

SECCIÓN 3

OLEAJE EN ROTURA EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN EN LOS MODELOS DE EVOLUCIÓN DE PLAYAS



RESUMEN Y CONCLUSIONES

Esta sección se dedica al desarrollo de la primera parte del objetivo específico de la Tesis, que consiste en la aplicación del modelo de evolución de medio-largo plazo en zonas donde los efectos de la refracción-difracción conjuntamente son los preponderantes. Así pues, en la presente sección se lleva a cabo la propuesta de un método para la determinación de las características del oleaje en rotura en estas zonas. Con este fin, la sección se encuentra compuesta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 6.** *Métodos previos para la determinación del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción.*
- **Capítulo 7.** *Método propuesto para la determinación del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción.*

CAPÍTULO 6

En este capítulo se analizan las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción, estudiándose los métodos que utilizan para el cálculo de estas magnitudes los principales modelos de evolución de playas de largo plazo existentes en la actualidad. Como resultado de este estudio, se establecen una serie de deficiencias presentes en estos métodos, así como la necesidad del desarrollo de un método nuevo.

El estudio indicado se lleva a cabo dividido en las siguientes etapas:

- En primer lugar se realiza un breve repaso de los estudios previos en el cálculo de la difracción y de la refracción-difracción del oleaje.
- A continuación se describe el método de Goda et al. (1978) para el cálculo de la difracción en las zonas objeto de estudio, así como la aproximación de este método realizada por Kraus (1984). Es tal la importancia de estos dos métodos, que la mayoría de los modelos de evolución de largo plazo los utilizan para estimar el coeficiente de difracción del oleaje en áreas sometidas a los procesos de refracción-difracción conjuntamente.

SECCIÓN 3

- Posteriormente se detalla el proceso seguido por el modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989), el modelo LITLINE (DHI, 2001) y el modelo ONELINE (Dabees y Kamphuis, 2000) para la determinación de las características del oleaje en rotura en estas zonas de refracción-difracción.

- Finalmente se especifican las deficiencias detectadas en los anteriores modelos.

Como principales aportes del capítulo se destacan los siguientes:

- ❖ La determinación de una serie de limitaciones presentes en la simplificación de Goda et al. (1978) y la aproximación de Kraus (1984) para el cálculo de la difracción, destacándose las siguientes:

- Se desprecia la influencia del período del oleaje. Consecuentemente, en los modelos GENESIS y LITLINE la zona de refracción-difracción en la posición de equilibrio de la línea de costa es independiente del período del oleaje.

- El parámetro de concentración direccional máxima en indefinidas sólo puede adoptar tres valores en particular, perdiéndose también con este hecho la influencia del período del oleaje.

- La curva propuesta para estimar el parámetro de concentración direccional máxima local no cubre el rango en el que se encuentran la mayoría de las estructuras, perdiendo validez en estas situaciones las expresiones aproximadas propuestas por Kraus (1984).

- La aproximación de Kraus (1984) no es adecuada para oleajes de banda muy ancha.

- Son métodos desarrollados para oleaje irregular (tipo “*sea*”), perdiendo su aplicabilidad en el caso de oleajes de banda muy estrecha (monocromáticos).

- ❖ El establecimiento de una inadecuada predicción de la zona de refracción-difracción por los modelos GENESIS, LITLINE y ONELINE. En el caso de los dos primeros modelos, la zona de refracción-difracción es fija (33-35 grados con respecto al oleaje incidente) y más reducida que lo adecuado. En el caso del

RESUMEN Y CONCLUSIONES

último modelo, aunque la zona analizada es función del período del oleaje, lo cual coincide con las investigaciones de González y Medina (2001), tampoco se calcula de una forma correcta. Entre las consecuencias de esta incorrecta definición de la zona de refracción-difracción, se encuentra la inadecuada determinación de la posición de equilibrio de la línea de costa.

❖ La determinación de que en la zona iluminada (véase figura 3.11 del capítulo 6) existe ya una modificación del ángulo del oleaje, lo cual no es contemplado por los modelos GENESIS y LITLINE y es considerado de una forma incorrecta por el modelo ONELINE.

❖ La comprobación de que todos los modelos subestiman el valor de la altura de ola en rotura en la zona de sombra y que en la zona iluminada los modelos GENESIS y LITLINE sobrestiman esta altura de ola y el modelo ONELINE la infravalora.

❖ El establecimiento de la necesidad del desarrollo de un método nuevo para la determinación de las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción, aplicable dentro de un modelo de evolución de playas que se pueda extender hasta el largo plazo.

CAPÍTULO 7

En este capítulo se describe el método que se propone en la Tesis para la determinación de las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción dentro de los modelos de evolución de playas, una vez que se ha comprobado la necesidad de este método del análisis del anterior capítulo.

El estudio de este capítulo se realiza en las siguientes fases:

- En una primera etapa se analizan por separado cada uno de los puntos del método propuesto que requieren de un análisis especial y que son: la determinación de la zona de refracción-difracción, el establecimiento del ángulo del oleaje y la obtención del coeficiente de difracción para el cálculo de la altura de ola.

SECCIÓN 3

1. La definición de la zona de refracción-difracción.

Esta zona se define con base en el ángulo α_{min} propuesto por González y Medina (2001), incorporándose de esta forma la influencia del período del oleaje en la definición de la zona analizada.

2. El ángulo del oleaje.

El ángulo de salida del oleaje desde una profundidad igual a la del morro de la estructura se calcula con una expresión desarrollada en este capítulo, no siendo pues necesario asumir hipótesis con este fin, lo cual es lo que hacen todos los principales modelos de evolución de largo plazo existentes. La expresión desarrollada tiene en consideración que en la zona iluminada existe ya una modificación del ángulo del oleaje incidente y que no existe una fuente única localizada en el morro de la estructura, sino que existen una serie de fuentes ubicadas en una zona transicional a partir de las que se radian las olas hacia la costa (todos estos aspectos ya habían sido observados por Dabees, 2000).

3. Altura de ola.

La altura de ola se determina con el método propuesto en este capítulo, el cual, aunque se basa en la simplificación de Goda et al. (1978) y en la aproximación de Kraus (1984), elimina las limitaciones existentes en las anteriores aproximaciones y que fueron indicadas en el capítulo 6. La formulación desarrollada incorpora dos parámetros principales, el parámetro α y el parámetro γ . El primero de estos parámetros permite extender el rango de aplicación de la formulación propuesta, siendo aplicable tanto para oleajes de banda ancha (tipo “*sea*”), como para oleajes de banda estrecha (tipo “*swell*”). En cuanto al segundo parámetro, introduce la correcta definición de la zona de refracción-difracción, incluyéndose la influencia del período del oleaje en la determinación de la altura de ola.

- Posteriormente se detalla paso a paso la aplicación de la metodología propuesta para el cálculo de las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción dentro del modelo de evolución (véase sección 7.6. del capítulo 7).

RESUMEN Y CONCLUSIONES

- Finalmente se presentan algunos resultados determinados con el método propuesto frente a los obtenidos con los métodos presentes en otros modelos de evolución de playas, los cuales fueron estudiados en el anterior capítulo.

Así pues, en este capítulo se desarrolla una formulación y procedimiento para la determinación de las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción y para ser incluido dentro de un modelo de evolución de playas aplicable hasta el largo plazo, cuyos principales logros y aportes son los siguientes:

- ❖ La incorporación de los procesos de refracción-difracción conjuntamente, a diferencia de los modelos GENESIS y LITLINE.

- ❖ La verificación de dicho método con base en los modelos de propagación de oleaje Oluca-MC (oleaje monocromático) y Oluca-SP (oleaje espectral) del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, los cuales han sido validados con datos de campo y de laboratorio.

- ❖ La incorporación de una definición adecuada de la zona de refracción-difracción mediante el ángulo α_{min} propuesto por González y Medina (2001), incluyéndose de esta forma la influencia del período del oleaje en la delimitación de la zona analizada.

- ❖ La inclusión de la modificación experimentada por el ángulo del oleaje en la zona iluminada, no estableciéndose diferenciación, a efectos del ángulo, entre la zona de sombra y la zona iluminada, como ya había sido observado por Dabees (2000).

- ❖ La incorporación de una zona transicional en la que existe una serie de fuentes a partir de las que se radian las olas hacia la costa, lo cual ya había sido comprobado por Dabees (2000).

- ❖ La eliminación de todas las limitaciones detectadas en la simplificación de Goda et al. (1978) y la aproximación de Kraus (1984) para la determinación del coeficiente de difracción en las zonas de refracción-difracción, destacándose los siguientes elementos:

SECCIÓN 3

- Se extiende el rango de aplicación de estos métodos desarrollados para oleajes de banda ancha (tipo “*sea*”) a oleajes de banda estrecha (tipo “*swell*”), mediante la introducción del parámetro α .

- Se incorpora la correcta definición de la zona de refracción-difracción, incluyéndose de esta forma la influencia del período del oleaje, mediante la utilización del parámetro γ .

CAPÍTULO 6

MÉTODOS PREVIOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL OLEAJE EN ROTURA EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

Los modelos de evolución de playas de largo plazo, como es el caso de los modelos de una línea, necesitan las características del oleaje en rotura para la determinación del transporte longitudinal de sedimento. En este tipo de modelos, el oleaje suele ser calculado de una manera simplificada, ya que es lógico que el nivel de sofisticación en la determinación de éste, sea acorde al del resto de elementos constituyentes, tales como el cálculo de los distintos transportes de sedimento e incluso las diferentes hipótesis inherentes al modelo. Por consiguiente, se suelen utilizar métodos simplificados para la estimación del oleaje en estos modelos. Métodos que, adicionalmente, deben ser lo suficientemente rápidos para que puedan ser incorporados dentro de un modelo de evolución de largo plazo (años a décadas). Sin embargo, el problema analizado es especialmente relevante en las zonas de refracción-difracción (diques exentos, diques de abrigo en puertos, cabos, salientes, etc.), ya que una determinación “*demasiado simplificada*” del oleaje en estas zonas posee una serie de implicaciones que serán analizadas en este capítulo.

En este capítulo se analizarán las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción, estudiándose los métodos que utilizan para el cálculo de estas magnitudes los principales modelos de evolución de playas de largo plazo existentes en la actualidad. Como resultado de este estudio, se establecerá una serie de deficiencias presentes en estos métodos, siendo imprescindible el desarrollo de un método nuevo, el cual se describe en el siguiente capítulo.

Así pues, el estudio indicado se llevará a cabo en este capítulo dividido en las siguientes fases:

- En primer lugar se realizará un breve repaso de los estudios previos en el cálculo de la difracción y de la refracción-difracción del oleaje.
- A continuación se describirá el método de Goda et al. (1978) para el cálculo de la difracción en las zonas objeto de estudio, así como la aproximación de este método realizada por Kraus (1984). Es tal la importancia de estos dos métodos, que la mayoría de los modelos de evolución de largo plazo los utilizan para estimar

el coeficiente de difracción del oleaje en áreas sometidas a los procesos de refracción-difracción conjuntamente.

- Posteriormente se detallará el proceso seguido por el modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989), el modelo LITLINE (DHI, 2001) y el modelo ONELINE (Dabees y Kamphuis, 2000) para la determinación de las características del oleaje en rotura en estas zonas de refracción-difracción.
- Finalmente se especificarán las deficiencias detectadas en los anteriores modelos.

6.2. ESTUDIOS DE DIFRACCIÓN Y REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN

Cuando el oleaje se propaga hacia aguas someras y encuentra diferentes obstáculos, como pueden ser cabos, islas o estructuras (diques exentos), se produce un fenómeno de cesión lateral de energía, que es conocido como difracción. Esta cesión lateral de energía también puede ser ocasionada por discontinuidades en la altura de ola a lo largo de un frente, las cuales están asociadas a la refracción por fondo. Esta es la razón por la que los fenómenos de refracción-difracción están casi siempre asociados y son especialmente relevantes en zonas sometidas a la influencia de estructuras costeras, tales como los diques exentos. En la proximidad de estas estructuras, ambos fenómenos pueden ser importantes, requiriéndose un estudio conjunto de la refracción-difracción.

Debido a la complejidad del estudio conjunto de la refracción-difracción, surgen los diferentes métodos simplificados de cálculo del oleaje en estas zonas, buscándose diferentes soluciones alternativas basadas en aproximaciones tremendamente simples. Una de estas alternativas se basa en asumir que la difracción es el fenómeno predominante en la zona próxima a la estructura y que, a una distancia “*suficientemente alejada*” de ésta, es la refracción el fenómeno dominante. Este concepto de “*suficientemente alejado*” es relativo y se suele considerar varias

longitudes de onda o al menos seis veces la anchura de la estructura, considerándose la misma en el sentido perpendicular a la dirección de avance del oleaje.

Los primeros trabajos de difracción fueron realizados por Sommerfeld (1896), el cual estudió el caso de fondo con profundidad uniforme, aplicó la teoría potencial (teoría lineal) y, asumiendo un movimiento armónico simple, obtuvo la ecuación de Helmholtz a partir de la ecuación de Laplace (para más detalles véase Dean y Dalrymple, 1991).

En la figura 3.1 aparece un esquema simple de la propagación del oleaje hasta alcanzar un dique exento y verse sometido al proceso de difracción (profundidad constante). El área se encuentra dividida en una zona iluminada y una zona de sombra. El oleaje incidente en el morro delimita estas dos zonas. Los frentes en la zona de sombra se pueden aproximar mediante semicírculos de centro en el morro del dique.

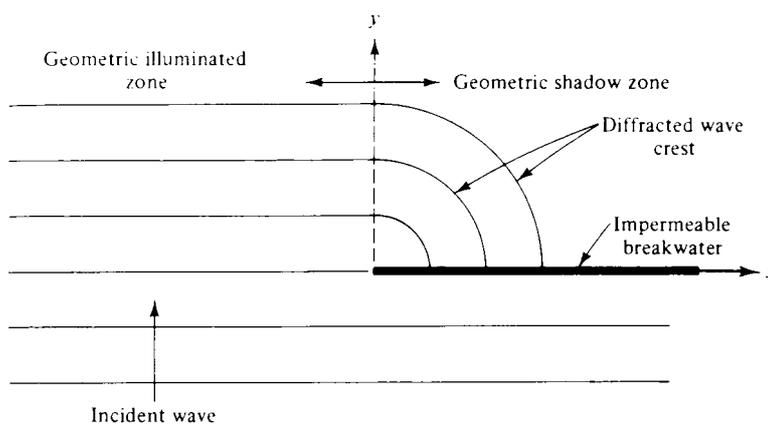


Figura 3.1- Esquema de la difracción generada por un dique exento en fondo uniforme (tomada de Dean y Dalrymple, 1991)

Sommerfeld (1896) resolvió la ecuación de Helmholtz para determinadas condiciones de contorno. La solución obtenida era algebraicamente complicada pues dependía de integrales de Fresnel (estas funciones se encuentran tabuladas en Abramowitz y Stegun, 1965). Sin embargo, la solución obtenida posee ciertas características de especial interés, como son:

1. Para valores grandes de y (es decir, distancias grandes desde el morro del dique), el coeficiente de difracción (relación de altura de ola con respecto a la altura de ola en el morro) adopta un valor de 0.5 en la línea que separa la zona de sombra de la zona iluminada. No se debe olvidar que esta solución se obtuvo para el caso de una onda monocromática.

2. Para distancias desde el morro del dique mayores que dos veces la longitud de onda en el morro, las isolíneas de altura de ola pueden ser determinadas con la expresión parabólica expresada con la ecuación (3.1).

$$\frac{x}{L} = \sqrt{\frac{\beta_r^4}{16} + \frac{\beta_r^2}{2} \frac{y}{L}} \tag{3.1}$$

donde: β_r se obtiene mediante la figura 3.2 propuesta por Penney y Price (1952), siendo función del parámetro R , el cual es el coeficiente de difracción y se define como el cociente entre la altura de ola difractada frente a la altura de ola incidente, la coordenada x y la coordenada y aparecen representadas en la figura 3.1 y L es la longitud de onda.

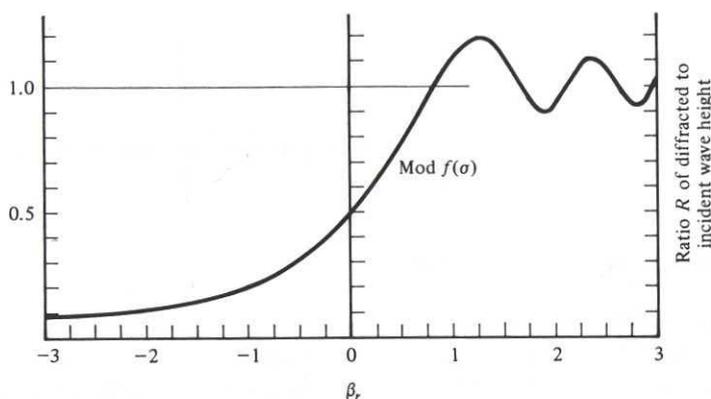


Figura 3.2- Coeficiente de difracción frente al parámetro β_r propuesto por Penney y Price (1952), (tomada de Dean y Dalrymple, 1991)

En la figura 3.3 se presentan los frentes y las isolíneas de alturas de ola en la zona sometida a la influencia de un dique exento para el caso de incidencia normal del oleaje. En línea continua aparecen los resultados obtenidos con la solución exacta de Sommerfeld (1896) y en línea discontinua los determinados con la aproximación de Penney y Price (1952) establecida mediante la ecuación (3.1).

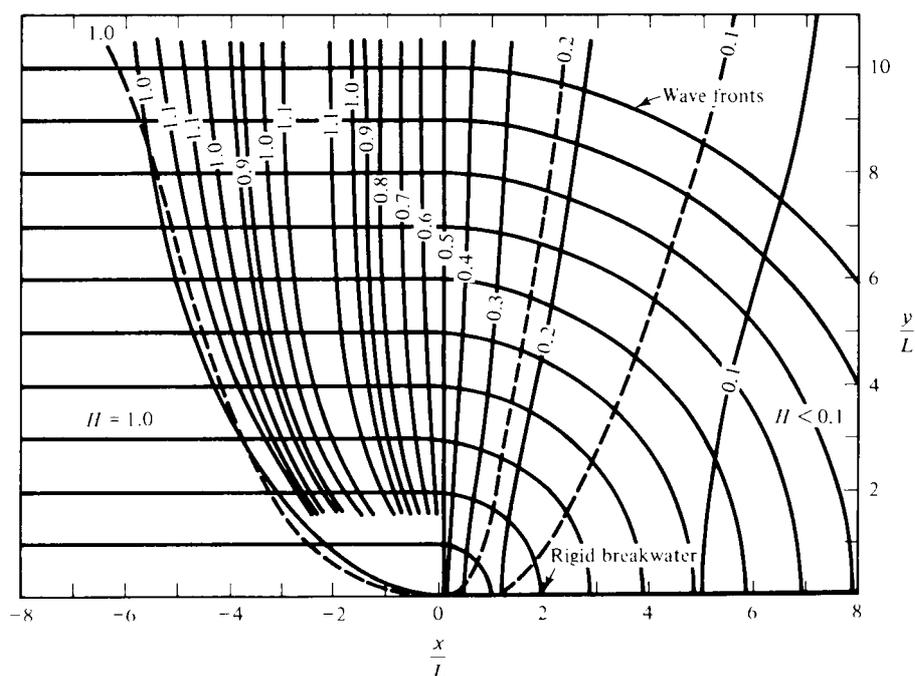


Figura 3.3- Frentes e isolíneas de altura de ola en la zona de influencia de un dique exento determinados con la solución exacta de Sommerfeld (1896) en línea continua y con la solución simplificada de Penney y Price (1952) en línea discontinua (tomada de Dean y Dalrymple, 1991)

El estudio del fenómeno de la refracción-difracción conjuntamente tiene su base en Berkhoff (1972), el cual puso fin a las teorías simplificadoras previas que separaban ambos procesos y que asumían que la difracción era el fenómeno predominante en la proximidad del obstáculo y la refracción lo era a una distancia “suficientemente alejada” de éste (varias longitudes de onda o al menos seis veces la anchura del obstáculo en el sentido perpendicular a la dirección de avance del oleaje).

