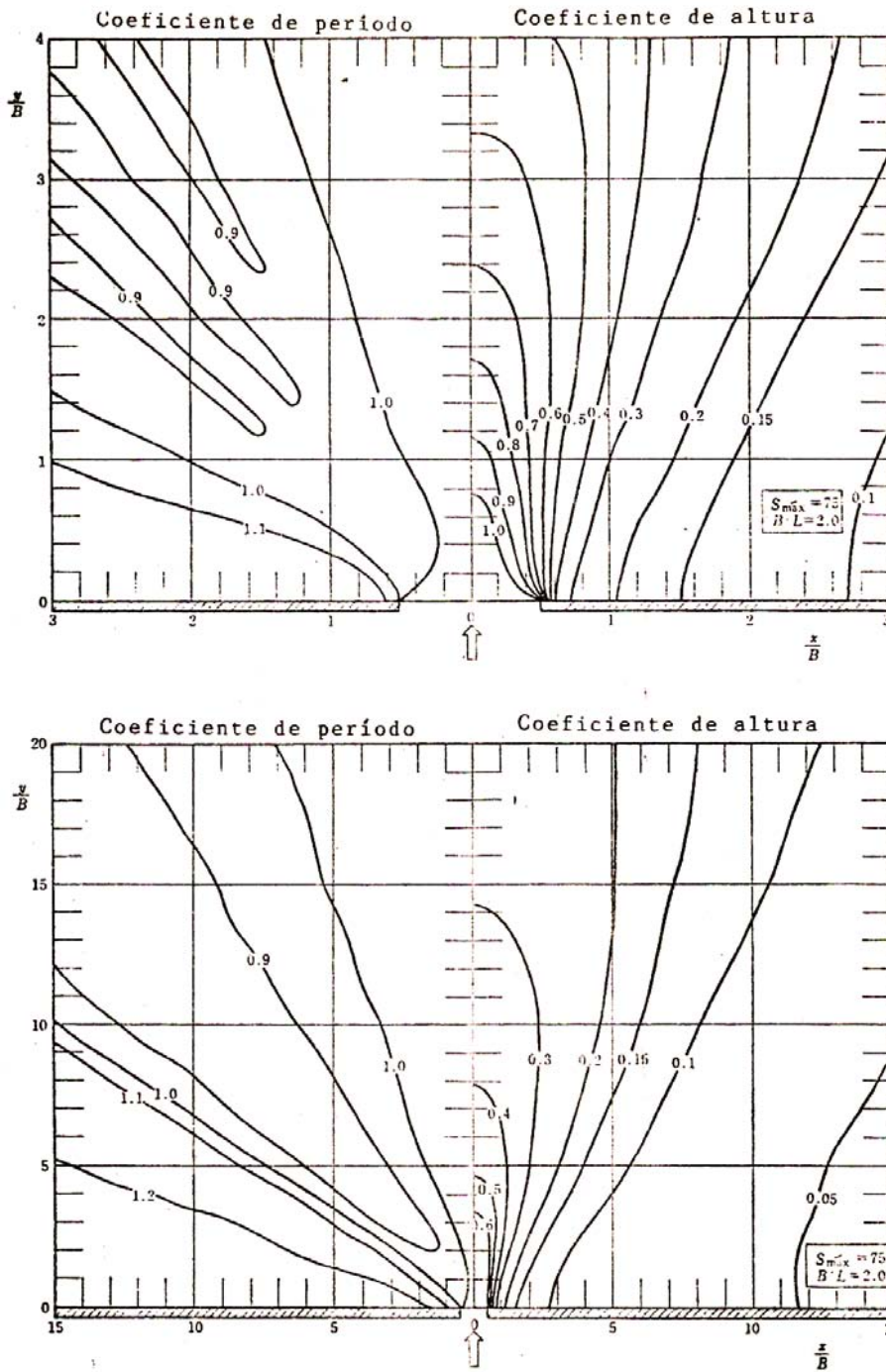


FIG.- 3.18 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS
($B/L = 2.0$. $S_{máx} = 75$)

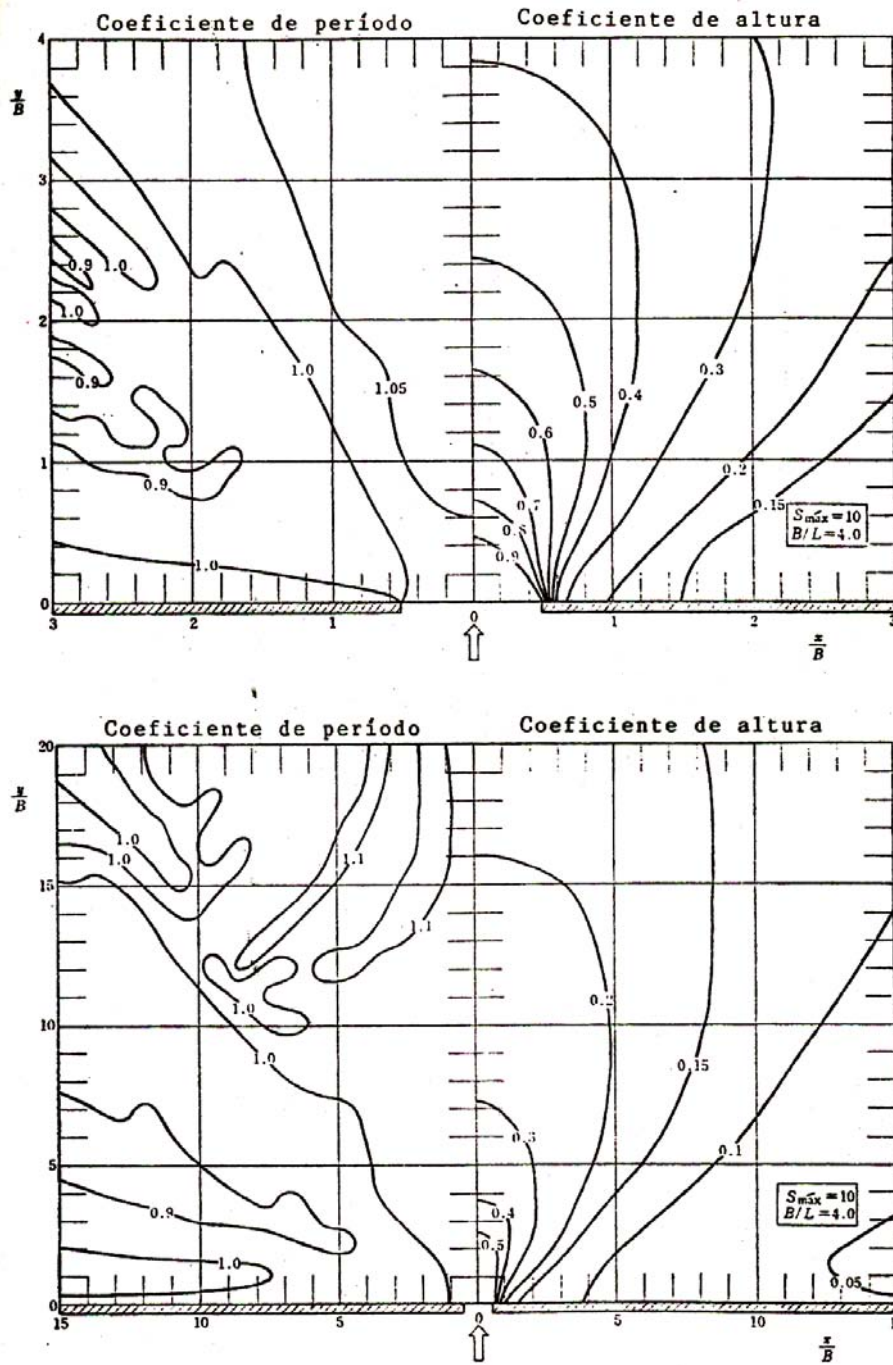


FIG.- 3.19 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS
(B/L) = 4.0. $S_{máx}$ = 10)

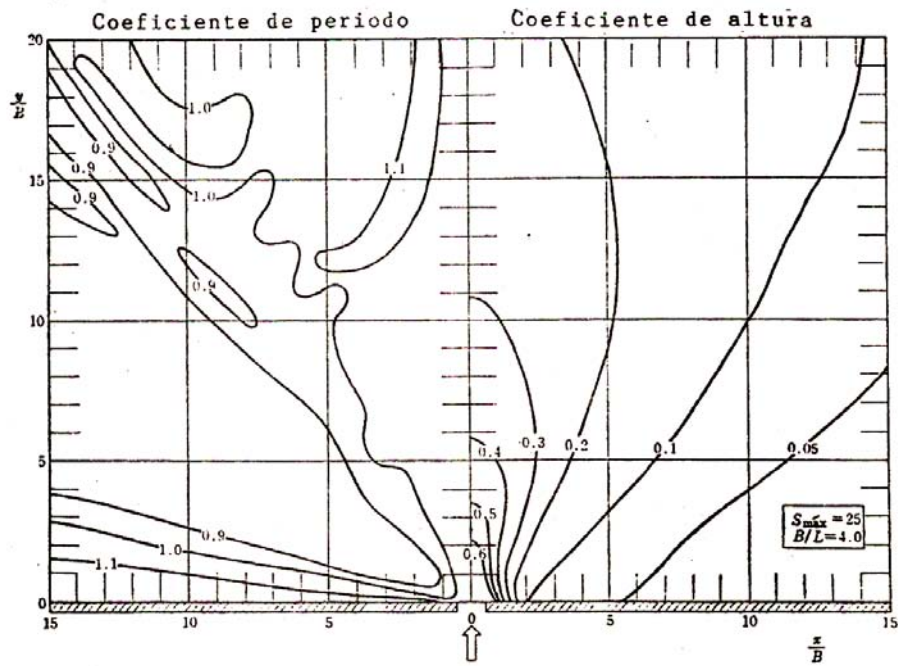
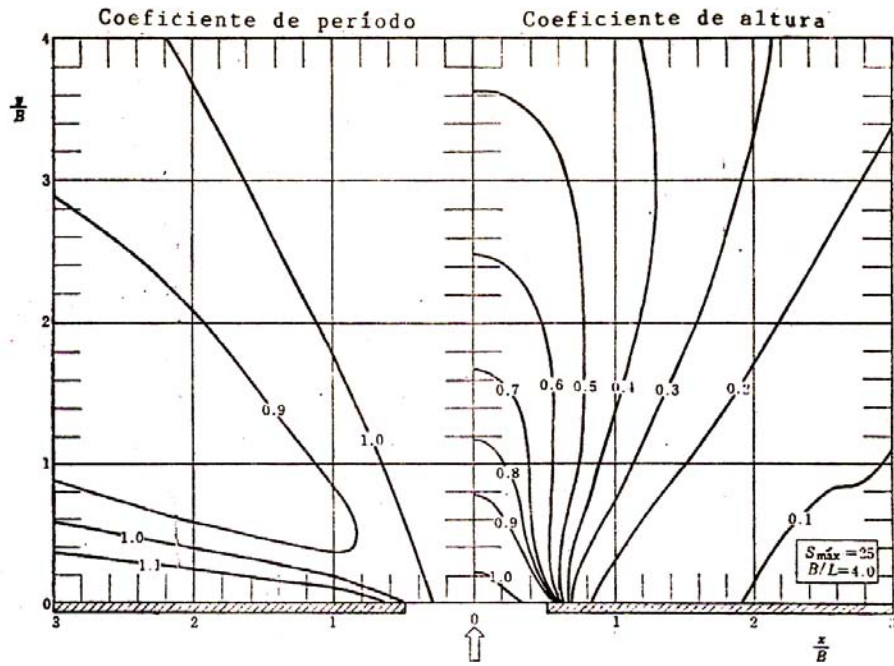


FIG.- 3.19 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS (B/L) = 4.0. Smáx = 25)

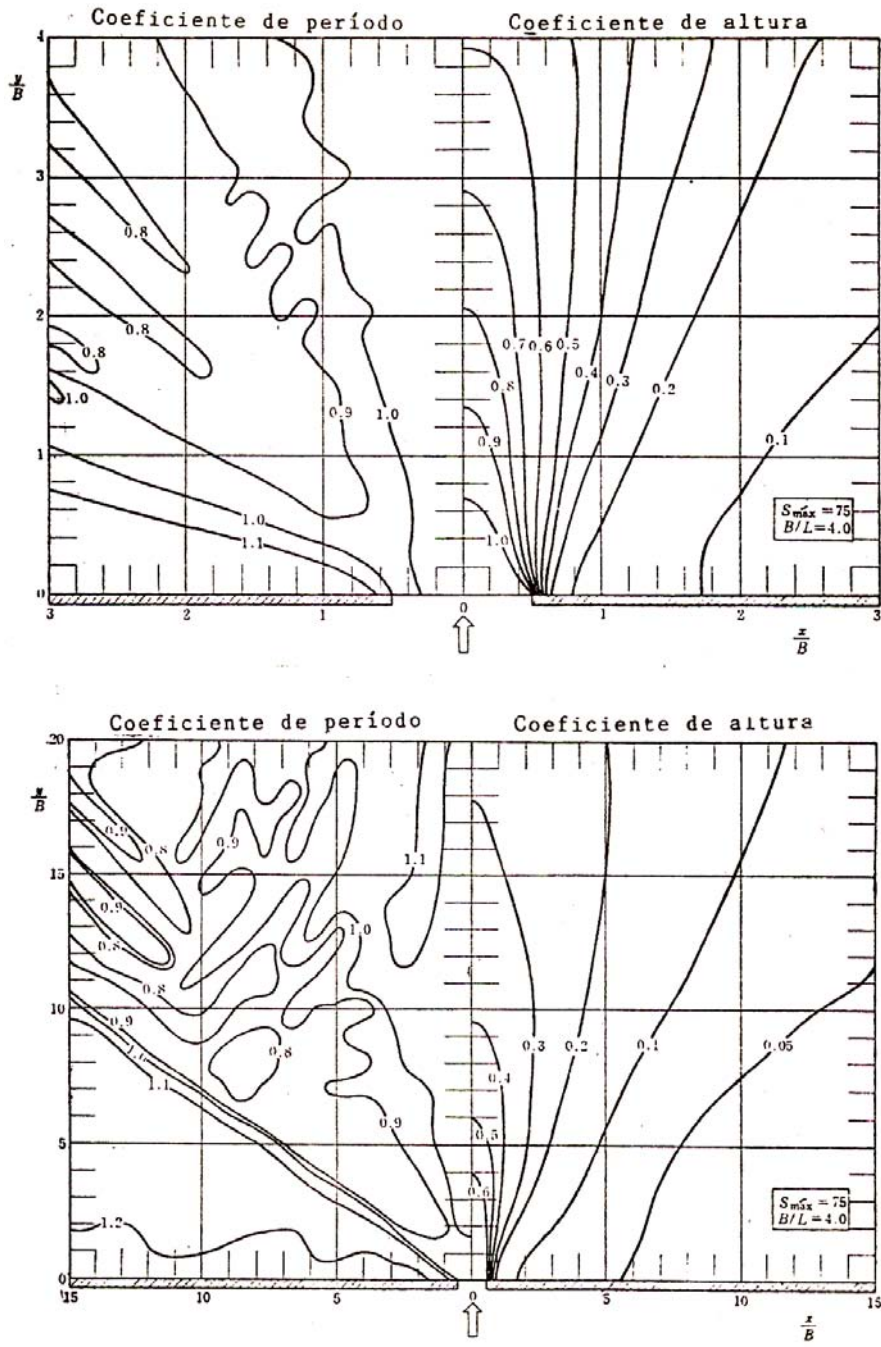


FIG.- 3.19 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS
(B/L) = 4.0. $S_{máx}$ = 75

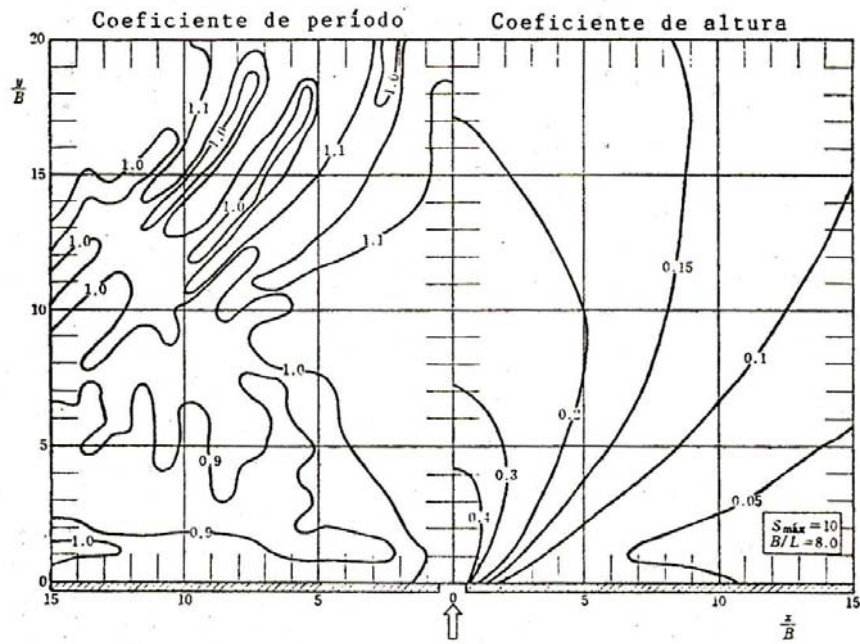
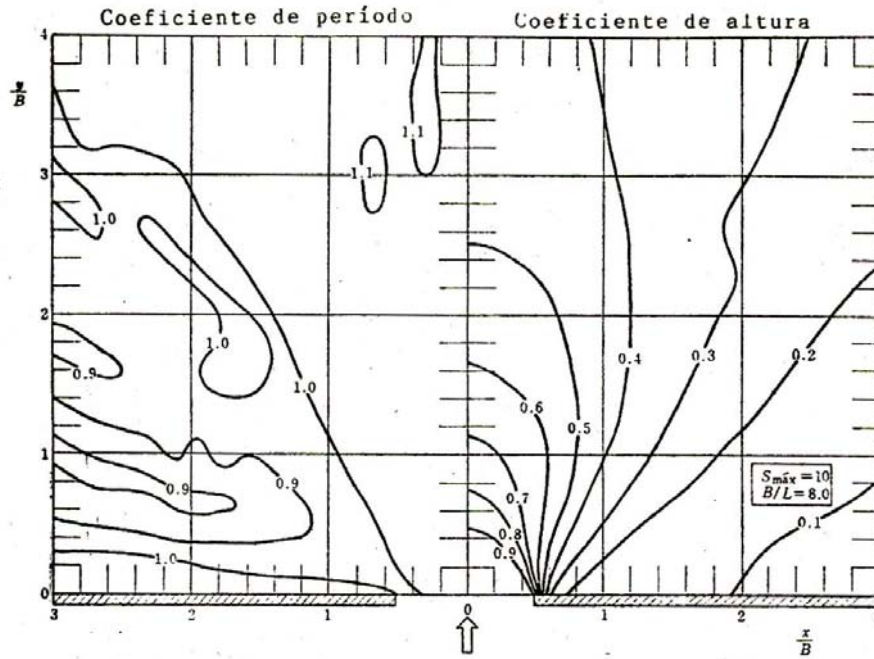


FIG.- 3.20 (a) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS
($B/L = 8.0$. $S_{máx} = 10$)

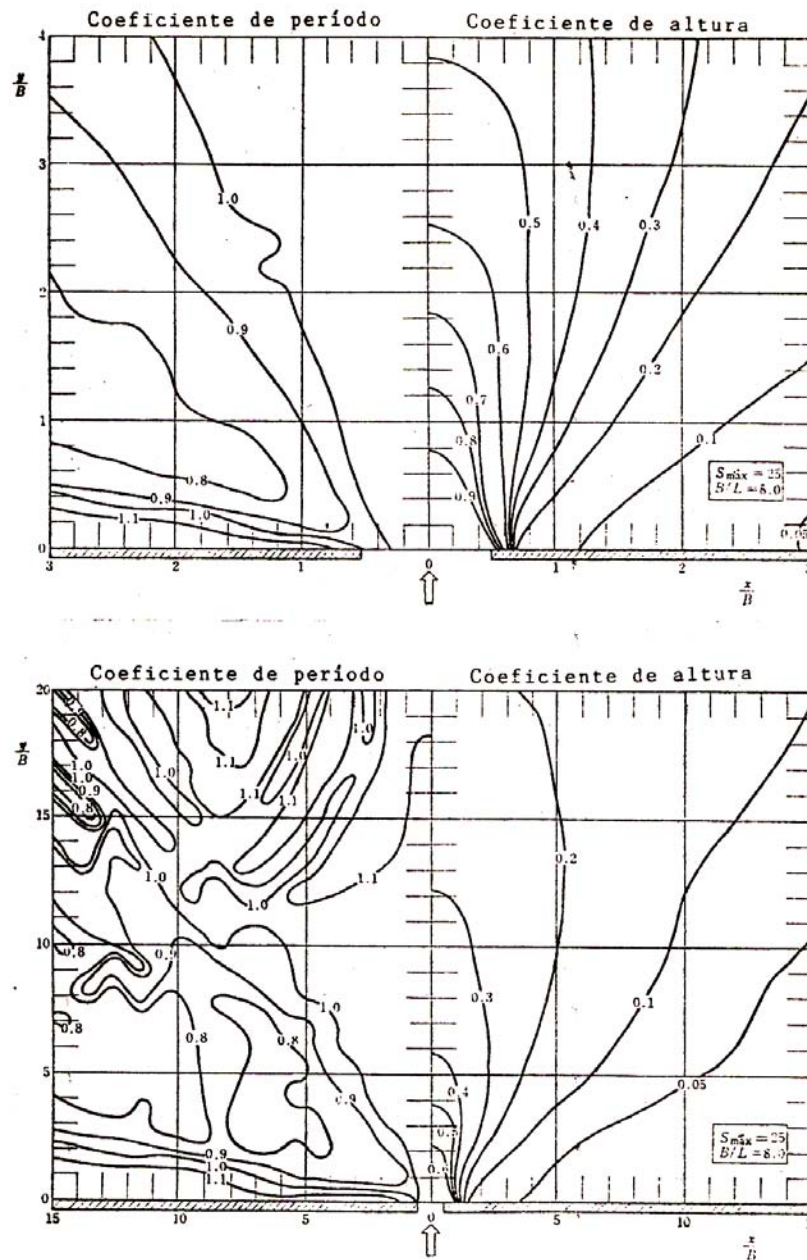


FIG.- 3.20 (b) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS (B/L) = 8.0. $S_{máx} = 25$

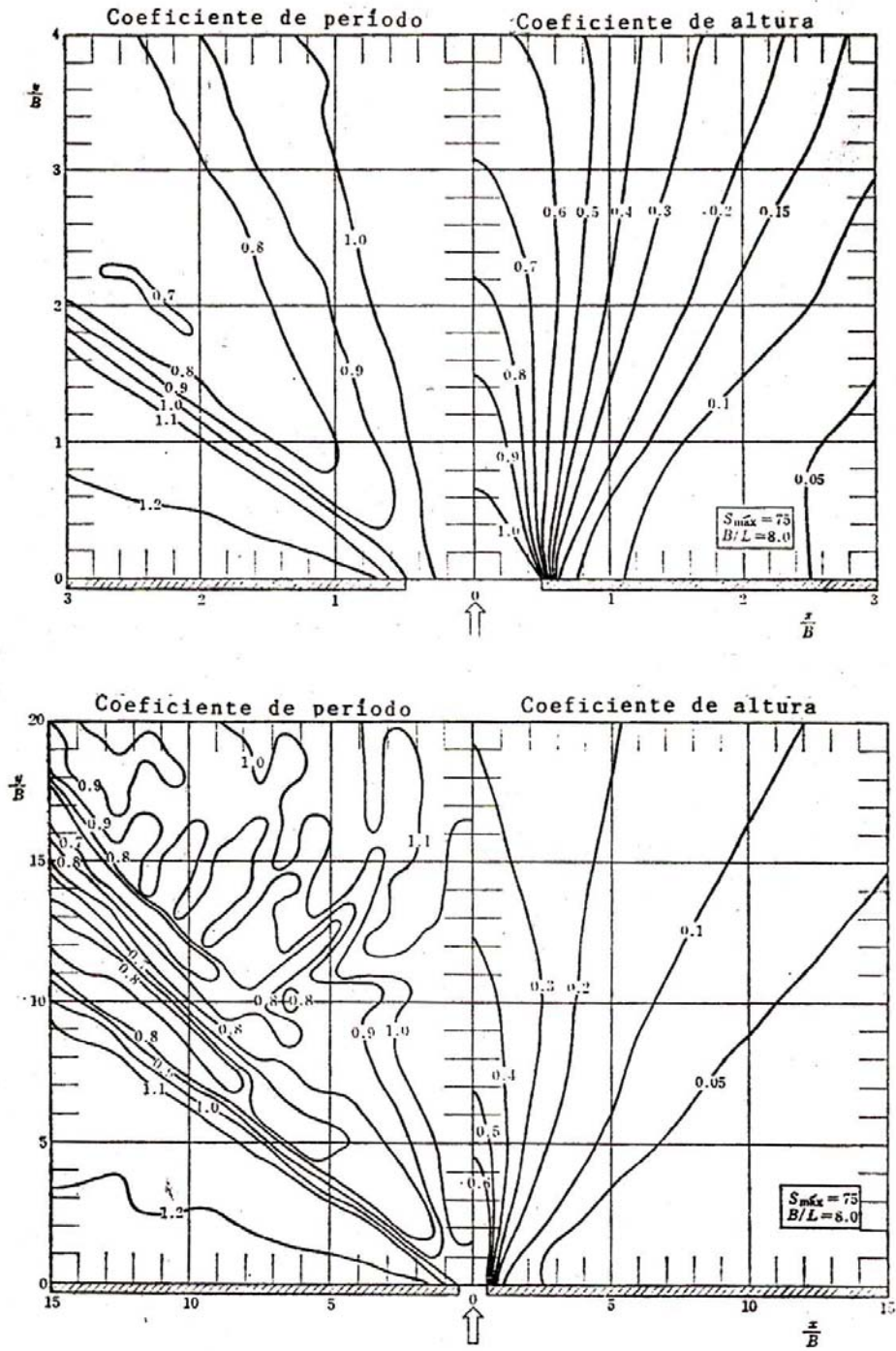


FIG.- 3.20 (c) FIGURA DE DIFRACCION EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS (B/L) = 8.0. $S_{máx} = 75$

