

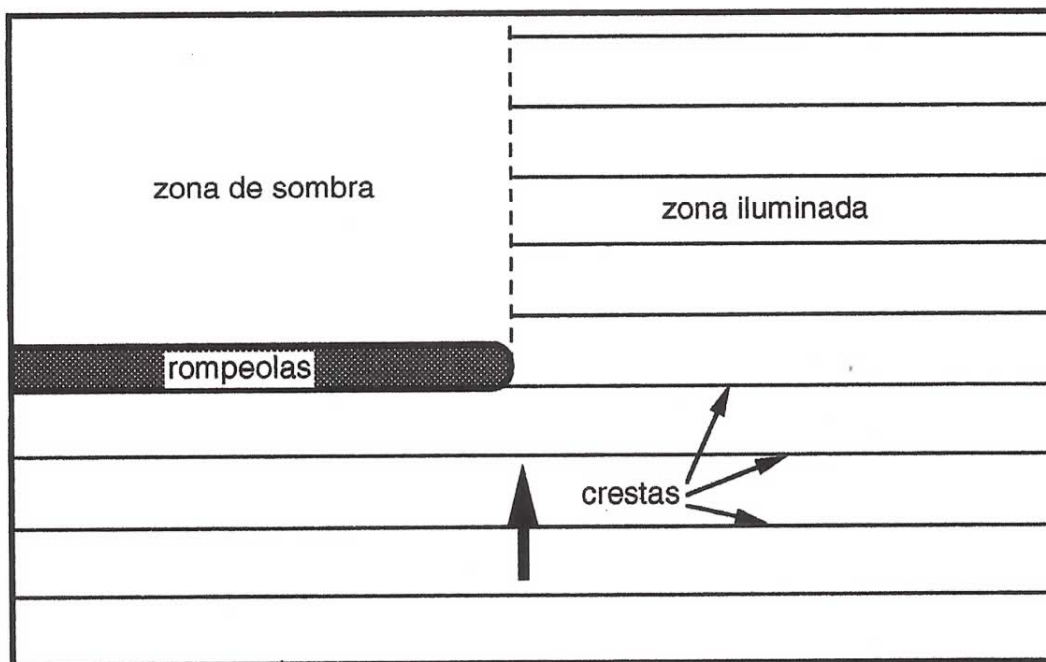
## VIII. TRANSFORMACION DE OLAJE DEBIDO A ESTUCTURAS Y LITORALES.

En el capítulo anterior se discutió la transformación de oleaje por la reducción gradual en la profundidad al propagarse el oleaje por sobre la plataforma continental hacia la costa. Aunque la capacidad de modelar esta transformación es esencial en la descripción del oleaje en zonas costeras, existen otros factores importantes en este contexto. En este capítulo veremos esencialmente las transformaciones al oleaje producidas por estructuras rígidas que emergen a través de la superficie libre o por el patrón costero cuando este es relativamente abrupto. Veremos tres conceptos diferentes: la difracción producida por el ingreso de un tren de olas a una zona parcialmente protegida del oleaje, la reflexión producida por estructuras artificiales o por la costa en sí y (solo en forma conceptual) la transmisión de oleaje a través de estructuras que permiten una cierta interacción entre el oleaje incidente externo y la zona protegida por la estructura.

El cálculo simultáneo de todas estas transformaciones es necesario para poder pronosticar las condiciones de oleaje en la zona costera a partir del conocimiento de las condiciones de oleaje en aguas profundas. Las condiciones específicas de cada problema en particular dictarán cuáles de estas transformaciones son importantes en cada zona. Por ejemplo, en la aproximación del oleaje generado en aguas profundas hacia una bahía de abrigo para embarcaciones sobre la costa, en zonas relativamente alejadas de la estructura protectora (usualmente un rompeolas) sólo será necesario considerar la refracción del oleaje por el cambio gradual de profundidad. Sin embargo, cerca del rompeolas en la zona desprotegida puede ser necesario considerar además la reflexión del oleaje producida por la estructura. En la zona protegida, será necesario considerar al menos la difracción y la transmisión de oleaje a través (o por arriba) de la estructura.