Berkhoff (1972), considerando teoría lineal de ondas y teniendo en cuenta la hipótesis de que el fondo variaba muy suavemente en una longitud de onda, obtuvo una ecuación capaz de tener en cuenta la refracción y la difracción conjuntamente, la *ecuación de la pendiente suave* (“*mild slope equation*”). Integrando la ecuación de Laplace en tres dimensiones se obtuvo la ecuación (3.2) en dos dimensiones:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(CC_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(CC_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (3.2)$$

Los términos de la expresión (3.2) quedan definidos de la siguiente forma: C es la celeridad de la onda, C_g es la celeridad de grupo, ϕ es el potencial del flujo y k es el número de onda, definido como $k=2\pi/L$ (L es la longitud de onda).

La ecuación (3.2) es exacta para profundidades reducidas e indefinidas y aproximada para profundidades intermedias. Asimismo, para la obtención de la ecuación (3.2) es requisito que el fondo varíe suavemente, como queda indicado en la ecuación (3.3). En esta ecuación, h representa la profundidad del fondo.

$$\frac{\nabla h}{kh} \ll 1 \quad (3.3)$$

Booij (1983) demostró que la expresión (3.2) predice resultados satisfactorios para fondo plano con pendientes de hasta 1:3.

6.3. DIFRACCIÓN CON EL MÉTODO DE GODA ET AL. (1978)

En este apartado se va a describir el método propuesto por Goda et al. (1978) para el cálculo de la difracción, ya que la mayoría de los modelos de evolución de largo plazo lo utilizan para estimar el coeficiente de difracción del oleaje en las zonas de refracción-difracción. En primer lugar se describirá la solución teórica, y posteriormente la solución aproximada.

6.3.1. SOLUCIÓN TEÓRICA

El estudio de la difracción mediante la solución de Sommerfeld (1896) y la aproximación de Penney y Price (1952), aunque aporta resultados razonables para el caso de oleaje regular (oleaje de banda estrecha, tipo “*swell*”), pierde su validez cuando el oleaje es irregular y la dispersión direccional del mismo aumenta, como es el caso de oleajes de banda ancha, tipo “*sea*”. Se comprobó que en la difracción, la dispersión direccional o angular del oleaje tiene una influencia mucho más relevante que la dispersión frecuencial del mismo (Goda et al., 1978; Goda, 1985).

Mobarek y Wiegel (1966) fueron los primeros en demostrar la aplicabilidad de los espectros direccionales para el estudio de la difracción en el caso de oleaje irregular. Sin embargo, no presentaron ningún diagrama de difracción para su uso ingenieril.

Nagai (1972) también verificó las diferencias existentes al estudiar la difracción en el caso de oleaje regular frente al irregular.

Después del estudio de estos trabajos, Goda et al. (1978) plantearon un método para la determinación de la difracción en el caso de oleaje irregular (Goda, 1985). Este método va a ser rigurosamente descrito, pues en él no sólo se basan la mayoría de los métodos para el cálculo de la difracción en los modelos de evolución de largo plazo, sino que también el método que se propondrá en el siguiente capítulo se basa en alguno de los elementos del método de Goda et al. (1978).

El oleaje irregular puede ser descrito con un espectro direccional de oleaje si se admite la hipótesis de que éste puede ser representado por una superposición lineal de infinitas ondas asociadas con una frecuencia y con una dirección. De acuerdo con esta definición, el espectro del oleaje difractado en un punto (x, y) se define con la expresión (3.4).

$$S_d(f|x, y) = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S_i(f, \theta) K_d^2(f, \theta|x, y) d\theta \quad (3.4)$$

donde: $S_i(f, \theta)$ es el espectro direccional del oleaje incidente, $K_d(f, \theta|x, y)$ es el coeficiente de difracción en un punto (x, y) para una onda con una frecuencia f y un ángulo θ . El espectro del oleaje difractado se ha presentado en forma de un espectro frecuencial debido a que la función de dispersión direccional se encuentra limitada para cada punto (x, y) con los ángulos θ_{min} a θ_{max} .

El coeficiente de difracción para oleaje irregular se calcula con la expresión (3.5).

$$K_d = \frac{(H_s)_d}{(H_s)_i} = \sqrt{\frac{(m_0)_d}{(m_0)_i}} \quad (3.5)$$

con: $(H_s)_d$ la altura de ola significativa difractada, $(H_s)_i$ la altura de ola significativa incidente, m_0 es el momento de orden cero del espectro definido con la teoría de Longuet-Higgins (1952) y los subíndices representan el momento del espectro difractado (d) o bien el momento del espectro incidente (i). Estos momentos se calculan con las expresiones (3.6) y (3.7).

$$(m_0)_i = \int_0^{\infty} \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S_i(f, \theta) d\theta df \quad (3.6)$$

$$(m_0)_d = \int_0^{\infty} S_d(f) df \quad (3.7)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (3.4), (3.5), (3.6) y (3.7), el coeficiente de difracción puede ser expresado con la expresión (3.8), (Goda, 1985).

$$K_d = \left(\frac{I}{(m_0)_i} \int_0^{\infty} \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} S_i(f, \theta) K_d^2(f, \theta) d\theta df \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Con el objetivo de calcular el coeficiente de difracción mediante la expresión (3.8), es necesario proponer un determinado espectro incidente. Este espectro se puede descomponer en el producto de un espectro frecuencial $S_i(f)$, por una función de dispersión direccional $G(f, \theta)$, como queda especificado en la ecuación (3.9).

$$S_i(f, \theta) = S_i(f) G(f, \theta) \quad (3.9)$$

La forma que adoptaron Goda et al. (1978) para definir el espectro frecuencial incidente fue la propuesta por Bretschneider (1959, 1968) y modificada por Mitsuyasu (1968). Esta expresión se presenta en la ecuación (3.10), la cual consiste en un espectro biparamétrico (H_s , altura de ola significativa y T_s , período del oleaje asociado a la altura de ola significativa).

$$S_i(f) = 0.257 H_s^2 T_s^{-4} f^{-5} \exp\left(-1.03(T_s f)^{-4}\right) \quad (3.10)$$

La frecuencia de pico f_p se puede obtener con la expresión (3.11).

$$f_p = \frac{1}{1.05 T_s} \quad (3.11)$$

Como función de dispersión direccional, Goda et al. (1978) adoptaron la propuesta por Mitsuyasu et al. (1975). Esta función queda indicada mediante la ecuación (3.12). En esta expresión, el ángulo θ se mide con respecto a la dirección principal de incidencia del oleaje.

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (3.12)$$

Los términos de la ecuación (3.12) se determinan utilizando las expresiones (3.13) y (3.14). La expresión (3.13) se introduce para normalizar la función de dispersión direccional.

$$G_0 = \left(\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right)^{-1} \quad (3.13)$$

El parámetro de concentración direccional S se calcula mediante la ecuación (3.14). Como queda indicado en esta ecuación, S depende del parámetro de

concentración direccional máxima S_{max} y de la frecuencia f . Adopta un valor máximo para la frecuencia de pico f_p , decreciendo para las frecuencias menores o mayores. Asimismo, se debe tener en cuenta que el parámetro de concentración direccional máxima S_{max} , debe ser calculado en la profundidad del morro del dique exento, el cual puede estar en profundidades indefinidas o a otra profundidad cualquiera.

$$S = \begin{cases} S_{max} \left(\frac{f}{f_p} \right)^5 & f \leq f_p \\ S_{max} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-2.5} & f \geq f_p \end{cases} \quad (3.14)$$

En la propuesta original de Mitsuyasu et al. (1975) se relacionó el parámetro de concentración direccional máxima en profundidades indefinidas $(S_{max})_0$, con la velocidad del viento generador U y con la aceleración de la gravedad g , mediante la expresión (3.15).

$$(S_{max})_0 = 11.5 \left(\frac{2\pi f_p U}{g} \right)^{-2.5} \quad (3.15)$$

Sin embargo, la ecuación (3.15) no es fácilmente aplicable desde un punto de vista ingenieril, pues aunque se conocen las características del oleaje se suelen desconocer las del viento generador.

Por otra parte, a partir de la fórmula de Wilson (1965) se pudo relacionar el término de dentro del paréntesis en la ecuación (3.15) con el peralte del oleaje en profundidades indefinidas, pudiéndose relacionar el parámetro de concentración direccional máxima del oleaje en indefinidas con el peralte del oleaje en estas profundidades, lo cual aparece representado en la figura 3.4. En esta figura, por

debajo del peralte de 0.026, la línea aparece en discontinua porque no se puede aplicar la fórmula de Wilson, habiéndose extrapolado el resultado. Asimismo, se debe tener en cuenta que, aunque se presenta una relación media entre ambos parámetros, existe una gran dispersión en los datos. Por consiguiente, Goda et al. (1978) recomendaron el empleo de los siguientes valores con fines ingenieriles:

- $(S_{max})_0=10$ para oleajes de banda ancha (tipo “*sea*”).
- $(S_{max})_0=25$ para oleajes de banda estrecha (tipo “*swell*”) con distancias cortas a medias de decadencia (peraltes del oleaje relativamente grandes).
- $(S_{max})_0=75$ para oleajes de banda estrecha (tipo “*swell*”) con distancias medias a largas de decadencia (peraltes del oleaje relativamente pequeños).

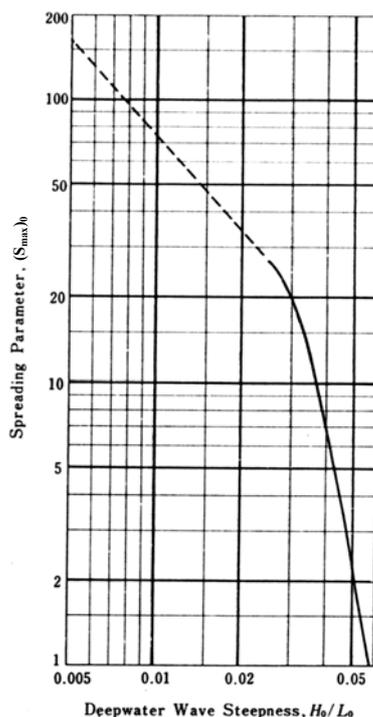


Figura 3.4- Relación entre el parámetro de concentración direccional máxima en indefinidas y el peralte del oleaje en indefinidas (tomada de Goda, 1985)

Todo este proceso se aplicó al estudio de un dique semi-infinito sometido a incidencia normal del oleaje y se construyó una serie de diagramas que aparecen

representados en la figura 3.5. En esta figura se puede visualizar en línea continua el coeficiente de difracción y en línea discontinua las variaciones experimentadas en el período del oleaje para dos casos del parámetro de concentración direccional máxima. Los diagramas de difracción de oleaje irregular, especialmente en estos casos donde se emplea una función de dispersión direccional que es dependiente de la frecuencia del oleaje, están caracterizados por variaciones en el período del oleaje adicionalmente a los cambios en la altura de ola.

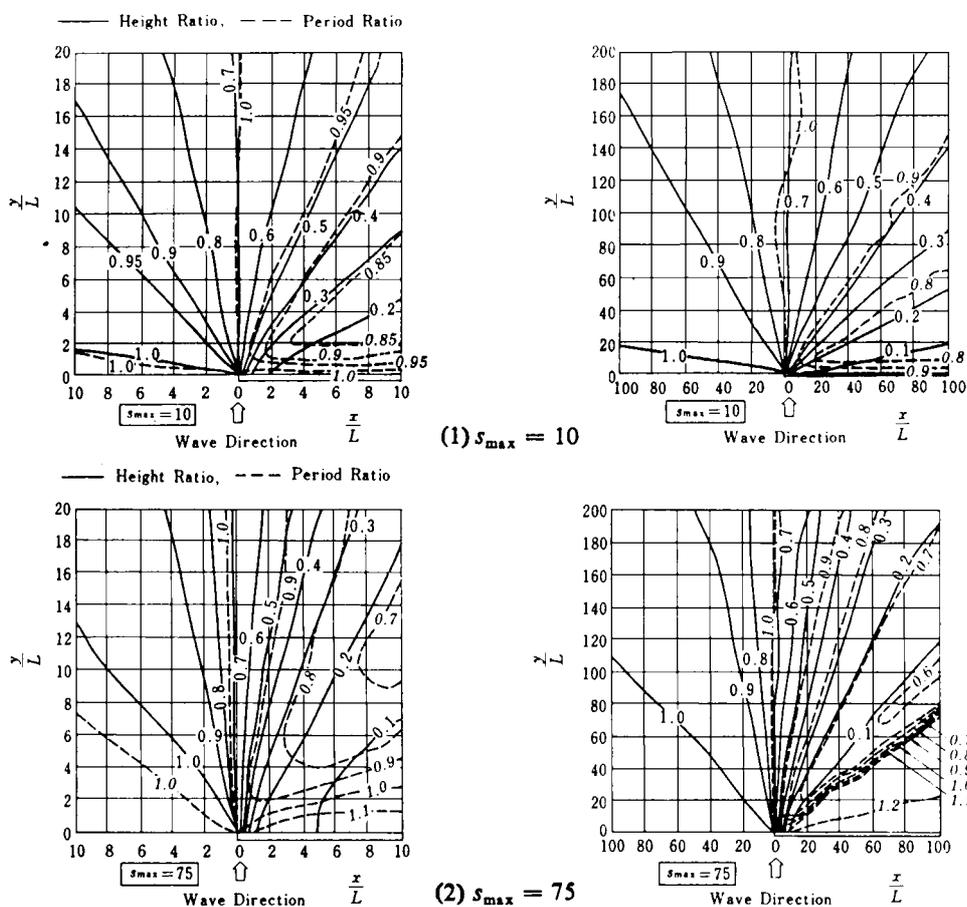


Figura 3.5- Diagramas de difracción de oleaje irregular para un dique semi-infinito sometido a incidencia normal y dos valores del parámetro de concentración direccional máxima, en línea continua altura de ola y en discontinua período del oleaje (tomada de Goda, 1985)

Del análisis comparativo entre el coeficiente de difracción para el caso de oleaje regular (figura 3.3) frente al de oleaje irregular (figura 3.5), se puede resaltar

el hecho de que, en el límite entre la zona de sombra y la zona iluminada, en el primer caso el coeficiente de difracción adopta un valor de 0.5, mientras que en el segundo vale 0.7. En la zona de sombra, utilizando teoría de difracción de oleaje regular, se están minusvalorando las alturas de ola.

Estas discrepancias del coeficiente de difracción entre oleaje regular y oleaje irregular fueron verificadas con diferentes medidas en campo, presentándose en la figura 3.6, con carácter de ejemplo, los datos recogidos en Akita (Japón). De esta figura se puede concluir que si bien la dispersión de los datos es considerable, los resultados obtenidos con difracción de oleaje regular (línea continua inferior) infravaloran el coeficiente de difracción. Sin embargo, los estimados con los diferentes valores del parámetro de concentración direccional máxima de difracción de oleaje irregular proporcionan unos resultados aceptables.

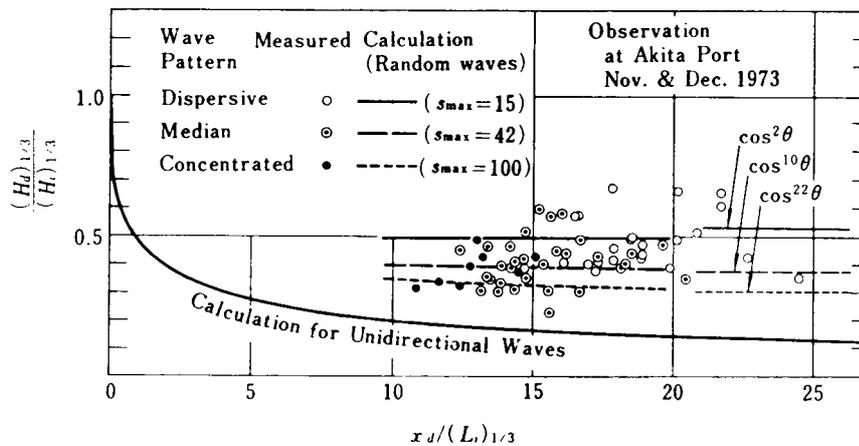


Figura 3.6- Coeficiente de difracción medido en Akita (Japón) frente al calculado con diferentes teorías de difracción (tomada de Goda et al., 1978)

En la mayoría de las situaciones, los diques exentos se van a encontrar en profundidades relativamente pequeñas comparadas con la longitud de onda. Así pues, el efecto de la refracción debe ser tenido en cuenta en el parámetro de concentración direccional máxima S_{max} . Este parámetro presente en la ecuación (3.14), como se comentó previamente, debe ser calculado en la profundidad del

morro del dique. La transformación experimentada por efecto de la refracción depende de la batimetría. En una zona donde la batimetría se pueda suponer recta y paralela, la variación del parámetro de concentración direccional máxima puede ser representada mediante la figura 3.7. En esta figura, el parámetro de concentración direccional máxima se obtiene en función del parámetro de concentración direccional máxima en profundidades indefinidas, del cociente de la profundidad en el morro con respecto a la longitud de onda en indefinidas asociada con el período significativo y del ángulo $(\alpha_p)_0$, el cual denota el ángulo de incidencia del oleaje en profundidades indefinidas. Merece la pena destacar que el parámetro de concentración direccional máxima no es especialmente sensible a la variación de este último parámetro, como se observa en la figura 3.7.