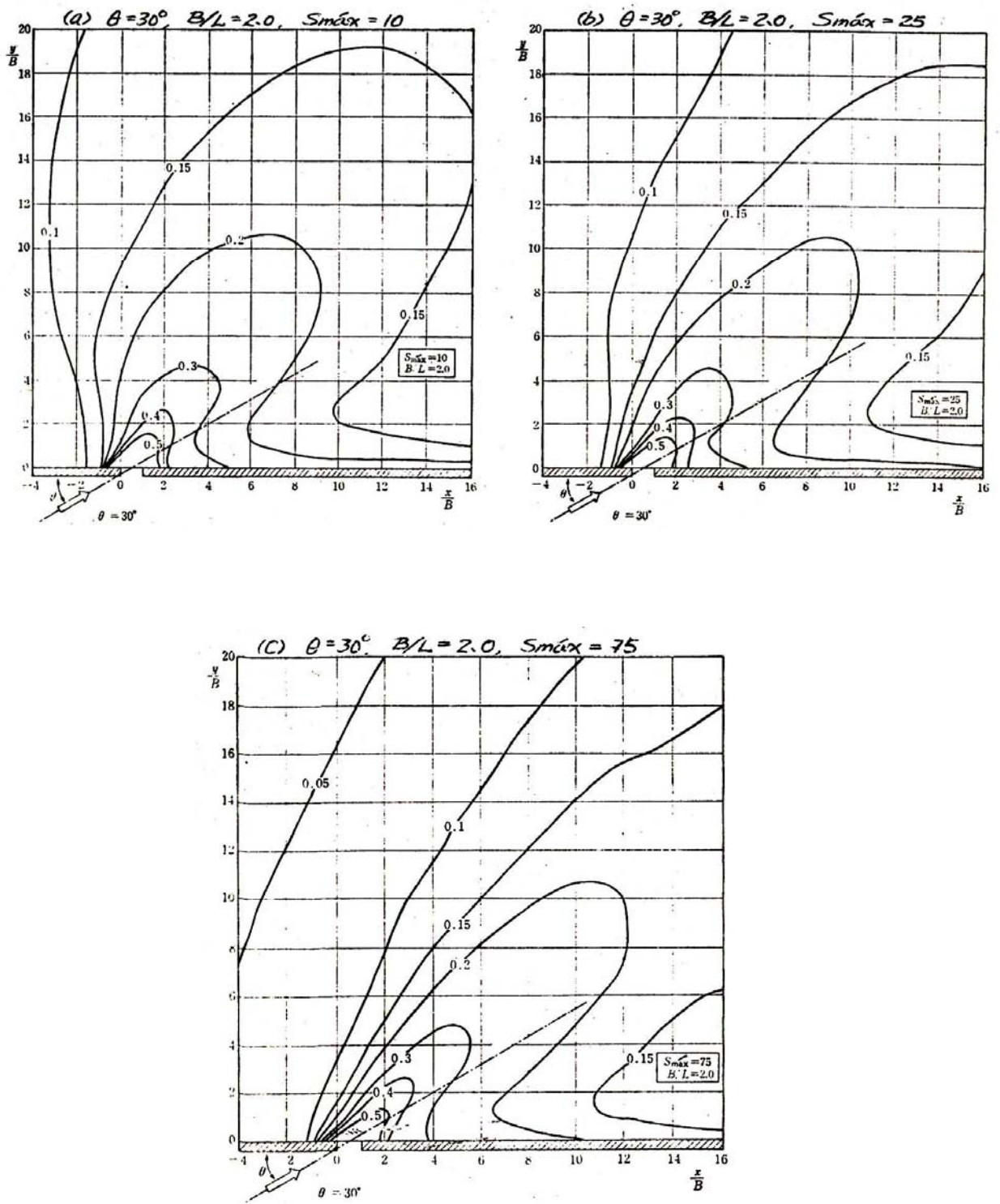


FIG.- 3.22 FIGURA DE DIFRACCION EN CASO DE QUE EL OLAJE INCIDA OBLICUAMENTE

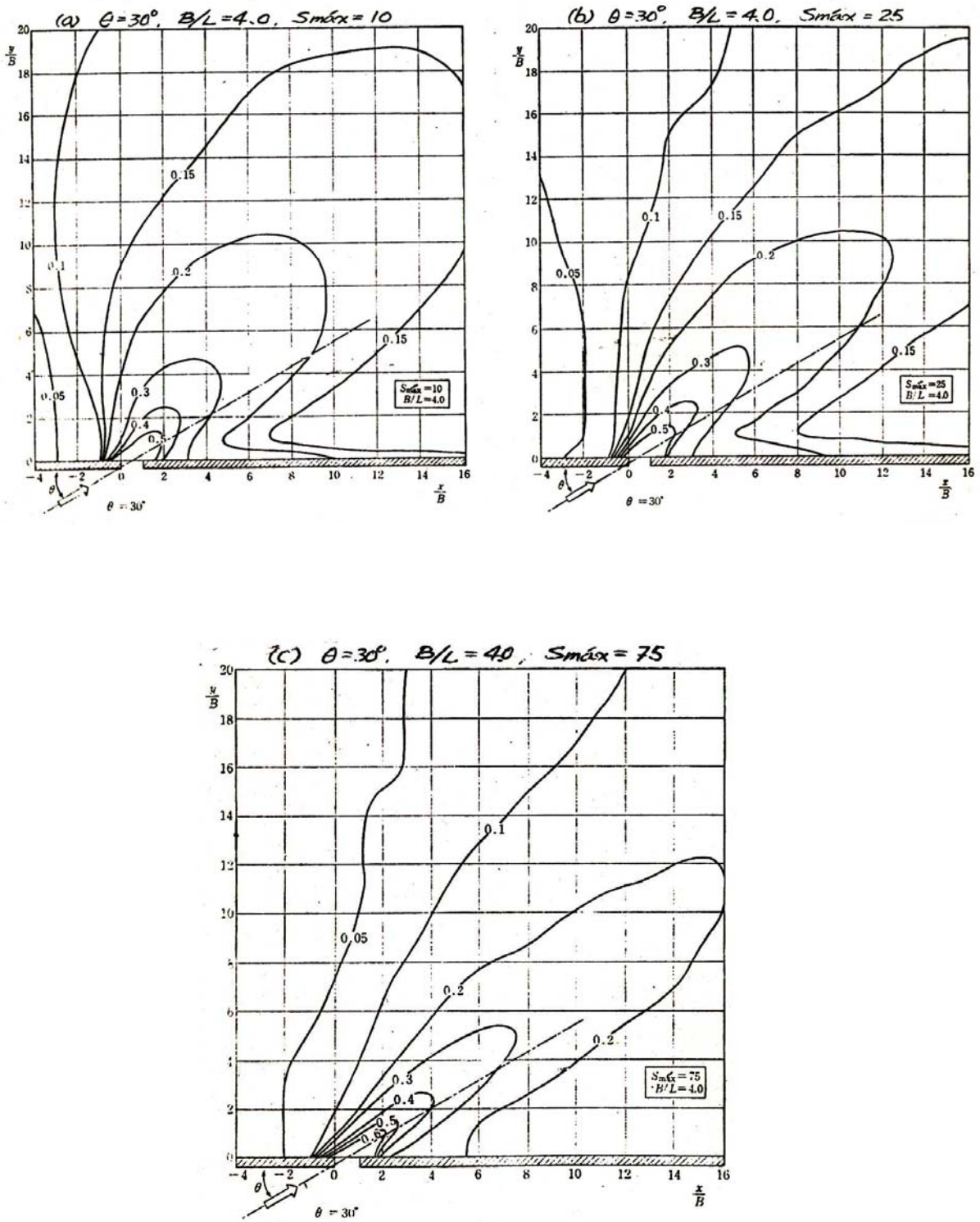
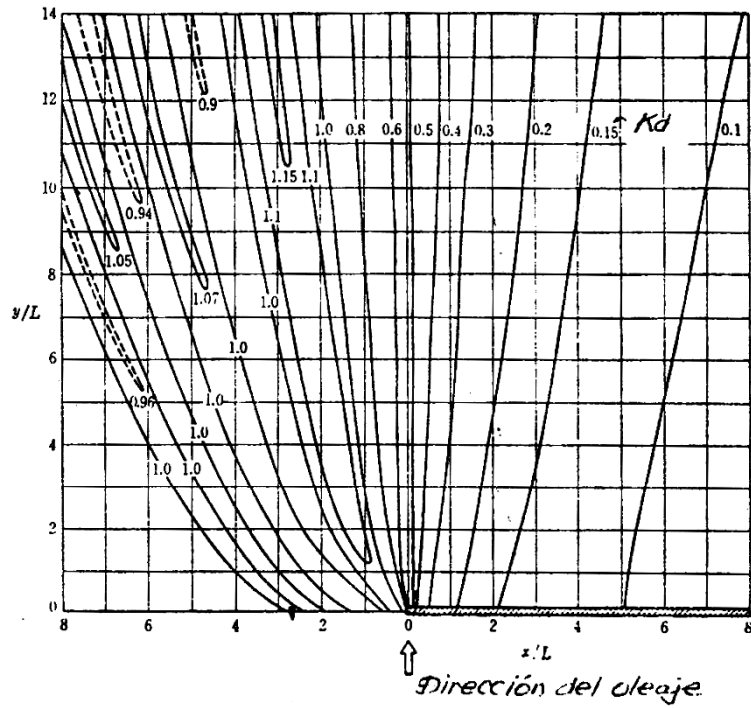
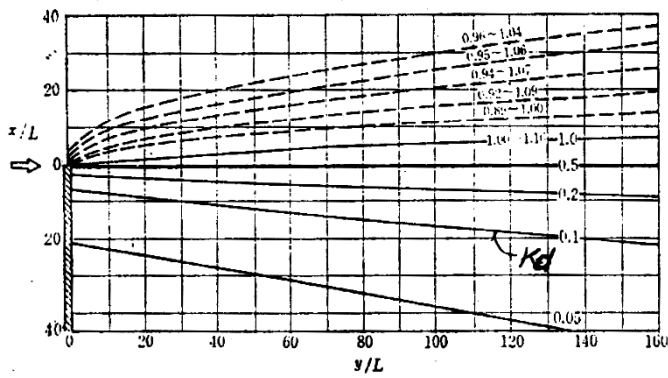


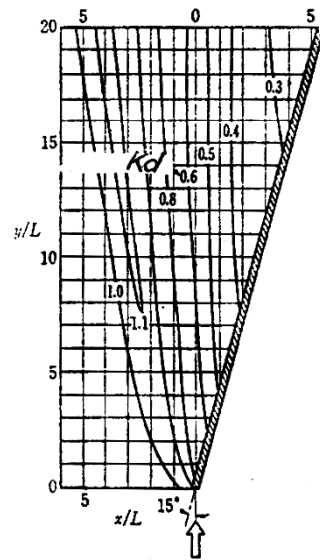
FIG.- 3.23 FIGURA DE DIFRACCION EN CASO DE QUE EL OLAJE INCIDA OBLICUAMENTE



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



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



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

FIG.- 3.24 FIGURA DE DIFRACCION DEL OLAJE REGULAR DE UN ROMPE OLAS SEMI INFINITO

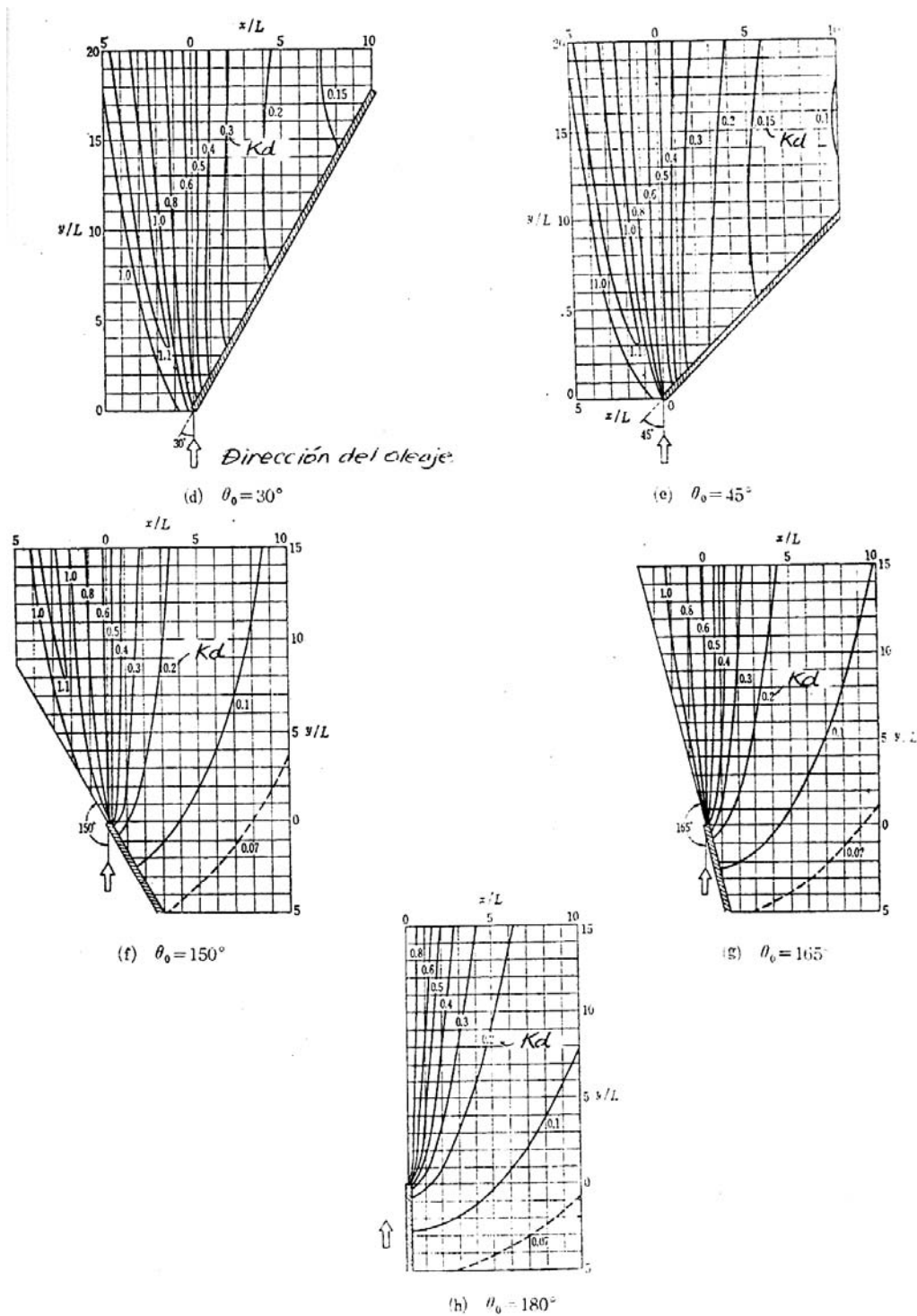


FIG.- 3.24 FIGURA DE DIFRACCION DEL OLAJE REGULAR DE UN ROMPE OLAS SEMI INFINITO

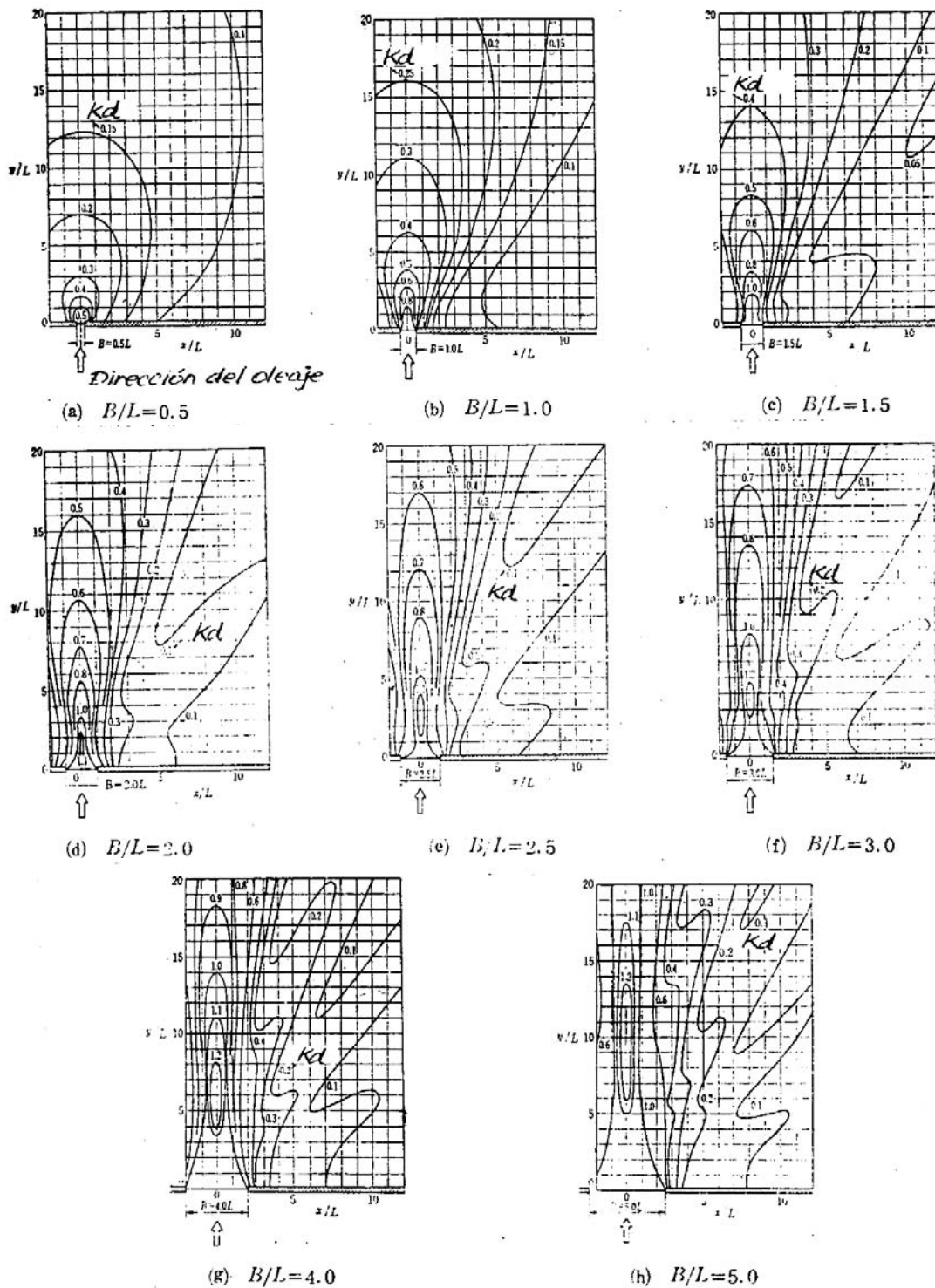


FIG.- 3.24 FIGURA DE DIFRACCION DEL OLAJE REGULAR EN UNA BOCA ENTRE ROMPEOLAS

3.2 Métodos de figuras dobles de difracción del oleaje

Este método se utiliza para estimar la altura aproximada del oleaje en el puerto, cuando el oleaje difractado es reflejado por los muelles. Por ejemplo: Considerando el puerto que se presenta en la Fig.- 3.26. En el 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 = 95.5m y B/L = 3.0.
- (b) Se traza la figura de difracción de B/L = 3.0 en el plano del puerto dibujando la cuadrícula.
- (c) Se calca la figura simplificada del puerto y la figura de difracción como se presenta en la Fig.- 3.15. 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.- 3.27, los números de I a VII son las áreas como sigue:

- I Área de difracción primaria
 - II Área de reflexión por $b_1c_1d_1$
 - III Área de reflexión del oleaje reflejado por $b_1c_1d_1$ en e_1f_1
 - IV Área de reflexión del oleaje reflejado por c_1d_1 (considerando que c_1d_1 refleja dos veces el oleaje)
 - V Área de reflexión por h_1g_1
 - VI Área de reflexión del oleaje reflejado por h_1g_1 en i_1j_1
 - VII Área de reflexión por h_1j_1
- (e) Se calca la figura 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.- 3.27 se calcula como sigue:

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

3.3 Combinación de difracción y refracción

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

- Trazar la figura de refracción hasta el rompeolas
- Trazar la figura de difracción de tres a cuatro longitudes de ola desde la boca del puerto.
- Se decide la nueva dirección del oleaje después de la difracción, con la última línea de la cresta del oleaje. Se traza la figura de refracción con la dirección nueva como se presenta en la Fig.- 3.28.
- La difracción del oleaje regular donde la profundidad cambia puede calcularse numéricamente con computadora. Puede aplicarse este cálculo para el oleaje irregular con el método de los oleajes componentes.

La altura y la dirección del oleaje en el lugar de estudio se calcula con las figuras correspondientes.

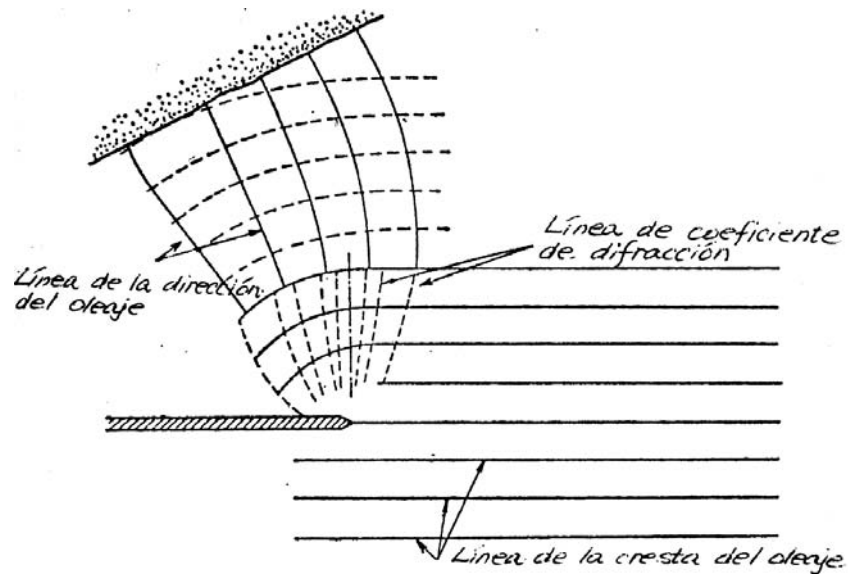


FIG.- 3.28 EJEMPLO DE COMBINACION DE DIFRACCION Y REFRACCION

4 REFLEXION 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 del oleaje incluyendo el oleaje reflejado, la altura de ola se puede calcular con la fórmula siguiente:

$$H_s = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2} \quad (6.18)$$

donde,

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

$H_1 H_2 \dots H_N$: Altura de 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 carga y descarga de mercancías.

En 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 de oleaje que incluye el oleaje reflejado puede calcularse con la fórmula - 3.18.

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 muestra en la Fig.- 3.29, la altura de ola en el punto A se calcula como sigue:

Primero se supone que no existe el rompeolas aislado y hay dos rompeolas; que se presentan en la figura con línea punteada. Después se traza la gráfica 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 esta figura 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:

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

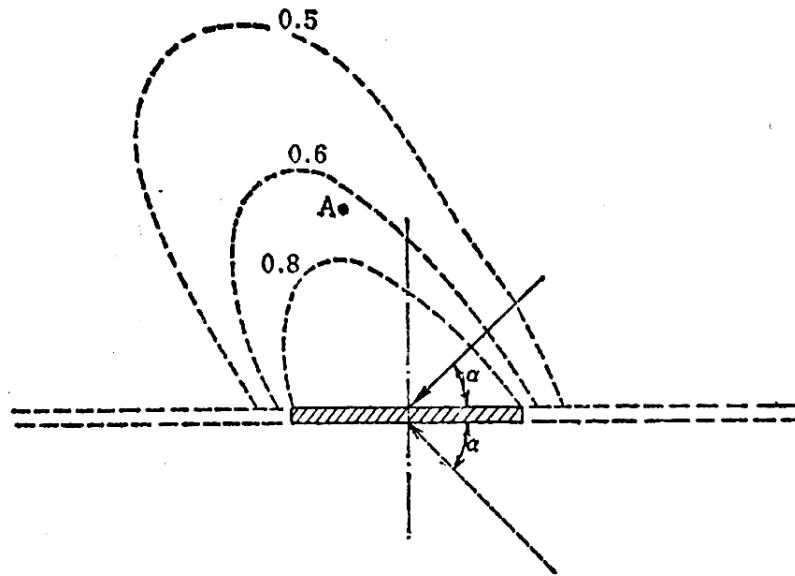


FIG.- 3.29 INFLUENCIA DEL OLAJE REFLEJADO

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:

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

El oleaje que tiene los valores de H_o / L_o más pequeños que los que se obtiene con la fórmula - 3.19 se refleja completamente.

$$\left(\frac{H_o}{L_o}\right)_{crit} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \cdot \frac{\text{sen}^2 \alpha}{\pi} \quad (3.19)$$

Donde,

α : Ángulo 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 $H'o/Lo$ mayores que los obtenidos por la Fórmula - 3.19 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 ($H'o/Lo$), la rugosidad del talud y el porcentaje de vacíos.