### VIII.1 DIFRACCION DE OLAJE.

La difracción de oleaje es el fenómeno por el que la energía de oleaje se transmite en dirección normal a la dirección de propagación de las olas, o sea a lo largo de las crestas. Al estudiar el fenómeno de refracción, al cruzarse dos rayos vecinos (punto cáustico) la interpretación física era que en ese punto la altura de oleaje era mucho mayor a la de los alrededores, o en otras palabras, existe un gradiente de H muy marcado a lo largo de la cresta. En estas condiciones es razonable pensar que la energía se *derramará* hacia la zonas de menos energía. Sin embargo el fenómeno de difracción es mas comunmente observado cuando oleaje incide sobre una estructura, misma que interrumpe en parte al avance natural de la cresta, como en el caso ilustrado en la fig. VIII.1 que muestra en planta un tren de olas incidiendo sobre una estructura (tipo rompeolas) recta. El que en este caso exista un derrame de energía a lo largo de las crestas se comprueba eurísticamente con el siguiente argumento.



**Fig. VIII.1.** Esquema (en planta) de un tren de olas regulares incidiendo sobre una estructura rompeolas. Observe la posible discontinuidad de la superficie libre sobre la línea punteada si la energía de oleaje no se *derramara* sobre la zona de sombra.

Si la energía se transmitiera solo a lo largo de rayos, la zona de *sombra* (misma que se denomina así en analogía al caso óptico donde la ondas son luminosas y la estructura representa un obstáculo opaco) estaría en calma total y a lo largo de la línea punteada existiría una discontinuidad en la superficie libre, lo que no es razonable. Por lo tanto de alguna manera, la energía en la zona *iluminada* debe colarse paulatinamente a la zona de sombra para lograr crestas de altura de ola variable pero no discontinua.

De hecho, la simple observación de casos similares desde el aire (o las fotografías aéreas correspondientes) muestran claramente el hecho de que en la zona de sombra, aunque el oleaje presente es más pequeño que en la zona iluminada, existe oleaje con amplitud finita y no se presenta discontinuidad alguna en la superficie libre. Se recomienda al respecto el observar fotografías aéreas del Shore Protection Manual (1977).

Desde hace miles de años, el hombre, en base a la observación empírica de este fenómeno, ha realizado obras de protección contra oleaje para sus embarcaciones. Estas consisten de algún tipo de rompeolas o bahías artificiales de abrigo que impiden el paso franco del oleaje incidente a la zona protegida.

### VIII.1.1 Planteamiento matemático del problema.

Suponiendo un fondo horizontal, la ecuación gobernante es la ecuación de Laplace en  $\phi$  para el dominio tridimensional  $(x,y,z)$  con condiciones de frontera en el fondo y en la superficie como las ya analizadas anteriormente (pero considerando variaciones en  $y$  también). De la solución regular se obtiene

$$\phi = \frac{-i F(x,y) g}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \quad \text{(VIII-1)}$$

$$\eta = \left. \frac{\partial \phi}{\partial t} \right|_{z=0} = F(x,y) e^{-i\omega t} \quad \text{(VIII-2)}$$

y la relación de dispersión

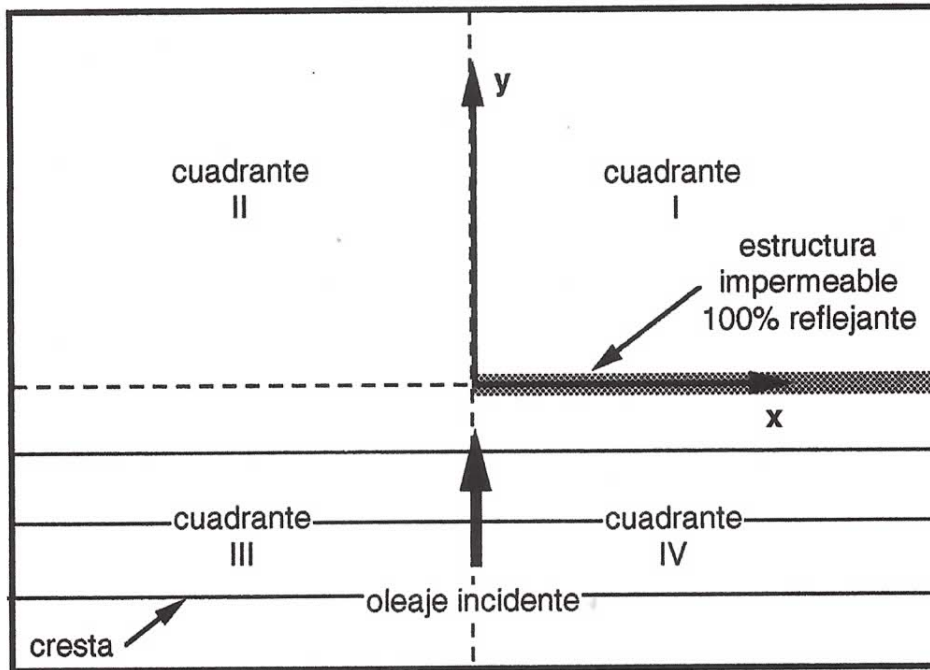
$$\omega^2 = g |\vec{k}| \tanh |\vec{k}| h \quad \text{(VIII-3)}$$