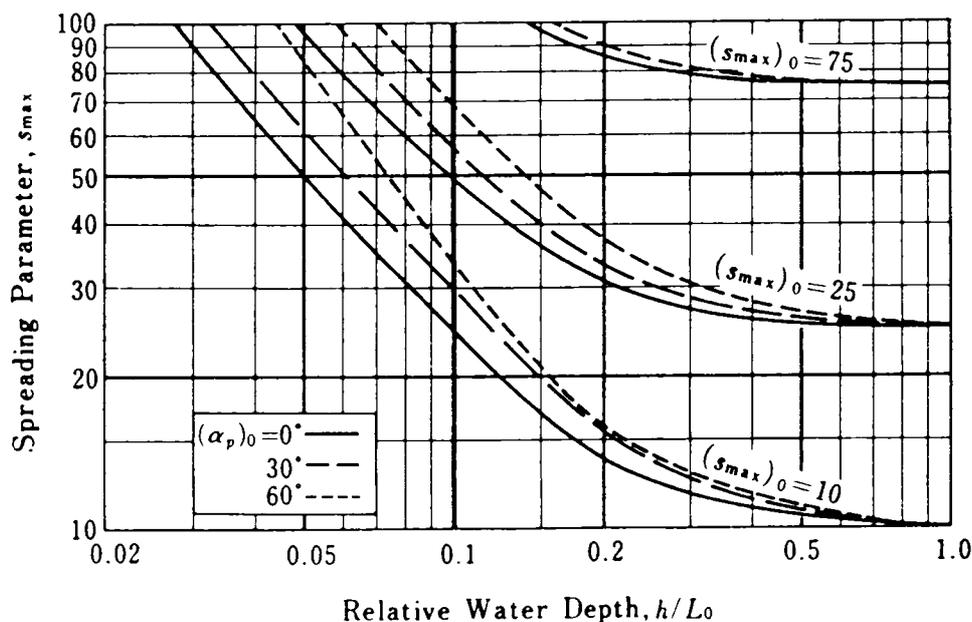


Figura 3.7- Estimación del parámetro de concentración direccional máxima en la profundidad del morro del dique exento (tomada de Goda et al., 1978)

6.3.2. SOLUCIÓN APROXIMADA

Basándose en todo lo expuesto previamente, se propuso el siguiente método aproximado (Goda, 1985). Básicamente, con este método lo que se está haciendo es

considerar a la estructura como un obstáculo que obstruye una parte del espectro direccional del oleaje incidente. Esto se traduce en simplificar la ecuación (3.8), asumiendo que el coeficiente de difracción de cada componente es nulo en la zona de sombra o bien vale la unidad en la zona iluminada. De esta forma, la ecuación (3.8) adopta la forma alternativa presentada en la ecuación (3.16). En esta expresión, el parámetro P_E representa la energía acumulada del espectro por direcciones, la cual es dependiente del ángulo θ , que corresponde al ángulo medido con respecto a la dirección principal del oleaje incidente.

$$P_E(\theta) = K_d^2 = \frac{I}{(m_0)_i} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\theta} \int_0^{\infty} S_i(f, \theta) df d\theta \quad (3.16)$$

En la ecuación (3.16), el momento espectral de orden cero del espectro incidente $(m_0)_i$ se calcula con la expresión (3.6), introduciendo como ángulos límites los valores de $\theta_{min} = -(\pi/2)$ y $\theta_{max} = (\pi/2)$, ya que las componentes del oleaje moviéndose en sentido opuesto al de la dirección principal del oleaje se descartan en el diseño de estructuras costeras.

En la figura 3.8 se presenta el cálculo de la distribución acumulada de la energía del oleaje relativa al ángulo principal de incidencia del oleaje. Para la obtención de esta figura, se ha utilizado como espectro frecuencial del oleaje incidente el planteado en la ecuación (3.10), como función de dispersión direccional la presentada en la ecuación (3.12) y como parámetro de concentración direccional el propuesto en la ecuación (3.14). Asimismo, se representan las curvas para diferentes valores del parámetro de concentración direccional máxima (5, 10, 25 y 75). En la figura 3.8 también se puede observar el resultado obtenido para una función de dispersión direccional distinta a la de Mitsuyasu (Mitsuyasu et al. 1975) y conocida como SWOP (Stereo Wave Observation Project), (para más detalles sobre esta función, véase Goda, 1985). Se puede visualizar que con esta última función los valores calculados son similares.

Así pues, la energía total alcanzando el punto de interés (expresada como un porcentaje de la energía que alcanza el morro del dique) se obtiene de la utilización de la figura 3.8 y el coeficiente de difracción calculando la raíz cuadrada de este valor dividido por cien, como queda expresado en la ecuación (3.17).

$$K_d = \sqrt{\frac{P_E(\theta)}{100}} \quad (3.17)$$

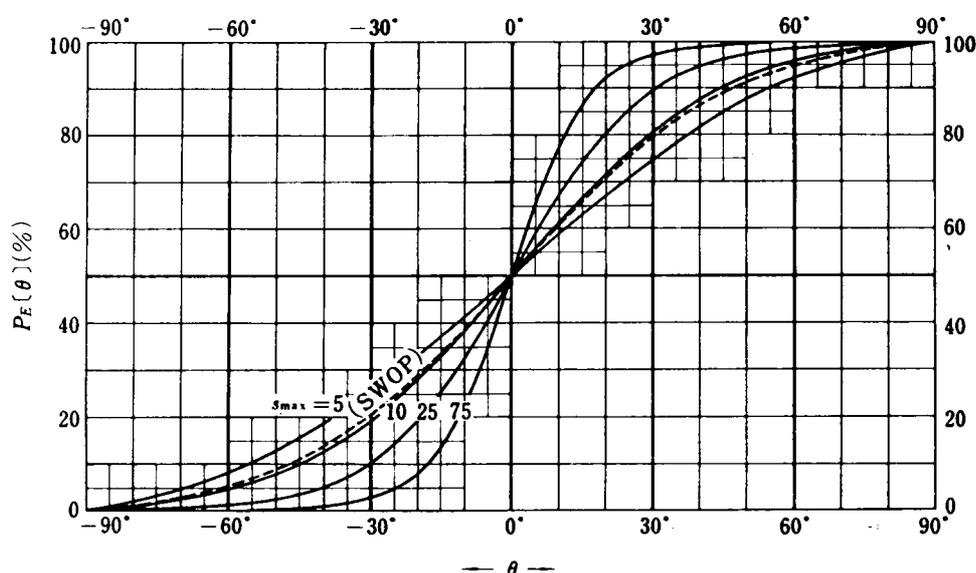


Figura 3.8- Distribución acumulada de la energía del oleaje relativa al ángulo con respecto al de la dirección principal de incidencia (tomada de Goda et al., 1978)

Este método aproximado se basa en el mismo principio que el utilizado por Pierson et al. (1955) en el método que propusieron para la atenuación del oleaje tipo “swell” debido a la dispersión angular o direccional para la predicción del oleaje, por lo que se denomina “*método de la dispersión angular*”. Método que, posteriormente y en diferentes ocasiones, fue de nuevo utilizado.

Según Goda (1985), la simplificación propuesta es considerablemente acertada siempre y cuando las dimensiones del dique exento no sean despreciables (del orden de varias decenas de longitudes de onda).

6.4. DIFRACCIÓN CON LA APROXIMACIÓN DE KRAUS (1984)

La aproximación propuesta por Kraus (1984) para determinar el coeficiente de difracción de oleaje irregular responde a la necesidad de calcular éste dentro de un modelo de evolución de largo plazo, el cual requiere de una optimización del tiempo empleado. El método propuesto se basa en emplear directamente la simplificación de Goda et al. (1978) descrita en el anterior apartado, pero en este caso la figura 3.8 ha sido ajustada con unas expresiones planteadas por Kraus (1984), siendo este hecho la única diferencia entre ambas aproximaciones.

La figura 3.8 se utiliza para calcular la energía en un punto P (localizado en una línea que forma un ángulo θ_D con respecto al rayo del oleaje incidente en el morro), como un porcentaje de la energía $P_E(\theta_D)$ que alcanza el morro del dique. La representación esquemática de este ángulo θ_D necesario en el método propuesto por Kraus (1984) aparece indicada en la figura 3.9. Téngase en cuenta que el ángulo θ_D se define negativo en la región de sombra y positivo en la región iluminada.

El coeficiente de difracción se calcula con la expresión (3.18).

$$K_d(\theta_D) = \sqrt{\frac{P_E(\theta_D)}{100}} \quad (3.18)$$

Con el objetivo de calcular la expresión (3.18), se utilizan las ecuaciones (3.19), (3.20) y (3.21). Estas tres ecuaciones son precisamente las expresiones propuestas por Kraus (1984) y son simplemente un ajuste de las curvas de la figura 3.8.

$$P_E(\theta_D) = 50(\tanh(A) + 1)(\%) \quad (3.19)$$

$$A = \frac{S_{max}}{W} \theta_D \quad (\theta_D \text{ en radianes}) \quad (3.20)$$

$$W = 5.31 + 0.270 S_{max} - 0.000103 S_{max}^2 \quad (3.21)$$

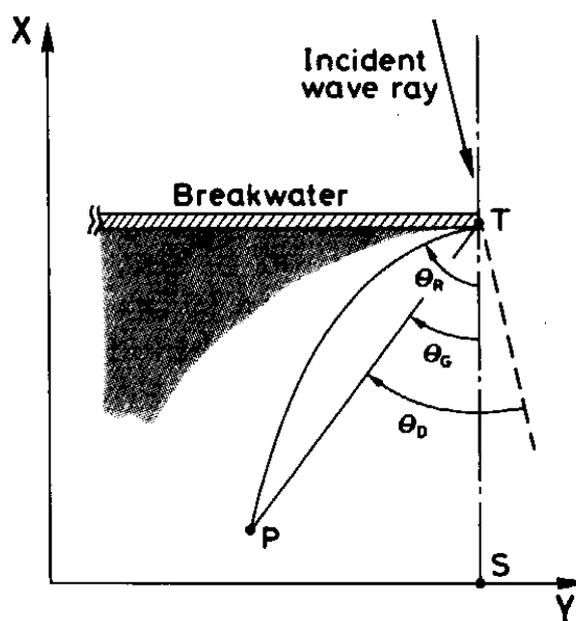


Figura 3.9- Representación esquemática del ángulo θ_D (tomada de Kraus, 1984)

Nótese que, para emplear la aproximación de Kraus (1984), sólo es necesario como dato de partida el parámetro de concentración direccional máxima local, esto es, en la profundidad del morro del dique exento. Este parámetro, como ya se comentó previamente, puede ser estimado con la figura 3.7 a partir del correspondiente parámetro en profundidades indefinidas. Este último parámetro puede ser obtenido con la figura 3.4 (lo cual no es muy recomendable debido a la gran dispersión de los datos que la generaron) o bien se puede utilizar uno de los tres valores propuestos en el anterior apartado en función de las características del oleaje.

En la figura 3.10 se pueden comparar los resultados obtenidos con la figura 3.8 (Goda et al., 1978), en línea continua, frente a los estimados con la aproximación

de Kraus (1984), en línea discontinua. Excepto para el caso de menor parámetro de concentración direccional máxima ($S_{max}=5$), los valores determinados con las expresiones propuestas por Kraus (1984) son similares. Así pues, para oleajes de banda muy ancha, el ajuste es pobre y no debiera ser empleada la aproximación de Kraus (1984).

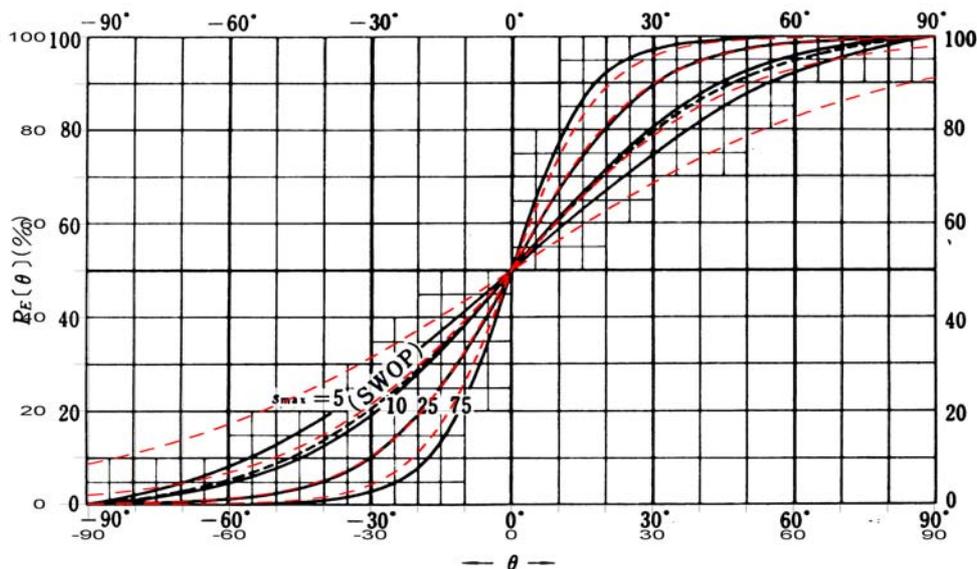


Figura 3.10- Distribución acumulada de la energía del oleaje relativa al ángulo con respecto al de la dirección principal de incidencia determinada con la simplificación de Goda et al. (1978), en línea continua, frente a la aproximación de Kraus (1984), en línea discontinua (modificada de Goda et al., 1978)

6.5. OLEAJE EN ROTURA EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN EN EL MODELO GENESIS

En este apartado se va a describir el proceso que sigue el modelo GENESIS (Hanson y Kraus, 1989) para determinar el oleaje en rotura en zonas donde los fenómenos de refracción-difracción son los preponderantes, como es el caso de áreas sometidas a la influencia de diques exentos.

El área sometida a la influencia de un dique exento se puede dividir en tres zonas, las cuales se pueden observar en la figura 3.11. Existe una zona exterior,

donde ni los frentes del oleaje, ni la altura de ola, se encuentran afectados por la presencia del dique. En la zona iluminada la altura de ola se ve influenciada por la presencia de la estructura pero los frentes permanecen inalterados. Finalmente en la zona de sombra, tanto los frentes del oleaje como la altura de ola se ven modificados por la existencia de la estructura.

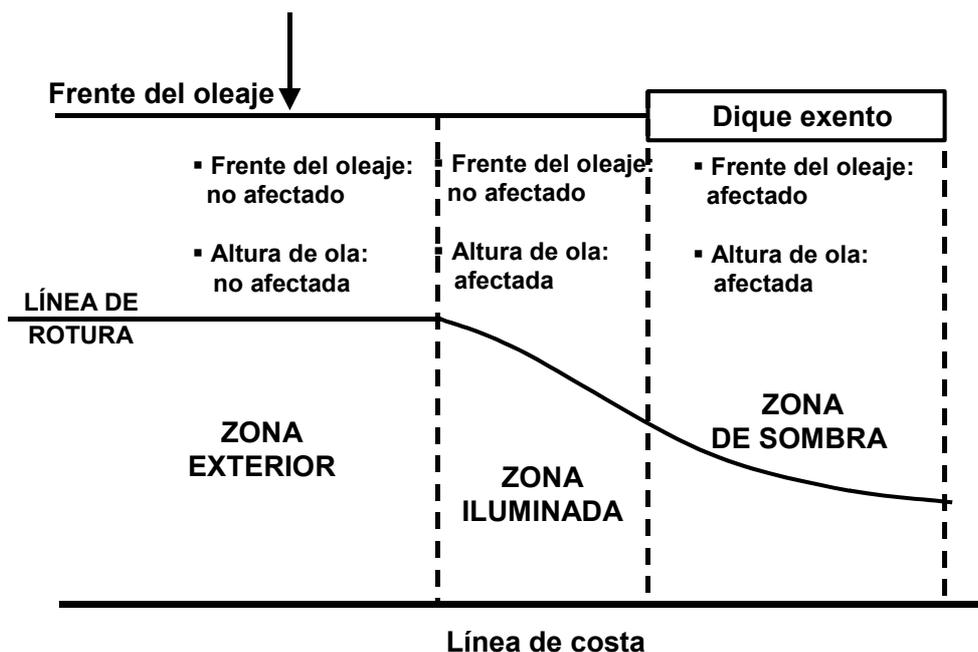


Figura 3.11- Delimitación de zonas en el área sometida a la influencia de un dique exento

En el modelo GENESIS, la delimitación entre zona exterior y zona iluminada viene marcada por el punto en el que el coeficiente de difracción adopta un valor próximo a la unidad (si se utiliza la aproximación de Kraus (1984) para calcular el coeficiente de difracción, el límite entre estas dos zonas se produce para un valor del ángulo con respecto al ángulo del oleaje incidente de unos 33-35 grados). La separación entre la zona iluminada y la zona de sombra viene marcada por el rayo del oleaje incidente en el morro.

El método que utiliza el modelo GENESIS para estimar las características del oleaje en rotura se resume en los siguientes párrafos, tal y como aparece indicado en Kraus (1984).

En la región iluminada se asume que el ángulo del oleaje no está afectado por la difracción y sólo se tiene en cuenta el efecto de la difracción en la altura de ola a través del coeficiente de difracción. Por lo tanto, en esta zona las olas se asomeran y refractan a partir de la profundidad y el ángulo del oleaje en el morro del dique exento.

Por el contrario, dentro de la zona de sombra, como el ángulo de salida del oleaje desde el morro no es conocido a priori, se suele utilizar para calcularlo la técnica del rayo. Sin embargo, este método requiere grandes tiempos de ejecución. Esta es la razón por la que el ángulo del oleaje dentro de la zona de sombra se tiene en cuenta de una forma simplificada, asumiendo que los rayos se refractan desde el morro (punto P_1 en la figura 3.12) hasta el punto de cálculo (punto P_2 en la figura 3.12), partiendo desde el morro con el ángulo geométrico (θ_g en la figura 3.12), es decir, con el ángulo que forma la línea recta entre ambos puntos (aún a sabiendas de que el ángulo del oleaje con el que se debiera salir desde el morro para alcanzar el punto P_2 sería el ángulo θ_l que aparece indicado en la figura 3.12).

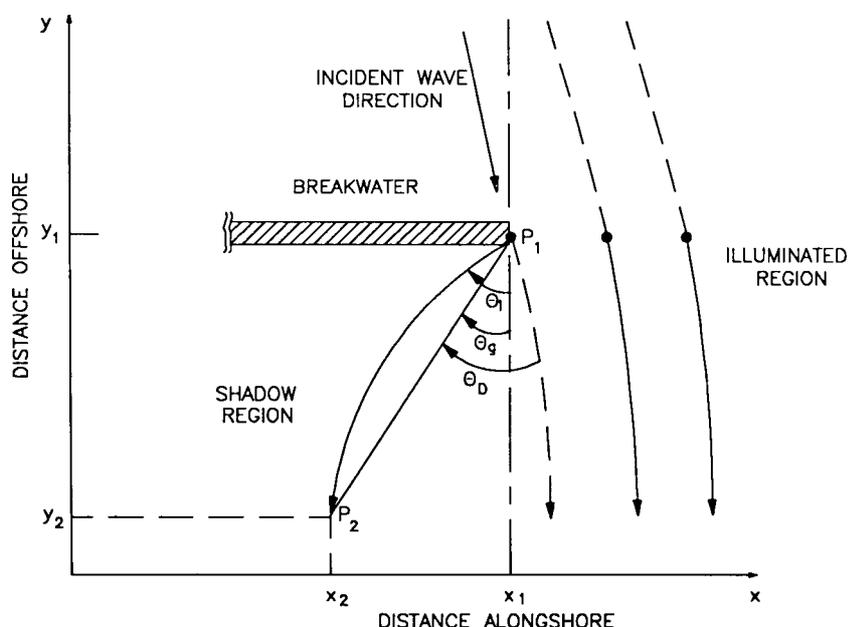


Figura 3.12- Representación esquemática del cálculo del oleaje en una zona sometida a la influencia de un dique exento en el modelo GENESIS (tomada de Hanson y Kraus, 1989)

En la región de sombra el coeficiente de difracción se determina de la misma forma que en la región iluminada, es decir, se calcula siguiendo la aproximación de Kraus (1984) al método simplificado de Goda et al. (1978), (Goda, 1985), que ha sido descrito en el anterior apartado. En ambas zonas (iluminada y sombra) el coeficiente de refracción se calcula con base en la ley de Snell para batimetría recta y paralela y el coeficiente de asomeramiento basado en el principio de conservación de energía.

Las características del oleaje en rotura se calculan de una forma iterativa, una vez que se ha asumido un criterio de rotura, el cual suele ser una expresión del tipo de la ecuación (3.22).

$$H_b = \gamma_b h_b \quad (3.22)$$

con: H_b , la altura de ola en rotura; h_b , la profundidad en rotura y γ_b , la constante que relaciona la altura de ola en rotura con la profundidad en rotura, que suele adoptar el valor de 0.78, aunque también se pueden utilizar otras formulaciones para determinar su valor. Formulaciones que pueden ser dependientes de otros parámetros como la pendiente del fondo, el peralte del oleaje, etc.