Miche da la fórmula siguiente para estimar el coeficiente de reflexión:

$$K_R = \frac{H_R}{H_I} = \rho \left(\frac{Lo}{H'o} \right) \sqrt{\frac{2\alpha}{\pi}} \cdot \frac{\text{sen}^2 \alpha}{\pi} \quad (3.20)$$

donde,

H_R : Altura de ola reflejada (m)

H_I : Altura de ola incidente (m)

$H'o$: Altura equivalente del oleaje en aguas profundas (m)

Lo : 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.- 3.20 se presenta en la Fig.- 3.30. El valor de 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

Talud permeable: $\rho = 0.3$ a 0.6

(piedra o elementos artificiales de concreto)

El valor de ρ cambia por el porcentaje de vacíos

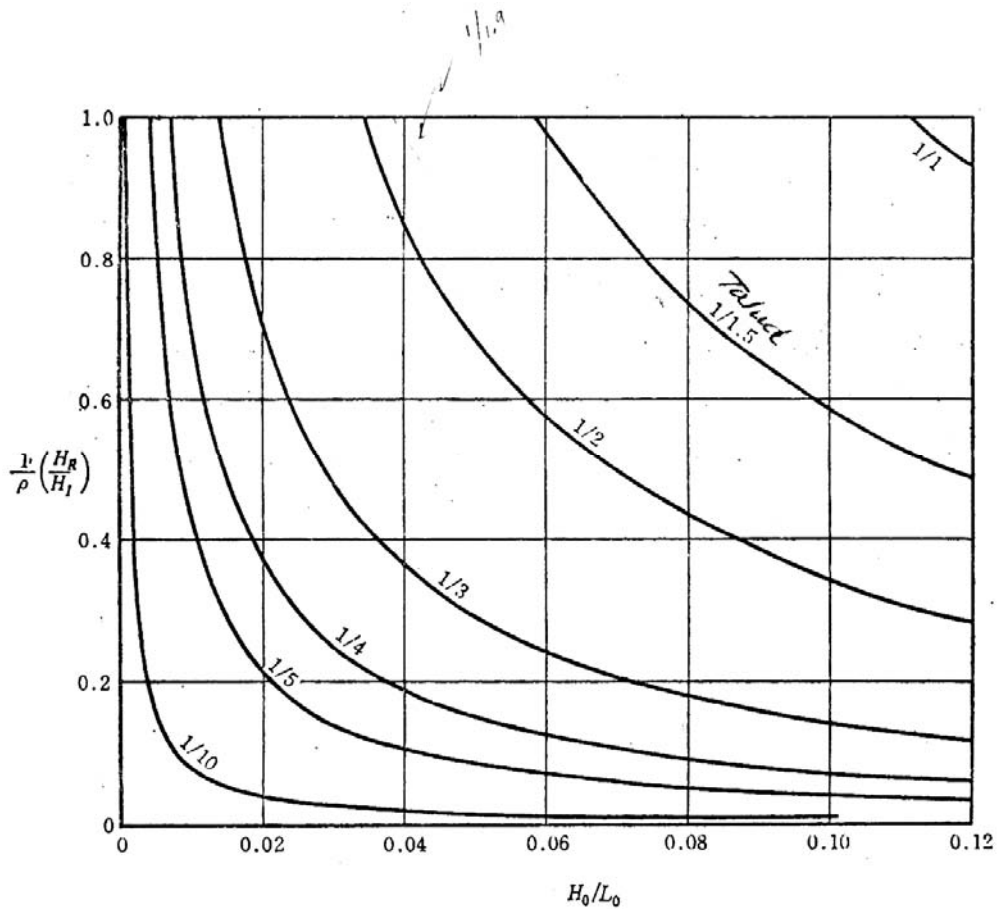


FIG.- 3.30 COEFICIENTE DE REFLEXION (SEGÚN MICHE)

4.3 Estimación del coeficiente de reflexión

Es deseable que el coeficiente de reflexión se estime por 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 modelos. Hay dos métodos para estimar el coeficiente de reflexión: son 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 coraza	3.3 – 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 pendiente suave 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.- 3.31 (a) a 3.31 (g). La distribución se calcula con 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 oleaje irregular usamos el valor de $S_{m\acute{a}x}$ 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 de rompeolas

Suponiendo el rompeolas que se presenta en la Fig.- 3.32. En esta figura α es el ángulo del oleaje incidente al rompeolas (II). Suponemos 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:

$$K_c = \frac{360^\circ}{\beta^\circ} \quad (3.21)$$

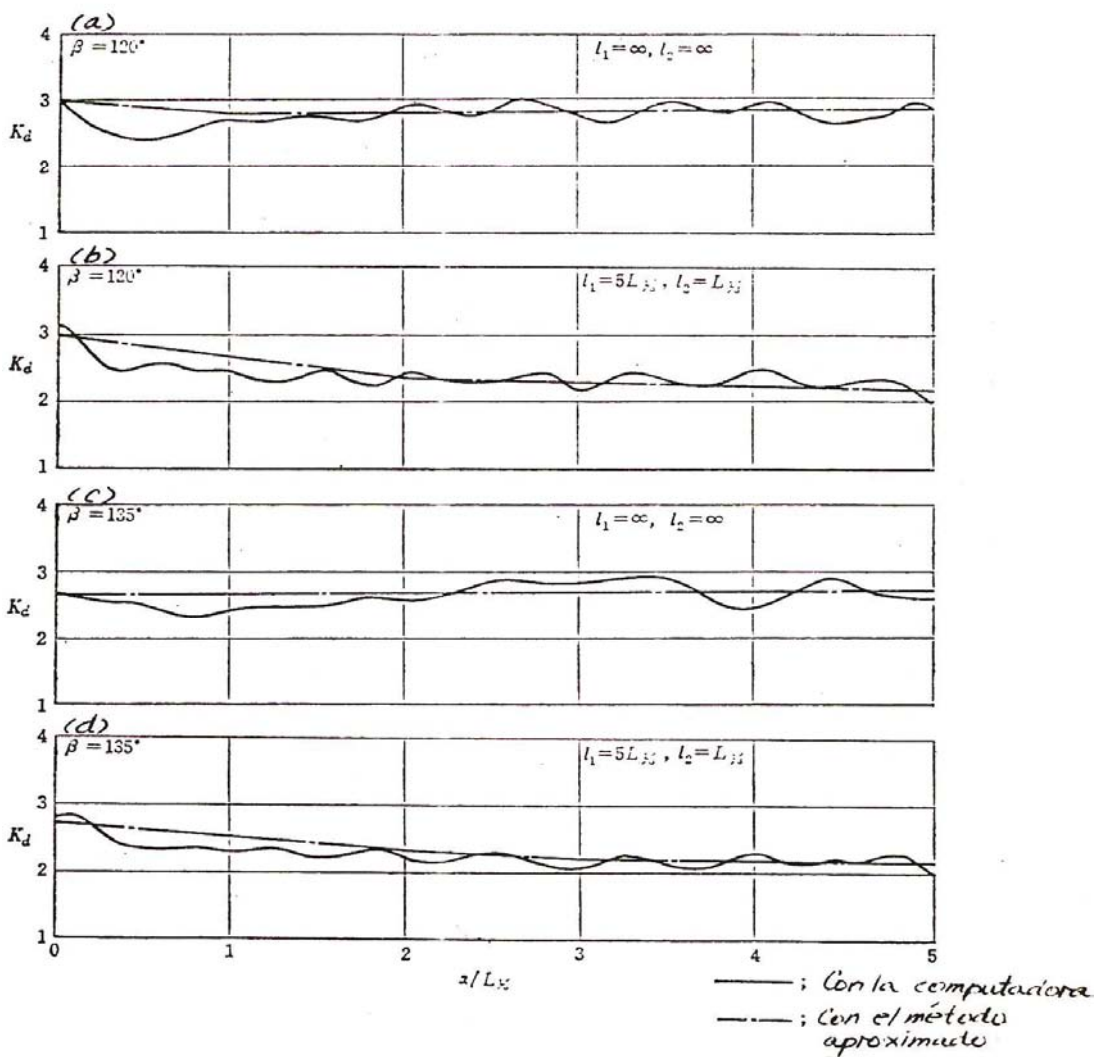
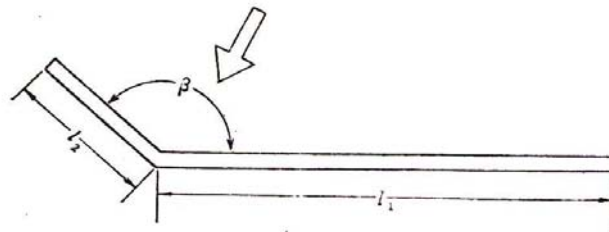


FIG.- 3.31 (a) a (d) DISTRIBUCION DE ALTURAS DEL OLAJE MAXIMO A LO LARGO DE UN ROMPEOLAS

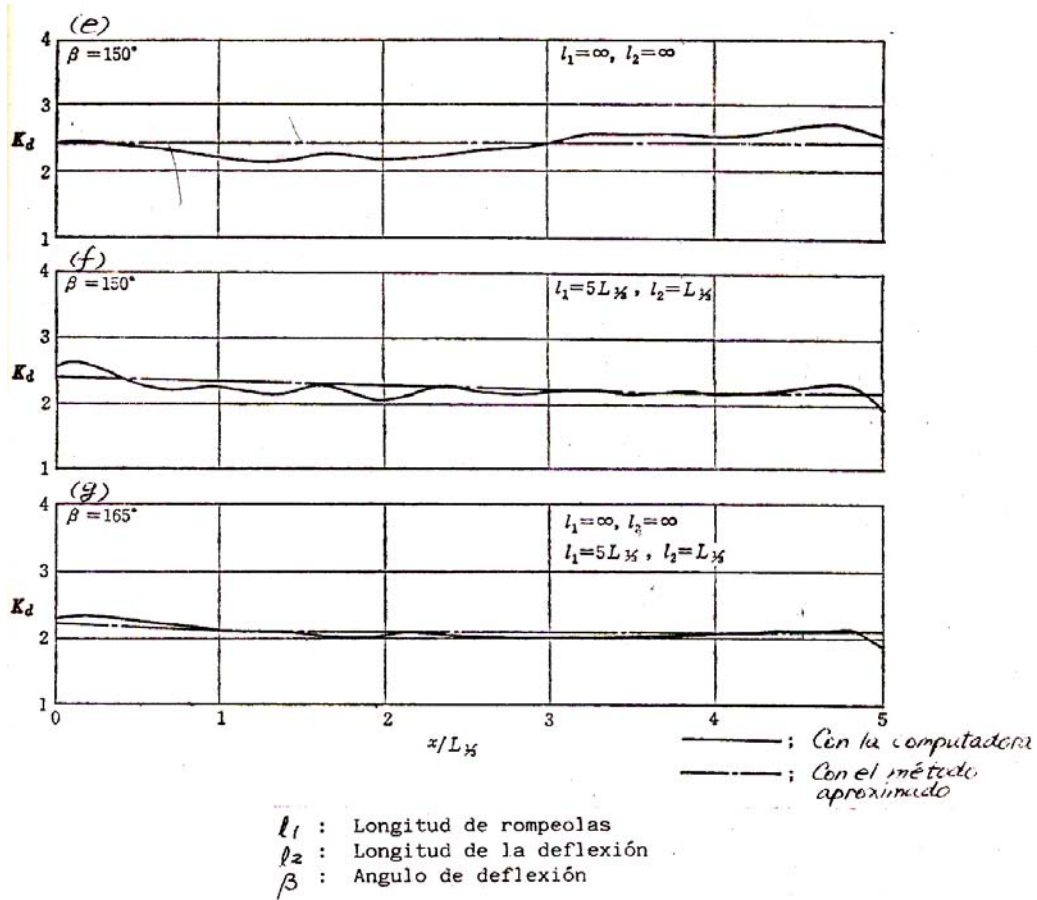


FIG.- 3.31 (e) a (g) DISTRIBUCION DE ALTURAS DEL OLEAJE MAXIMO A LO LARGO DE UN ROMPEOLAS

Donde, β es el ángulo de deflexión entre rompe olas (I) y (III). Cuando $\beta = 120^\circ$, el valor de Kc será 3. Si el oleaje no se refleja completamente el coeficiente de difracción hipotético (\overline{Kc}) se calcula con la fórmula siguiente:

$$\overline{Kc} = \sqrt{\left(\frac{Kc}{2}\right)^2 - 1} \quad (3.22)$$

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:

$$K = (1 + r_{II})\overline{Ko} \quad (3.23)$$

donde, Ko es el coeficiente de incremento de altura de ola y está dado con la fórmula siguiente:

$$\overline{Ko} = \sqrt{1 + (r_I \overline{Kc})^2} \quad (3.24)$$

Por ejemplo, en caso de $\beta = 120^\circ$, $r_I = 0.3$, $r_{II} = 0.1$, la proporción de altura de la ola por la altura incidente en la esquina del rompeolas será:

$$\overline{Kc} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}\right)^2 - 1} = 1.12$$

$$\overline{Ko} = \sqrt{1 + (0.3 \times 1.12)^2} = 1.05$$

$$K = 2 \times 1.05 = 2.10$$

Después pensamos 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). Suponemos el rompeolas (I) como una boca del puerto, como se dijo antes, y describimos una figura de difracción como se presenta en la Fig.- 3.32. El coeficiente de difracción en el punto A será $\overline{K_A}$ 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 $\overline{K_A}$ será como sigue:

$$K_A = (1 + r_{II})\overline{K_{OA}}$$

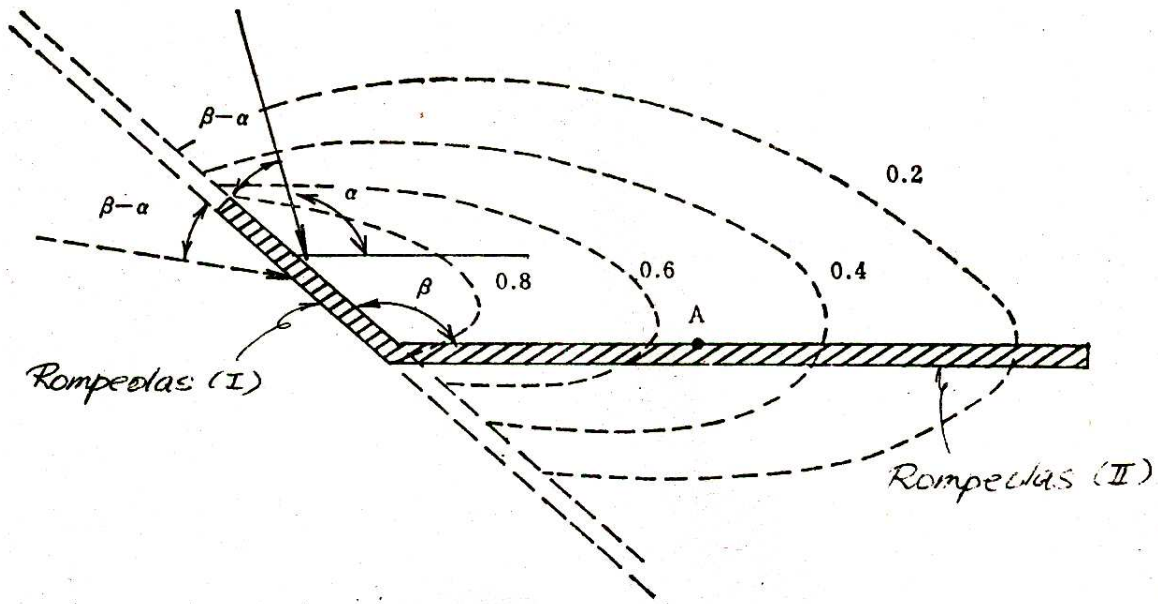


FIG.- 3.32 DISTRIBUCION DE LA ALTURA DE OLA A LO LARGO DE LA DEFLEXION DEL ROMPEOLAS

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

$$\bar{K}_{OA} = \sqrt{1 + (r_I \bar{K}_A)^2} \quad (3.26)$$

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

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

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

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

r_I	β^0	\bar{K}_o	\bar{K}_{OA}		
			1 (*)	2 (*)	3 (*)
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 (l) PRESENTADAS EN UNIDADES DE LONGITUDES DE OLA SIGNIFICANTE (L1/3)

5 DEFORMACION DEL OLEAJE POR EFECTO DEL FONDO

En caso de que el oleaje se propague en aguas bajas se debe considerar no solo la 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.- 3.33

Esta figura se calcula con la teoría de ola larga no-lineal según Shuto. La figura incluye la solución de la teoría del oleaje de pequeña amplitud y también podemos estimar la deformación del oleaje de aguas profundas a aguas bajas. Por eso, se usa esta figura normalmente para estimar la deformación del oleaje. En esta figura K_s es el coeficiente de fondo, $H'o$ es la altura equivalente de la ola en aguas profunda H es la altura de ola a la profundidad h y Lo 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 $h \leq Lo/20$, las celeridades de las componentes del oleaje irregular convergen a la celeridad de la ola larga. En este caso se puede aplicar la teoría del oleaje largo 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 $h/Lo > 0.05$. Por eso la figura del coeficiente de aguas bajas para oleaje regular (es decir Fig.- 3.33) se puede aplicar a la deformación por aguas bajas del oleaje irregular. En este caso, se representa el oleaje irregular por el oleaje significante.

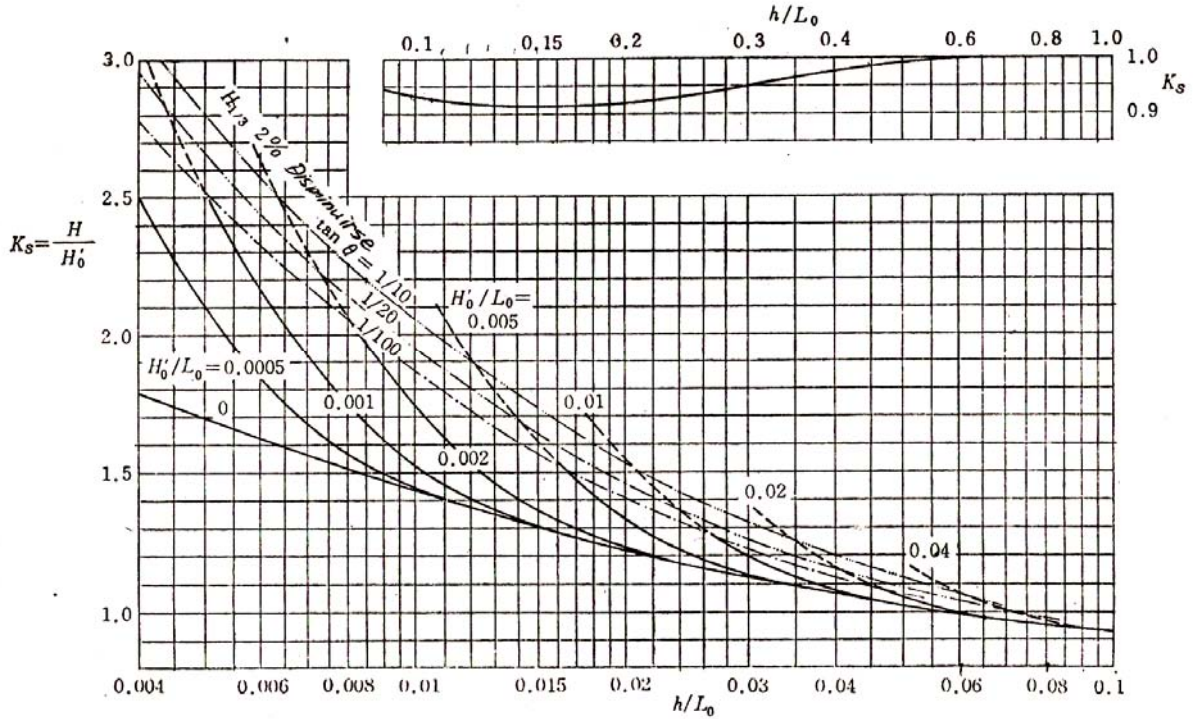


FIG.- 3.33 COEFICIENTE DE FONDO (Ks) SEGÚN SHUTO.

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 podemos estimar la deformación de la altura de ola solo con el efecto de aguas bajas.

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

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{H_0} &= \sqrt{\frac{1}{2\eta} \frac{Co}{C}} = K_s \\ \eta &= \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh \frac{4\pi h}{L}} \right\} \end{aligned} \right\} \text{ (6.27)}$$

Donde:

H : Altura de ola a la profundidad h

H'o : Altura de ola equivalente en aguas profundas

Co : Celeridad de ola en aguas profundas

C : Celeridad de ola a la profundidad h

Ks : Coeficiente de fondo

h : Profundidad

L : Longitud de ola a la profundidad h

El valor de la Fórmula – 3.27 está dado en la parte baja de la curva con valor H'o/Lo= 0 de la Fig.- 3.33. La fórmula de la deformación en aguas bajas con efecto de la no-linealidad de la ola larga infinita según Shoto es como sigue:

$$\left. \begin{aligned}
 K_s &= \sqrt{2\eta \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}, \left(\frac{gHT^2}{h^2} \leq 30\right) \\
 Hh^{\frac{5}{2}} &= const., \left(30 \leq \frac{gHT^2}{h^2} < 50\right) \\
 Hh^{\frac{5}{2}} &= \left[\sqrt{\frac{gHT^2}{h^2} - 2\sqrt{3}}\right] = const., \left(50 \leq \frac{gHT^2}{h^2}\right)
 \end{aligned} \right\} \text{ (3.28)}$$

Donde,

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{\frac{4\pi h}{L}}{\sinh\frac{4\pi h}{L}} \right\}$$

H : Altura de ola a la profundidad A

T : Período de ola

L : Longitud de ola h

6 ROMPIENTE DE LA OLA

En el lugar donde la profundidad es menor que tres veces la altura de ola equivalente en aguas profundas, se debe considerar la deformación de la altura de ola por rompiente. Para estimar la deformación de la altura de ola, normalmente se toma en consideración la irregularidad del oleaje.

La deformación de la altura de ola por rompiente se calcula con las Figs.- 3.34 (a) a (e) y 3.35 (a) a (e). Estas figuras consideran la teoría del modelo de rompiente de ola según Goda. La Fig.- 3.34 es para estimar la altura de ola significativa en la zona de rompiente y la Fig.- 3.35 es para estimar la altura de ola máxima en la zona de rompiente.

En estas figuras, la deformación de la altura de ola en el área derecha de la línea punteada se estima con la figura de deformación en aguas bajas (Fig.- 3.33). En el área izquierda de la figura domina la deformación de la altura por rompiente, por eso la altura de ola se estima con estas figuras. El pendiente del fondo normalmente se define como el promedio de la zona entre los valores de 1.5 a 2.5 de $h/H'o$. Se debe considerar que el valor de $H_{1/3}/H'o$ incluye un error de ± 0.1 .

Cuando la profundidad es menor que un medio de la ola equivalente en aguas profundas, la energía de la corriente por oleaje es más grande que la del oleaje mismo. Por esa razón es deseable usar la altura de ola en el lugar como $h = \frac{1}{2} H'o$ para estimar la fuerza del oleaje sobre las estructuras.