donde  $|F(x,y)|$  es una función que representa la distribución espacial de la amplitud de onda y  $\vec{k} = k_x \hat{i} + k_y \hat{j}$  es el vector número de onda. Nuevamente, la solución es considerada como la parte real sin presentar esto explícitamente.

$F(x,y)$  es una función compleja que incluye información de la amplitud del oleaje en su magnitud  $|F|$ , así como de su fase en

$$\text{arc tan} \left\{ \frac{\text{Imag.} \{ F \}}{\text{Real} \{ F \}} \right\} \quad \text{(VIII-4)}$$

Falta por obtener esta  $F(x,y)$  para lo que usaremos condiciones de frontera laterales. En base a la fig.VIII.2 se deducen las siguientes condiciones de frontera para el caso de oleaje plano avanzando en dirección +y que se ve interrumpido por una estructura semiinfinita que impide su paso hacia el primer cuadrante y al mismo tiempo refleja totalmente el oleaje hacia el segundo cuadrante (una estructura totalmente impermeable al oleaje y 100% reflejante como un muro vertical).



**Fig. VIII.2.** Esquema auxiliar en el planteamiento matemático del problema de difracción sobre un rompecapas semi-infinito.

$$\begin{aligned}
 \text{Para } x > 0 \quad y = 0^- \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 &\longrightarrow \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \\
 \text{Para } x > 0 \quad y = 0^+ \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 &\longrightarrow \frac{\partial F}{\partial y} = 0
 \end{aligned}
 \quad \begin{array}{l} \text{frontera} \\ \text{impermeable} \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Para } y \longrightarrow -\infty \quad x < 0 \quad \text{solo ola incidente} \quad F &\longrightarrow a_1 e^{iky} \\
 \text{Para } x \longrightarrow \infty \quad y > 0 \quad \text{no hay olas} \quad F &\longrightarrow 0 \\
 \text{Para } x \longrightarrow \infty \quad y < 0 \quad \text{solo ola estacionaria} \quad F &\longrightarrow 2 a_1 \cos ky
 \end{aligned}
 \quad \text{(VIII-5)}$$

Observe que dada la incertidumbre de lo que sucede cerca de la punta de la estructura (que es lo que se desea obtener), las tres últimas condiciones de frontera laterales se establecen *muy lejos* de esta punta (cuando  $y$  tiende a  $-\infty$  o cuando  $x$  tiende a  $+\infty$ ).

La substitución de  $\phi$  (ec.VIII-1) en la ecuación de Laplace produce la

ecuación de Helmholtz

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + k^2 F(x,y) = 0 \quad k = |\vec{k}| \quad \text{(VIII-6)}$$

donde los tres términos provienen respectivamente de los correspondientes

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}$$

Bajo las condiciones de frontera especificadas en la ec.VIII-5, esta ecuación fue resuelta por Sommerfeld desde (1896) en el campo de la óptica. En las coordenadas normalizadas

$$x' = kx \quad y' = ky \quad \text{(VIII-7)}$$

que representan la distancia en dirección  $x$  y  $y$  en unidades de  $2\pi$  longitudes de onda de la ola incidente, la ecuación de Helmholtz queda

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y'^2} + F = 0 \quad \text{(VIII-8)}$$

que es válida para cualquier número de onda (o cualquier frecuencia de ola). La solución en términos de  $x$  y  $y$  es:

$$F(x,y) = \frac{1+i}{2} \left[ e^{-iky} \int_{-\infty}^{\beta} e^{-i(\pi/2)u^2} du + e^{iky} \int_{-\infty}^{\beta'} e^{-i(\pi/2)u^2} du \right] \quad \text{(VIII-9)}$$

que puede ser evaluada usando las tabulaciones de las integrales de Fresnel (ver por ejemplo Abramovitz y Stegun 1977). En la ecuación anterior la variable  $u$  es una variable *muda* de integración y

$$\beta = \pm \sqrt{\frac{4}{L} (r-y)} \quad \beta' = \pm \sqrt{\frac{4}{L} (r+y)} \quad r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{(VIII-10)}$$

donde  $r$  es la distancia radial desde el origen y los signos de  $\beta$  y  $\beta'$  dependen del cuadrante del que se trate.