Con carácter de ejemplo, se presenta en la figura 3.13 la variación longitudinal de la altura de ola en rotura H_b adimensionalizada con la correspondiente altura de ola en rotura en la zona no afectada por la estructura $H_{b\ ref}$ (véase parte izquierda de la figura), así como la variación longitudinal del ángulo del oleaje en rotura θ_b (véase parte derecha de la figura), para un caso de configuración de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa. Las características del caso presentado son: profundidad en el morro del dique exento, 5 metros; longitud del dique, 1500 metros (para que sea asimilable a un dique semi-infinito); altura de ola incidente en el morro, 1 metro; período asociado, 8 segundos; incidencia normal; pendiente de la playa, la asociada a un perfil de Dean de parámetro de forma $A_d=0.2$ metros^{1/3}.

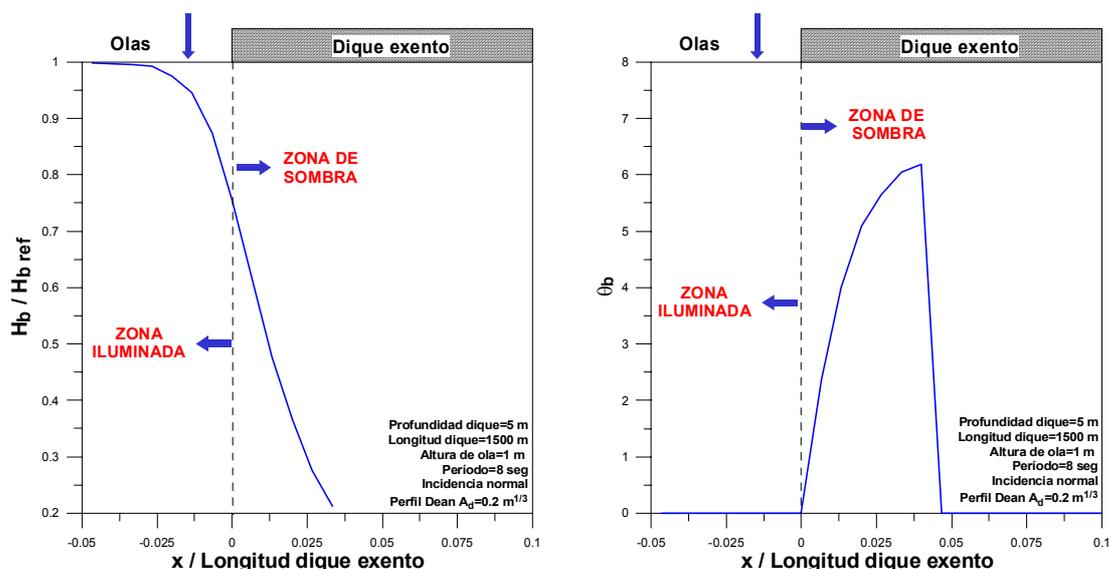


Figura 3.13- Características del oleaje en rotura determinadas con el modelo GENESIS, para un caso concreto de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa

6.6. OLAJE EN ROTURA EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN EN EL MODELO LITLINE

En este apartado se va a describir el esquema que sigue el modelo LITLINE (DHI, 2001) perteneciente al paquete LITPACK para determinar el oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción.

La evaluación de la difracción en el modelo LITLINE es similar a la del modelo GENESIS. Existen dos diferencias principales con respecto a este último modelo. La primera consiste en que, para calcular el ángulo geométrico θ_g en la zona de sombra, se utiliza la posición local de la línea de costa; lo cual se hace para simplificar los cálculos y ahorrar tiempo de computación. La segunda diferencia se refiere a que, sabiendo que el ángulo geométrico no es una adecuada aproximación del ángulo de salida desde el morro, este ángulo es mejorado siendo multiplicado por un factor de 1 para ángulos pequeños hasta un factor de 1.5 para ángulos grandes.

De la misma forma que se presentó en la figura 3.13 las características del oleaje en rotura determinadas con el modelo GENESIS, para un caso de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa, en la figura 3.14 se

presentan las mismas características que en la anterior y para el mismo caso obtenidas con los dos modelos (GENESIS, en línea continua y LITLINE, en raya y punto). Como se observa en la figura 3.14 los resultados son similares, simplemente se observan diferencias en la determinación del ángulo en rotura asociadas al incremento del ángulo geométrico con el correspondiente factor previamente indicado.

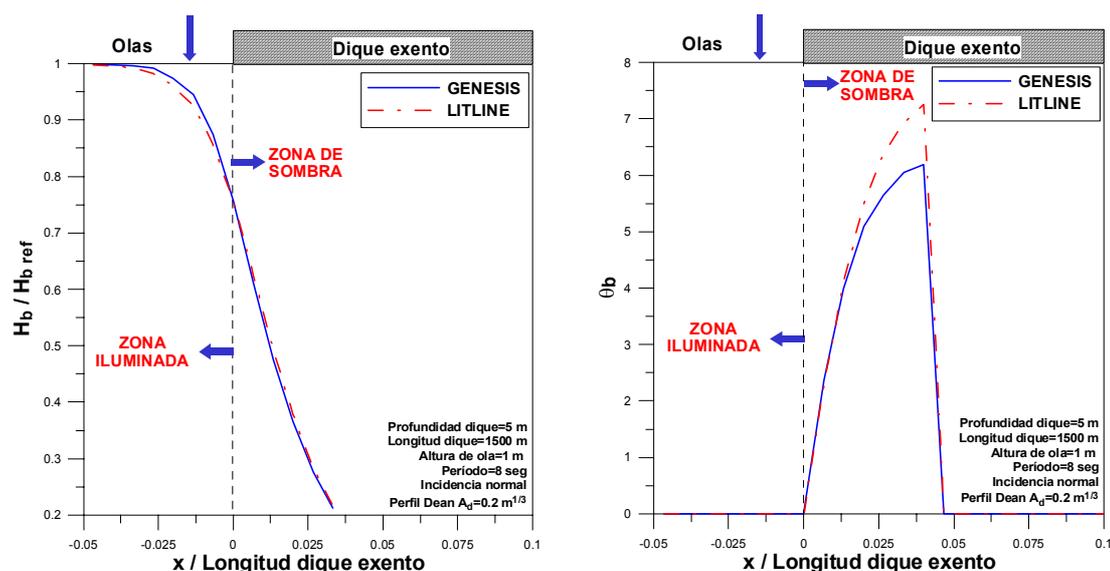


Figura 3.14- Características del oleaje en rotura determinadas con los modelos GENESIS y LITLINE, para un caso concreto de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa

6.7. OLAJE EN ROTURA EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN EN EL MODELO ONELINE

Dabees y Kamphuis (2000) desarrollaron un modelo de una línea o de evolución de largo plazo denominado ONELINE, en el que se utilizó un método totalmente diferente al de los anteriores modelos para determinar las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción.

Como se observa en la figura 3.15, la teoría de difracción lineal desarrollada para profundidad de agua constante, predice formas circulares de los frentes del oleaje difractado (véase parte izquierda de la figura). Sin embargo, el asomeramiento

y la refracción asociada a una profundidad variable, modifican los frentes en estas zonas sometidas a la influencia de estructuras. Asimismo, diferentes estudios de campo mostraron que la dispersión del oleaje asociada a la amplitud de la onda en zonas someras modificaba las formas circulares de los frentes en las áreas de estudio, tendiendo éstas hacia formas de arcos de radio decreciente (Weishar y Byrne, 1978).

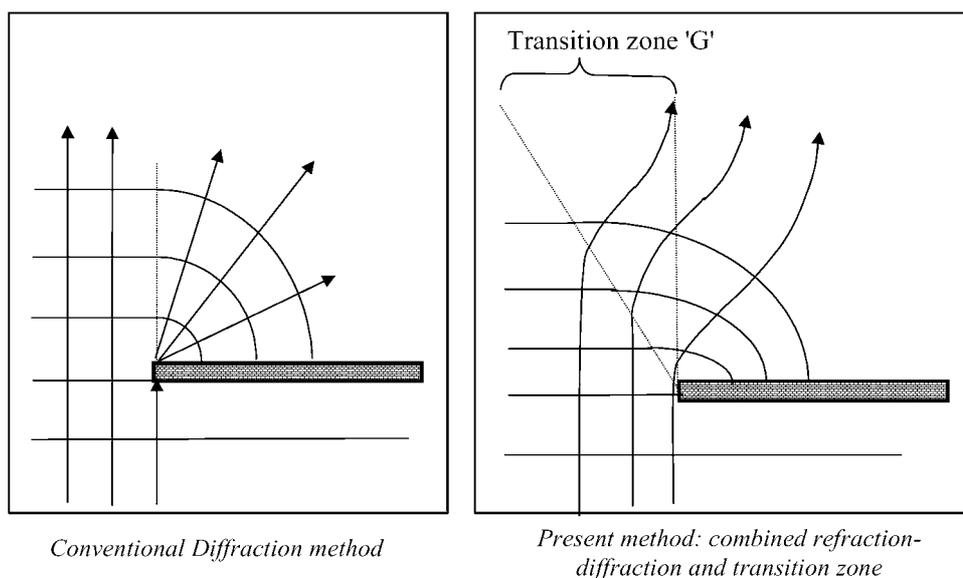


Figura 3.15- Frentes de oleaje en áreas sometidas a la influencia de un dique exento, determinados con los métodos convencionales (izquierda), frente a lo propuesto por Dabees (2000) (derecha), (tomada de Dabees, 2000)

Como ya se comentó previamente, la mayoría de los modelos de evolución de largo plazo utilizan teoría de difracción lineal para simular el oleaje difractado en estas zonas de influencia de los diques exentos. En estos modelos, los morros de los diques exentos se asumen como fuentes a partir de las que se radia el oleaje hacia la costa. Sin embargo, fuera de la zona de sombra el oleaje mantiene su forma de propagación original. Según Dabees (2000), esto es cierto para ondas luminosas, pero para ondas de gravedad el comportamiento es diferente debido a la influencia de la inercia. A diferencia de las ondas luminosas, las cuales pueden cambiar su curso instantáneamente, la inercia de la masa de las partículas de agua de las ondas de gravedad impide que este cambio se produzca repentinamente. Esto es lo que hace

que en la difracción, la influencia de la inercia, adicionalmente al efecto del asomeramiento y la refracción, relaja cualquier cambio radical alrededor del morro del dique exento, tendiendo hacia una forma elíptica más suave de los frentes del oleaje. El resultado es la existencia de una zona de transición (zona G que se observa en la parte derecha de la figura 3.15), en la que los rayos del oleaje cambian el curso gradualmente en la proximidad de la estructura. La anchura de la zona transicional se asume proporcional a la longitud de onda. Dabees (2000), basándose en varias ejecuciones de calibración de su modelo, recomendó utilizar un valor de dos a tres veces la longitud de onda para determinar esta zona de transición.

Asimismo, del análisis de diferentes medidas de laboratorio y de campo (Hsu y Silvester, 1990 y McCormick, 1993), se determinó que la planta de equilibrio de la línea de costa seguía una forma casi circular o elíptica, con un centro localizado a una distancia separado del morro del dique exento. Así pues, el oleaje cerca de la costa seguirá una forma casi circular similar.

Basado en todo lo expuesto anteriormente, Dabees (2000) propuso un método para determinar las características del oleaje en rotura en estas zonas de refracción-difracción, que se describe detalladamente en los siguientes párrafos.

Se asume que existe una serie de fuentes a partir de las que se radian las olas difractadas hacia la costa. Estas fuentes se extienden a lo largo de la distancia G (esta distancia G es la zona transicional que se observa en la figura 3.15) desde el morro del dique exento y a lo largo del frente incidente en él. A medida que el oleaje se acerca a la costa, las trayectorias de éste se curvan debido al efecto de la refracción. Las olas viajan desde un punto I hacia el punto P (véase el esquema de la figura 3.16), asumiendo que sus ángulos siguen la ley de Snell. Es, en este contexto, donde se hace una hipótesis fundamental que consiste en asumir que la refracción tiene lugar a lo largo de un arco circular, es decir, los puntos I y P pertenecen a un arco circular, como se indica en la figura 3.16. De esta forma, los frentes de oleaje casi circulares cambian hacia formas elípticas más suaves a medida que se propagan hacia la costa.

La altura de ola y el ángulo en cualquier localización dada P dentro de la zona de influencia del dique exento (véase figura 3.16) se calcula tal y como se expresa a continuación.

En primer lugar se determina la posición de la fuente I a partir de la que parte el rayo del oleaje que llega al punto P . Con este objetivo, se determina la distancia x_I del morro del dique exento al punto I mediante la ecuación (3.23).

$$x_I = G \frac{y}{S_D} \quad (3.23)$$

G es la anchura de la zona de transición, y es la distancia del dique exento al punto P y S_D es la distancia del dique exento a la línea de costa. Cada uno de los términos de la ecuación (3.23) aparecen claramente representados en la figura 3.16.

Asimismo, siguiendo lo comentado previamente, si se asume que el rayo del oleaje sigue un arco circular del punto I al punto P , el ángulo de salida del punto I denotado α_I y el ángulo de llegada al punto P denotado α_P , se representan mediante las ecuaciones (3.24) y (3.25), respectivamente.

$$\alpha_I = \theta_{IP} + \xi \quad (3.24)$$

$$\alpha_P = \theta_{IP} - \xi \quad (3.25)$$

con: θ_{IP} es el ángulo de la línea recta entre los puntos I y P y ξ es la diferencia entre el ángulo del rayo del oleaje real y el ángulo de la línea recta entre los puntos I y P (véase figura 3.16).

Se aplica la ley de Snell entre los puntos I y P , resultando la ecuación (3.26).

$$\frac{\sin \alpha_P}{\sin \alpha_I} = \frac{L_P}{L_I} \quad (3.26)$$

siendo: L_I y L_P las longitudes de onda en los puntos I y P , respectivamente.

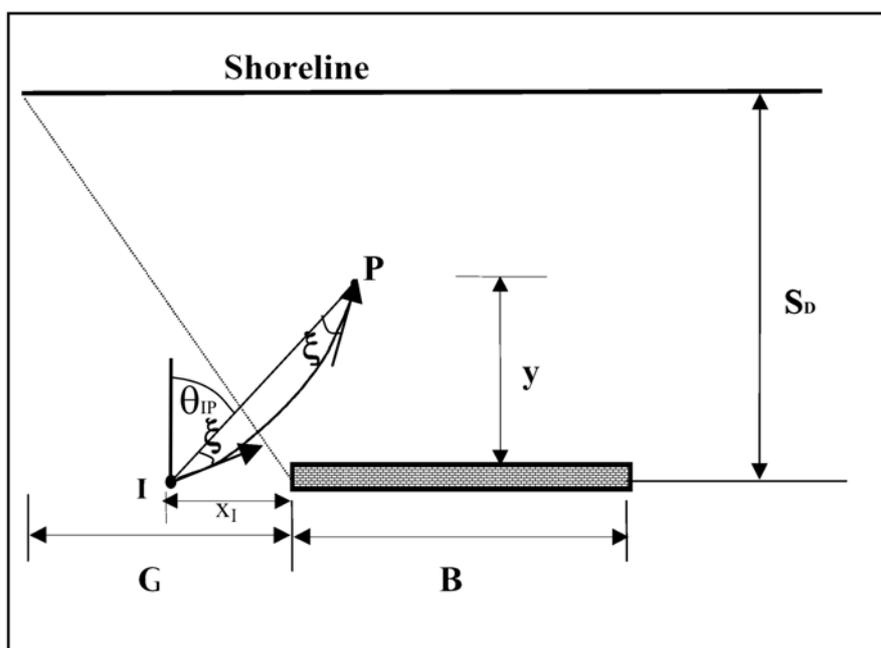


Figura 3.16- Representación esquemática del método propuesto para el cálculo de la refracción-difracción en áreas sometidas a la influencia de diques exentos (modificada de Dabees, 2000)

Introduciendo (3.24) y (3.25) dentro de la ecuación (3.26) se obtiene el valor de ξ mediante la ecuación (3.27).

$$\xi = \tan^{-1} \left(\left(\frac{L_I - L_P}{L_I + L_P} \right) \tan \theta_{IP} \right) \quad (3.27)$$

Haciendo uso de la expresión (3.27) se calculan los ángulos de salida del punto I y de llegada al punto P . Así pues, ha quedado plenamente descrito la determinación de los ángulos mediante el método de Dabees (2000).

En cuanto a las alturas de ola, Dabees (2000) utiliza los diagramas del coeficiente de difracción para oleaje irregular de Goda (1985), pero en lugar de utilizar la aproximación de Kraus (1984), realiza un análisis de regresión de estos gráficos, obteniéndose las expresiones (3.28), (3.29) y (3.30) para determinar el coeficiente de difracción (Kamphuis, 2000). En estas tres ecuaciones, el parámetro θ_D tiene el mismo significado que en la aproximación de Kraus (1984) descrita previamente. Dicho ángulo aparece representado en la figura 3.9 e indica el ángulo que forma la línea del morro del dique al punto analizado con respecto al rayo del oleaje incidente; definiéndose positivo en la zona iluminada y negativo en la zona de sombra. Sin embargo, en las ecuaciones (3.28), (3.29) y (3.30), este ángulo debe ser introducido en grados, a diferencia de en la aproximación de Kraus (1984).

$$0 \geq \theta_D > -90 \Rightarrow K_d = 0.71 + 0.0093\theta_D + 0.000025\theta_D^2 \quad (3.28)$$

$$40 \geq \theta_D > 0 \Rightarrow K_d = 0.71 + 0.37 \sin \theta_D \quad (3.29)$$

$$90 \geq \theta_D > 40 \Rightarrow K_d = 0.83 + 0.17 \sin \theta_D \quad (3.30)$$

Definidas las características del oleaje con este método, las características del oleaje en rotura se calculan de una forma iterativa, al igual que en los dos métodos anteriores (GENESIS y LITLINE), una vez que se establece un criterio de rotura.

Con el objetivo de poder comparar los métodos descritos para la obtención de las características del oleaje en rotura en las zonas de estudio y pertenecientes a los tres modelos de evolución de largo plazo descritos (GENESIS, LITLINE y

ONELINE), en la figura 3.17 se presentan estas magnitudes (la variación longitudinal de la altura de ola en rotura H_b adimensionalizada con la correspondiente altura de ola en rotura en la zona no afectada por el dique exento $H_{b,ref}$ en la parte izquierda de la figura y la variación longitudinal del ángulo del oleaje en rotura θ_b en la parte derecha de la misma) para el mismo caso de configuración de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa que el establecido en la figura 3.13.