Se tiene que usar la computadora para el cálculo, de la teoría del modelo de rompiente. Sin embargo, normalmente se usa el método de cálculo aproximado como sigue:

$$H_{1/3} = \left\{ \begin{array}{l} K_s H'o, \left(\frac{h}{L_o} \geq 0.2 \right) \\ \min\{(\beta_o H'o + \beta_1 h), \beta_{\max} H'o, K_s H'o\}, \left(\frac{h}{L_o} < 0.2 \right) \end{array} \right\} \quad (3.29)$$

Donde,

$$\left. \begin{array}{l} \beta = 0.028 \left(\frac{H'o}{L_o} \right)^{-0.38} \exp[20(\tan \theta^{1.5})] \\ \beta_1 = 0.52 \exp[4.2 \tan \theta] \\ \beta_{\max} \left\{ 0.92 \quad 0.32 \left(\frac{H'o}{L_o} \right)^{-0.29} \exp[2.4 \tan \theta] \right\} \end{array} \right\} \quad (3.30)$$

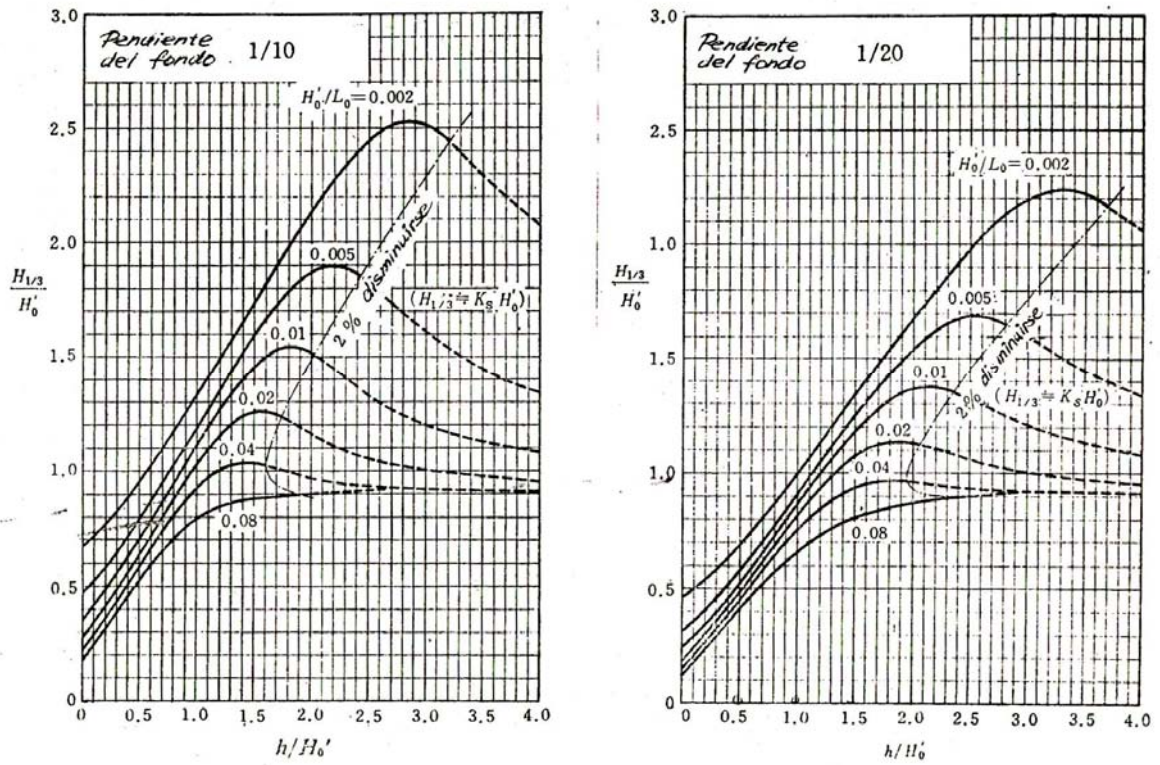


FIG.- 3.34 ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN LA ZONA DE ROMPIENTE

(a) PENDIENTE DEL FONDO 1/10

(b) PENDIENTE DEL FONDO 1/20

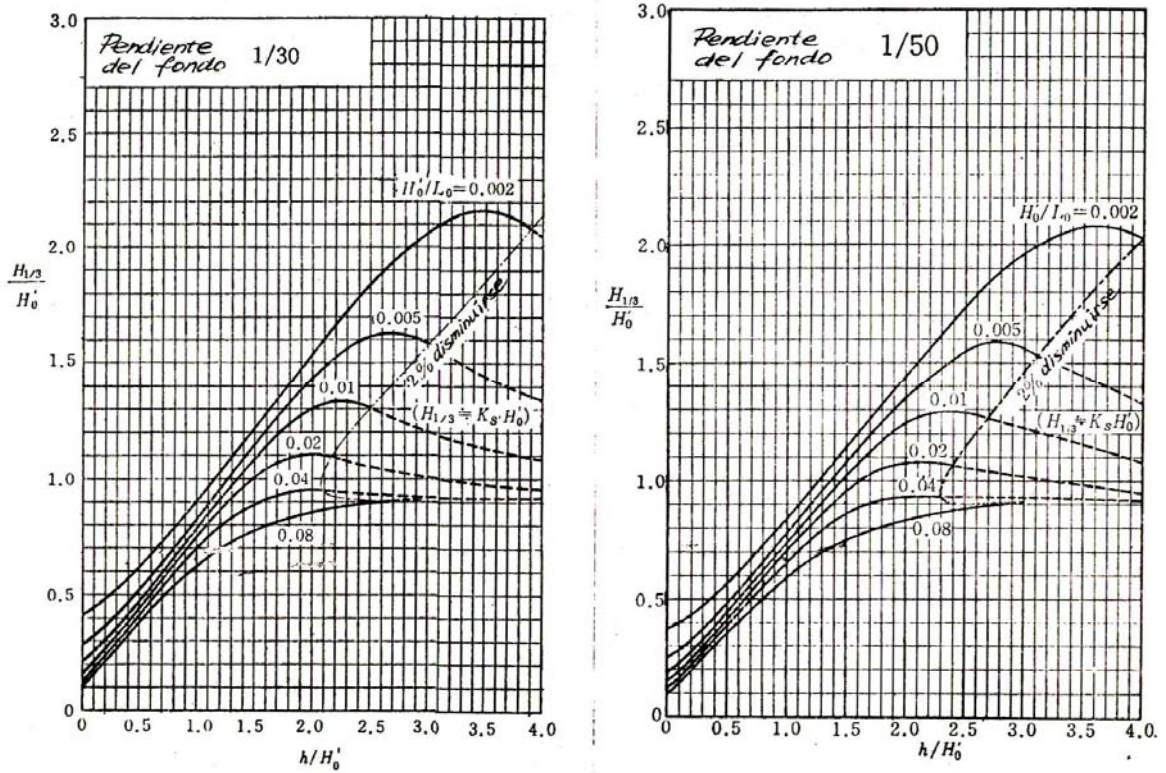


FIG.- 3.34 ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN LA ZONA DE ROMPIENTE

(c) PENDIENTE DEL FONDO 1/30

(d) PENDIENTE DEL FONDO 1/50

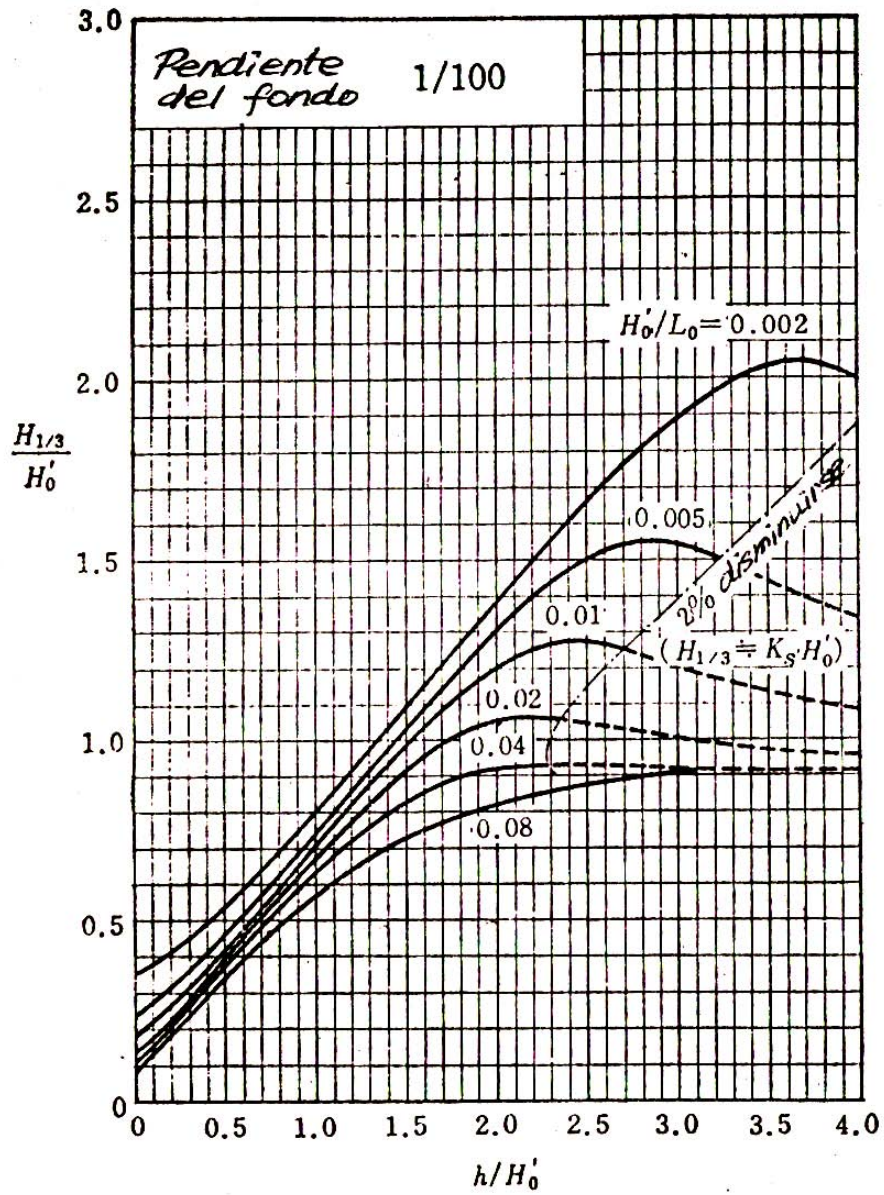


FIG.- 3.34 ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE EN LA ZONA DE ROMPIENTE

(e) PENDIENTE DEL FONDO 1/100

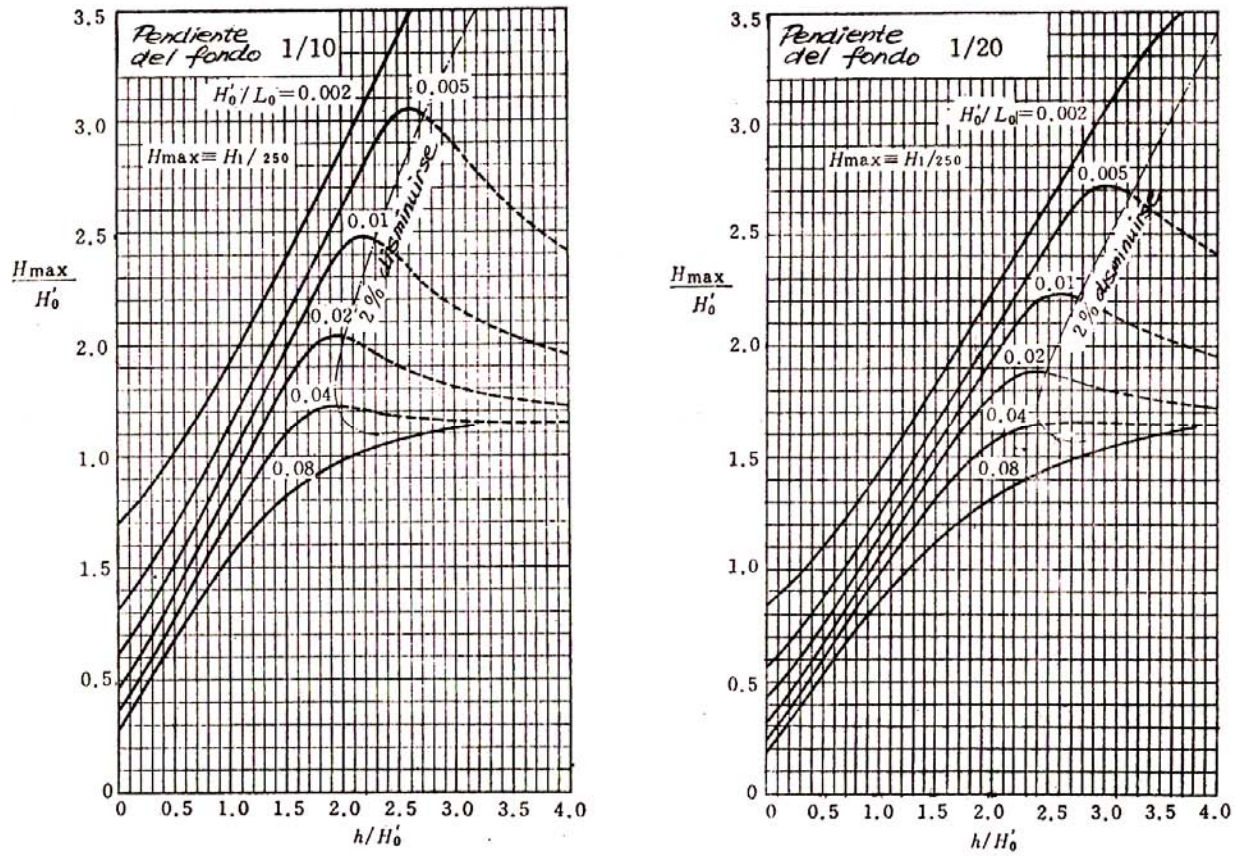


FIG.- 3.35 ALTURA DE LA OLA MAXIMA EN LA ZONA DE ROMPIENTE

(a) PENDIENTE DEL FONDO 1/10

(b) PENDIENTE DEL FONDO 1/20

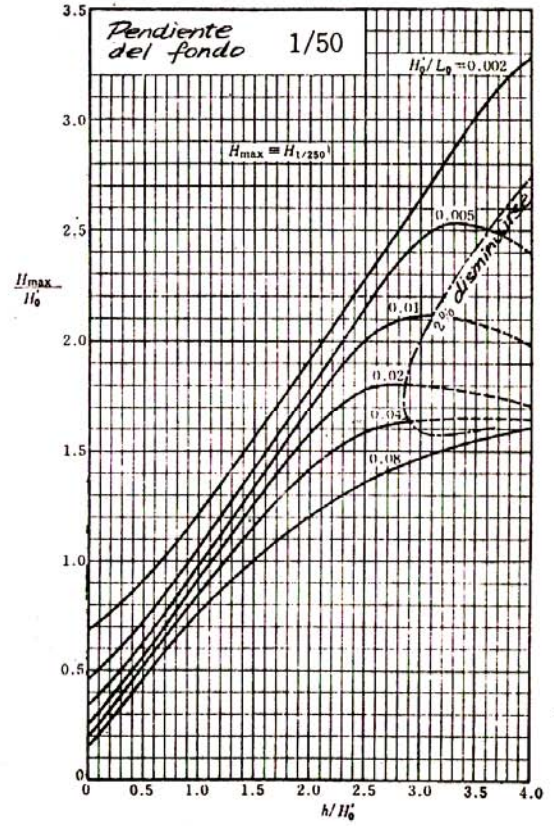
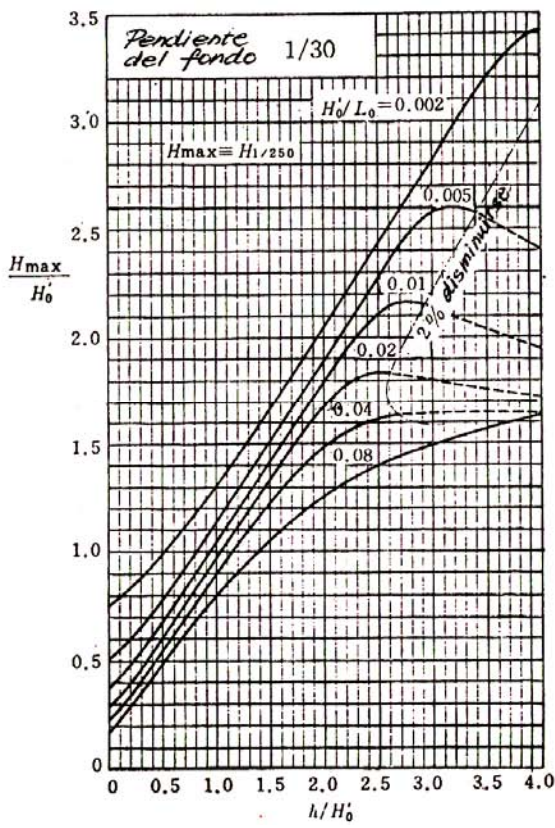


FIG.- 3.35 ALTURA DE LA OLA MAXIMA EN LA ZONA DE ROMPIENTE

(c) PENDIENTE DEL FONDO 1/30

(d) PENDIENTE DEL FONDO 1/50

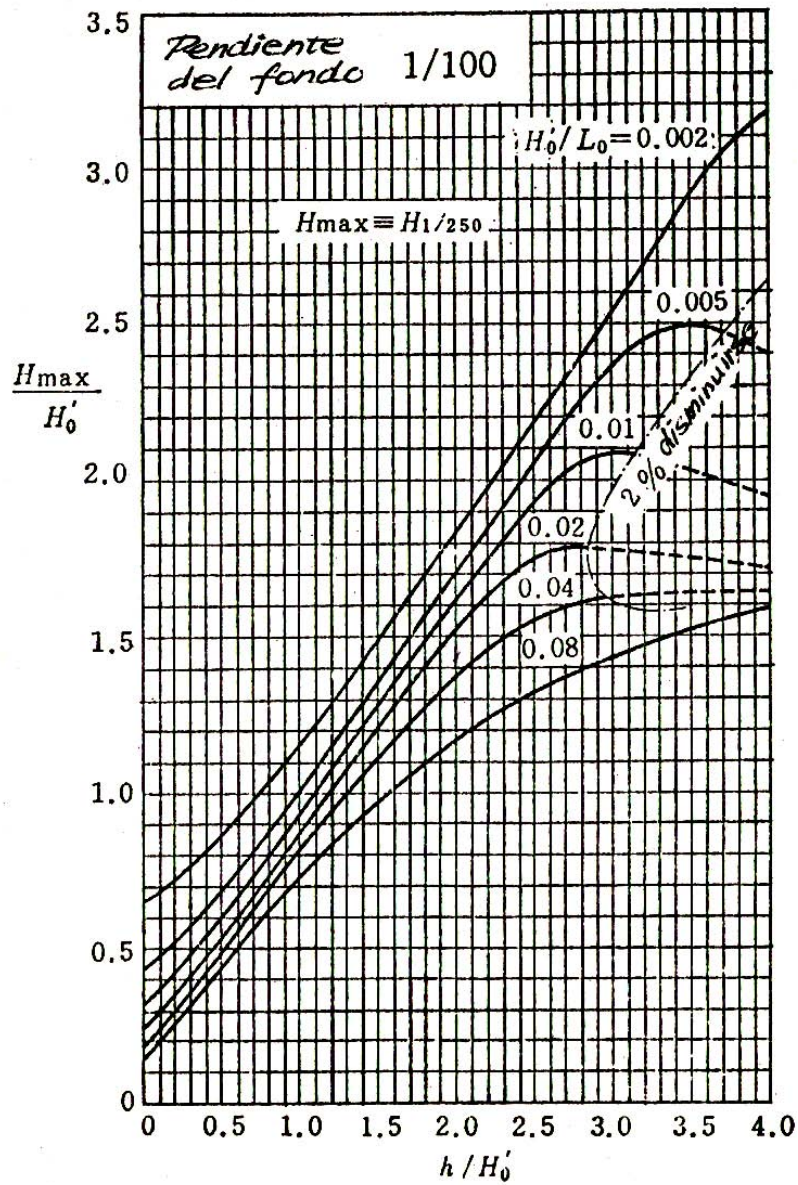


FIG.- 3.35 ALTURA DE LA OLA MAXIMA EN LA ZONA DE ROMPIENTE

(e) PENDIENTE DEL FONDO 1/100

El valor de K_s se da con la Fig.- 3.33. En las fórmulas 3.29 y 3.30, $\min \{ \}$ y $\max \{ \}$ significan el valor mínimo y el valor máximo en el paréntesis $\{ \}$, respectivamente y $\tan\theta$ es la pendiente del fondo.

$$H_{m\acute{a}x} \left\{ \begin{array}{l} 1.8KsH'o, \left(\frac{h}{Lo} \geq 0.2 \right) \\ \min \left\{ \left(\beta^* H'o + \beta_1^* \right), \beta^* \max H'o, 1.8KsH'o \right\}, \left(\frac{h}{Lo} < 0.2 \right) \end{array} \right\} \quad (6.31)$$

donde,

$$\left. \begin{array}{l} \beta^* = 0.052 \left(H'o / Lo \right)^{-0.38} \exp \left[20 (\tan \theta)^{1.5} \right] \\ \beta_1^* = 0.63 \exp \left[3.8 \tan \theta \right] \\ \beta_{m\acute{a}x} = \max \left\{ 1.65, 0.53 \left(H'o / Lo \right)^{-0.29} \exp \left[2.4 \tan \theta \right] \right\} \end{array} \right\} \quad (3.32)$$

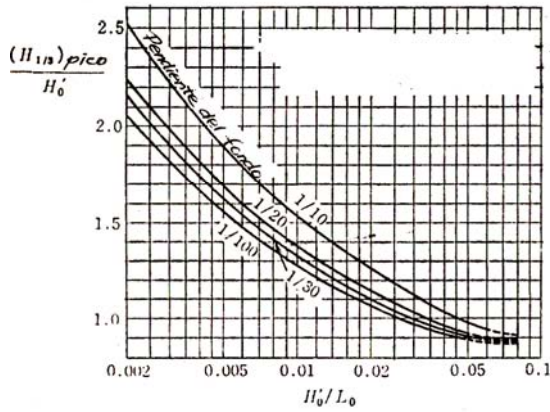
Si suponemos la altura de ola rompiente significativa $\left(H_{\frac{1}{3}} \right)_{\text{pico}}$ es el valor máximo de la altura de ola en significativa en la zona rompiente, la altura de ola rompiente significativa de da con la Fig.- 3.36.

Además si suponemos la profundidad donde la ola rompe $\left(h_{\frac{1}{3}} \right)_{\text{pico}}$ es la profundidad donde la altura de la ola significativa será máxima, se da con la Fig.-3.37. Se representa la altura de ola rompiente en el caso de oleaje regular como Hb en la Fig.- 3.38. Esta figura se usa para estimar la altura de ola rompiente en el caso de ensayo con oleaje regular. La curva de la figura se obtiene con la formula siguiente:

$$\frac{Hb}{Lb} = 0.17 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{Lo} \left(1 + 15 \tan^{\frac{4}{3}} \theta \right) \right] \right\} \quad (3.33)$$

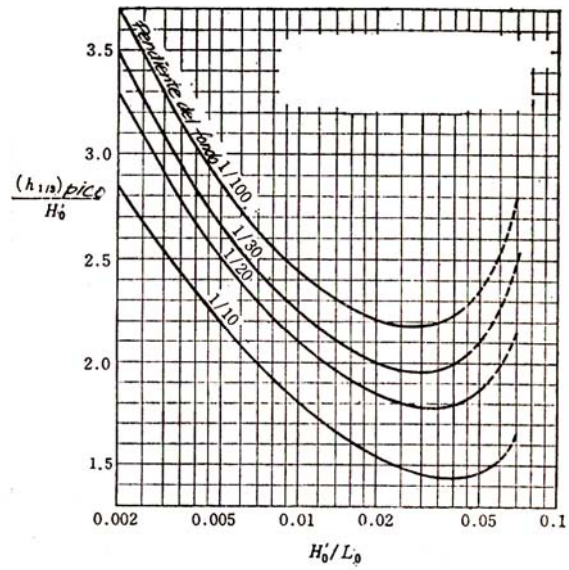
donde, $\tan \theta$ es la pendiente del fondo.

En el sitios de poca profundidad, ocurre un incremento en el nivel medio del mar por la rompiente del oleaje. Por eso, se debe considerar el incremento del nivel del mar para estimar la altura de ola rompiente con esta figura. La estimación de la profundidad donde la ola rompe $\left(h_{\frac{1}{3}} \right)_{\text{pico}}$ en la teoría del modelo de rompiente según Goda incluye el cambio del nivel del mar por el "radiation strees" y "surf beat".



*) $(H/3)_{pico}$ es el valor máximo de la ola significativa en la zona de rompiente.

FIG.- 3.36 ALTURA DE OLA ROMPIENTE EN CASO DE OLAJE IRREGULAR



*) $(h/3)_{pico}$ es la profundidad donde la altura de ola será máxima.

FIG.- 3.37 PROFUNDIDAD DONDE LA OLA EN CASO DE OLAJE IRREGULAR

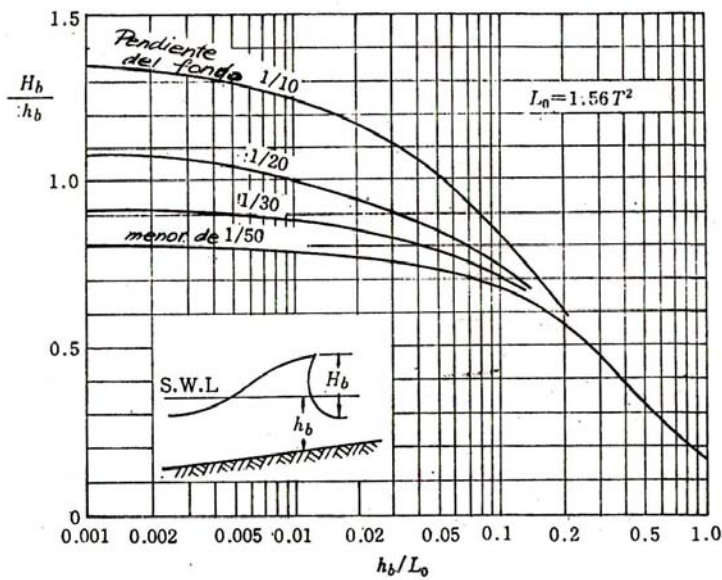


FIG.- 3.38 ALTURA DE OLA ROMPIENTE EN CASO DEL OLAJE REGULAR

Se presenta la profundidad donde la ola se rompe en el caso del oleaje regular (h_b) en la Fig.- 3.39. Se usa esta figura en caso de que sea ensayo con oleaje regular.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de la deformación por rompiente en casos de costas simples.