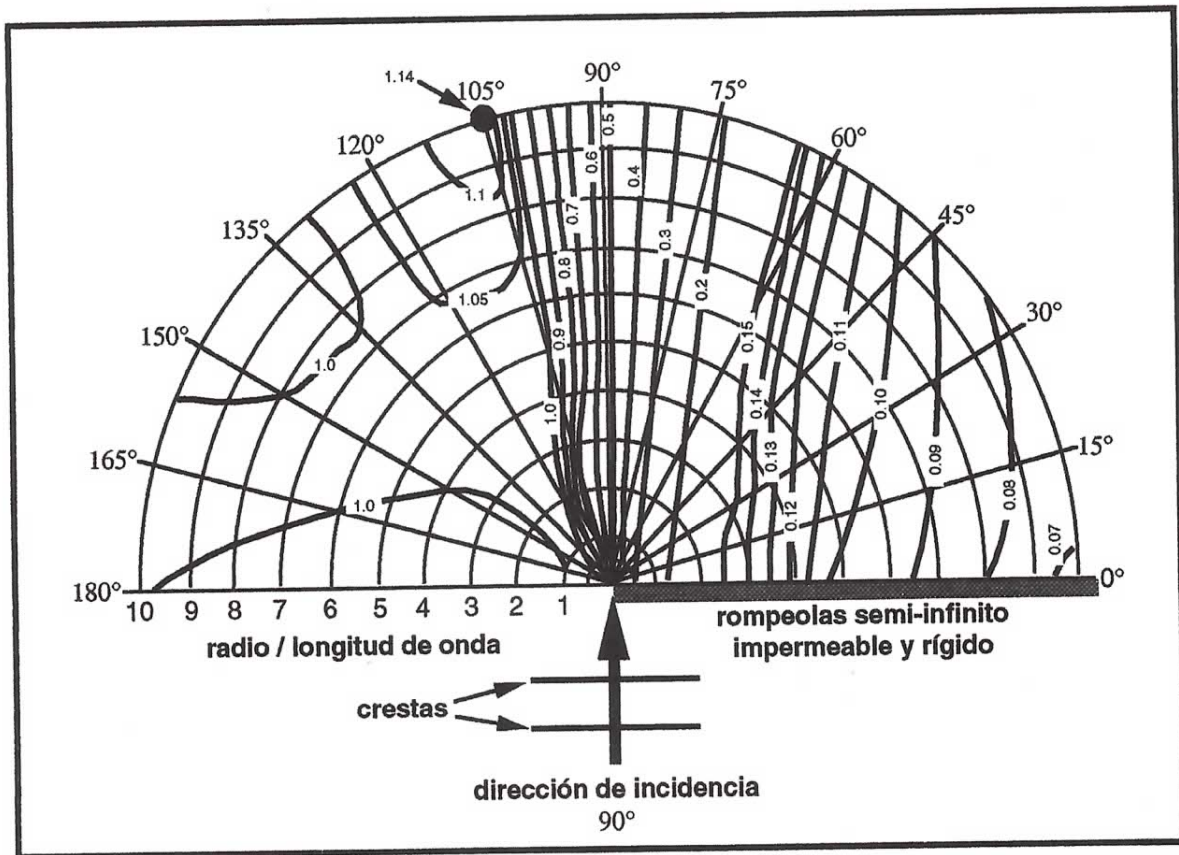
Obviamente, la evaluación es muy complicada, por lo que ingenierilmente se recurre a diagramas precalculados para geometrías genéricas de varios tipos de estructura con respecto a la dirección de incidencia. Las siguientes secciones tratan aspectos prácticos de la aplicación de estos diagramas.