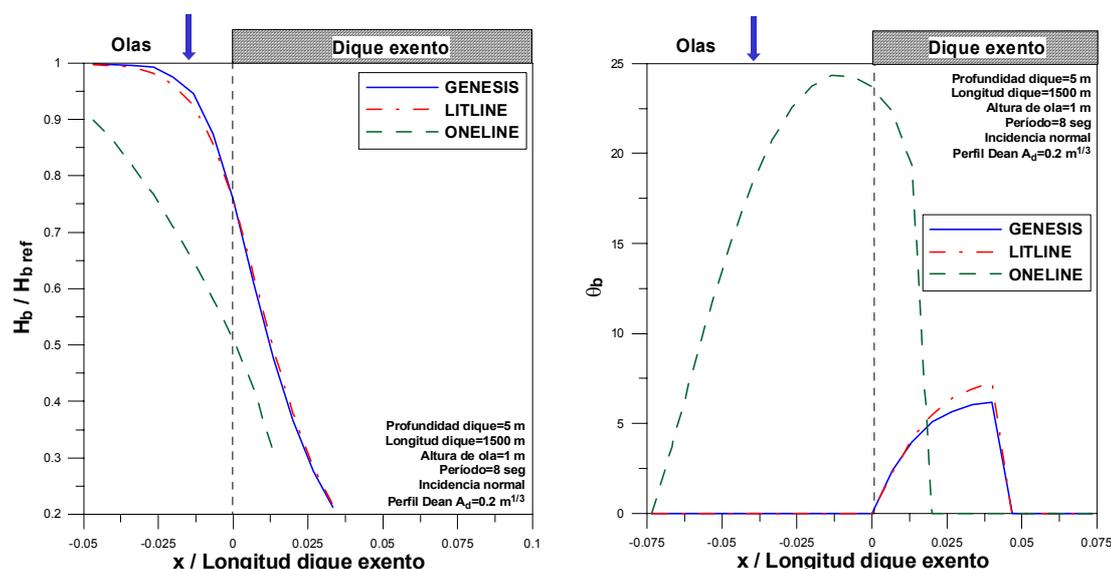


Figura 3.17- Características del oleaje en rotura determinadas con los modelos GENESIS, LITLINE y ONELINE, para un caso concreto de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa

Como se observa en la figura 3.17, aunque los resultados obtenidos con el modelo GENESIS y LITLINE son similares, los estimados con el modelo ONELINE difieren considerablemente. Se debe tener en cuenta que con el método presente en este último modelo, no se hace diferenciación entre la zona de sombra y la zona iluminada. Asimismo, el ángulo del oleaje se ve afectado por la difracción en una zona más amplia. Merece la pena comentar el hecho de que mientras que con los modelos GENESIS y LITLINE la zona a partir de la cual el dique exento comienza a afectar al oleaje es fija (es de unos 33-35 grados con respecto al rayo del oleaje incidente, véase apartado 6.5.), con el modelo ONELINE esta zona es variable al

depender de la longitud de onda del oleaje en las proximidades del morro de la estructura. Tampoco se debe olvidar que el método propuesto por Dabees (2000) trata de incorporar la refracción-difracción conjuntamente, a diferencia de los otros métodos.

6.8. DEFICIENCIAS DE LOS MÉTODOS PREVIOS

Como resultado del estudio previo, y una vez observadas las discrepancias existentes entre las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción obtenidas con los diferentes modelos, se requiere un estudio más profundo con el objetivo de poder establecer el grado de validez de los diferentes métodos.

Nótese que las consideraciones anteriores no fueron realizadas por los modelos de evolución de largo plazo precedentes debido a que la validez de estos modelos se basó principalmente en comparaciones de la línea de costa y no del oleaje. Es tal la importancia del método para determinar las características del oleaje, que ciertas características de la línea de costa (como la forma en planta de equilibrio) no van a poder ser representadas si se utiliza un método erróneo de propagación, independientemente de que se calibre el modelo de evolución de largo plazo empleado.

Con el objetivo de una mayor claridad en la lectura de este apartado, se divide en dos partes: una relacionada con las deficiencias de los métodos previos, las cuales se pueden considerar generales, y otra, con las deficiencias particulares, que son inherentes a las aproximaciones empleadas para calcular el fenómeno de la refracción-difracción conjuntamente.

6.8.1. DEFICIENCIAS GENERALES

Así pues, con la idea de poder precisar las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción y poder determinar el grado de validez de los diferentes métodos presentados, se utilizó un modelo numérico de propagación de

oleaje MSP (véase GIOC, 2001a y GIOC, 2001b) que resuelve el problema de la refracción-difracción conjuntamente mediante la aproximación parabólica de la ecuación de la pendiente suave o “mild slope equation” y que ha sido validado con datos de campo y de laboratorio. Una descripción más detallada de este modelo numérico puede ser consultada en el anejo II. En la figura 3.18 se presentan los mismos resultados que en la figura 3.17 y, adicionalmente, se muestran las características del oleaje en rotura determinadas con el modelo numérico MSP mencionado.

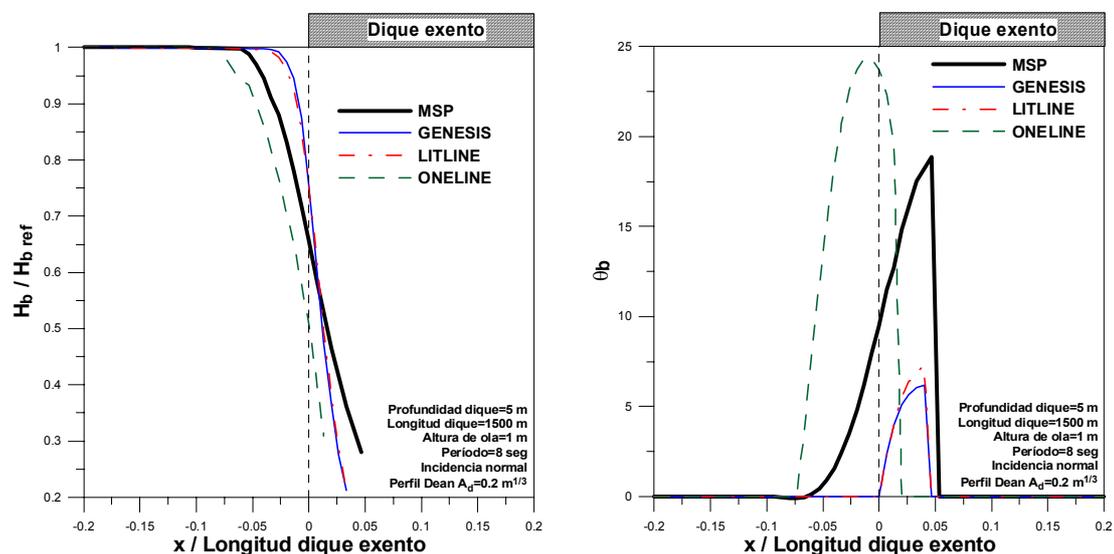


Figura 3.18- Características del oleaje en rotura determinadas con los modelos GENESIS, LITLINE y ONELINE, para un caso concreto de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa, comparadas con los resultados proporcionados por un modelo numérico de propagación de oleaje MSP

De la observación de la figura 3.18, las discrepancias existentes se pueden dividir en los siguientes puntos:

✓ *Determinación de la zona de refracción-difracción.* El modelo numérico MSP predice un área de influencia de la estructura intermedia entre la determinada con los modelos GENESIS y LITLINE y la estimada con el modelo ONELINE. Como se especificó en el anterior apartado, el área de influencia obtenida con los

primeros modelos es fija y queda definida por un ángulo de 33-35 grados con respecto al rayo de incidencia del oleaje en el morro del dique exento. En cuanto al modelo ONELINE, según Dabees y Kamphuis (2000), la zona analizada abarca una distancia de entre dos a tres veces la longitud de onda (zona *G* referenciada en el anterior apartado). Este último método tiene la ventaja de que con él, el área de influencia ya no es fija y depende del período de la onda, lo cual coincide con las investigaciones de González y Medina (2001), con las que se pudo establecer la relación existente, para diferentes playas del litoral español, entre el área sometida a la influencia de un dique exento y el parámetro Y/L_s (Y : distancia del punto difractante a la parte de playa no afectada por el dique exento; L_s : longitud de onda en cercanías del punto de difracción).

✓ *Ángulo del oleaje en rotura.* En los modelos GENESIS y LITLINE, el ángulo se ve afectado en una zona más reducida de la esperada, pues en estos modelos sólo se modifica el ángulo del oleaje en lo que en el anterior apartado se denominó como zona de sombra. Sin embargo, de la comparación con el modelo MSP, se puede apreciar que en la zona iluminada ya existe una modificación del ángulo del oleaje. Por el contrario, aunque en el modelo ONELINE no se diferencia entre zona de sombra y zona iluminada, los valores obtenidos del ángulo del oleaje en rotura son excesivamente grandes.

✓ *Altura del oleaje en rotura.* Las diferencias observadas en altura de ola, al igual que en el ángulo del oleaje, tienen dos componentes claramente identificadas; por una parte está el hecho de la incorrecta determinación de la zona de refracción-difracción y, por otra parte, están las diferencias en magnitud de la altura de ola. Todo esto tiene como resultado que, aunque en la zona de sombra todos los modelos subestiman el valor de la altura de ola, en la zona iluminada los modelos GENESIS y LITLINE sobrestiman la altura de ola y el modelo ONELINE la infravalora. Tampoco se debe olvidar que las características del oleaje en rotura (altura de ola y ángulo del oleaje) están íntimamente unidas; consecuentemente, una incorrecta determinación del ángulo del oleaje conllevará valores erróneos de la altura de ola en rotura.

6.8.2. DEFICIENCIAS PARTICULARES

Adicionalmente a las anteriores consideraciones, existen unas deficiencias de carácter particular que están asociadas a la simplificación de Goda et al. (1978) y a la aproximación de Kraus (1984) para determinar la difracción en estas zonas de refracción-difracción. Deficiencias que quedan indicadas en los siguientes puntos:

✓ De la comparación de los diagramas de isolíneas del coeficiente de difracción a sotavento del dique semi-infinito según la teoría de Penney y Price (1952), (véase figura 3.3), con los de Goda (1985), (Goda et al., 1978), (véase figura 3.5), se pueden apreciar diversas diferencias. Mientras que las isolíneas establecidas por los primeros son parabólicas, las propuestas por Goda (1985) se asemejan a radios con centro en el morro de la estructura difractante. Esto es asimilable a decir que los valores del coeficiente de difracción en un determinado punto dependen: en el primer caso (Penney y Price, 1952), tanto de x/L como de y/L , pero en el segundo (Goda, 1985), sólo dependen de x y de y , sin depender, por lo tanto, de la longitud de onda. De esta forma, con la simplificación de Goda et al. (1978) se está perdiendo la influencia del período del oleaje.

Las consideraciones anteriores son especialmente significativas al determinar la zona de influencia de una estructura costera. Esta zona, en el caso de Penney y Price (1952) varía con el período, pero en el caso de la simplificación de Goda et al. (1978) es independiente de este parámetro. Todo lo dicho para la simplificación de Goda et al. (1978) es extensible al caso de la aproximación de Kraus (1984), pues esta última es un ajuste de la primera, como se explicó en el anterior apartado.

Con carácter de ejemplo, en la figura 3.19 se presentan los resultados de la línea de costa en equilibrio (planta de equilibrio) obtenidos con el modelo GENESIS para una configuración de un dique exento a una distancia de cuarenta metros con respecto a la línea de costa inicial y para diferentes períodos del oleaje. En esta figura se puede verificar lo comentado anteriormente, pues al basarse el modelo GENESIS en la simplificación de Goda et al. (1978) y en la aproximación de Kraus (1984), la zona de refracción-difracción en la posición de equilibrio de la línea de costa es independiente del período del oleaje. Las deficiencias observadas en el modelo

GENESIS son trasladables al modelo LITLINE, pues ambos emplean el mismo esquema aproximado para estimar la difracción en estas zonas.

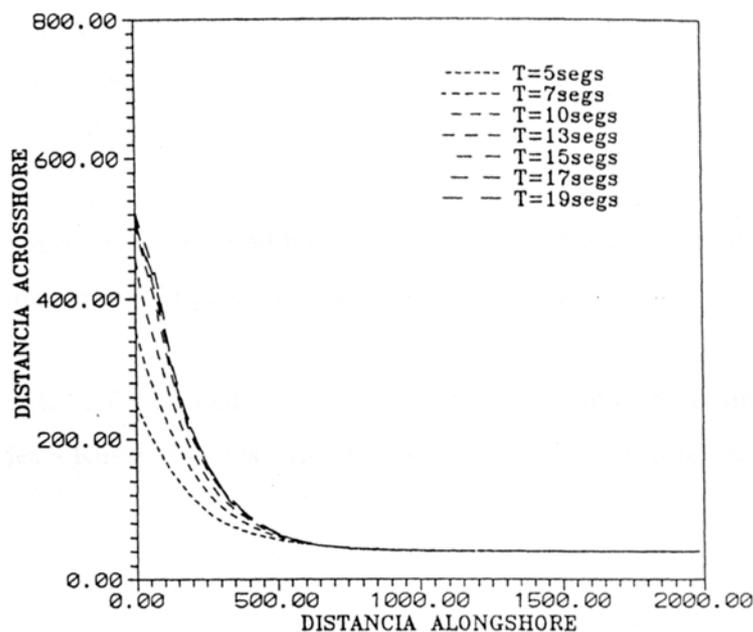


Figura 3.19- Ejemplo de la influencia del período del oleaje en la planta de equilibrio de la línea de costa en el modelo GENESIS (tomada de López, 1996)

✓ Adicionalmente a lo comentado en el punto anterior y, a diferencia de los resultados obtenidos por González y Medina (2001), en los modelos GENESIS y LITLINE la zona de refracción-difracción en la posición de equilibrio de la línea de costa en las zonas sometidas a la influencia de diques exentos tampoco depende de la distancia de la estructura a la línea de costa (distancia Y referida en González y Medina, 2001). Este hecho, que está directamente asociado a un esquema de difracción erróneo en las zonas analizadas, puede tener consecuencias no muy deseables en la determinación de la posición de la línea de costa en equilibrio. En la figura 3.20 aparece un ejemplo de la posición de la línea de costa en equilibrio al hacer uso de la curva propuesta por González y Medina (2001) para determinar la zona de influencia de un dique exento (a la que se hará referencia en el siguiente capítulo), frente a la correspondiente línea de costa obtenida con el modelo GENESIS (los resultados son extensibles al modelo LITLINE).

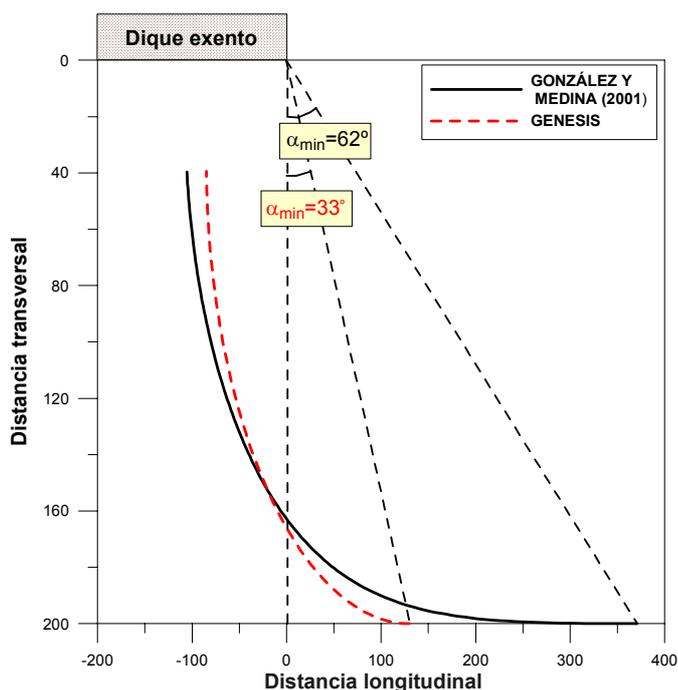


Figura 3.20- Posición de equilibrio de la línea de costa determinada por González y Medina (2001) frente a la calculada con el modelo GENESIS

✓ Aunque Goda (1985) propone, en un principio, la figura 3.4 para determinar la relación entre el peralte del oleaje en indefinidas y el parámetro de concentración direccional máxima en indefinidas, debido a la gran dispersión existente en los datos generadores de esta figura, finalmente recomienda utilizar sólo tres valores para este último parámetro, en función del tipo de oleaje. Estos mismos valores se utilizan en la aproximación de Kraus (1984). Esto es una limitación importante de por sí. Asimismo, tiene como consecuencia que no se tiene en ningún momento en cuenta la influencia del período del oleaje.

✓ Otra limitación de la simplificación de Goda et al. (1978) y de la aproximación de Kraus (1984) para calcular la difracción, radica en la utilización de la figura 3.7 para estimar el parámetro de concentración direccional máxima local, pues en esta figura el parámetro indicado es función de la relación profundidad local en el morro adimensionalizada con la longitud de onda en profundidades indefinidas y el rango de variación de esta relación es pequeño, no cubriendo el rango en el que se encuentran la mayoría de las estructuras.

Como ejemplo, en el caso particular de un oleaje de período de 12 segundos, si el parámetro de concentración direccional máxima en profundidades indefinidas es 10, sólo se puede utilizar la figura 3.7 para profundidades en el morro del dique mayores que 6.7 metros. En el mismo caso, pero para un valor del parámetro de concentración direccional máxima en profundidades indefinidas de 25, sólo se puede utilizar la figura 3.7 para profundidades en el morro mayores que 11.3 metros. Finalmente, con el mismo período del oleaje y un parámetro de concentración direccional máxima en profundidades indefinidas de 75, solamente se puede utilizar la mencionada figura en el caso de que la profundidad en el morro del dique sea superior a 33 metros. Por consiguiente, existe un considerable número de casos en los que la figura 3.7 carece de validez, siendo imposible estimar el parámetro de concentración direccional máxima local y, como consecuencia, tampoco se podrá calcular el coeficiente de difracción.

✓ Una consecuencia de la anterior limitación consiste en que las expresiones propuestas por Kraus (1984), más concretamente la ecuación (3.21), pierde su validez cuando la relación profundidad local en el morro adimensionalizada con la longitud de onda en profundidades indefinidas queda fuera del rango de la figura 3.7.

✓ Otra de las limitaciones de la aproximación de Kraus (1984), que fue expuesta cuando se describió esta aproximación, quedó indicada en la figura 3.10. En esta figura se pudo observar que, para oleajes de banda muy ancha ($S_{max}=5$), las expresiones ajustadas por Kraus (1984) son una pobre estimación de las curvas aproximadas por Goda et al. (1978).

✓ Finalmente, otra deficiencia del método simplificado de Goda et al. (1978) y de la aproximación de Kraus (1984), es el hecho de que, al ser métodos diseñados especialmente para oleaje irregular (tipo “*sea*”), dejan de ser aplicables en el caso de oleajes de banda muy estrecha (monocromáticos).

6.9. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha estudiado la simplificación de Goda et al. (1978) y la aproximación de Kraus (1984) que utilizan casi todos los modelos de evolución para el cálculo de la difracción. Asimismo, se ha realizado un análisis de la determinación del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción por los principales modelos de evolución de playas de largo plazo (GENESIS, LITLINE y ONELINE), comparándose con los resultados obtenidos con un modelo numérico de propagación de oleaje MSP que resuelve el problema de la refracción-difracción conjuntamente. Como resultado de este estudio, se han podido establecer las siguientes conclusiones:

❖ La simplificación de Goda et al. (1978) y la aproximación de Kraus (1984) para el cálculo de la difracción poseen una serie de limitaciones.

- Desprecian la influencia del período del oleaje. Consecuentemente, en los modelos GENESIS y LITLINE la zona de refracción-difracción en la posición de equilibrio de la línea de costa es independiente del período del oleaje.

- El parámetro de concentración direccional máxima en indefinidas sólo puede adoptar tres valores en particular, perdiéndose también con este hecho la influencia del período del oleaje.

- La curva propuesta para estimar el parámetro de concentración direccional máxima local, no cubre el rango en el que se encuentran la mayoría de las estructuras, perdiendo validez en estas situaciones las expresiones aproximadas propuestas por Kraus (1984).

- La aproximación de Kraus (1984) no es adecuada para oleajes de banda muy ancha.

- Son métodos desarrollados para oleaje irregular (tipo “*sea*”), perdiendo su aplicabilidad en el caso de oleajes de banda muy estrecha (monocromáticos).