Supongamos que hay una costa con curvas batimétricas rectas y paralelas a la costa. La pendiente del fondo de la costa será 1/100. En la planeación se considera una estructura del puerto con 12.00m de profundidad.

La altura y periodo de la ola estimada en aguas profundas son:

$$H_o = 10 \text{ m}$$

$$T_o = 12 \text{ seg}$$

$$S_{\text{máx}} = 10 \text{ (Wind wave)}$$

En este caso , las alturas de ola significativa y de ola máxima (es decir las olas de diseño) se calculan como sigue:

$$L_o = \frac{g}{2\pi} T_o^2 = 225 \text{ m}$$

$$\frac{h}{L_o} = \frac{12}{225} = 0.053$$

Con la Fig.- 3.8 (a) en caso de $S_{\text{máx}} = 10$ y $(\alpha_p)_o = 0^\circ$, el valor de K_r es:

$$K_r = 0.94$$

Podemos pensar que no ocurre la difracción antes de la llegada del oleaje a la estructura. Por eso, la altura equivalente de la ola en aguas profundas (H'_o) es:

$$H'_o = K_r H_o = 9.4 \text{ m}$$

Los valores de la relación de esbeltez de la ola H'_o/L_o y la profundidad relativa a la altura equivalente de ola en aguas profundas h/H'_o son:

$$\frac{H'_o}{L_o} = 0.042, \quad \frac{h}{H'_o} = 1.28$$

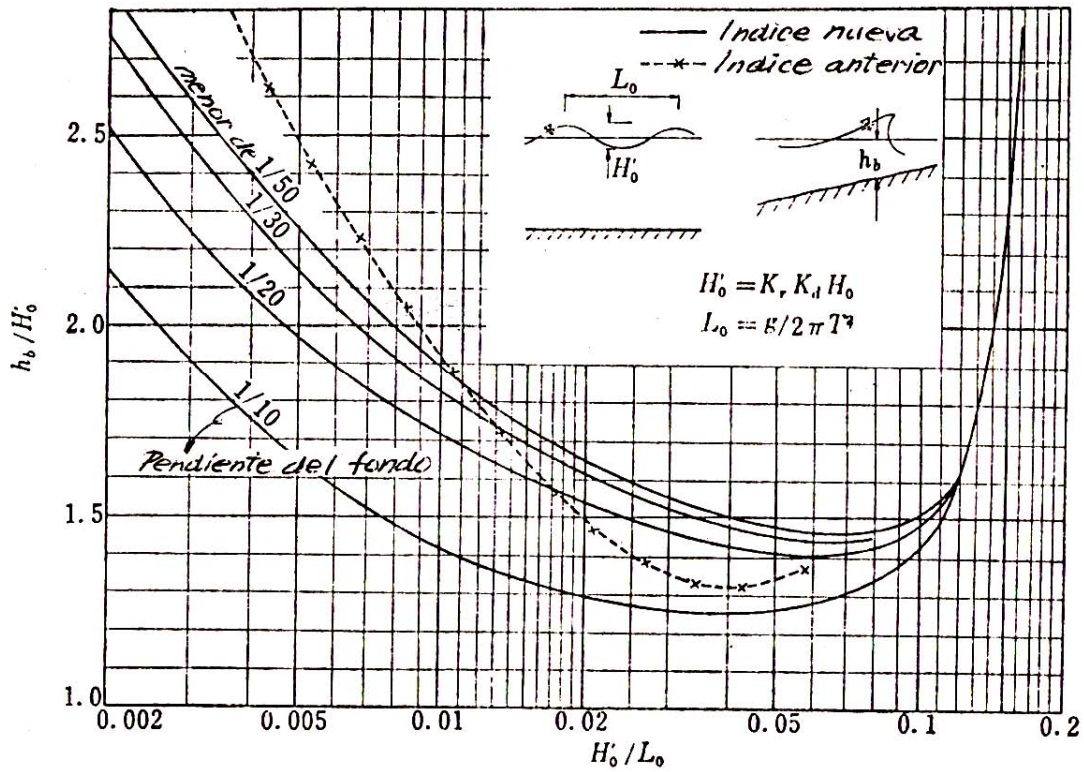


FIG.- 3.39 PROFUNDIDAD DONDE LA OLA ROMPE EN CASO DEL OLEAJE REGULAR

El valor de $\frac{H_{1/3}}{H'_0}$ se estima con la FIG.- 3.34 (e) como sigue:

$$\frac{H_{1/3}}{H'_0} = 0.76$$

Por lo tanto, la ola significativa en el lugar de diseño será:

$$H_{1/3} = 0.76 \times 9.4 = 7.14m$$

El valor de $H_{m\acute{a}x}$ se estima con la FIG.- 3.35 (e) como sigue:

$$\frac{H_{m\acute{a}x}}{H'_0} = 0.98$$

$$H_{m\acute{a}x} = 0.98 \times 9.4 = 9.21m$$

7 DISMINUCION DE LA ALTURA DE OLA POR LA FRICCION DEL FONDO

De vez en cuando se considera la disminución de la altura de ola por la fricción del fondo. Una fórmula de la disminución se da según Bretschneider y Reid con la concepción de que el esfuerzo de la fricción del fondo es proporcional al cuadrado de la velocidad de la partícula de agua. El coeficiente de la disminución, en caso de que el oleaje se propague a una distancia de ΔX en el agua a una profundidad uniforme de h se da con la Fórmula – 3.44

$$K_f = \frac{H_2}{H_1} = \left[1 + \frac{64\pi^3 f H_1 \Delta X}{3g^2 h^2} \left(\frac{h}{T^2} \right)^2 \frac{K_s^2}{\sinh^3 \frac{2\pi h}{L}} \right]^{-1} \quad (3.44)$$

donde,

H_f : Coeficiente de disminución

H_1 : Altura de ola anterior (m)

H_2 : Altura de ola disminuida (m)

g : Aceleración de la gravedad (m/seg²)
(= 9.8 m/seg²)

f : Coeficiente de fricción

h : Profundidad

T : Periodo de la ola

L : Longitud de ola en la profundidad de h (m)

K_s : Coeficiente de fondo

La gráfica del cálculo del coeficiente de disminución se presenta en la Fig.- 3.40. Otra fórmula de la disminución se da según Shuto con la teoría de la ola larga infinita y no lineal en caso de que el oleaje se propague a una distancia ΔX en el agua a una profundidad uniforme de h . el coeficiente de disminución por la fricción del fondo se presenta en la Fig.- 3.41. En la figura, el parámetro U^2 se da con la fórmula siguiente:

$$U^2 = \frac{gT^2}{h^2} H_1 \quad (3.45)$$

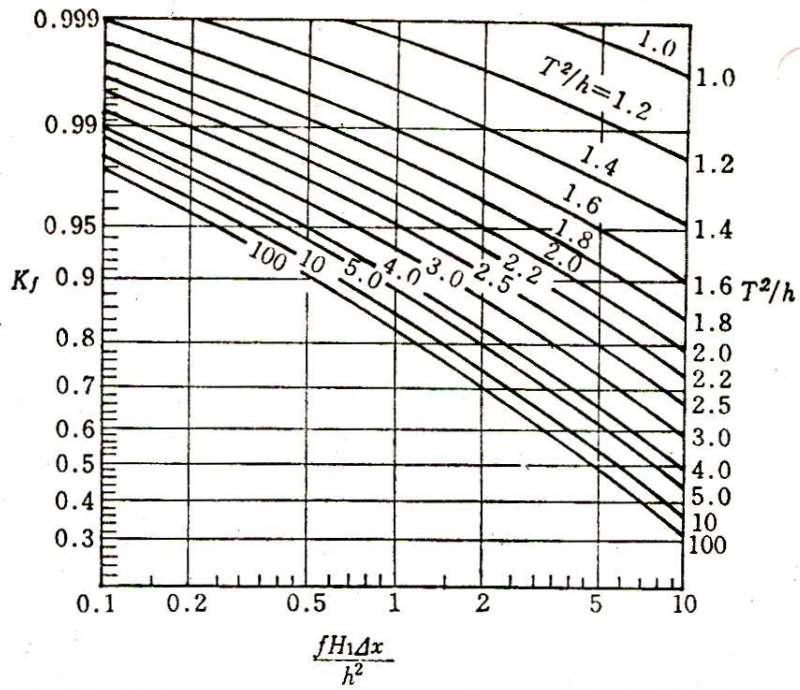


FIG.- 3.40 COEFICIENTA DE DISMINUCION POR LA FRICCION DEL FONDO (SEGÚN BRETSCHNEIDERY REID)

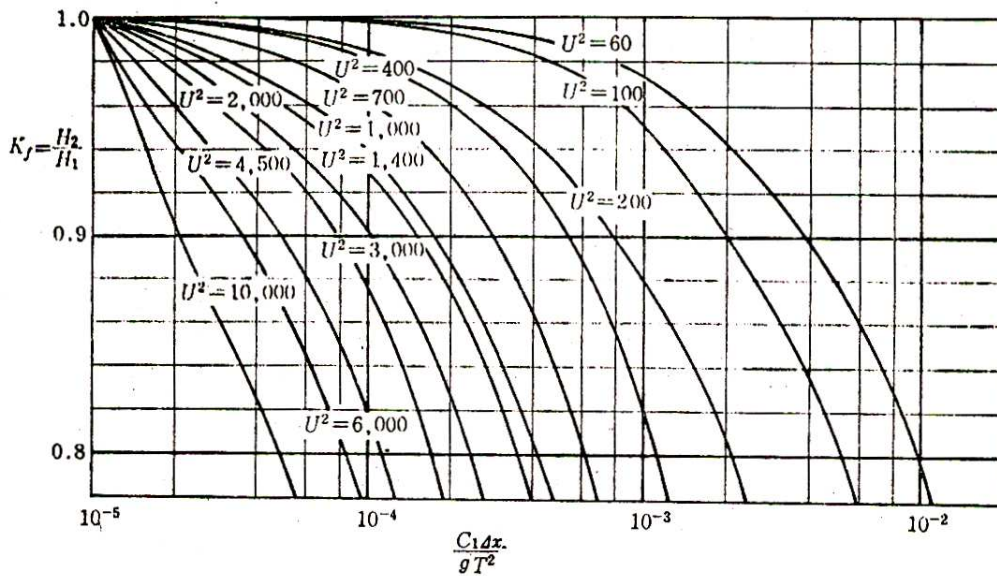


FIG.- 3.41 COEFICIENTA DE DISMINUCION POR LA FRICCION DEL FONDO (SEGÚN SHUTO)

Para aplicar, es deseable dividir el valor de Δ de manera que se cumpla $H_2/H_1 > 0.8$ para deducir el error de cálculo. El valor de C en esta figura es el coeficiente de fricción. Los coeficientes de fricción se presentan en las Figs.- 3.42 y 3.43. La Fig.- 3.42 es para el caso de fondo liso y la Fig.- 6.43 es para el caso de fondo rugoso.

En estas figuras, los valores relacionados son los siguientes:

R : Número de Reynolds

$$\left(R = \sqrt{\frac{ReT}{2\pi}} = \frac{vb}{\sqrt{\sigma\mu}} \right)$$

σ : Frecuencia angular $\left(= \frac{2\pi}{T} \right)$

μ : Coeficiente de viscosidad dinámica del agua

vb : Velocidad de la partícula de agua en el fondo

Z_0 : Diámetro de la arena en el fondo del mar

δ : Ancho del lecho de frontera

Cuando el valor de $M = 30vb \frac{Z_0}{\mu}$ sea mayor de 100 será el fondo rugoso y menos de 100 será el fondo liso.

El cálculo se realiza de la manera siguiente:

(1) El método de Bretschneider y Reid

Suponemos una costa que tiene una pendiente uniforme en el fondo del mar 1/200, el oleaje tiene una altura de 10.00m y el periodo de 15 seg. e incide con un ángulo de 90°. En la zona del mar que tiene la profundidad tres veces más que la altura de ola, influye el efecto de rompiente de la ola, por eso se termina el cálculo antes de esta profundidad. El coeficiente de fricción se supone como $f = 0.01$. El área de cálculo será de la profundidad de 100 m a 30 m y por eso la distancia del cálculo será 14 km. Se divide la zona de cálculo entre dos, una es la distancia de 10 km y otra es la de 4 km.

La profundidad media en la primera zona de la distancia de 10 km será de 75 m. La altura de ola en el lugar que tiene 100m de profundidad es:

$$H_1 = KsHo = 0.95 \times 10 = 9.5(m)$$

Por eso,

$$\frac{fH_1\Delta X}{h^{21}} = \frac{0.01 \times 9.5 \times 10000}{75^2} = 0.17$$

$$\frac{T^2}{h} = \frac{15^2}{75} = 3.0$$

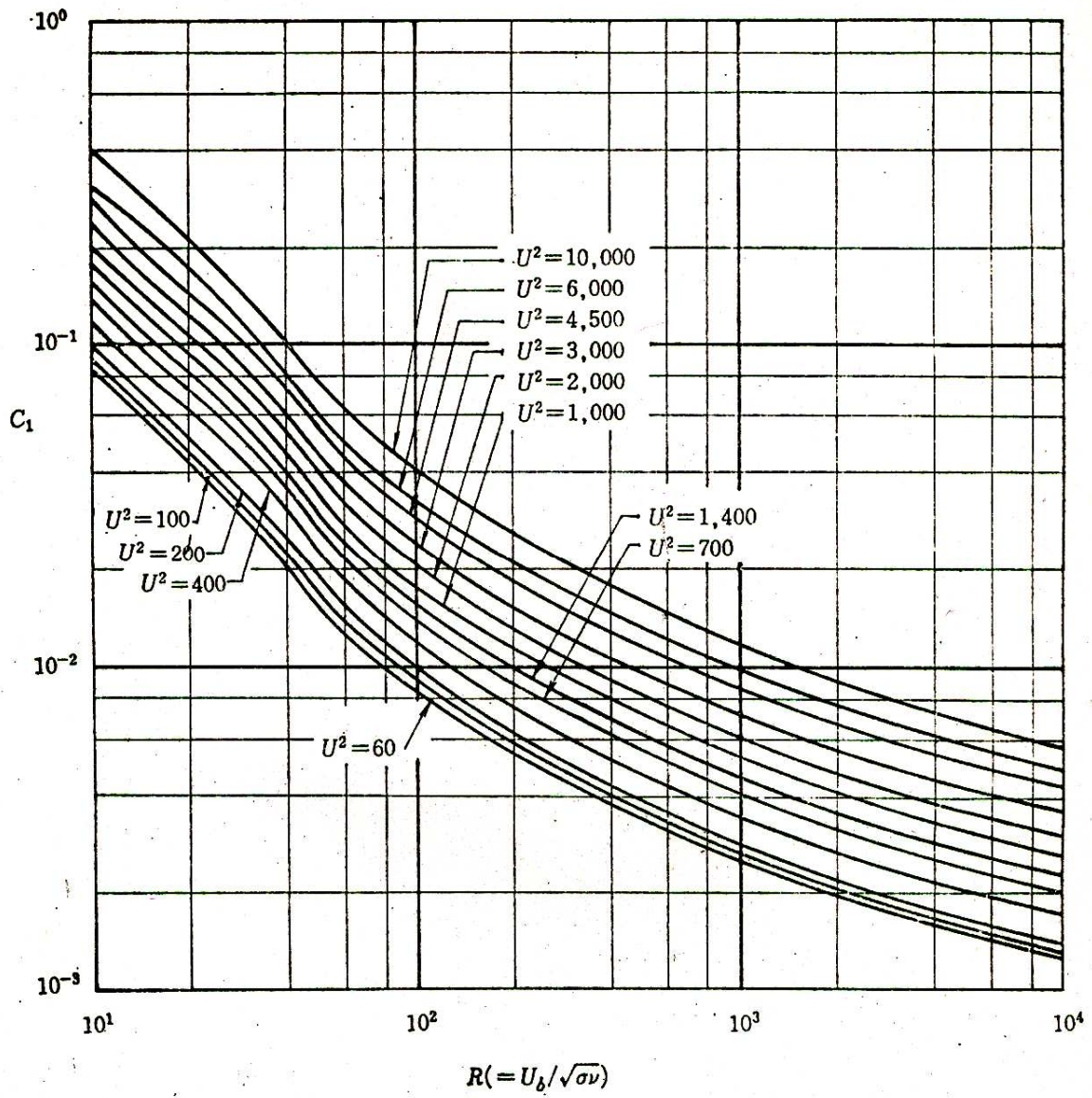


FIG.- 3.42 COEFICIENTE DE FRICCIÓN DEL FONDO DEL MAR
(EN CASO DE FONDO LISO)

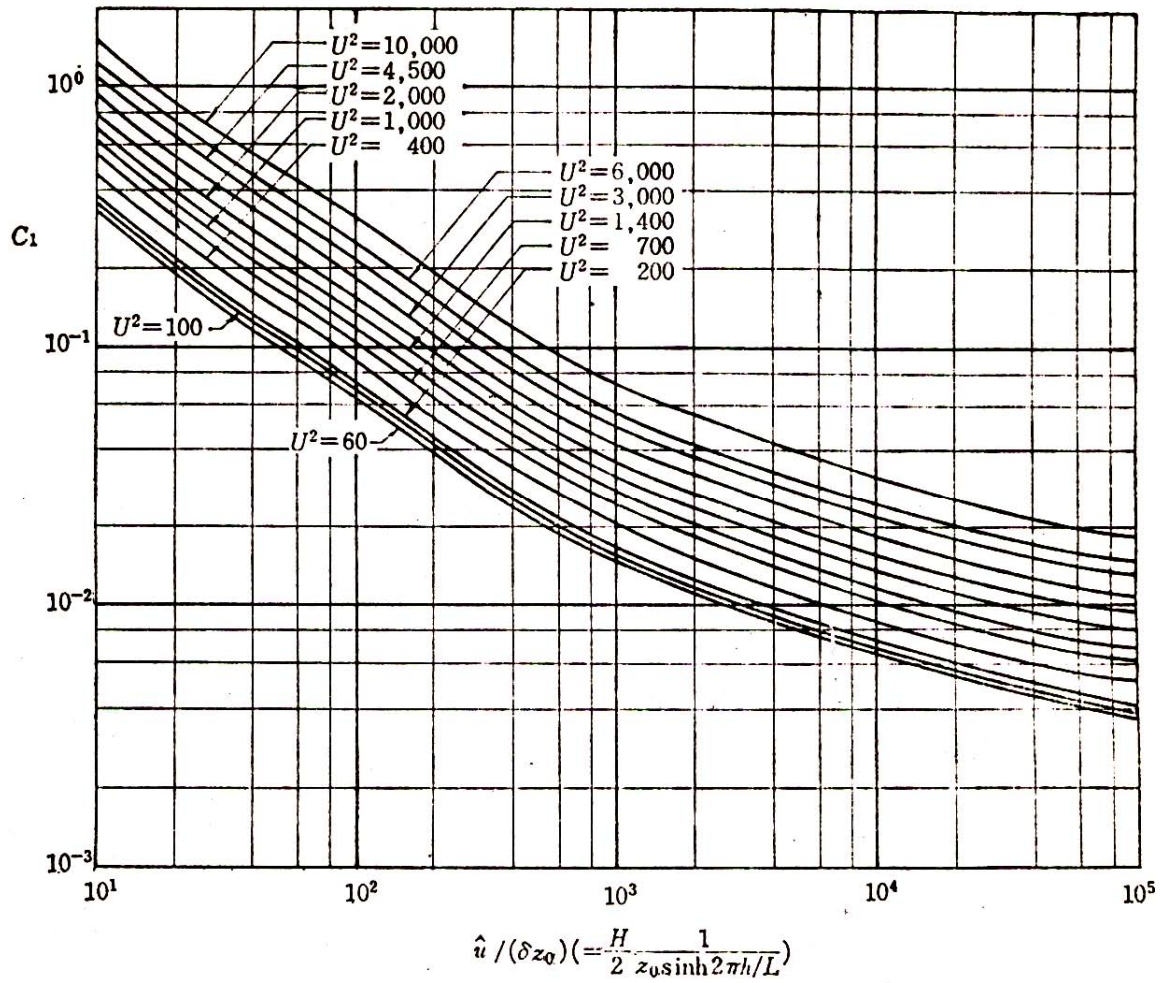


FIG.- 3.43 COEFICIENTE DE FRICCIÓN DEL FONDO DEL MAR
(EN CASO DE FONDO RUGOSO)

Utilizando la Fig.- 3.40, el coeficiente de la disminución (K_f) será de 0.986. Además se debe considerar la deformación por efecto de fondo. Los coeficientes de fondo en los lugares de 100m y 50m de profundidades son los siguientes.

$$(1) \quad h=100m$$

$$L_o = \frac{g}{2\pi} T_o^2 = 1.56 \times 15^2 = 351m$$

$$\frac{h}{L_o} = 0.285, \quad \frac{H'_o}{L_o} = \frac{10}{351} = 0.0285$$

Con la Fig.-3.33, $K_s = 0.95$

$$(2) \quad h=50m$$

$$\frac{h}{L_o} = \frac{50}{351} = 0.142, \quad \frac{H'_o}{L_o} = 0.0285$$

Con la Fig.- 3.33, $K_s = 0.92$

Por eso, la altura de la ola (H_2) será:

$$H_2 = \frac{(K_s)_{50}}{(K_s)_{100}} \cdot K_f \cdot H_1 = \frac{0.92}{0.95} \times 0.986 \times 9.5 = 9.07m$$

La profundidad promedio, en la segunda zona de la distancia de 4 km, será de 40m, y por lo anterior:

$$\frac{T^2}{h} = 5.6$$

$$\frac{fH_1 \Delta X}{h^2} = \frac{0.01 \times 9.07 \times 4000}{40^2} = 0.227$$

Con la Fig.- 3.40, el coeficiente de disminución es:

$$K_f = 0.969$$

El coeficiente de fondo en el lugar que tiene 30m de profundidad es:

$$\frac{h}{L_o} = \frac{30}{351} = 0.085, \quad \frac{H'_o}{L_o} = 0.0285$$

$$(K_s)_{30} = 0.97$$

Por eso, la altura de la ola en el lugar que tiene 30m de profundidad será:

$$H_2 = \frac{(K_s)_{30}}{(K_s)_{50}} K_f H_1 = \frac{0.97}{0.92} \times 0.969 \times 9.07 = 9.3m$$

Si no afectamos la disminución de la altura de ola por la fricción del fondo, la altura de ola en este lugar será:

$$H = K_s H_0 = 0.97 \times 10.0 = 9.7 \text{ m}$$

Por eso, disminuye 40cm la altura de ola por efecto de la fricción del fondo

(2) El método de Shuto

Se puede aplicar este método solamente al oleaje largo infinito. Por lo que en el ejemplo se tiene el periodo de la ola de 30 seg.

Las otras condiciones son:

Diámetro de la arena del fondo: $Z_0 = 0.5 \text{ mm}$

Profundidad: $h = 10 \text{ m}$

Altura de ola: $H = 1.0 \text{ m}$

Distancia de la propagación de la ola: $\Delta X = 2 \text{ km}$

Se considera la disminución por la fricción del fondo en este caso como sigue:

$$U_b = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} = \frac{3.14 \times 1.0}{30} \times \frac{1}{0.215} = 0.49 \text{ (m/seg)}$$

El valor del índice (M) es:

$$V = 1.1 \times 10^{-2} \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{seg}} \right)$$

$$M = \frac{30 U_b Z_0}{V} = \frac{30 \times 0.49 \times 0.05}{1.1 \times 10^{-2}} = 66.89 > 100$$

Por eso, podemos suponer que el fondo es rugoso:

$$\frac{\bar{U}}{\delta_{s0}} = \frac{H}{2} \frac{1}{Z_0 \sinh \frac{2\pi h}{L}} = \frac{100}{2} \times \frac{1}{0.05 \times 0.215} = 4.65 \times 10^3$$

$$U^2 = \frac{g T^2 H}{h^2} = \frac{9.8 \times 30^2}{100} = 88.2$$

Con la Fig.- 3.43, el coeficiente de fricción (C_1) es 8×10^{-3} . En la Fig.- 3.41, el valor de $C_1 \Delta X / g T^2$ es:

$$\frac{C_1 \Delta X}{g T^2} = \frac{8 \times 10^{-3} \times 2000}{9.8 \times 30^2} = 1.8 \times 10^{-3}$$

Por eso,

$$K_f = \frac{H_2}{H_1} = 0.93$$

Es decir, disminuye la altura de ola en 7cm por la fricción del fondo.

CAPITULO 4
ALCANCE, OVERTOPPING Y TRANSMICION DE OLAJE

1 ALCANCE (RELAMIDO) DE OLAJE

Cuando el oleaje llega a la costa, o a una estructura tiende a subir por su talud. El fenómeno de alcance está determinado por muchos elementos; tales como: las dimensiones del oleaje, las formas del dique, la localización, el perfil del fondo. Por eso es deseable determinar la altura del alcance con ensayos en modelo.