### VII.1.2 Olas incidentes en un rompeolas seminfinito.

Los diagramas que representan la solución de la ecuación de Helmholtz bajo las condiciones de frontera especificadas, ec.VIII-9, se presentan usualmente como gráficas de isolíneas de igual coeficiente de difracción

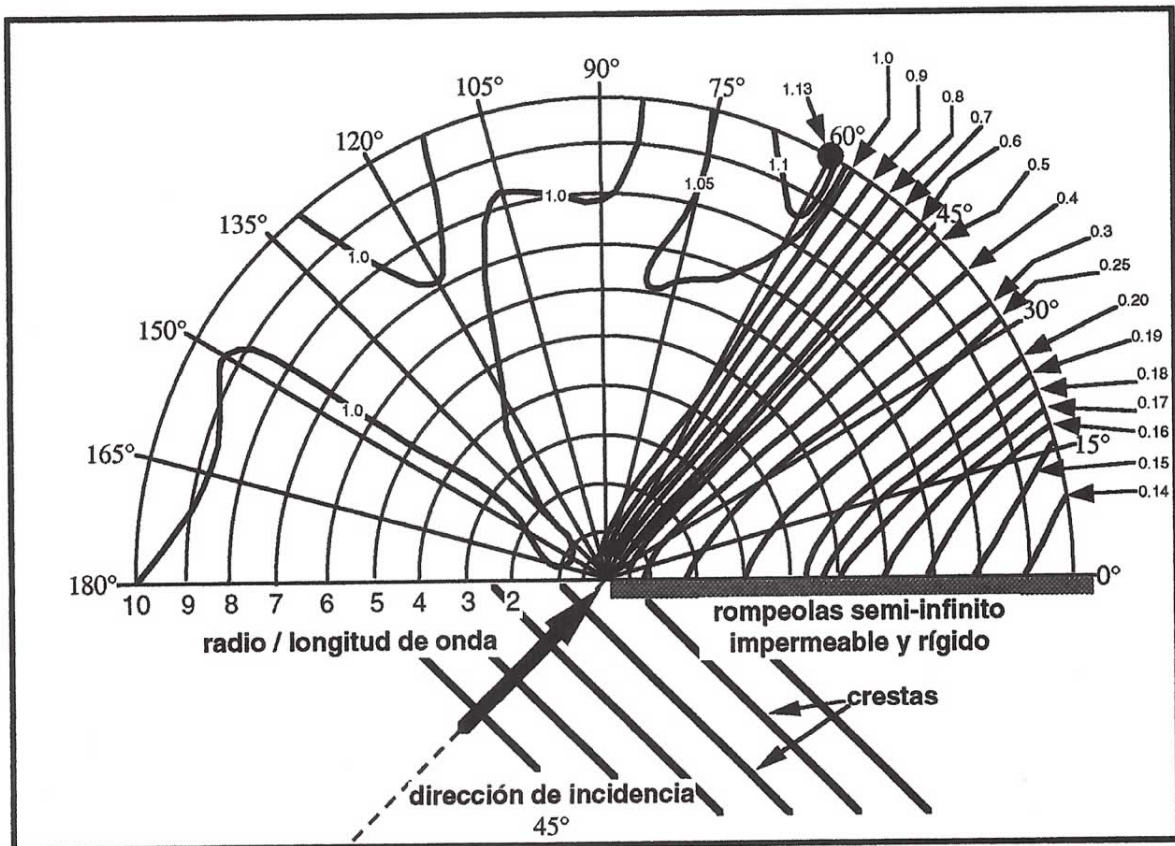
$$K_D = \frac{H(x,y)}{H_1} \quad (\text{VIII-11})$$

o sea la relación de altura de ola a su valor original antes de interaccionar con la estructura. Se presentan, como las figs. VIII.3, VIII.4 y VIII.5, diagramas para ángulo de incidencia de  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $135^\circ$  con respecto a  $x$ . Diagramas similares para ángulos de  $15, 30, 45, 60, 90, 105, 120, 135, 150, 165$  y  $180^\circ$  se pueden consultar en el Shore Protection Manual (1977).