❖ Los modelos GENESIS, LITLINE y ONELINE no predicen adecuadamente la zona de refracción-difracción. En el caso de los dos primeros modelos, la zona de refracción-difracción es fija (33-35 grados con respecto al oleaje

incidente) y más reducida que lo adecuado. En el caso del último modelo, aunque la zona analizada es función del período del oleaje, lo cual coincide con las investigaciones de González y Medina (2001), tampoco se calcula de una forma correcta. Entre las consecuencias de esta incorrecta definición de la zona de refracción-difracción, se encuentra la inadecuada determinación de la posición de equilibrio de la línea de costa.

❖ En la zona iluminada existe una modificación del ángulo del oleaje. Los modelos GENESIS y LITLINE no contemplan esta modificación y el modelo ONELINE, aunque no diferencia entre zona de sombra y zona iluminada, tampoco predice el ángulo del oleaje acertadamente.

❖ En la zona de sombra todos los modelos subestiman el valor de la altura de ola, en la zona iluminada los modelos GENESIS y LITLINE sobrestiman la altura de ola y el modelo ONELINE la infravalora.

❖ Es imprescindible el desarrollo de un método nuevo para la determinación de las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción, aplicable dentro de un modelo de evolución de playas que se pueda extender hasta el largo plazo. Este método será desarrollado en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 7

MÉTODO PROPUESTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL OLEAJE EN ROTURA EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN

7.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a describir el método que se propone en la presente Tesis para la determinación de las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción dentro de los modelos de evolución de playas. En el anterior capítulo se pudo comprobar la necesidad del desarrollo de un método de este tipo, una vez analizado los diferentes métodos que utilizan los principales modelos de evolución de largo plazo, detectándose una serie de deficiencias en los mismos, así como las implicaciones y consecuencias de estas limitaciones.

El estudio de este capítulo se realizará en las siguientes fases:

- En una primera etapa se analizarán por separado cada uno de los puntos del método propuesto que requieren de un análisis especial y que son: la determinación de la zona de refracción-difracción, el establecimiento del ángulo del oleaje y la obtención del coeficiente de difracción para el cálculo de la altura de ola.
- Posteriormente se detallará la metodología a seguir dentro del modelo de evolución para el cálculo de las características del oleaje en rotura en las zonas de refracción-difracción.
- Finalmente se presentarán algunos resultados determinados con el método propuesto frente a los obtenidos con los métodos presentes en otros modelos de evolución de playas, los cuales fueron estudiados en el anterior capítulo.

7.2. CONSIDERACIONES INICIALES

En primer lugar, se debe tener en cuenta que, tanto para detectar algunas de las deficiencias de los modelos antecesores indicadas en el anterior capítulo, como para el desarrollo del método que se describe en este capítulo, se ha utilizado un modelo numérico de propagación de oleaje MSP. Este modelo resuelve la aproximación parabólica de la *ecuación de la pendiente suave* (“*mild slope equation*”, véase ecuación 3.2 del capítulo 6). Se ha trabajado con las dos versiones

de las que dispone el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria, la versión para oleaje monocromático, denominada como Oluca-MC (GIOC, 2001a), y la versión para oleaje espectral u Oluca-SP (GIOC, 2001b). Ambas versiones incluyen una extensión en ángulos de propagación de acuerdo a Kirby (1986b).

Con el objetivo de una mayor claridad en la lectura de este capítulo, la descripción del modelo numérico MSP utilizado se puede consultar en el anejo II de la Tesis, describiéndose los fundamentos de este modelo, las hipótesis en las que se basa, así como la validación del mencionado modelo. Sin embargo, merece la pena recalcar que la credibilidad de ambos modelos numéricos de propagación, tanto del Oluca-MC, como del Oluca-SP, no es puesta en duda en absoluto, debido no sólo a los diez años de utilización de estos modelos en innumerables proyectos a lo largo del litoral español, sino también a una serie de casos de validación que se mencionan en el anejo II y que se pueden analizar con más detalle en GIOC (2001a) y GIOC (2001b).

7.3. DETERMINACIÓN DE LA ZONA DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN

La determinación correcta de la zona de refracción-difracción es de especial relevancia, como se comentó en el anterior capítulo. En la figura 3.21 aparecen representadas las tres zonas en las que se divide el área de influencia de un dique exento según González y Medina (2001). Se debe definir el límite entre la región 1 y la región 2 de la figura 3.21.

En la figura 3.21 el punto P_0 marca el límite de la zona de influencia del dique exento. El ángulo que forma la línea recta entre el morro del dique y el punto P_0 con respecto a la dirección de incidencia del oleaje se denomina α_{min} . Este ángulo aparece representado en la figura 3.22.

González y Medina (2001), con base en veintiséis playas de las costas del Océano Atlántico y del Mar Mediterráneo de España, propusieron la ecuación (3.31) para el cálculo del ángulo α_{min} .

$$\alpha_{min} = \arctan \left(\frac{\left(\frac{\beta_r^4}{16} + \frac{\beta_r^2 Y}{2 L_s} \right)^{\frac{1}{2}}}{\frac{Y}{L_s}} \right) \quad (3.31)$$

con: $\beta_r=2.13$, Y hace referencia a la distancia del punto de control o morro difractante a la parte de playa en línea recta, es decir, la parte de playa que ya no se encuentra sometida a la influencia del dique exento y que queda definida a partir del punto P_0 y L_s representa una longitud de onda de escala que, según González y Medina (2001), se calcula con una profundidad media a lo largo del frente cercano al punto de control y con el período del oleaje asociado a la altura de ola que es excedida doce horas al año H_{s12} .

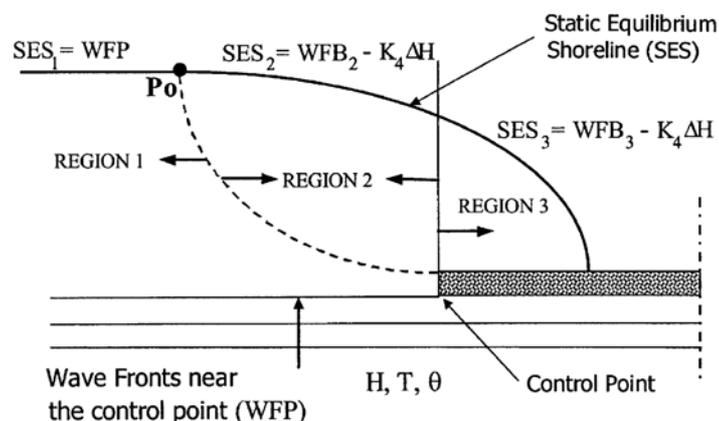


Figura 3.21- Representación esquemática de las regiones en las que se divide el área de influencia de un dique exento (tomada de González y Medina, 2001)

La ecuación (3.31) aparece representada en la figura 3.23.

Así pues, en la metodología que se propone en esta Tesis para determinar las características del oleaje en rotura, se utilizará la expresión (3.31) para delimitar la zona de refracción-difracción. Esta expresión posee la ventaja de considerar la influencia del período en la definición de este área, a diferencia de los métodos que utilizan los modelos GENESIS y LITLINE, y similarmente a como se proponía en el modelo ONELINE (zona G), (véase capítulo 6).

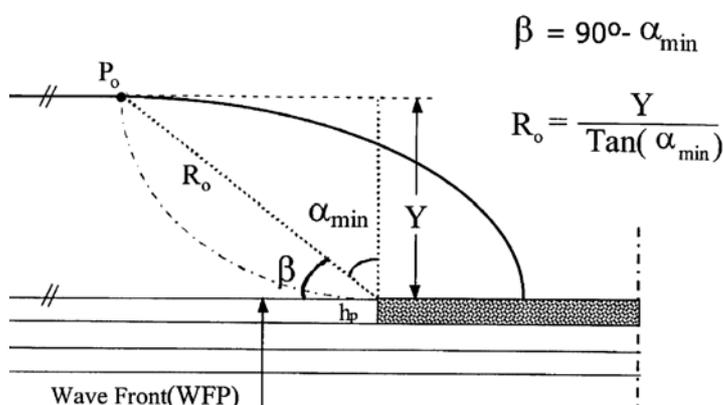


Figura 3.22- Representación esquemática de los parámetros que se utilizan para definir el área de influencia de un dique exento (tomada de González y Medina, 2001)

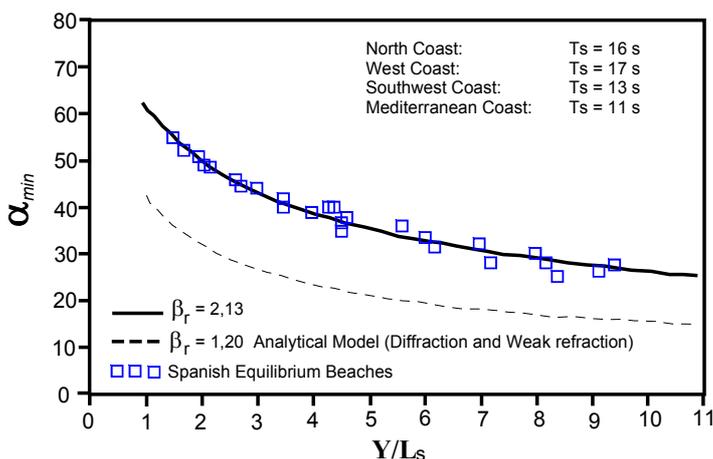


Figura 3.23- Determinación del ángulo α_{min} en función de la distancia del dique a la playa adimensionalizada con una longitud de onda de escala y resultados obtenidos a partir de la expresión analítica para el caso de débil refracción y difracción (tomada de González y Medina, 2001)

7.4. ÁNGULO DEL OLEAJE

Con el objetivo de establecer el ángulo del oleaje se utiliza el modelo numérico MSP. Se pretende disponer de un método que tenga en cuenta la refracción-difracción, por eso se hace uso de este modelo numérico, pero, al mismo tiempo, debe ser lo suficientemente rápido como para que se pueda incorporar dentro de un modelo de evolución de largo plazo.

De la comparación realizada entre el modelo MSP y los diferentes métodos simplificados pertenecientes a los modelos de evolución de largo plazo (véase capítulo 6), se pudo concluir que en la zona iluminada existe ya una modificación del ángulo del oleaje incidente. Por lo que, a efectos del ángulo, no se debe diferenciar entre zona de sombra y zona iluminada. El método propuesto no considera esta distinción. Por otra parte, aunque el método de Dabees (2000) sigue esta idea, con su aproximación del arco circular no se obtienen valores adecuados para el ángulo del oleaje en rotura.

Por consiguiente, sin necesidad de considerar las aproximaciones que utilizan otros modelos para estimar el ángulo de salida del oleaje desde el morro de la estructura, y siguiendo la idea de Dabees (2000) de que no existe una fuente única localizada en el morro del dique exento, sino que existe una serie de fuentes ubicadas en una zona transicional a partir de las que se radian las olas hacia la costa, se pretende determinar estos ángulos de salida con base en una serie de propagaciones utilizando el modelo numérico MSP.

7.4.1. DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS UTILIZADOS

En este apartado se van a describir los casos analizados y propagados con el modelo numérico MSP. En todos los casos estudiados se propagó con batimetrías rectas y paralelas, cuyas profundidades seguían un perfil de Dean. Sin embargo, con la idea de estudiar la influencia de la batimetría, se utilizaron diferentes parámetros de forma del perfil de equilibrio de Dean (A_d). La ecuación (3.32) representa el perfil

de equilibrio de Dean (con y la distancia medida en sentido perpendicular a la costa y h la profundidad del perfil).

$$h = A_d y^{\frac{2}{3}} \quad (3.32)$$

En todos los casos analizados se estudió un dique exento emergido e impermeable con una longitud de mil quinientos metros, a efectos de que el dique pudiera ser considerado como semi-infinito.

En cuanto al oleaje incidente, alcanzaba el morro del dique exento con un ángulo normal a éste. Nótese que en la mayoría de las situaciones reales, el oleaje alcanza el morro de las estructuras con incidencia normal o casi normal. Sin embargo, se ha comprobado que la formulación derivada es igualmente aplicable para el caso de incidencia oblicua, pues en realidad el ángulo determinado corresponde a la variación del mismo con respecto al ángulo con el que el oleaje alcanza el morro del dique.

Aunque posteriormente para el cálculo de la altura de ola se utilizará el modelo Oluca-SP (oleaje espectral), a efectos de obtener el ángulo, todos los casos analizados han sido propagados con el modelo Oluca-MC (oleaje monocromático).

Las disposiciones estudiadas de diques exentos se pueden dividir en cuatro configuraciones: configuración 1, configuración 2, configuración 3 y configuración 4. Estas configuraciones se diferencian por la pendiente del perfil de equilibrio de Dean asumido para la batimetría, esto es, por el parámetro de forma de este perfil y por la distancia del morro del dique a la playa, que es equivalente a la profundidad en el morro del dique. Con cada una de estas configuraciones se analizaron diferentes condiciones de oleaje: alturas de ola en el morro y períodos de oleajes incidente. Todas estas características se describen en las siguientes tablas.

En la tabla 3.1 se presenta una descripción de las características que diferencian cada una de las configuraciones estudiadas con el modelo numérico de propagación de oleaje MSP.

Las características del oleaje incidente en el morro (alturas de ola y períodos del oleaje), así como las claves del caso, se presentan en las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5, para las configuraciones 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

DESCRIPCIÓN	A_d <i>(Parámetro de forma de Dean, $m^{1/3}$)</i>	h_p <i>(Profundidad en el morro del dique, m)</i>	Dis <i>(Distancia del morro del dique a la costa, m)</i>
Configuración 1	0.1	5	354
Configuración 2	0.2	5	125
Configuración 3	0.2	10	354
Configuración 4	0.2	8	253

Tabla 3.1- Configuraciones de dique exento estudiadas con el modelo numérico MSP

CONFIGURACIÓN 1	H_{morro} <i>(Altura de ola en el morro, m)</i>	T <i>(Período del oleaje, s)</i>	CLAVE
Caso 1	1	4	A101
Caso 2	1	8	A102
Caso 3	1	12	A103
Caso 4	3	4	A104
Caso 5	3	8	A105
Caso 6	3	12	A106

Tabla 3.2- Características de los casos analizados con el modelo numérico MSP para la configuración 1 de dique exento

CONFIGURACIÓN 2	H_{morro} <i>(Altura de ola en el morro, m)</i>	T <i>(Período del oleaje, s)</i>	CLAVE
Caso 1	1	4	A201
Caso 2	1	8	A202
Caso 3	1	12	A203
Caso 4	3	4	A204
Caso 5	3	8	A205
Caso 6	3	12	A206

Tabla 3.3- Características de los casos analizados con el modelo numérico MSP para la configuración 2 de dique exento

CONFIGURACIÓN 3	H_{morro} <i>(Altura de ola en el morro, m)</i>	T <i>(Período del oleaje, s)</i>	CLAVE
Caso 1	1	4	C301
Caso 2	1	8	C302
Caso 3	1	12	C303
Caso 4	3	4	C304
Caso 5	3	8	C305
Caso 6	3	12	C306
Caso 7	6	4	C307
Caso 8	6	8	C308
Caso 9	6	12	C309

Tabla 3.4- Características de los casos analizados con el modelo numérico MSP para la configuración 3 de dique exento

CONFIGURACIÓN 4	H_{morro} (Altura de ola en el morro, m)	T (Período del oleaje, s)	CLAVE
Caso 1	1	4	C501
Caso 2	1	8	C502
Caso 3	1	12	C503
Caso 4	3	4	C504
Caso 5	3	8	C505
Caso 6	3	12	C506
Caso 7	5	4	C507
Caso 8	5	8	C508
Caso 9	5	12	C509

Tabla 3.5- Características de los casos analizados con el modelo numérico MSP para la configuración 4 de dique exento

7.4.2. FORMULACIÓN

Para cada uno de los casos presentados en las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se determinaron las características del oleaje en rotura. Con este objetivo, previamente se estableció un criterio de rotura; en concreto se empleó la expresión (3.22) con $\gamma_b=0.78$.

El objetivo presente es la propuesta de una expresión para obtener el ángulo de salida del oleaje de una profundidad igual a la profundidad en el morro de la estructura difractante. Dicho ángulo se va a denotar en lo sucesivo como α_{sal} . Adicionalmente, se debe considerar que el método propuesto va a ser empleado dentro de un modelo de evolución aplicable hasta el largo plazo, en el que se realiza una propagación con batimetría recta y paralela a la línea de costa siguiendo la ley de Snell. Así pues, con tal objetivo se utilizan las características del oleaje en rotura obtenidas mediante el modelo numérico MSP para todos los casos presentados en las tablas 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5, realizando una propagación inversa de los ángulos del

oleaje en rotura (aplicando Snell) hasta una profundidad igual a la profundidad en el morro del dique y determinándose este ángulo α_{sal} .

Como resultado, se establece que el ángulo de salida del oleaje de una profundidad igual a la profundidad en el morro del dique exento α_{sal} , se descompone en el ángulo del oleaje incidente en el morro α_{morro} y un ángulo denotado como I_{ang} , el cual puede ser un incremento o un decremento con respecto al anterior, en función del morro del dique exento que se está analizando. La ecuación (3.33) representa esta descomposición, en la que el signo positivo se aplica en el caso del morro 1 y el signo negativo en el morro 2 (véase figura 3.24 para la identificación de los morros).

$$\alpha_{sal} = \alpha_{morro} \pm I_{ang} \quad (3.33)$$

Una vez analizados todos los casos propagados con el modelo numérico MSP, se trató de encontrar una expresión para determinar el valor del ángulo I_{ang} . Después de un análisis exhaustivo del problema, se pudieron encontrar las variables de las que depende este ángulo, las cuales aparecen representadas en la figura 3.24. Recuérdese que en la mayoría de las situaciones reales, el oleaje alcanza el morro del dique exento con incidencia normal o casi normal, que equivale a un ángulo α_{morro} con valor nulo. Sin embargo, como la formulación propuesta corresponde al valor del ángulo I_{ang} , el cual indica la variación del ángulo α_{sal} con respecto al ángulo de incidencia del oleaje en el morro (α_{morro}), esta formulación derivada es igualmente aplicable para el caso de incidencia oblicua.

En esencia, las variables de las que depende el ángulo I_{ang} son: el ángulo θ_{ref} , que es el ángulo que forma la línea recta entre el morro del dique y el punto considerado (punto i en la figura 3.24) con respecto a la línea del ángulo α_{min} ; la distancia d_{dp} entre el punto G y el punto C y la distancia d entre el punto G y el punto considerado i . Como se observa en la figura 3.24, el punto C representa la intersección de la línea de rotura en la zona no afectada por el dique exento con la línea del ángulo α_{min} , mientras que el punto G representa la proyección del punto C

sobre el frente del oleaje en el morro del dique exento. El punto G delimita una zona que es asimilable a la zona transicional del modelo de Dabees (2000) indicada en el anterior capítulo.