1.1 Caso en que la sección es uniforme

Este caso se tiene cuando la pendiente del fondo es uniforme, podemos estimar la altura del alcance como sigue:

(1) Cuando el oleaje no rompe

Se presenta cuando la estructura está en una zona más profunda que la rompiente. Entonces no rompe el oleaje sobre el talud, es decir que el valor de α_c según Miche es mayor que el valor que se da con la siguiente fórmula que nos representa la esbeltez del oleaje:

$$\sqrt{\frac{2\alpha_c}{\pi}} \cdot \frac{\text{sen}^2 \alpha_c}{\pi} = \frac{H'o}{L_o} \quad (4.1)$$

La altura de alcance se da con la siguiente fórmula según Takada:

$$\frac{R}{H'o} = \left[\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha_c}} + \left(\frac{\eta_s}{H_1} - 1 \right) \right] K_s \quad (\alpha > \alpha_c) \quad (4.2)$$

donde,

H'o : Altura de la ola equivalente en aguas profundas

Ks : Coeficiente de fondo

H₁ : Altura de ola frente a la estructura

η_s : Altura de la cresta de ola del nivel del mar

R : Altura de alcance

Se recomienda que el valor de $\frac{\eta_s}{H_1}$ se obtenga con la siguiente fórmula, según Miche:

$$\frac{\eta_s}{H_1} = 1 + \pi \frac{H_1}{L} \coth kh \left(1 + \frac{3}{4 \text{senh}^2 kh} - \frac{1}{4 \cosh^2 kh} \right) \quad (4.3)$$

donde,

k : Número de ola $\left(\frac{2\pi}{L} \right)$

Cuando el oleaje rompe sobre el talud; es decir el valor de α_c es menor que el valor obtenido en la fórmula - 4.1, la altura del alcance se da con la fórmula -4.4 según Takada.

$$\frac{R}{H_0'} = \left[\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha c}} + \left(\frac{\eta s}{H_1} - 1 \right) \right] \cdot K_s \cdot \left(\frac{\cot \alpha c}{\cot \alpha} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (\alpha > \alpha c) \quad (4.4)$$

Con las fórmulas - 4.3 y -4.4, podemos estimar la altura en caso del oleaje no rompiente. La altura del alcance será máxima en caso de $\alpha = \alpha c$.

(2) Cuando el oleaje rompe.

Este caso se da cuando, la estructura está en zona de rompiente.

En este caso no podemos estimar la altura del alcance teóricamente, por lo que se estima con ensayos hidráulicos en modelo. Se presentan los resultados de los ensayos, según Toyoshima, para casos en que las pendientes sean de 1/20 y 1/30 en las Figs.- 4.1 (a) a 4.1(h).

1.2 Caso en que la sección no es uniforme

Este caso se presenta en la Fig.- 4.2. La altura del alcance se estima como sigue:

- (i) Se calcula la profundidad de rompiente (h_b) basándose en los valores del oleaje en aguas profundas (punto B)
- (ii) Suponemos la altura del alcance (R_1) (punto A) y unimos los puntos. Esta pendiente (α) será la supuesta ($\cot \alpha$).
- (iii) Con la Fig.- 4.3, estimamos la altura del alcance R_2 usando la pendiente supuesta ($\cot \alpha$) y luego comparamos los valores de R_1 y R_2 . Si no son iguales tenemos que cambiar el valor de R. Se obtiene el valor de R repitiendo este procedimiento.

Este método se puede utilizar en caso de que la pendiente del fondo sea mayor de 1/30.

Cuando la pendiente del fondo sea menor de 1/50, se puede usar la Fig.- 4.4 según Hosoi para estimar la altura del alcance.

1.3 Caso en que el oleaje incide oblicuamente

Cuando el oleaje incide oblicuamente a la costa, la altura del alcance será más pequeña que cuando incide perpendicularmente.

Suponiendo que el ángulo entre la línea de costa y la línea de cresta del oleaje es β . Cuando $\beta=0^\circ$, la altura del alcance será máxima.

Se presenta la relación entre el ángulo (β) y el coeficiente de la altura del alcance ($K\beta$) en la Fig.- 4.5 según Hosoi y Shuto. Otros resultados de ensayos también se presentan en la figura.

1.4 Efecto de la estructura que absorbe la energía de oleaje

Llamemos a la estructura que absorbe la energía del oleaje 'la estructura absorbente'. Cuando se cubre de elementos artificiales de concreto como Tetrápodos un dique, se disminuye la altura del alcance. El efecto de la estructura absorbente sobre el alcance se presenta en la fig. - 4.6. En realidad el efecto cambia por los métodos usados en la cubierta de la estructura absorbente. Por eso es recomendable que se determine la altura del alcance con ensayos en modelo.

1.5 Determinación de la elevación de la estructura

Se deben considerar como resultados de los ensayos de modelo sobre el alcance a los promedio de datos. Además cuando se diseñan las estructuras con el oleaje significativo, algunas olas rebasan las estructuras. Por eso, para decidir la elevación de las estructuras se debe considerar no solo el alcance, sino también el overtopping del oleaje.

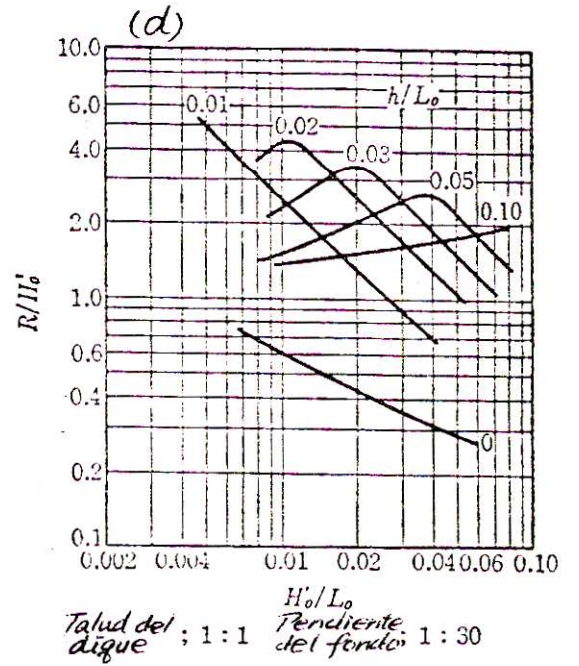
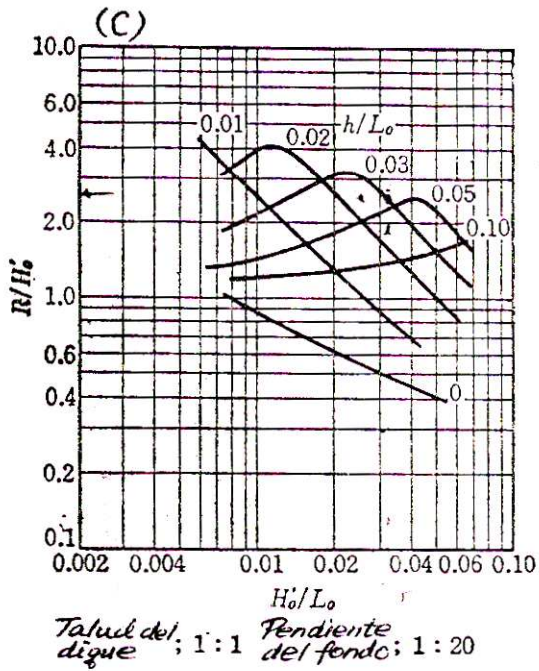
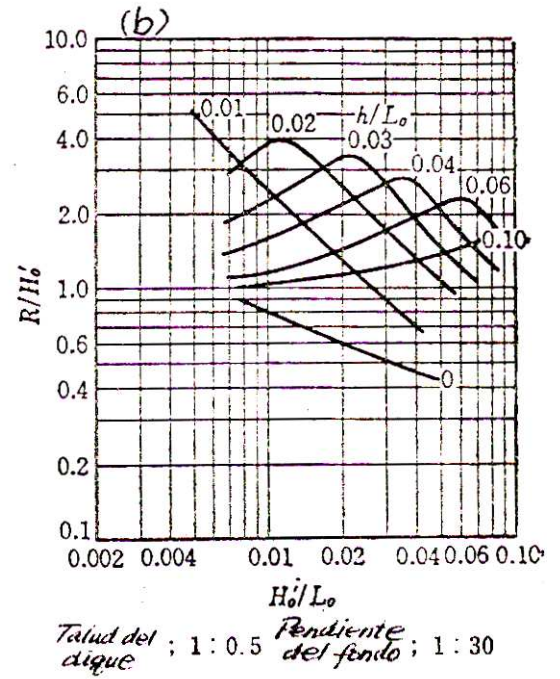
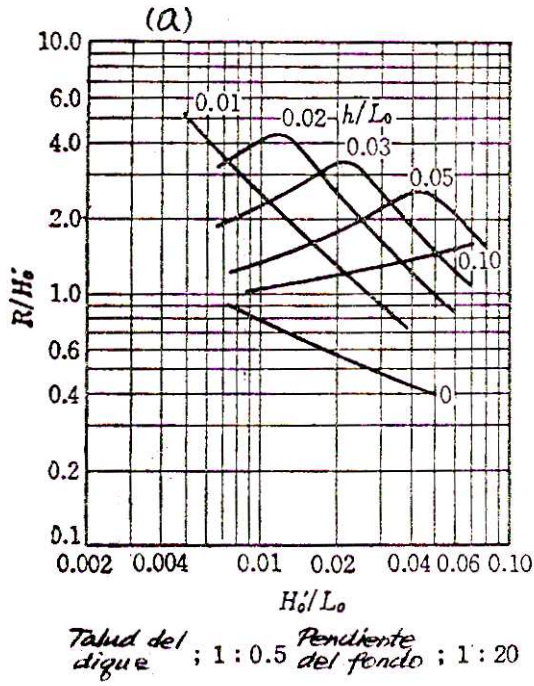
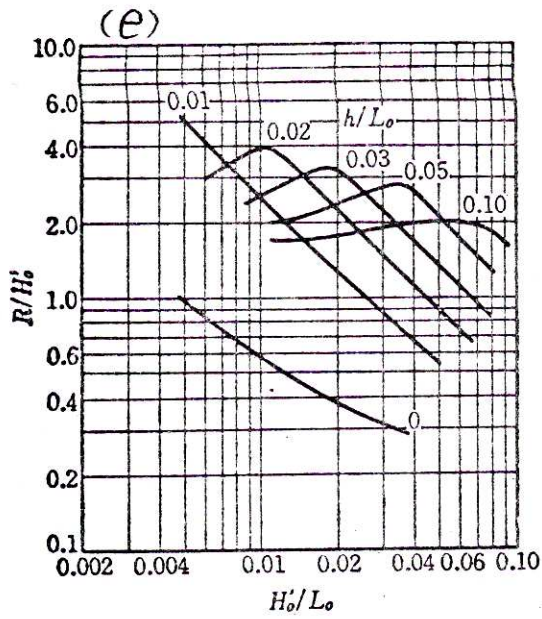
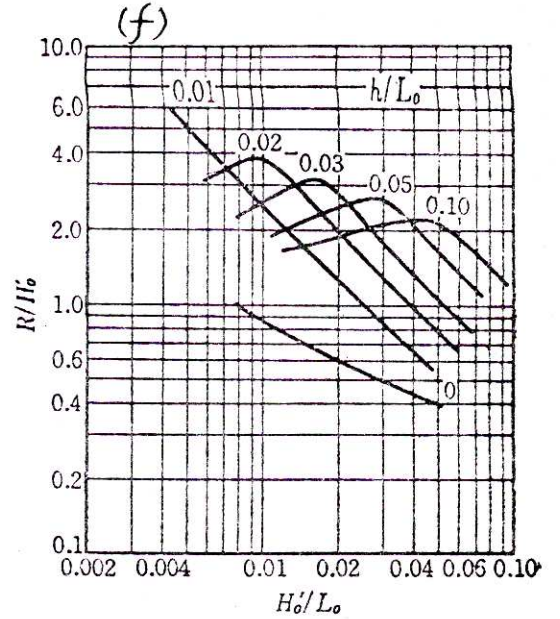


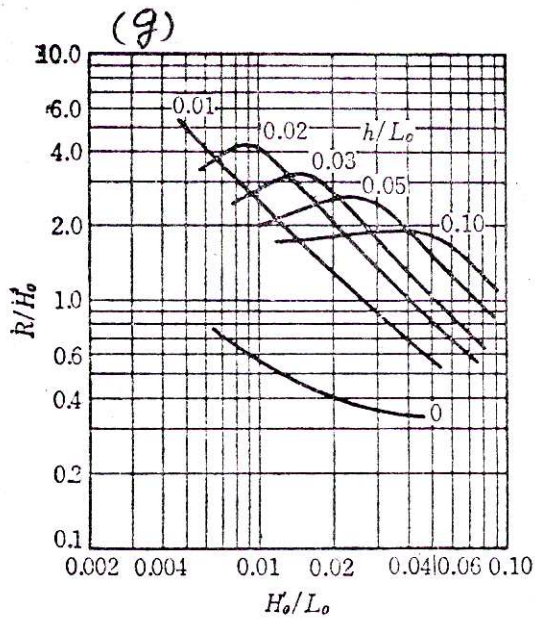
FIG.- 4.1 (a) A (d) ALTURA DE ALCANCE



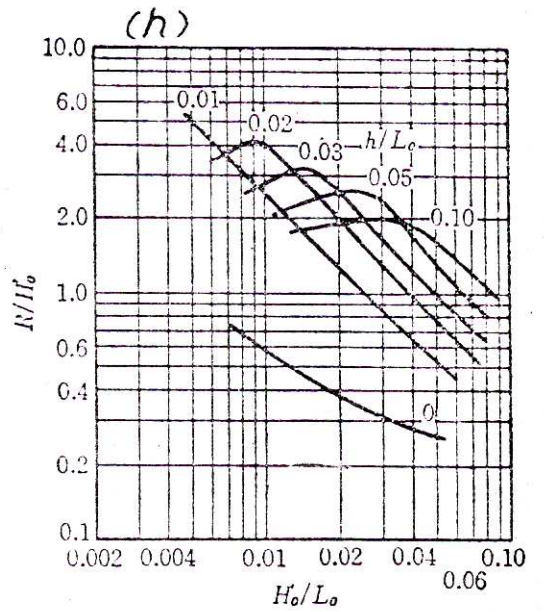
Talud del dique ; 1:2 Pendiente del fondo; 1:20



Talud del dique ; 1:2 Pendiente del fondo; 1:30



Talud del dique ; 1:3 Pendiente del fondo; 1:20



Talud del dique ; 1:3 Pendiente del fondo; 1:30

FIG.- 4.1 (e) A (h) ALTURA DE ALCANCE

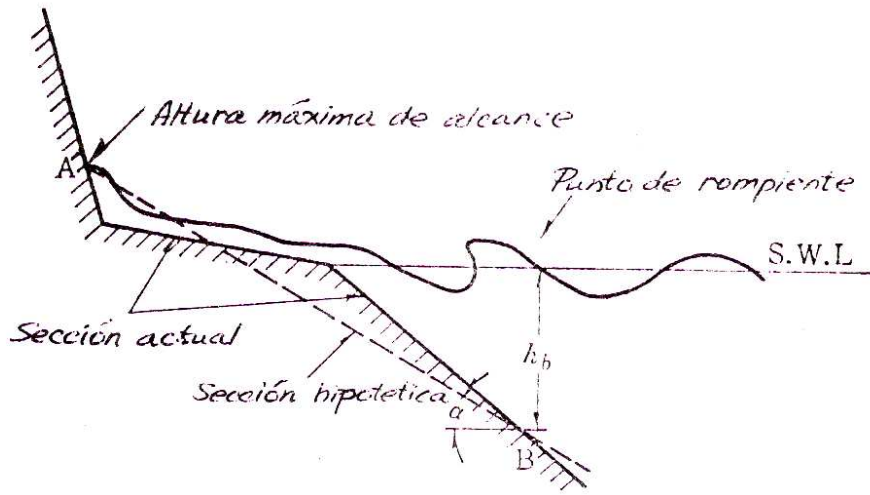


FIG.- 4.2 SECCION NO UNIFORME Y LA PENDIENTE HIPOTETICA

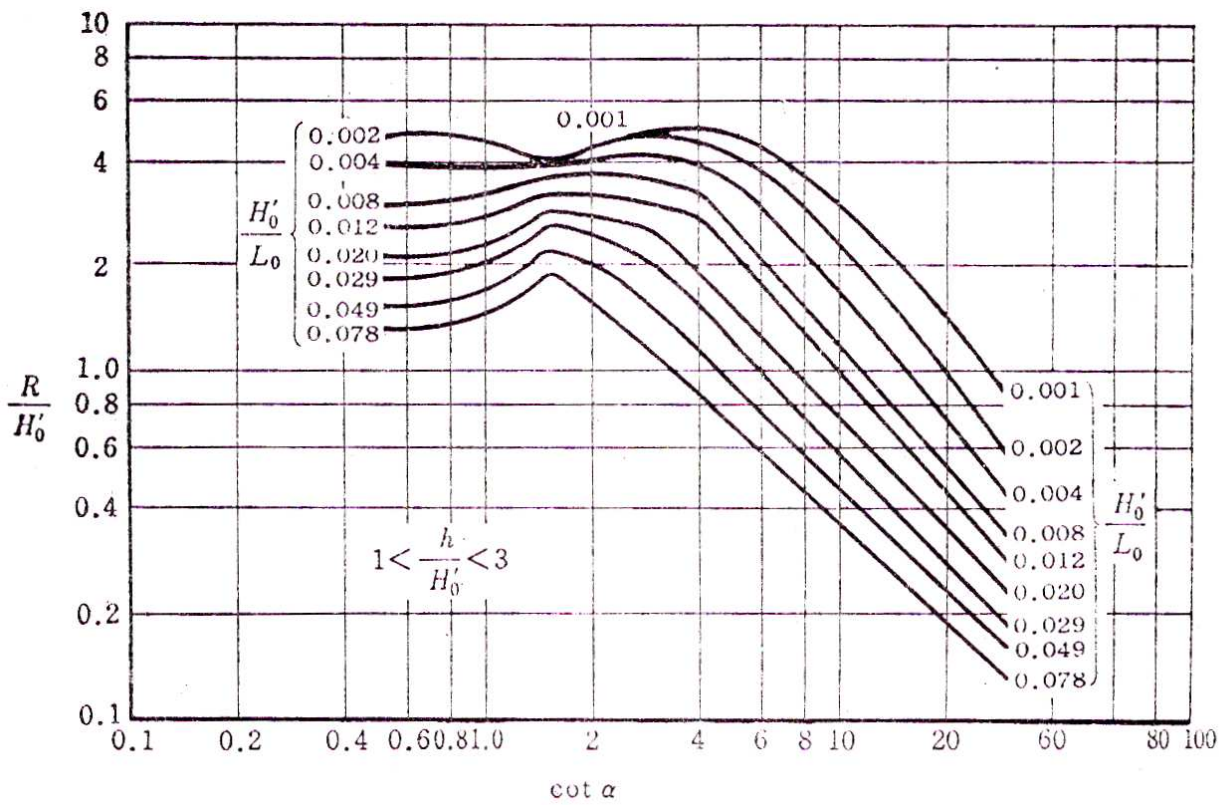


FIG.- 4.3 ALTURA DE ALCANCE PARA SECCIONES NO UNIFORMES

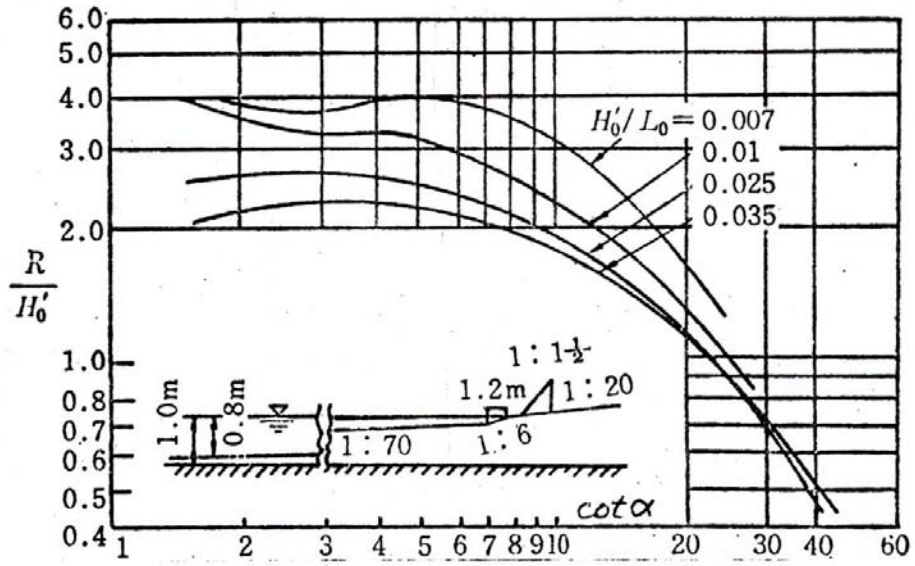


FIG.- 4.4 ALTURA DE ALCANCE EN CASO DE PENDIENTE SUAVE DEL FONDO

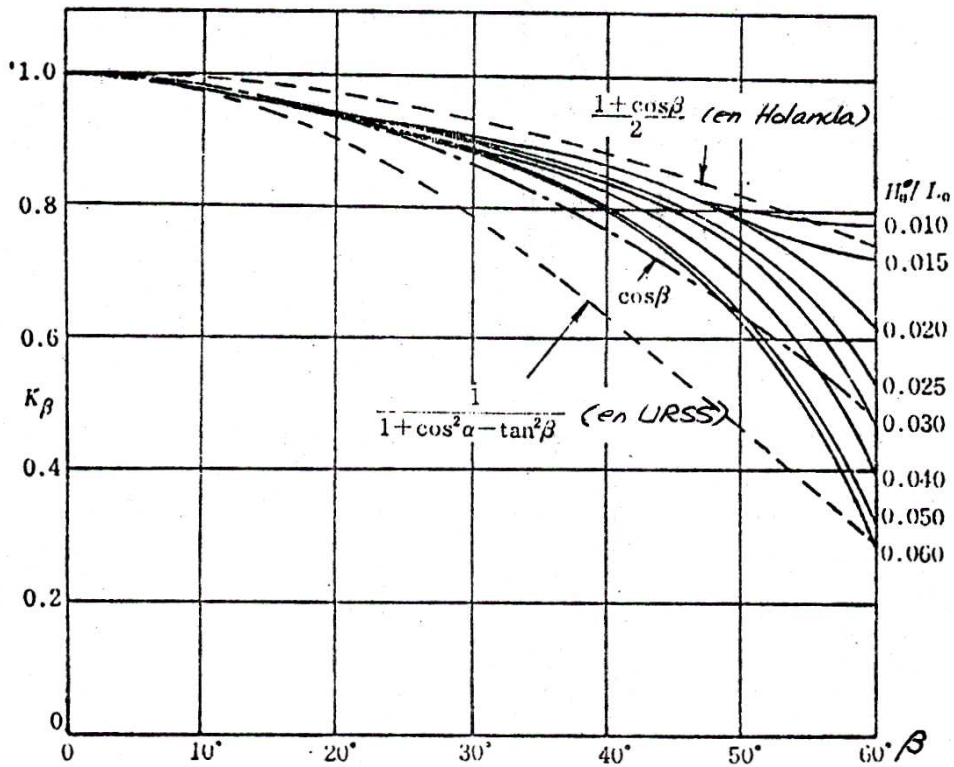


FIG.- 4.5 RELACION ENTRE EL ÁNGULO Y LA ALTURA DEL ALCANCE

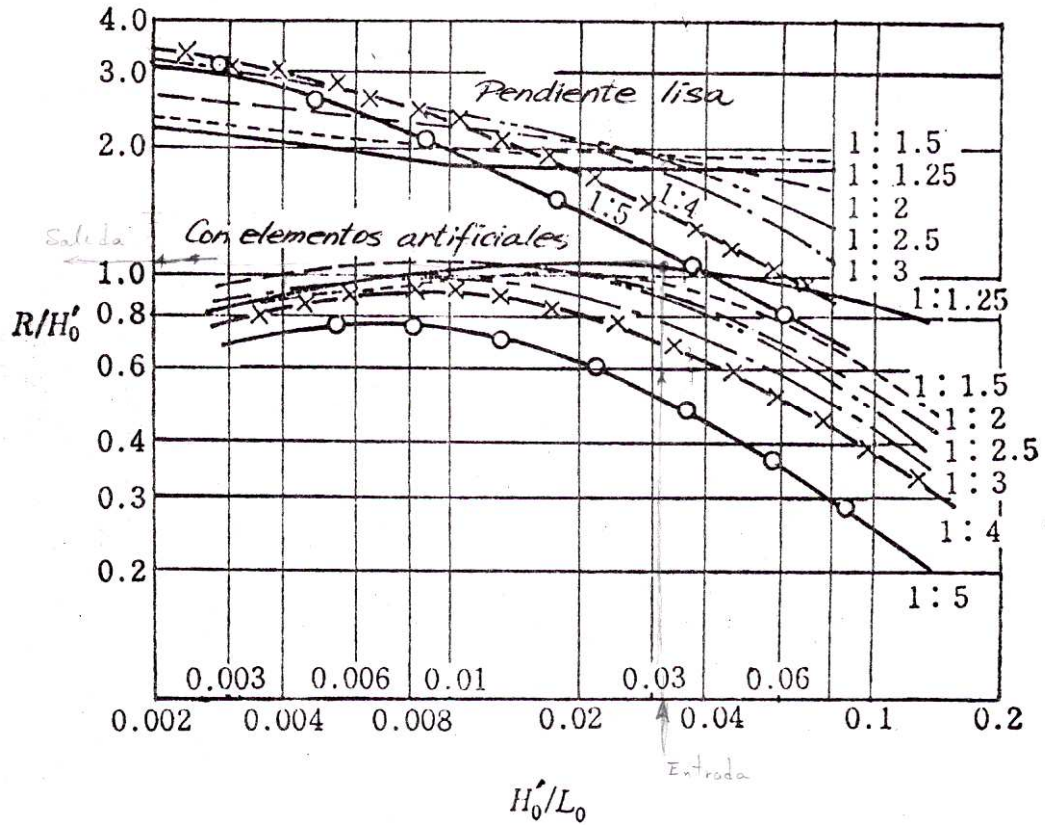


FIG.- 4.6 ALTURA DEL ALCANCE EN EL CASO DE ELEMENTOS ARTIFICIALES DE CONCRETO EN LA CUBIERTA

2 OVERTOPPING DEL OLAJE

Para las estructuras donde el volumen de overtopping es un elemento importante, el volumen de overtopping normalmente se estima con los ensayos o con los resultados de ensayos hechos anteriormente. En este caso se debe considerar la irregularidad de oleaje.