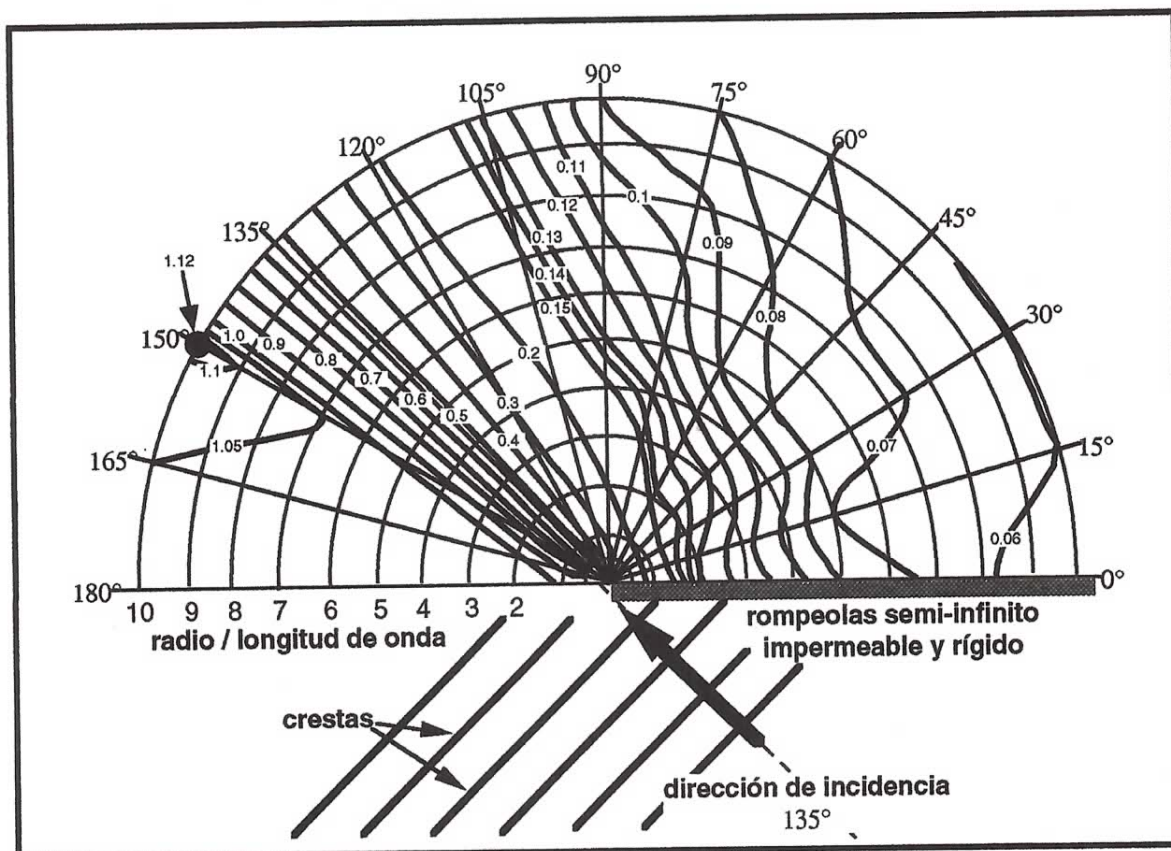


**Fig. VIII.3.** Diagrama de difracción para un rompeolas semi-infinito impermeable y rígido con oleaje incidente perpendicular (las isóneas representan iguales coeficientes de refracción). Fuente: Shore Protection Manual (1977).





**Fig. VIII.4.** Diagrama de difracción para un rompeolas semi-infinito impermeable y rígido con oleaje incidente oblicuo a 45° (las isólinas representan iguales coeficientes de refracción). Fuente:Shore Protection Manual (1977).



**Fig. VIII.5.** Diagrama de difracción para un rompeolas semi-infinito impermeable y rígido con oleaje incidente oblicuo a 135° (las isólineas representan iguales coeficientes de refracción). Fuente: Shore Protection Manual (1977).