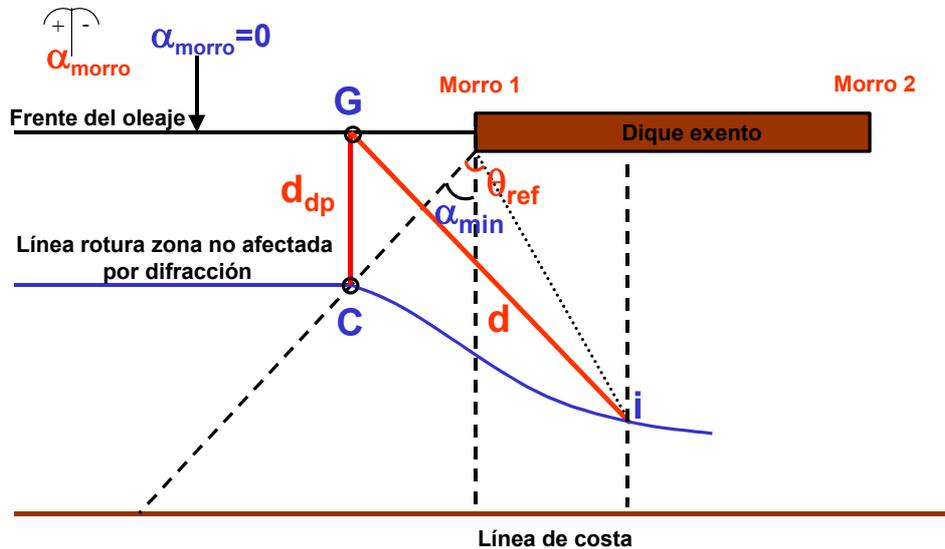


Figura 3.24- Representación esquemática de las variables de las que depende el ángulo del oleaje en el área sometida a la influencia del dique exento

En la figura 3.25 se presentan los valores obtenidos a partir del modelo numérico MSP para el ángulo I_{ang} frente al ángulo θ_{ref} . El tamaño de los puntos representa el valor del cociente d/d_{dp} que tiene asociado cada uno de ellos. Con el objetivo de una mayor claridad de la figura, también se indican con números los valores del cociente d/d_{dp} . En esta figura se puede observar que existe una relación de tipo parabólica entre el ángulo I_{ang} y el ángulo θ_{ref} , la cual es variable en función del valor del cociente d/d_{dp} .

Así pues, las expresiones obtenidas para estimar el valor del ángulo I_{ang} son de tipo parabólico, siendo función del ángulo θ_{ref} y del valor del cociente d/d_{dp} , como se puede observar en la figura 3.25. La expresión (3.34) indica esta dependencia.

$$I_{ang} = f\left(\theta_{ref}, \frac{d}{d_{dp}}\right) \quad (3.34)$$

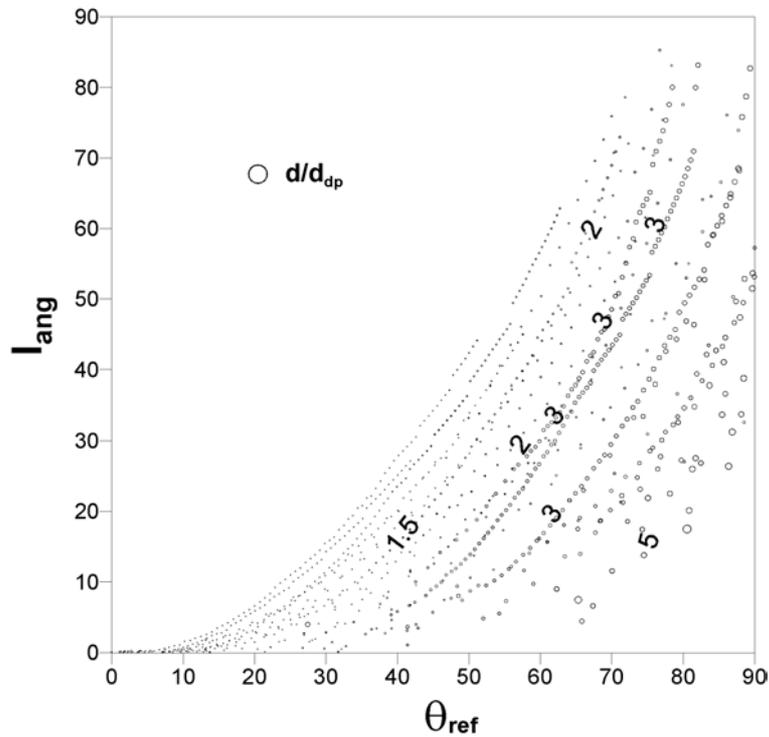


Figura 3.25- Dependencia entre el ángulo I_{ang} y el ángulo θ_{ref} para diferentes valores del cociente d/d_{dp}

Existe un ángulo límite θ_{lim} , para el que para valores inferiores del ángulo θ_{ref} (en valor absoluto y expresado en grados), el valor del ángulo I_{ang} es nulo. El valor del ángulo θ_{lim} depende del cociente d/d_{dp} y su valor en grados queda expresado en la ecuación (3.35).

$$\theta_{lim} = \sqrt{\frac{20.53 \left(\frac{d}{d_{dp}} - 1 \right)}{0.018}} \quad (3.35)$$

Por consiguiente, en función de la comparación del ángulo θ_{ref} con respecto al ángulo límite θ_{lim} , se calcula de distinta forma el ángulo I_{ang} , como se indica en la ecuación (3.36). Nótese que en esta ecuación el parámetro P_C (punto de corte de la parábola) representa la parte del ángulo I_{ang} que no está relacionada con el ángulo θ_{ref} , sino que está asociada al cociente d/d_{dp} , como posteriormente quedará indicado. Asimismo, el parámetro P_C indica el valor del ángulo θ_{ref} que corresponde a un valor nulo del ángulo I_{ang} , lo que es equivalente a un ángulo de salida a una profundidad igual a la del morro del dique exento idéntico al ángulo con el que el oleaje alcanza el morro. Por consiguiente, corresponde a una situación en la que el ángulo de salida no experimenta modificación.

$$\begin{aligned} |\theta_{ref}| \geq \theta_{lim} &\Rightarrow I_{ang} = 0.018 \theta_{ref}^2 - P_C \\ |\theta_{ref}| < \theta_{lim} &\Rightarrow I_{ang} = 0 \end{aligned} \quad (3.36)$$

Para determinar el valor P_C (punto de corte de la parábola) de la ecuación (3.36), se utiliza la expresión (3.37). La relación indicada en la expresión (3.37) aparece representada en la figura 3.26.

$$\begin{aligned} \frac{d}{d_{dp}} > 1 &\Rightarrow P_C = 20.53 \left(\frac{d}{d_{dp}} - 1 \right) \\ \frac{d}{d_{dp}} \leq 1 &\Rightarrow P_C = 0 \end{aligned} \quad (3.37)$$

Como resultado, se recalca que para determinar el ángulo I_{ang} , sólo es necesario definir el ángulo θ_{ref} y el cociente d/d_{dp} . Conocidos estos valores, se utilizará la expresión (3.36) para determinar el ángulo I_{ang} . En la expresión (3.36)

aparece el ángulo θ_{lim} , el cual se calculará con la ecuación (3.35), así como el parámetro P_C , que se obtendrá con la expresión (3.37).

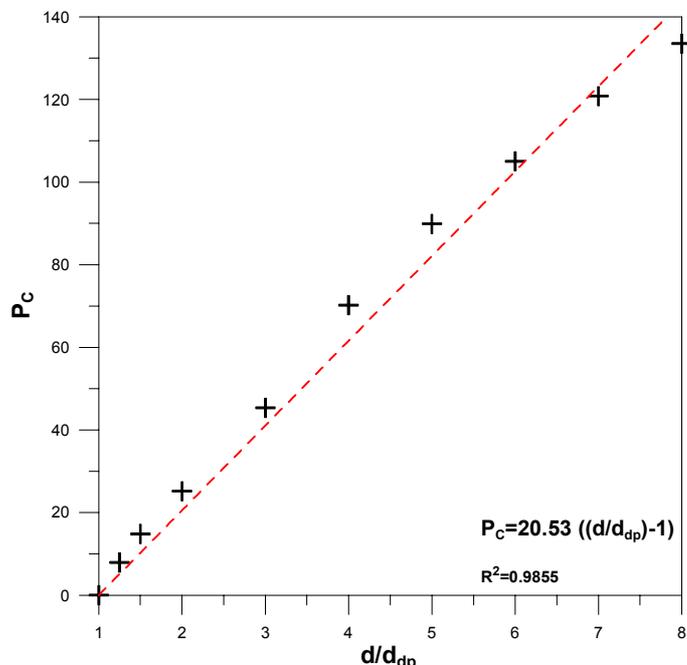


Figura 3.26- Dependencia entre el parámetro P_C (punto de corte de la parábola) y el cociente d/d_{dp}

El ajuste propuesto para el ángulo I_{ang} queda representado gráficamente en la figura 3.27. Con la intención de realizar un análisis comparativo entre la formulación propuesta y los valores determinados con el modelo numérico MSP, en la figura 3.27 también se presentan estos últimos valores, los cuales ya habían sido mostrados en la figura 3.25. Los puntos corresponden a los valores determinados con el modelo numérico MSP, siendo su tamaño proporcional al valor del cociente d/d_{dp} (también se indican los valores del cociente d/d_{dp} con números) y las parábolas corresponden a los valores obtenidos con la formulación propuesta.

Finalmente, el ángulo de salida del oleaje de una profundidad igual a la profundidad en el morro del dique exento (α_{sal}) se determinará mediante la ecuación (3.33).

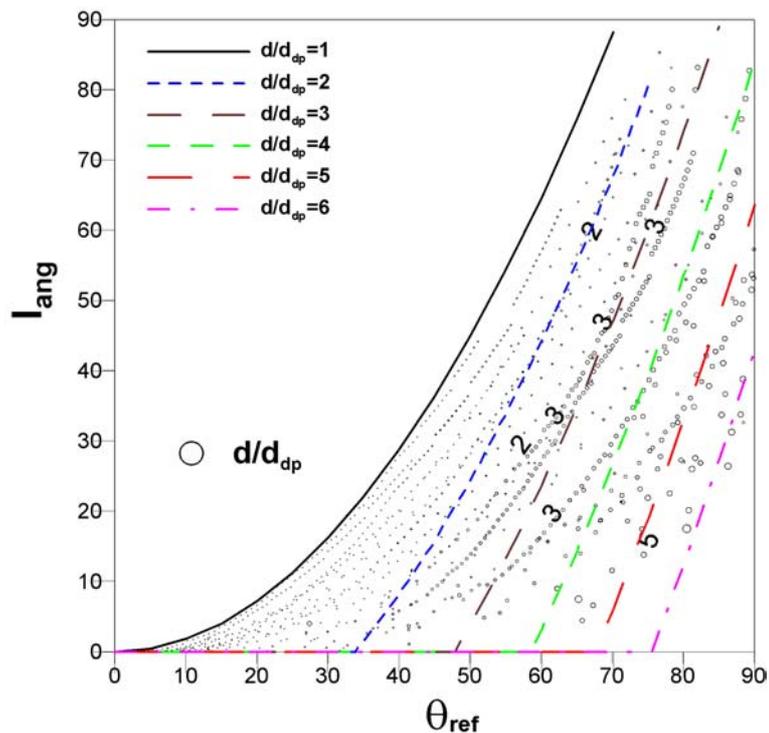


Figura 3.27- Comparación de la relación propuesta entre el ángulo I_{ang} y el ángulo θ_{ref} para diferentes valores del cociente d/d_{dp} frente a los valores determinados numéricamente

7.5. COEFICIENTE DE DIFRACCIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE OLA

Como ya se comentó en el anterior capítulo, las diferencias observadas en altura de ola tienen dos componentes claramente identificables; por una parte está el hecho de la incorrecta determinación de la zona de refracción-difracción, y por otra parte están las diferencias en magnitud de la altura de ola. El primer problema se resuelve teniendo en cuenta lo comentado en el apartado 7.3. sobre la definición de la zona de refracción-difracción. Sin embargo, para resolver el segundo se requiere una modificación del método de cálculo del coeficiente de difracción. Este último además debe incorporar la formulación para determinar la zona de influencia de un dique exento (González y Medina, 2001).

En este contexto se desarrolla una formulación que recoge todas las ideas comentadas en el párrafo anterior. Tiene como base la simplificación de Goda et al. (1978) y la aproximación de Kraus (1984) descritas en el capítulo 6. Sin embargo,

con la formulación que se va a proponer, se van a eliminar todas las limitaciones detectadas en los métodos anteriores y que fueron indicadas en el anterior capítulo.

7.5.1. FORMULACIÓN

La expresión que se propone para obtener el coeficiente de difracción se presenta en la ecuación (3.38). Como se puede observar, esta ecuación es similar a la planteada por Goda et al. (1978) y Kraus (1984), (véase ecuaciones 3.17 y 3.18 del anterior capítulo). Sin embargo, en la ecuación (3.38) aparece un parámetro nuevo, el parámetro α . La determinación de este último se analizará en el siguiente apartado; pero en esencia es el parámetro que permite tener en cuenta el tipo de oleaje. Por consiguiente, con este parámetro se puede extender el método de cálculo de la difracción al caso de oleajes de banda estrecha.

$$K_d(\theta_D) = \sqrt{\left(\frac{P_E(\theta_D)}{100}\right)^\alpha} \quad (3.38)$$

Aunque el apartado 7.5.2. se dedicará a la determinación del parámetro α , en este apartado se adelanta la fórmula obtenida con este fin, presentándose en la ecuación (3.39). Mediante la expresión (3.39) el parámetro α es función directa del parámetro σ . Este último parámetro indica el grado de dispersión direccional del espectro del oleaje o ancho de la dispersión direccional.

$$\alpha = -0.423 \ln(\sigma) + 2.68 \quad (3.39)$$

En cuanto al término P_E de la ecuación (3.38), se determina con la ecuación (3.40). Nótese que esta expresión es similar a la ecuación (3.19) propuesta por Kraus

(1984) e indicada en el anterior capítulo. Sin embargo, en el caso presente no se utilizan las expresiones aproximadas (3.20) y (3.21) derivadas por el anterior investigador (véase capítulo 6), sino que se utiliza solamente la ecuación (3.40). En esta última ecuación aparece un parámetro nuevo, el parámetro γ . En el apartado 7.5.3. se estudiará este parámetro, adelantándose que es el elemento que controla la definición de la zona de refracción-difracción.

$$P_E(\theta_D) = 50(\tanh(\gamma\theta_D) + 1)(\%) \quad (\theta_D \text{ en radianes}) \quad (3.40)$$

7.5.2. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO α

El parámetro presente es el responsable de la capacidad del método propuesto de obtener el coeficiente de difracción para diferentes tipos de oleaje, desde oleajes de banda ancha hasta oleajes de banda estrecha.

Con la intención de determinar la influencia de las características del espectro del oleaje sobre el parámetro α , se estudió una serie de casos con el modelo Oluca-SP (oleaje espectral). Este modelo utiliza un espectro TMA (véase anejo II), aplicable en zonas cercanas a la costa donde las profundidades son relativamente poco profundas y el oleaje se encuentra afectado por el fondo. Se define a partir de un espectro JONSWAP, el cual es modificado por una función adimensional de la profundidad (véase Hughes, 1984). El espectro frecuencial queda caracterizado con un parámetro que define la anchura del espectro, esto es, la dispersión frecuencial γ_f , (véase GIOC, 2001b, en esta referencia el parámetro γ_f se denota con el símbolo γ). Este parámetro adopta un valor aproximado de 10 para oleajes de banda estrecha, tipo “*swell*” y de 2-4 para oleajes de banda ancha, tipo “*sea*”. En cuanto a la función de dispersión direccional, en el modelo Oluca-SP se utiliza la expresión propuesta por Borgman (1984), en la que el grado de dispersión direccional se expresa con el parámetro σ , el cual determina el ancho de la dispersión direccional (véase GIOC, 2001b, en esta referencia el parámetro σ se expresa con el símbolo σ_m).

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se estudió una serie de casos con el modelo Oluca-SP, en los cuales se consideró una batimetría de profundidad constante (en concreto la profundidad elegida fue de 5 metros) en la que se ubicó un dique exento emergido e impermeable con una longitud de mil quinientos metros, a efectos de que el dique pudiera ser considerado como semi-infinito. El oleaje incidente en el morro quedó caracterizado con una altura de ola significativa de 1 metro y una dirección media del oleaje de 0 grados (incidencia normal al morro del dique exento). Este oleaje fue estudiado para diferentes períodos de pico T_p y se analizaron diferentes valores del parámetro de dispersión frecuencial γ y de dispersión direccional σ . Todas estas características que diferencian cada uno de los casos estudiados quedan indicadas en la tabla 3.6.

Del análisis de los casos anteriores se pudo concluir que el período de pico es menos influyente en la estimación del parámetro α . Asimismo, la dispersión frecuencial es irrelevante en la determinación de este parámetro. Sin embargo, la dispersión direccional posee gran importancia, quedando directamente relacionado el valor del parámetro en cuestión con esta dispersión, mediante la ecuación (3.39). Esta relación queda gráficamente representada en la figura 3.28.

De la ecuación (3.39) se puede inferir que para oleajes de banda estrecha (tipo “*swell*”) el parámetro α adopta el valor de 2 y este último parámetro se va gradualmente reduciendo al mismo tiempo que el parámetro de dispersión direccional aumenta. Así pues, la expresión (3.39) propuesta, como se puede observar en la figura 3.28, tiende hacia un valor de α igual a la unidad, que es el valor que propusieron Goda et al. (1978) para oleajes de banda ancha (tipo “*sea*”), como quedó indicado en el capítulo 6. De esta forma, queda acotado el rango de variación del parámetro α entre 1 y 2, correspondiendo estos valores con los valores del parámetro de dispersión direccional σ de 53 a 5 grados, respectivamente.

CASOS	TIPO OLAJE	$T_P(s)$	DISPERSIÓN FRECUENCIAL γ_f	DISPERSIÓN DIRECCIONAL $\sigma(^{\circ})$
1	<i>Sea</i>	4	3.3	5
2	<i>Sea</i>	4	3.3	10
3	<i>Sea</i>	4	3.3	15
4	<i>Sea</i>	4	3.3	20
5	<i>Sea</i>	4	3.3	25
6	<i>Sea</i>	4	3.3	30
7	<i>Swell</i>	4	10	5
8	<i>Swell</i>	4	10	10
9	<i>Swell</i>	4	10	15
10	<i>Swell</i>	4	10	20
11	<i>Swell</i>	4	10	25
12	<i>Swell</i>	4	10	30
13	<i>Sea</i>	8	3.3	5
14	<i>Sea</i>	8	3.3	10
15	<i>Sea</i>	8	3.3	15
16	<i>Sea</i>	8	3.3	20
17	<i>Sea</i>	8	3.3	25
18	<i>Sea</i>	8	3.3	30
19	<i>Swell</i>	8	10	5
20	<i>Swell</i>	8	10	10
21	<i>Swell</i>	8	10	15
22	<i>Swell</i>	8	10	20
23	<i>Swell</i>	8	10	25
24	<i>Swell</i>	8	10	30

Tabla 3.6- Características de los casos analizados con el modelo Oluca-SP (oleaje espectral)

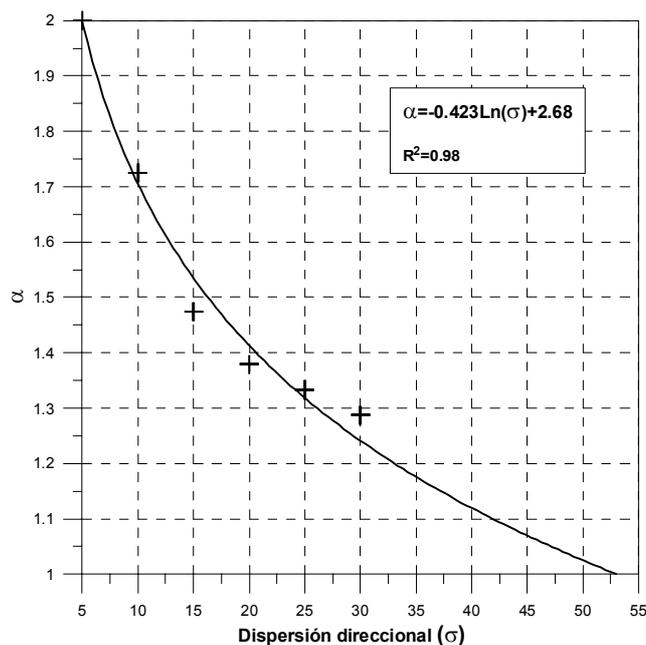


Figura 3.28- Dependencia entre el parámetro α y el parámetro de dispersión direccional del oleaje σ

Asimismo, el parámetro α es el que controla el valor del coeficiente de difracción en la línea del rayo del oleaje incidente en el morro, esto es, en θ_D igual a cero (en la línea que tradicionalmente ha sido considerada la separación entre zona de sombra y zona iluminada). Con el objetivo de que se pueda visualizar la influencia de este parámetro, se presenta en la figura 3.29 la variación longitudinal de la altura de ola en rotura H_b adimensionalizada con la correspondiente altura de ola en rotura en la zona no afectada por el dique exento $H_{b\ ref}$, para un caso de configuración de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa (en concreto es el caso A202 indicado en la tabla 3.3, véase también la tabla 3.1 para conocer la configuración de este caso). En esta figura se muestran los resultados obtenidos para dos opciones de los parámetros; ambos casos tienen el mismo valor del parámetro γ ($\gamma=2.23$) y dos parámetros de dispersión direccional definidos por dos valores diferentes del parámetro objeto de interés ($\alpha=1$ y $\alpha=1.6$). De nuevo se puede verificar que una disminución del parámetro α consigue un coeficiente de difracción más elevado. Recuérdese (véase Goda et al., 1978 o bien el anterior capítulo) que los coeficientes de difracción en el caso de oleajes de banda ancha (tipo “sea”) son

mayores que los mismos coeficientes en el caso de oleajes de banda estrecha (tipo “swell”).