2.1 Concepto del volumen de overtopping del oleaje irregular

El volumen de overtopping es el total del agua sobrepasado y la razón del volumen de overtopping es el volumen promedio del agua sobrepasado por cada unidad de tiempo.

El volumen total de overtopping por el oleaje irregular se puede presentar con la Fórmula – 4.5.

$$Q_{total} = \sum_t Q_i(H_i, T_i)nt(H_i, T_i) \quad (4.5)$$

donde,

Q_{total} : Volumen total del agua sobrepasado

Q_i : Volumen del agua sobrepasado por las olas que tiene el valor de H_i y T_i

n : Número de ola que tiene H_i, T_i

H_i : Altura de ola

T_i : Período de ola

La razón del volumen de overtopping se calcula con la fórmula siguiente:

$$g_{exp} = \sum_i g_i(H_i, T_i) \frac{T_i}{\bar{T}} \cdot \frac{n_i(H_i, T_i)}{N} \quad (4.6)$$

donde, \bar{T} es el período promedio y N es el número total de olas.

Cuando N es más grande, $\frac{n_i}{N}$ será la probabilidad de ocurrencia ($p(H) \cdot d(H)$). Si se considera constante el periodo de g_{exp} se calcula con la fórmula siguiente:

$$g_{exp} = \int_0^{\infty} g(H) \cdot p(H) \cdot dH \quad (4.7)$$

g_{exp} es un valor esperado y por eso se llama la razón del volumen esperado de overtopping.

Los resultados del ensayo presentan que el valor de g_{exp} cambia por el período promedio. Por eso, se introduce el efecto del período a la forma de H_o/L_o en las figuras del volumen de overtopping que se presentan más adelante.

Cuando se estima la razón del volumen de overtopping con el ensayo, es conveniente que se usen oleajes irregulares. Pero si no se puede, podemos estimarla con el oleaje regular. En este caso, primero se hace una curva de la razón del volumen de overtopping por cada altura de la ola equivalente en aguas profundas. En el ensayo de oleaje regular se puede usar el período significativo del oleaje y se calcula la razón del volumen de overtopping por la probabilidad de ocurrencia para cada altura de ola.

2.2 Figuras de la razón del volumen de overtopping

Podemos estimar la razón del volumen de overtopping con las Figs.- 4.7. a 4.10. Estas figuras se consideran para un dique vertical el cual se cubre con piedras o elementos artificiales de concreto como Tetrápodos. Estas figuras se han hecho con ensayos de oleaje irregular.

La comparación entre los resultados del ensayo y las observaciones en campo indican que los valores de la precisión de las figuras estarán en los intervalos que se presentan en la Tabla - 4.1.

Las Figs.- 4.7 y 4.8 son para el caso de un dique vertical y las Figs.- 4.9 y 4.10 son para el caso de un dique cubierto con elementos de piedra o elementos artificiales de concreto.

Si no coinciden los valores de relación de esbeltez en aguas profundas (H_o/L_o), se puede estimar la razón del volumen de overtopping con el método de interpolación utilizando las figuras.

Se presenta la razón del volumen de overtopping en el caso de un dique escalonado en la Fig.- 7.11. Es el resultado del ensayo del oleaje irregular y en esta figura se modifican los valores de h y h_c a h' y h'_c para quitar el efecto de "surf beat".

TABLA -4.1 INTERVALOS DEL VOLUMEN EN CAMPO

$\frac{g}{\sqrt{2g(H'o)^3}}$	DIQUE VERTICAL	DIQUE CUBIERTO CON ELEMENTOS ARTIFICIALES
10^{-2}	0.7 a 1.5	0.5 a 2
10^{-3}	0.4 a 2	0.2 a 3
10^{-4}	0.2 a 3	0.1 a 5
10^{-5}	0.1 a 5	0.05 a 10

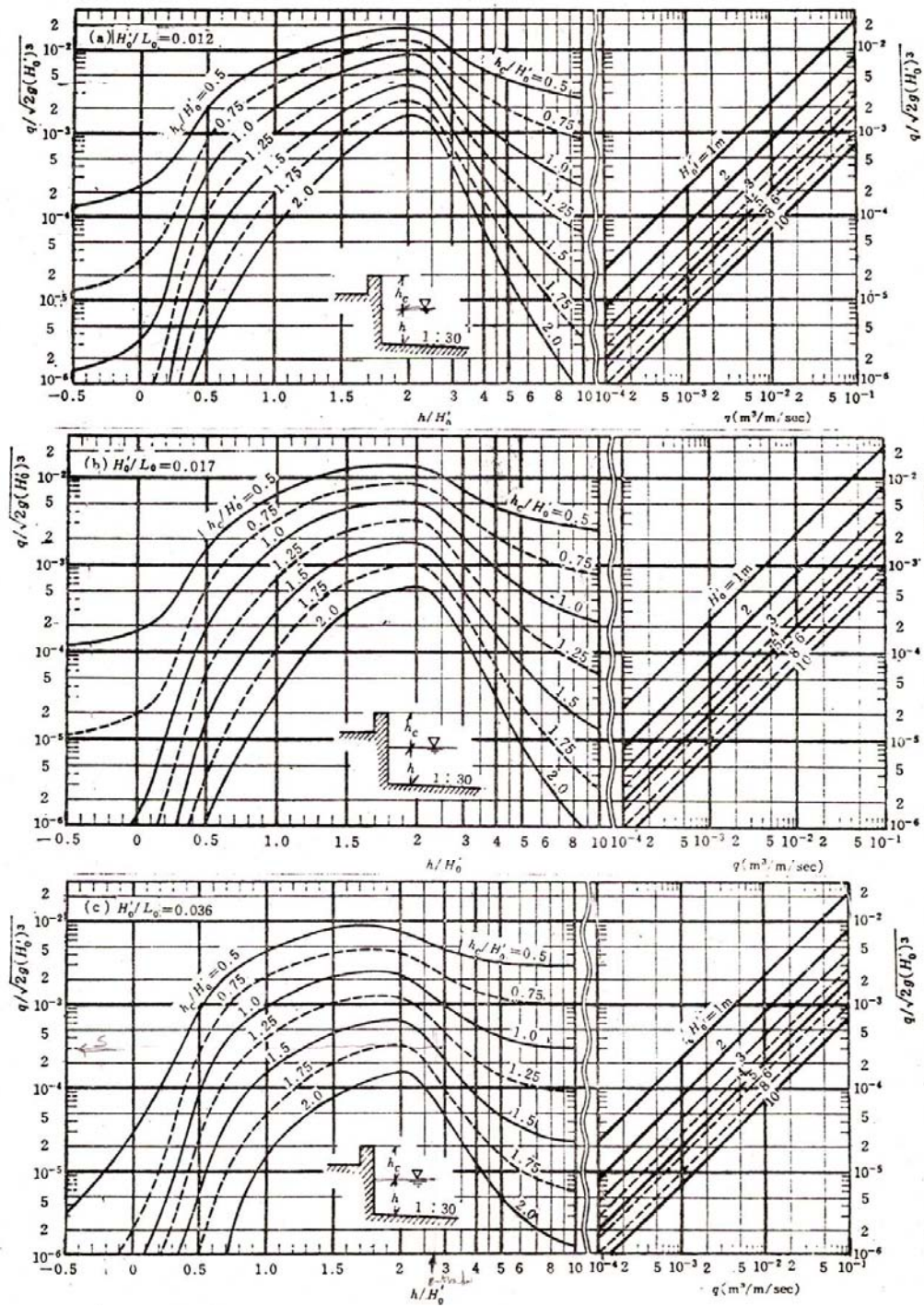


FIG.- 4.7 RAZON DEL VOLUMEN DE OVERTOPPING DE UN DIQUE VERTICAL ($i = 1/30$)

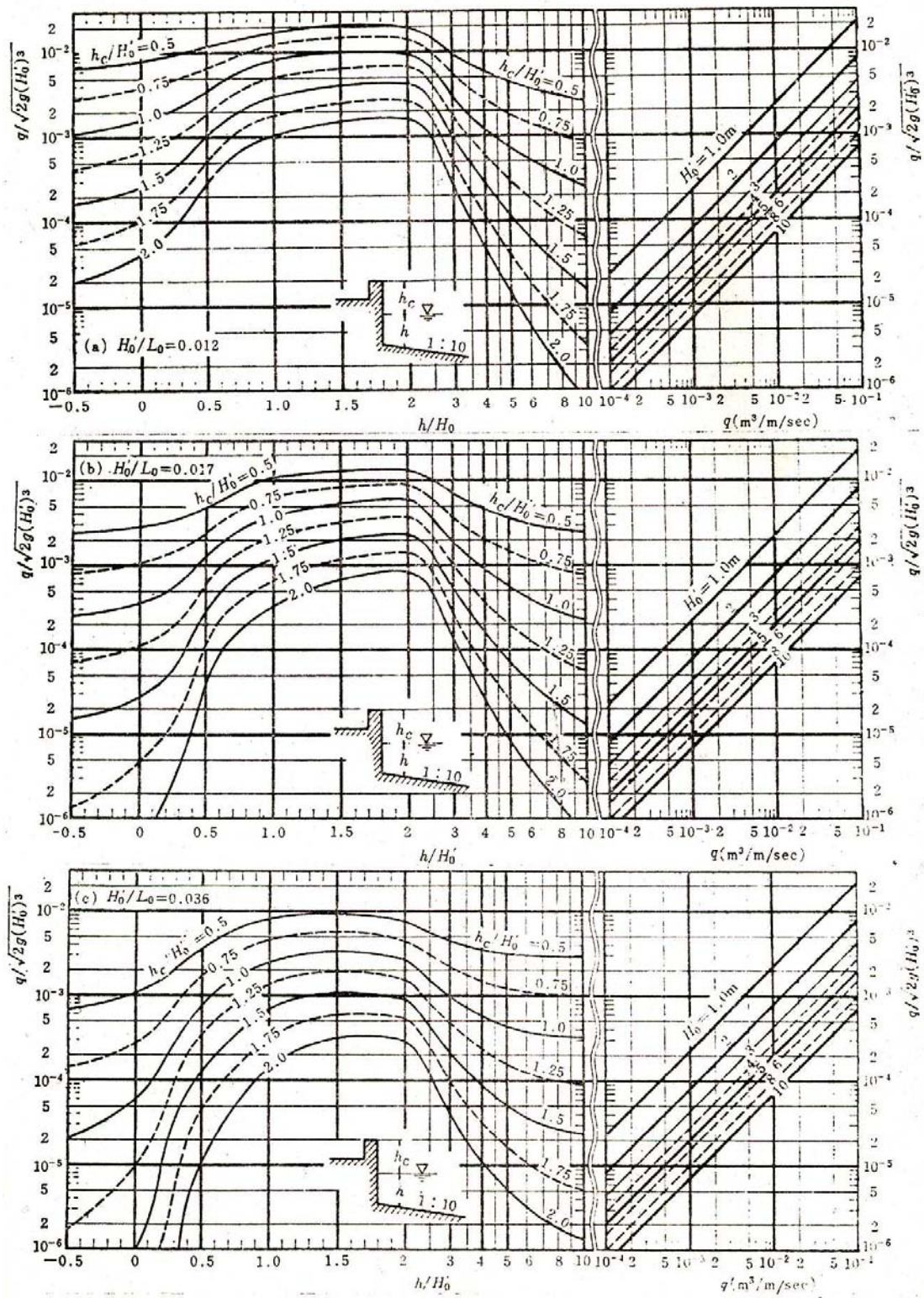


FIG.- 4.8 RAZON DEL VOLUMEN DE OVERTOPPING DE UN DIQUE VERTICAL ($i = 1/10$)

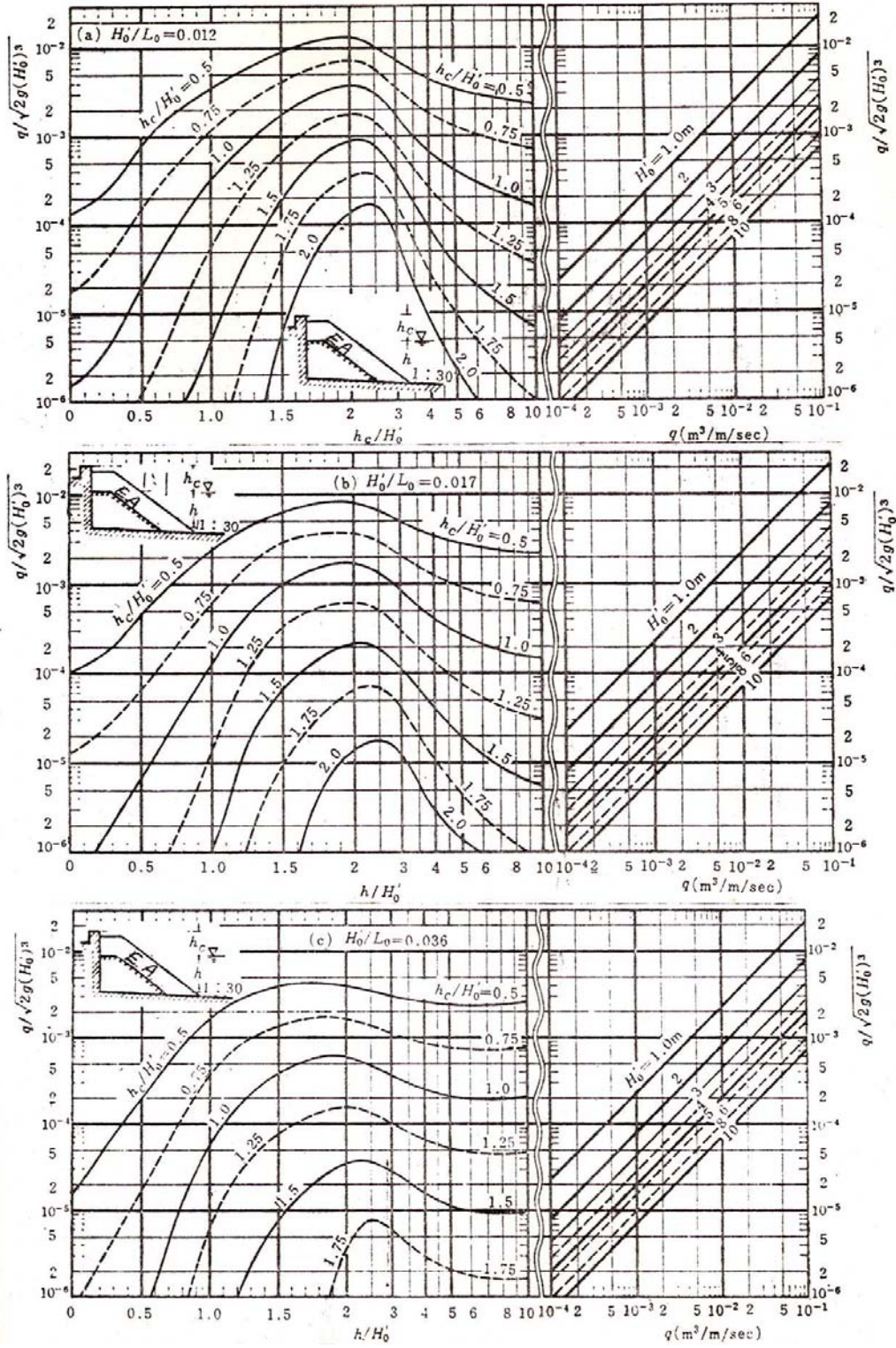


FIG.-4.9 RAZON DEL VOLUMEN DE OVERTOPPING DE UN DIQUE VERTICAL CUBIERTO CON ELEMENTOS SUELTOS ($i = 1/30$)

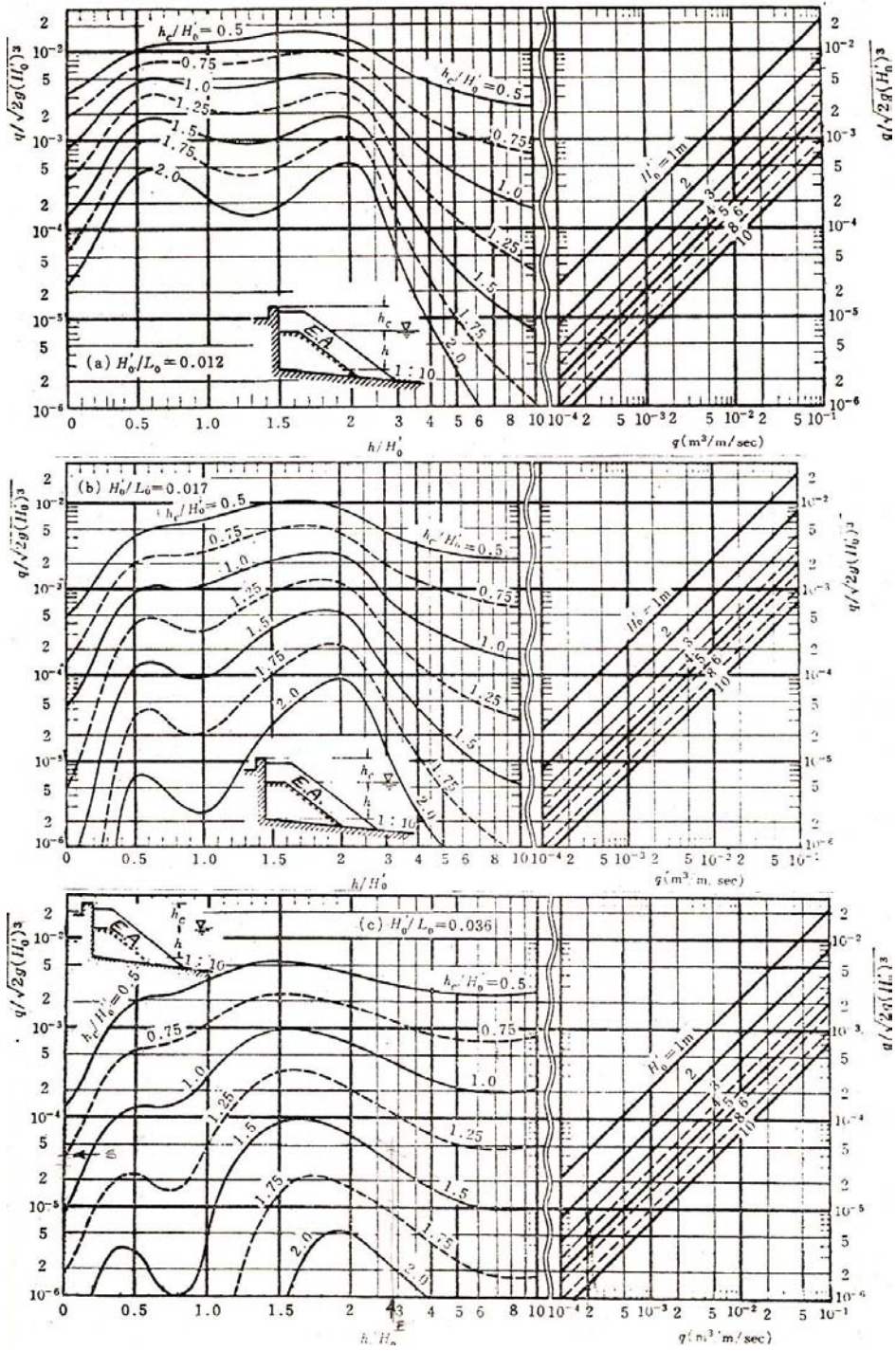


FIG.-4.10 RAZON DEL VOLUMEN DE OVERTOPPING DE UN DIQUE VERTICAL CUBIERTO CON ELEMENTOS SUELTOS ($i = 1/10$)
(Donde: E.A. =Elementos Artificiales)

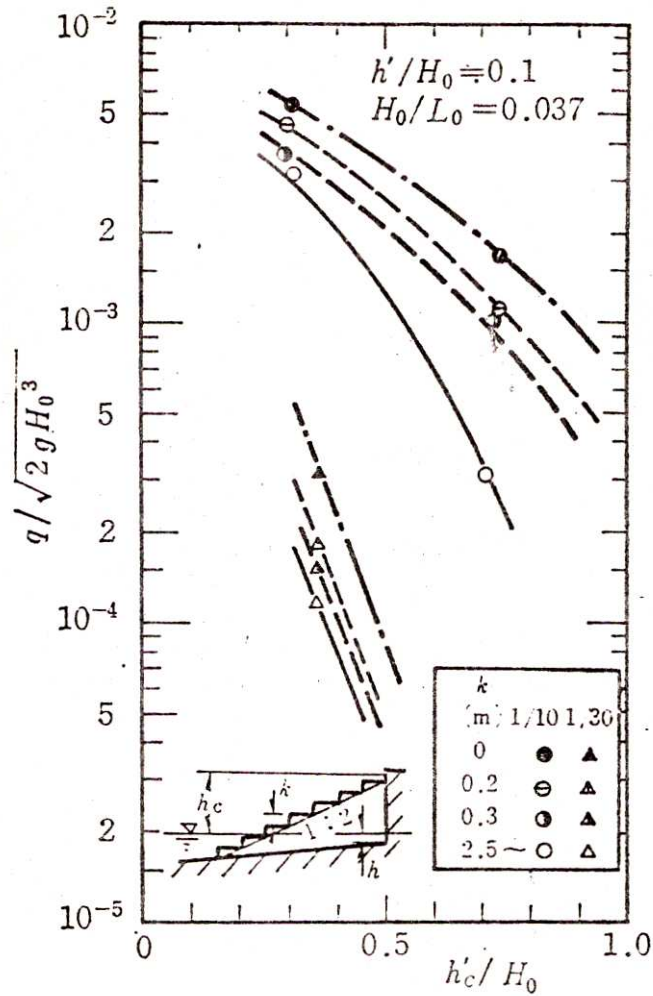


FIG.- 4.11 RAZON DEL VOLUMEN DE UN DIQUE ESCALONADO

3 ALTURA DE OLA TRANSMITIDA DENTRO DEL PUERTO

La altura de ola transmitida por overtopping o el paso del oleaje dentro del rompeolas al puerto se puede estimar con el ensayo de los resultados de ensayos que se hayan hecho anteriormente. La altura de ola transmitida por el overtopping por rompeolas de tipo mixto de enrocamiento y paramento vertical como se presenta en la Fig.- 4.12. Se puede aplicar esta figura al caso del oleaje irregular.