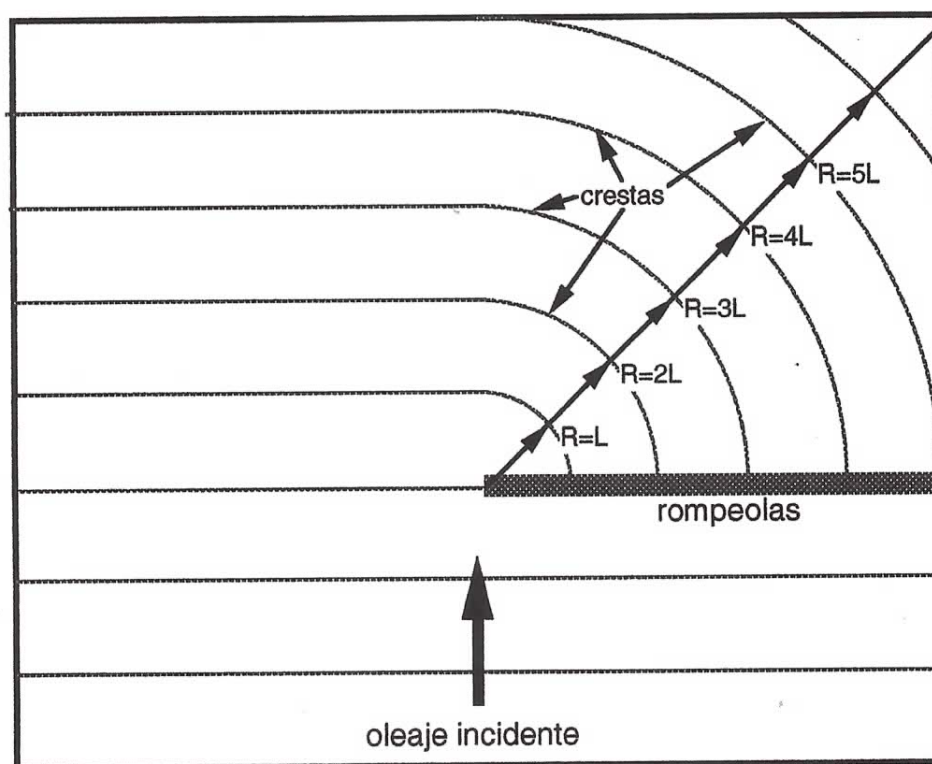
Nótese que en estos diagramas las coordenadas son adimensionales normalizadas con  $L$ , o sea en unidades de número de longitudes de onda, por lo que son aplicables a cualquier ola monocromática o componente sinusoidal libre en el caso de oleaje policromático.

Es interesante notar que la línea  $K_D=0.5$  coincide prácticamente con la continuación de la dirección incidente a partir de la punta de la estructura. Esto implica que el fenómeno de difracción no solo afecta a la zona de sombra sino también parcialmente a la zona iluminada (en aquella parte entre las isólineas  $K_D=1$  y  $K_D=0.5$ . De hecho, de esta zona proviene la energía de oleaje que se filtra hacia la zona de sombra.

Como es intuitivamente razonable, la frecuencia y número de onda (o periodo y longitud de onda) se mantienen iguales a los de la ola

incidente sin disturbio de la estructura. Sin embargo, la dirección de propagación del oleaje sí se modifica, curvándose los rayos hacia la zona de sombra, invadiendo con oleaje (de menor amplitud) dicha zona.

Cuando son de interés las formas de las líneas de cresta, estas se aproximan bastante bien en la zona de sombra con círculos concéntricos con centro en la punta de la estructura, como se esquematiza en la fig. VIII.6.