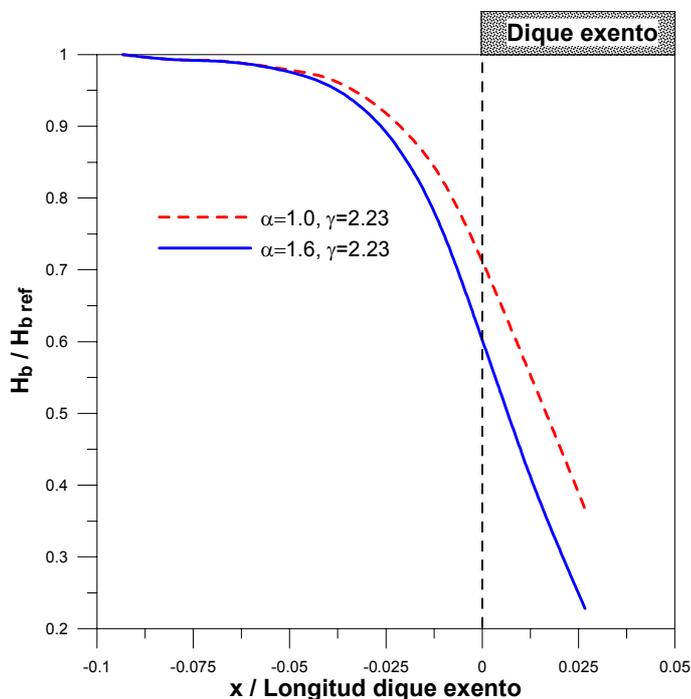


Figura 3.29- Influencia del parámetro α en la determinación de las características del oleaje en rotura

7.5.3. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO γ

Este parámetro es el encargado de incorporar la formulación para definir la zona de refracción-difracción (González y Medina, 2001) en el método propuesto para el cálculo del coeficiente de difracción. Con este objetivo, el parámetro γ se determina imponiendo la condición de que el coeficiente de difracción adopte el valor de 1 en el ángulo α_{min} , el cual es estimado con la formulación de González y Medina (2001). Así pues, para cada caso en concreto, el parámetro γ se obtendrá con la ecuación (3.41).

$$K_d(\theta_D = \alpha_{min} \text{ en radianes}) = 1 \quad (3.41)$$

Es relevante tener en consideración el hecho de que mediante este parámetro se está introduciendo la influencia del período del oleaje en el método de cálculo del coeficiente de difracción a través del ángulo α_{min} .

Con el objetivo de que se pueda visualizar la influencia del parámetro γ , se presenta en la figura 3.30 la variación longitudinal de la altura de ola en rotura H_b adimensionalizada con la correspondiente altura de ola en rotura en la zona no afectada por el dique exento $H_{b\ ref}$, para un caso de configuración de dique exento, características de oleaje incidente y pendiente de la playa (en concreto es el caso A202 indicado en la tabla 3.3, véase también la tabla 3.1 para conocer la configuración de este caso). En esta figura se muestran los resultados obtenidos para dos opciones de los parámetros; ambos casos tienen el mismo parámetro α ($\alpha=1$) y dos valores diferentes del parámetro objeto de interés ($\gamma=2.23$ y $\gamma=4.46$).

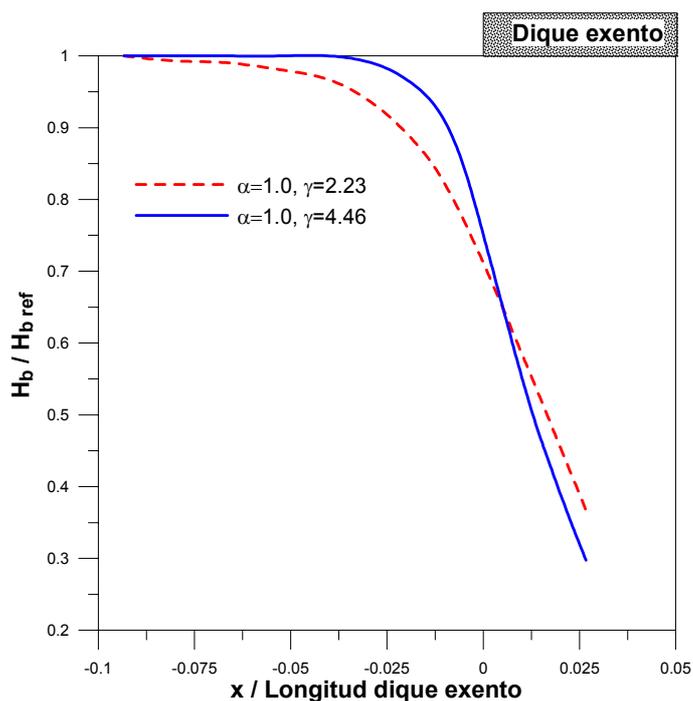


Figura 3.30- Influencia del parámetro γ en la determinación de las características del oleaje en rotura

De la observación de la figura 3.30, se puede corroborar que el parámetro γ delimita la zona de refracción-difracción y, por lo tanto, especifica la zona a partir de

la cual la estructura comienza a influir en la determinación de las características del oleaje en rotura. Nótese que el parámetro γ sigue la tendencia contraria al ángulo α_{min} , lo cual se deduce de la ecuación (3.41). Cuanto mayor sea la zona de influencia del dique exento, esto es, cuanto mayor sea el ángulo α_{min} , menor será el valor adoptado por el parámetro γ .

7.6. METODOLOGÍA PROPUESTA

Una vez descrito el método de cálculo de cada uno de los elementos necesarios para la determinación de las características del oleaje en zonas de refracción-difracción, en este apartado se detallará la metodología a seguir dentro del modelo de evolución propuesto para determinar las anteriores magnitudes.

La metodología que se propone está compuesta de las siguientes etapas (véase la figura 3.31, en la que queda gráficamente identificada cada una de las etapas):

1. Determinación de la zona de refracción-difracción, para lo cual se utiliza la expresión propuesta por González y Medina (2001) para estimar el ángulo α_{min} , (véase ecuación 3.31).

2. Cálculo de la rotura del oleaje fuera de la zona afectada por la estructura.

3. Obtención de la intersección entre el ángulo α_{min} y la línea que define la rotura del oleaje fuera de la zona de influencia del dique exento, determinándose el punto C , como se observa en la figura 3.31. Posteriormente se calcula el punto G , como resultado de la proyección del punto C sobre el frente del oleaje en el morro del dique exento.

4. Para cada celda de cálculo i se utiliza un proceso iterativo para la determinación de la posición de rotura, de la altura de ola en rotura, así como del ángulo del oleaje en rotura.

El ángulo del oleaje se definirá siguiendo lo comentado en el apartado 7.4. En concreto, el ángulo con el que el oleaje parte de una profundidad igual a la del morro

de la estructura se obtiene con las ecuaciones (3.33), (3.35), (3.36) y (3.37) detalladamente descritas en el mencionado apartado.

En cuanto a la altura de ola, se calculará afectando a la altura de ola incidente por el coeficiente de asomeramiento, de refracción y de difracción. De estos tres coeficientes, el novedoso es el último, pues se propone un método nuevo para determinar el coeficiente de difracción, el cual tiene su base en las expresiones planteadas por Goda et al. (1978) y Kraus (1984) especificadas en el capítulo 6. El método de obtención del coeficiente de difracción quedó detalladamente indicado en el apartado 7.5., utilizándose con tal fin las ecuaciones (3.38), (3.39), (3.40) y (3.41).

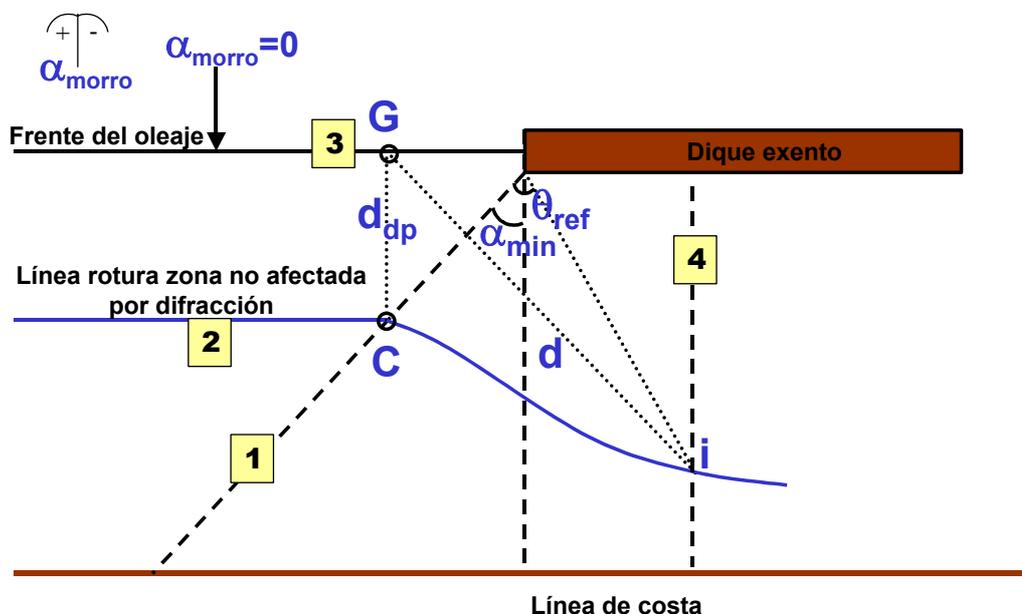


Figura 3.31- Etapas de la metodología propuesta para la determinación de las características del oleaje en rotura en las zonas de refracción-difracción

Finalmente, el oleaje es refractado, asomerado y difractado, comenzando en la profundidad en el morro del dique exento con el ángulo α_{sal} (véase ecuación 3.33) y teniendo en cuenta la ley de Snell para batimetría recta y paralela en el cálculo del coeficiente de refracción, la conservación de energía para la obtención del coeficiente de asomeramiento y el método propuesto en esta Tesis para la

determinación del coeficiente de difracción. Este proceso se repite iterativamente hasta que se alcance la rotura. La rotura se definirá con el criterio de rotura elegido, pudiéndose emplear el criterio propuesto en la ecuación (3.22) del anterior capítulo.

7.7. RESULTADOS

La metodología propuesta ha sido aplicada a diferentes configuraciones de diques exentos, comparándose los resultados obtenidos con la misma frente a los determinados con los principales modelos de evolución de playas de largo plazo que fueron descritos en el capítulo 6 (GENESIS, LITLINE y ONELINE). Asimismo, se ha realizado una comparación con las características del oleaje en rotura establecidas con el modelo numérico de propagación de oleaje MSP. Con carácter ilustrativo se presentan algunos ejemplos.

En la figura 3.32 se presenta la variación longitudinal de la altura de ola en rotura H_b adimensionalizada con la correspondiente altura de ola en rotura en la zona no afectada por el dique exento $H_{b\ ref}$ (véase parte izquierda de la figura), así como la variación longitudinal del ángulo del oleaje en rotura θ_b (véase parte derecha de la figura) para el caso A102 de la tabla 3.2. Por otra parte, en la figura 3.33 se muestran las mismas magnitudes para el caso C305 de la tabla 3.4. En ambas figuras se puede visualizar una adecuada predicción de las características del oleaje en rotura con el modelo propuesto, no sólo en cuanto a la altura de ola en rotura, sino también y especialmente en la determinación de la zona de refracción-difracción y del ángulo del oleaje en rotura. Así pues, las ventajas del método propuesto son claramente identificables.

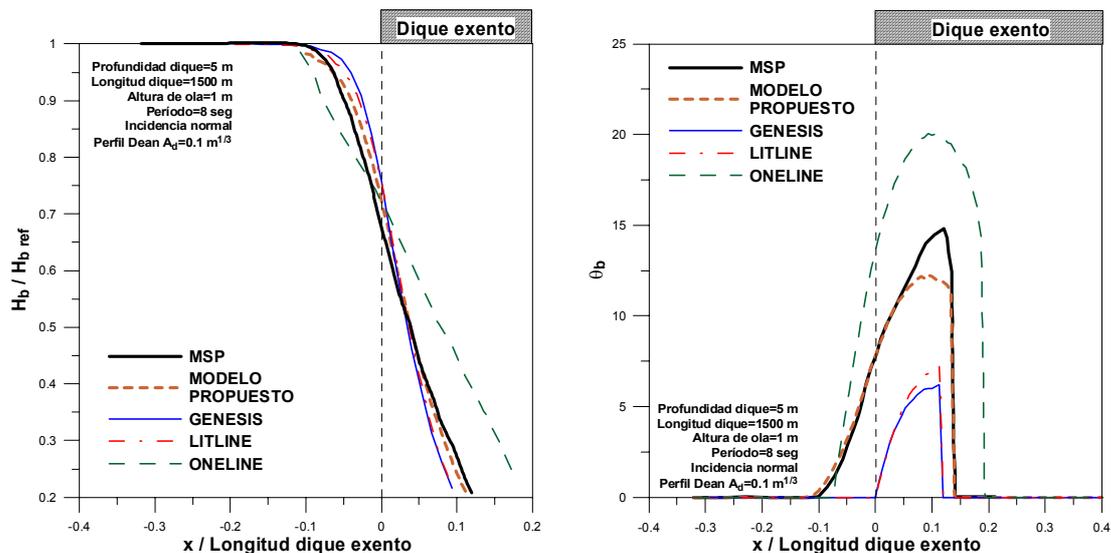


Figura 3.32- Características del oleaje en rotura determinadas con los modelos MSP, GENESIS, LITLINE, ONELINE y con el modelo propuesto (caso A102 de la tabla 3.2)

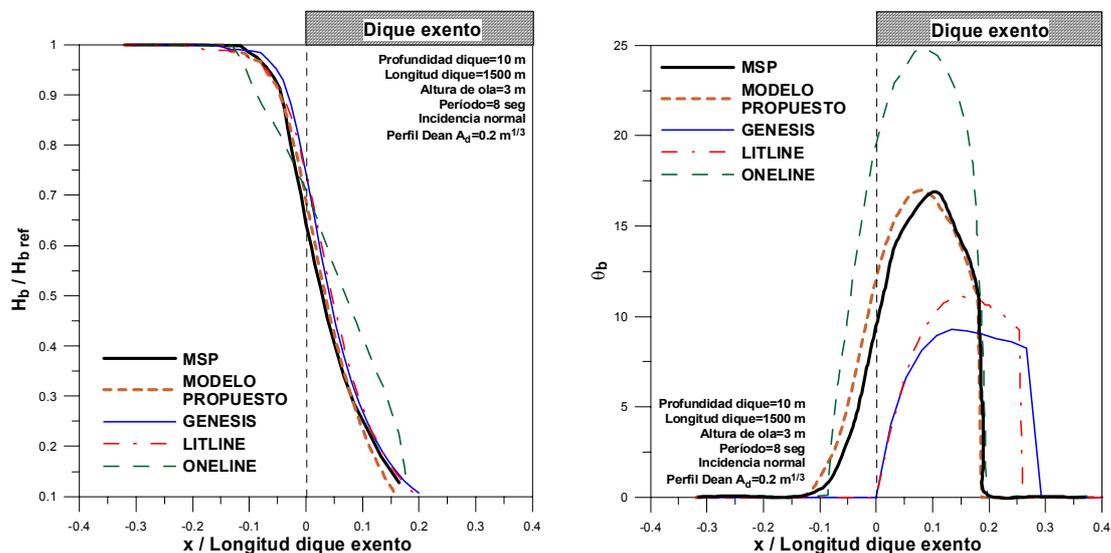


Figura 3.33- Características del oleaje en rotura determinadas con los modelos MSP, GENESIS, LITLINE, ONELINE y con el modelo propuesto (caso C305 de la tabla 3.4)

7.8. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha desarrollado una formulación y procedimiento para la determinación de las características del oleaje en rotura en zonas de refracción-difracción y para ser incluido dentro de un modelo de evolución de playas aplicable hasta el largo plazo. Dicho método posee los siguientes aportes principales:

- ❖ La incorporación de los procesos de refracción-difracción conjuntamente, a diferencia de los modelos GENESIS y LITLINE.
- ❖ La verificación de dicho método con base en los modelos de propagación de oleaje Oluca-MC (oleaje monocromático) y Oluca-SP (oleaje espectral) del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, los cuales han sido validados con datos de campo y de laboratorio.
- ❖ La incorporación de una definición adecuada de la zona de refracción-difracción mediante el ángulo α_{min} propuesto por González y Medina (2001), incluyéndose de esta forma la influencia del período del oleaje en la definición de la zona analizada.
- ❖ La inclusión de la modificación experimentada por el ángulo del oleaje en la zona iluminada, no estableciéndose diferenciación, a efectos del ángulo, entre la zona de sombra y la zona iluminada, como ya había sido observado por Dabees (2000).
- ❖ La incorporación de una zona transicional en la que existe una serie de fuentes a partir de las que se radian las olas hacia la costa, lo cual ya había sido comprobado por Dabees (2000).
- ❖ La eliminación de todas las limitaciones detectadas en la simplificación de Goda et al. (1978) y la aproximación de Kraus (1984) para la determinación del coeficiente de difracción en las zonas de refracción-difracción, destacándose los siguientes elementos:

- Se extiende el rango de aplicación de estos métodos desarrollados para oleajes de banda ancha (tipo “*sea*”) a oleajes de banda estrecha (tipo “*swell*”), mediante la introducción del parámetro α .

- Se incorpora la correcta definición de la zona de refracción-difracción, incluyéndose de esta forma la influencia del período del oleaje, mediante la utilización del parámetro γ .