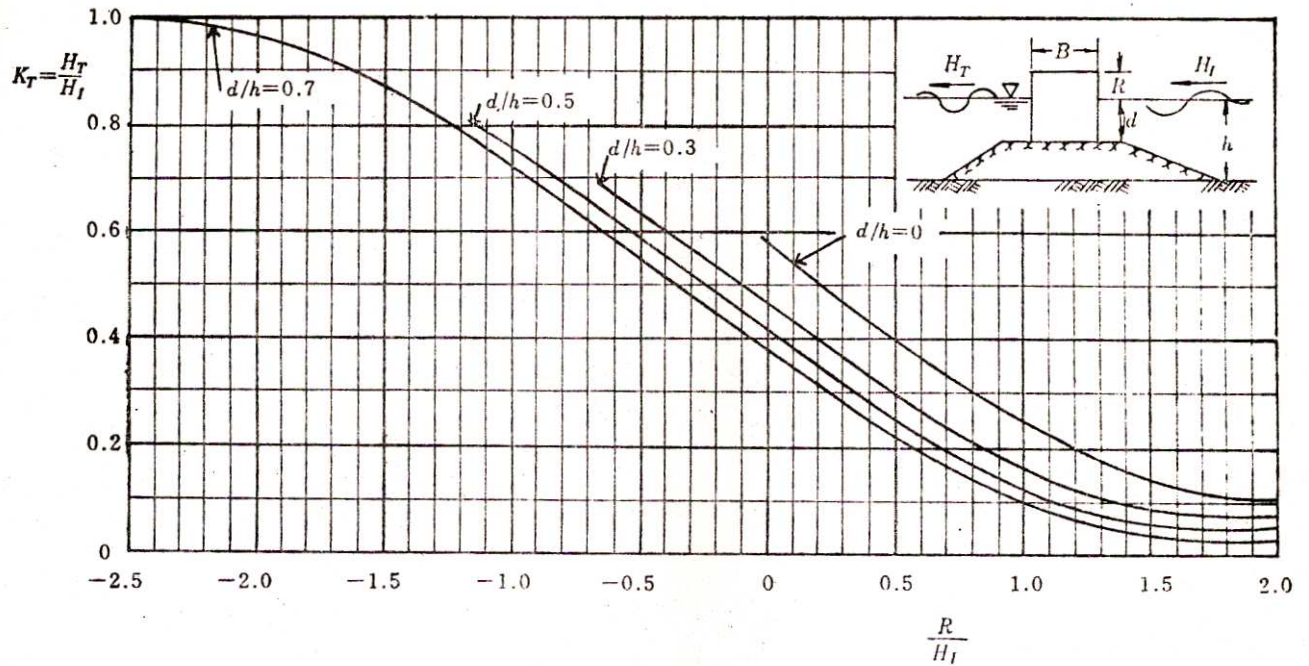


FIG.- 4.12 COEFICIENTE DE LA ALTURA DE OLA TRANSMITIDA

En el caso de que se cubra con elementos artificiales de concreto el paramento del rompeolas como se presenta en la Fig.- 4.13, el coeficiente de transmisión de la altura de ola estará dado con la fórmula – 4.8 según Kondo y Sato.

$$K_T = 0.3 \left(1.1 - \frac{R}{H_I} \right), \quad \left(0 < \frac{R}{H_I} \leq 0.75 \right) \quad (4.8)$$

donde,

K_T : Coeficiente de transmisión

R : Evaluación del rompeolas sobre el nivel del mar

H_I : Altura de la ola incidente

Por otra parte, hay una comparación entre el coeficiente de transmisión de los resultados del ensayo y las observaciones en campo en caso de rompeolas con elementos artificiales de concreto según Hattori como se presenta en la Fig.-4.14. En esta figura, los resultados de ensayo y de las observaciones en campo coinciden. Pero se tiene que recordar que los resultados son para el caso de que el oleaje no rebase la estructura.

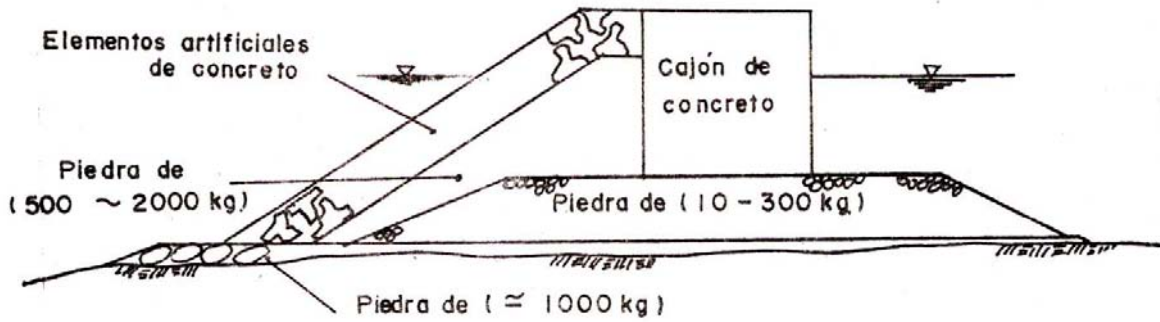


FIG.- 4.13 ROMPEOLAS DEL TIPO COMPUESTO CUBIERTO CON ELEMENTOS ARTIFICIALES

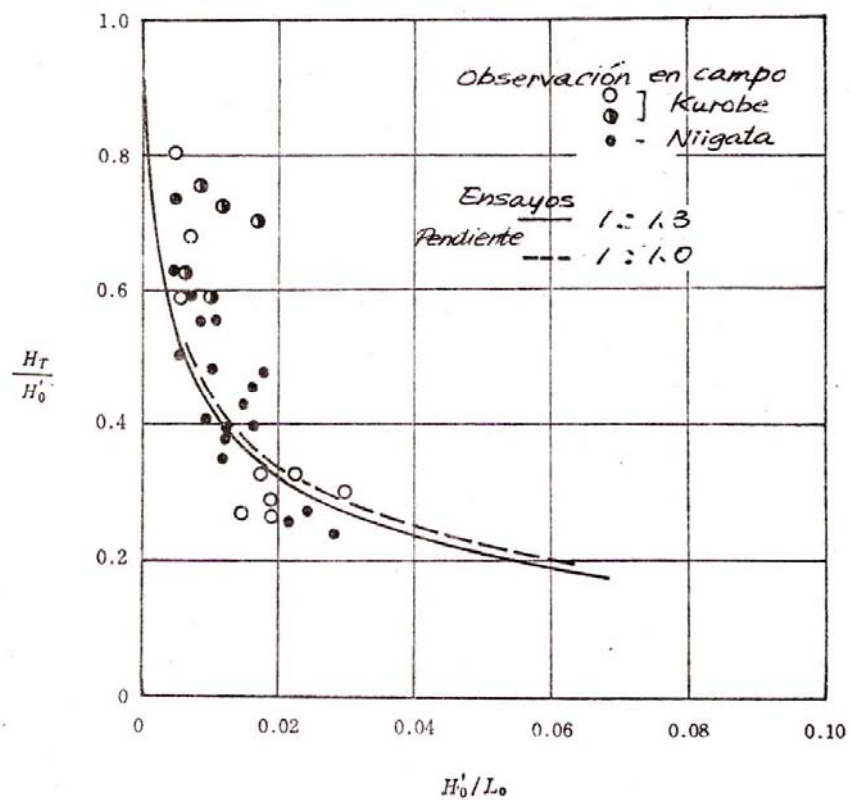


FIG.- 4.14 COMPARACION DEL COEFICIENTE DE LA ALTURA DE OLA ENTRE LOS ENSAYOS Y LAS OBSERVACIONES EN CAMPO

Siendo en esta figura:

H_T : Altura de ola transmitida

H_0' : Altura de ola equivalente en aguas profundas

L_0 : Longitud de olas en aguas profundas

En caso del rompeolas de enrocamiento, el coeficiente de transmisión se da con la siguiente fórmula según Kubo:

$$0 \leq \frac{R}{H_I} < 1 \quad : \quad K_T = 0.56 \left(1 - 0.63 \frac{R}{H_I} - 0.97 \frac{H_I}{L} \right)$$

$$1 \leq \frac{R}{H_I} \quad : \quad K_T = 0.25 \left(1 - 24.8 \frac{H_I}{L} \right)$$

Donde,

R : Elevación del rompeolas sobre el nivel del mar (bordo libre)

H_I : Altura de ola incidente

K_T : Coeficiente de transmisión

L : Longitud de ola

CAPITULO 5 **OLEAJE EN EL PUERTO**

1 TRANQUILIDAD EN EL PUERTO

La tranquilidad en el puerto se relaciona a los factores tales como la agitación del barco, las maniobras de maquinaria, la facilidad de la navegación en el puerto, refugio en tormenta y temporal, el límite de las obras en el mar, la eficiencia de maniobras de carga y descarga y el porcentaje de funcionamiento de operación. Los factores del oleaje relacionados con la tranquilidad del puerto son los siguientes:

(1) Oleaje que entra por la boca del puerto

El oleaje que entra por la boca del puerto se propaga al fondo del mismo por difracción.

(2) Oleaje transmitido a través del rompeolas

El oleaje proveniente de mar adentro se transmite una parte de su energía adentro del puerto por overtopping o a través del enrocamiento. En el caso del oleaje transmitido por overtopping o sea cuando el oleaje se transmite sobrepasando la estructura el periodo de oleaje transmitido es más pequeño que el incidente.

En caso del oleaje transmitido a través del enrocamiento, el oleaje de menor período disminuye al paso y por eso, el período de oleaje transmitido será mayor.

(3) Oleaje reflejado

Se reflejan los oleajes que entran en el puerto por la existencia de muelles u otras estructuras. Por eso, se debe considerar el efecto del oleaje reflejado para estimar la tranquilidad en el puerto.

(4) Oleaje ocasionado por barcos

El oleaje que se produce por barcos grandes que navegan en el puerto a veces sacude a los barcos pequeños por lo que baja la eficiencia de las maniobras de carga y descarga. No conociéndose las características de este oleaje cualitativamente.

(5) Oleaje generado por viento en el puerto

Para puertos grandes ocurre un oleaje generado por viento. La altura y el período del oleaje será mayor cuando la velocidad del viento sea más grande y el fetch más largo.

Por eso, a veces se tiene que considerar este oleaje.

(6) Seiches

El seich que ocurre en el puerto por el oleaje exterior sacude los barcos en el puerto. Especialmente en el caso de barcos contenedores, el seich baja la eficiencia de las maniobras de carga y descarga. Por lo tanto, también se debe considerar este efecto.

Sobre la sacudida del barco, es importante considerar no solo el efecto de altura sino también el efecto de período en estos factores.

2 PROCEDIMIENTO DE LA ESTIMACION DEL OLEAJE EN EL PUERTO

2.1 Esquemas para calcular la probabilidad de la ocurrencia de excedencia de la altura de ola

Es recomendable calcular la posibilidad de ocurrencia de excedencia de la altura de la ola con la Fig.- 5.1. Además, de vez en cuando se deben considerar los oleajes generados por barco, por viento y seich. En la figura se presenta el procedimiento para calcular el oleaje exterior del puerto en la parte izquierda y el oleaje del puerto en la parte derecha. El procedimiento para el oleaje en el puerto se divide en los cálculos de difracción y reflexión en la boca del puerto y el análisis del oleaje transmitido. Para calcular el oleaje exterior del puerto se deben conseguir los datos del oleaje del puerto en cuestión de algún puerto cercano. Si faltaran datos, se deben complementar con los valores estimados de los datos meteorológicos.

Luego, se calcula el número de ocurrencia de excedencia y de altura de cada dirección. En el caso de estimar la altura de ola en el puerto, se deben elegir los lugares en que se calculan las alturas de ola considerando los planos de localización de las estructuras del puerto. Se calculan, seguidamente, el oleaje entrante y el transmitido a los lugares que se eligen. Finalmente se calcula la probabilidad de la ocurrencia de excedencia de la altura de la ola para todas las direcciones.

2.2 Distribución de la ocurrencia del oleaje exterior al puerto

Es recomendable que se usen los datos de oleaje observados o estimados por más de 5 años y se dividen los datos en anuales o estacionales, normalmente se presentan los valores de probabilidad de ocurrencia con la de excedencia cada año. Se divide la dirección del oleaje en más de tres direcciones. Si, no existen los datos sobre la dirección, se estiman con los datos del viento. En este caso se deben considerar los siguientes:

En la tabla de ocurrencia de altura y período de oleaje relacionado respectivamente, la parte que se satisface la relación:

$$T_{1/3} < \sqrt{30H_{1/3}}$$

Puede ser considerada como "wind wave", por eso la dirección del oleaje coincidirá con la del viento. Por otra parte, si

$$T_{1/3} > \sqrt{50H_{1/3}}$$

En la tabla se considerara como "swell". Por lo tanto la dirección del oleaje se estima considerando las características del área. En este caso, se aconseja utilizar los datos observados en campo. La probabilidad de ocurrencia del viento fuerte normalmente está determinada para un viento de más de 10m/seg.

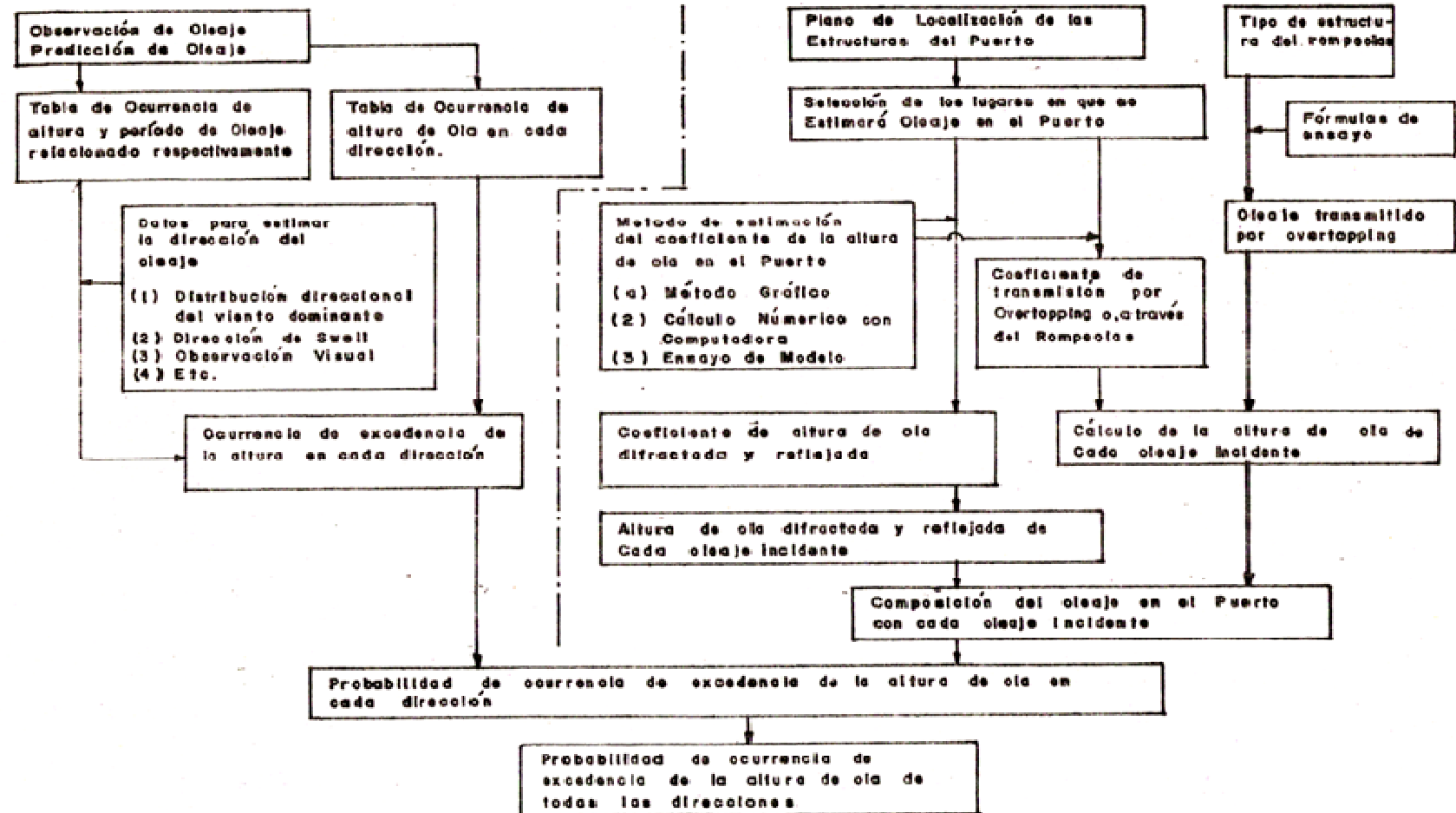


FIG.- 5.1 ESQUEMA DEL CALCULO DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE EXCEDENCIA DE LA ALTURA DE OLA

El rango de la altura de ola es cada metro y el periodo se toma en dos o tres divisiones. Si no se divide el periodo, se toma el periodo predominante en cada dirección como se presenta en la Tabla – 5.1.

TABLA.- 5.1 EJEMPLO DEL NUMERO DE OCURRENCIA DE EXCEDENCIA DE LA ALTURA DE OLA PARA CADA DIRECCION

DIRECCION DEL OLAJE	PERIODO SELECCIONADO (SEG)	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL OLAJE						
		MAS DE 0.0m	MAS DE 1.0m	MAS DE 2.0m	MAS DE 3.0m	MAS DE 4.0m	MAS DE 5.0m	MAS DE 6.0m
ESE A SE	6	40.8	13.3	3.4	1.1	0.3	0	0
SSE A S	12	33.8	22.4	11.8	5.2	2.3	0.8	0.3
SSW A SW	10	25.4	14.7	6.3	2.6	0.8	0.2	0
TODAS LAS DIRECCIONES		100.0	50.4	21.5	8.9	3.8	1.2	0.3

2.3. Oleaje que pasa por la boca del puerto

La proporción de la altura de ola en el puerto por la altura de ola que incide se estima con: el método gráfico, los resultados del análisis numérico y de ensayos de modelo. En estos casos, se debe considerar el oleaje reflejado en el puerto. Para estimar la altura de ola en el puerto se usa el oleaje irregular. Si se estima con oleaje regular, se debe considerar la irregularidad del mismo. En el caso del método gráfico, se usarán las figuras de difracción de oleaje irregular.

2.4 Oleaje transmitido

El cambio de altura de ola en el puerto del oleaje transmitido se calcula como sigue:

Primero, consideramos que la parte del rompeolas que transmite el oleaje es una boca hipotética y se calcula el coeficiente de difracción con las figuras de difracción del oleaje regular.

Conocido el k_d en un lugar de estudio del puerto, la altura de la ola se obtiene con la siguiente expresión:

$$H = k_d \cdot K_T \cdot H_I \quad (5.1)$$

donde,

K_T : Coeficiente de transmisión

H_I : Altura de ola incidente

2.5 Probabilidad de ocurrencia de excedencia

Es conveniente calcular la probabilidad de ocurrencia de excedencia considerando los elementos del oleaje en el puerto (oleaje incidente, transmitido, reflejado, etc.). También se puede graficar la probabilidad sustituida por los días en un año con las alturas de ola.

Se calcula la altura de ola en el puerto para cada rango de altura de probabilidad de ocurrencia de excedencia del oleaje exterior del puerto y para cada dirección del oleaje. En este caso se calculan por separado los oleajes incidente y transmitido, y posteriormente se suman como sigue:

$$H = \sqrt{H_I^2 + H_T^2}$$

Donde,

H : Altura de ola resultante

H_I : Altura de ola incidente

H_T : Altura de ola transmitida

La probabilidad de ocurrencia de excedencia de la altura de ola en el puerto se calcula como sigue:

Primero trazamos la gráfica de la probabilidad de ocurrencia de excedencia de la altura de ola en el exterior del puerto como se presenta con línea continua en la Fig.- 5.2. La figura presenta un ejemplo de la probabilidad de ocurrencia de excedencia de las direcciones de ESE a SE de la Tabla.-5.1.

La altura de ola resultante se traza en la misma figura. Por ejemplo, la altura en el puerto en caso de que la altura de ola sea igual a 2.0 m será 1.05, sólo la altura de ola cambia a 1.05 m quedando la probabilidad con el mismo valor. La línea punteada en la gráfica representa la probabilidad de ocurrencia de excedencia en el puerto en caso de las direcciones ESE a SE.

La probabilidad de ocurrencia de excedencia en el puerto de la dirección total se calcula sumando el valor de la probabilidad de la dirección.

Conclusiones:

El estudio del oleaje es determinante para poder diseñar correctamente las estructuras que se encuentran en el mar y en las orillas de éste.

Debemos tomar en cuenta datos históricos, que nos reflejan el comportamiento del mar en diferentes momentos para a partir de ello, hacer un análisis estadístico del comportamiento. Sin embargo, se deben tomar en cuenta estas condiciones cuando se requieren datos como la refracción, difracción, reflexión, efecto del fondo y el rompimiento del oleaje.

Existe una analogía entre el oleaje y las ondas electromagnéticas; es decir, tenemos una definición de altura y periodo. El tren de oleaje se obtiene basándose en la suposición de que el oleaje es la continuación de las olas que tienen muchas alturas y períodos diferentes.

El Método de Zero-upcrossing actúa sobre la ola respectiva en el tren de oleaje regular y considera que el periodo de una ola se mide desde la hora que cruzan el nivel medio del mar elevándose la superficie del mar hasta la hora que se presenta la misma condición, definiéndose como altura la diferencia entre la mayor y menor en la superficie del mar.

El espectro de energía es otro método que determina la distribución de energía en proporción de los oleajes tanto secuencial como unidimensional. Siendo este método muy efectivo para analizar el oleaje regular.

Para calcular el oleaje regular se usan cinco métodos: ola significativa, distribución de probabilidad, experimental (usando modelo de oleaje irregular) y método de espectro de energía.

Dentro de la definición de oleaje tenemos: el Oleaje significativo; que toma un tercio de las olas más altas y se calcula el promedio de alturas y periodos; el oleaje máximo que son los valores mayores observados durante un periodo determinado; el oleaje equivalente en aguas profundas, que está dado cuando la profundidad es mayor a un medio de la longitud de la ola.

Las características básicas de las olas se calculan con base a la teoría de las olas de pequeña amplitud. Esto es de gran utilidad cuando se presenta un oleaje irregular, dichas características engloban: Perfil, (altura, tiempo, longitud y periodo de la ola), longitud, celeridad, velocidad de la partícula de agua, aceleración de la partícula de agua, presión dentro del agua, energía y propagación de ésta.

El oleaje estadístico, que se compone por la Distribución de Rayleigh; que se basa en la premisa de que la energía del oleaje irregular se distribuye en la banda de periodo estrecho, sin embargo Goda comprobó que se puede aplicar con periodo de espectro de banda ancha.

Así mismo; para diseñar estructuras, se debe considerar el espectro del oleaje que incluya frecuencia y dirección. El espectro direccional toma en cuenta que las direcciones del oleaje por la influencia de refracción tienden a uniformarse así como a unirse las líneas de cresta, tanto lateral como longitudinalmente.

El oleaje de diseño en aguas profundas que se utiliza para diseñar instalaciones en el puerto, se determinan con cualquiera de los siguientes métodos: datos de oleaje observados por periodos largos de tiempo, oleaje estimado con datos meteorológicos y oleaje estimado basado en hipótesis de huracanes.

Se deben introducir los conceptos de probabilidad para determinar la ocurrencia de oleaje dañino, siendo el periodo de retorno el intervalo promedio en años que ocurre una fuerza exterior mayor que la supuesta y la probabilidad de encuentro es el factor de la vida útil de la instalación con relación al periodo de retorno; tomando en cuenta los factores como la importancia de la instalación, su valor, etc.

Para definir el oleaje de diseño hay que tomar en cuenta: el oleaje en aguas profundas, las deformaciones del oleaje (difracción, refracción, reflexión y efecto de fondo), el oleaje que rebasa las estructuras (over-topping). Además, de hacer las correcciones por efecto de la marea en el sitio de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Horikawa K. y Kuo C. T.; "A Study on wave transformation inside surf zone"; Coastal Eng. in Japan, Vol. 9, 1966; pp. 69-81.
- 2.- Divoky D., LeMéhauté B. Y Lin A.; "Breaking waves on gentle slopes"; J. Geophysical Res.; Vol. 75, No. 9; 1970; pp.1681-1692.
- 3.- Bretshneider C. L. Y Reid R. O.; "Modification of wave height due to bottom friction, percolation and refraction"; U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion, Tech. Memo. No. 45; 1954.
- 4.- Ippen A. T.; "Estuary and Coastline Hydrodynamics"; Mc Graw-Hill; New York, 1966; pp. 318-322.
- 5.- Ippen A. T. y Goda Y.; "Wave induced oscillations in harbors: solution for a rectangular harbor connected to the open-sea"; Hydrodynamics Lab. Rept. No. 59; Massachusetts Inst. of Technology, 1963; pp.1-90.
- 6.- Wilson B. W.; "Note on surface wind stress over at low and high wind speeds"; Jour Geophysical Rev.; Vol. 63; 19060; pp. 3377- 3382.
- 7.- Comisión Federal de Electricidad; "Manual de diseño de obras civiles"; Hidráulica Marítima, 1983.
- 8.- Skejlbreia L. Y Hendrickson J. A.; "Fifth order gravity wave theory with tables of functions"; National Engineering Science Co.; 1962; pp. 1-424.
- 9.- Goda Y; "Wave forces on a vertical circular cylinder: Experiments and proposed method of wave force computation"; Rep. Port and Harbour Res. Inst.; 1964; No. 8, pp.1-74.
- 10.- Wiegel R. L.; "Gravity Waves, Tables of Functions, Council on wave research"; The Engineering Foundation; Berkeley; 1964; pp.1-30.
- 11.- "U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore Protection, planning and Design"; Tech. Rept. No. 4; third edition; U.S. Gov. Printing Office, 1966; pp. D-1-27.
- 12.- Goda Y. y Abe Y.; "Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves"; Rept. Port and Harbour Res. Inst.; Vol. 7, No. 3, 1968.

13.- Iwagaki Y.; "Hyperbolic waves and their shoaling"; coastal Eng. in Japan; vol. II, 1968; pp.1-18.

14.- Pierson W. J. Jr.; "The interpretation of crossed orthogonal in wave refraction phenomena"; U.S. Army Corps, of Eng., Beach Erosion Board, Tech Memo; No. 21, 1951; pp.1-83.

15.- Yamada H., Kimura G. y Okabe J.; "Precise determination of the solitary waves of extreme height on water of a uniform depth"; Rept. Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ.; Vol. XVI, No. 52, 1968; pp. 15-32.