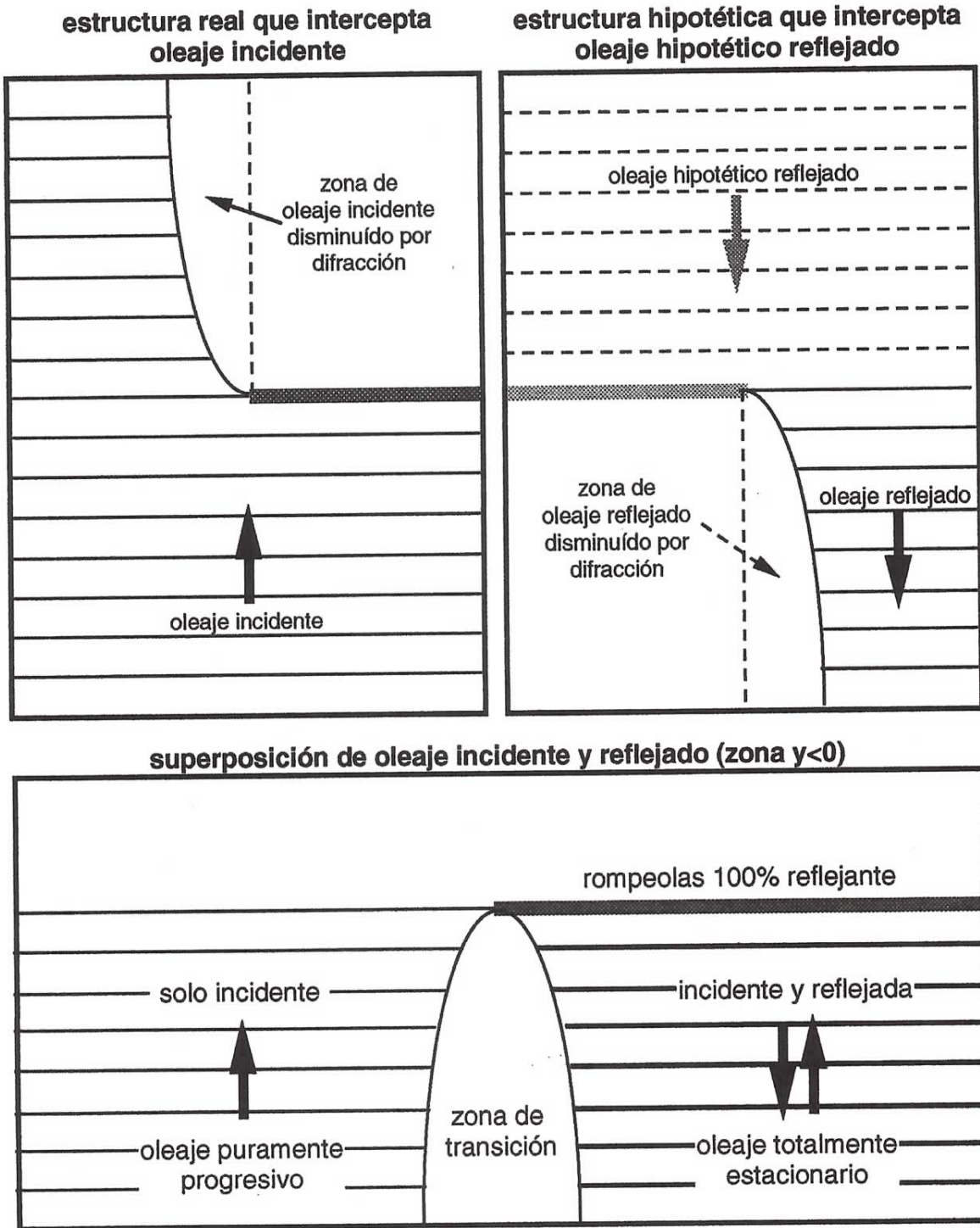
**Fig. VIII.6.** Geometría aproximada de las líneas de cresta para difracción en un rompeolas semi-infinito.

Nótese que en este simple caso, cuando solo existe difracción desde una punta, no es necesario tomar en cuenta la fase de las olas; la amplitud del oleaje en la zona de sombra está completamente definido por un solo tren de olas.

Existe todavía alguna discusión entre gente dedicada a la hidráulica marítima, sobre la exactitud y validez de estos diagramas en la zona

*iluminada* para  $y > 0$ , aunque en general se acepta su uso en la zona de *sombra*. Nótese que esto no es grave en el contexto ingenieril ya que la zona iluminada presenta altura de ola mayores a  $H_1$  pero en ningún caso mucho más altas (como máximo un 5% adicional).

En la zona frente a la estructura ( $x > 0$ ,  $y < 0$ ) se presenta una ola estacionaria debido a la reflexión total de la ola incidente en la estructura, pero de hecho también se ve afectada por difracción desde la punta. Se puede visualizar conceptualmente a esta onda reflejada como una onda igual a la incidente pero avanzando en dirección  $-y$  (válida solo para  $y < 0$ ) y bloqueada por una estructura a lo largo de  $y = 0$ ,  $x < 0$ , ver fig.VIII.7. Visualizar conceptualmente de esta manera facilita el comprender que el fenómeno de difracción en la punta también existe en la parte iluminada. La superposición de la ola incidente (inclusive en su parte difractada) y la ola reflejada (inclusive en la zona difractada) define completamente el estado del oleaje en todo el dominio. Cuando la reflexión en la estructura no es total sino parcial, bastará considerar a la onda reflejada (sin disturbio) con una amplitud  $R a_1$  en lugar de  $a_1$  (con  $R < 1$ ).



**Fig. VIII.7.** Diagrama de conceptualización de las condiciones de oleaje frente a una estructura semiinfinita 100% reflejante.