


## SECCIÓN 4

# PERFIL DE EQUILIBRIO EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN





## RESUMEN Y CONCLUSIONES

---

Esta sección se dedica al desarrollo de la segunda 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 una formulación de perfil de equilibrio en estas zonas. Con este fin, la sección se encuentra compuesta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 8.** *Antecedentes y descripción de los datos de campo.*
- **Capítulo 9.** *Formulación de perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción.*
- **Capítulo 10.** *Calibración con datos de campo y discusión de la formulación propuesta.*
- **Capítulo 11.** *Procedimiento para la determinación del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción.*

### **CAPÍTULO 8**

En este capítulo se analiza el problema de la variabilidad espacial del perfil de playa en zonas de refracción-difracción. El estudio indicado se lleva a cabo dividido en las siguientes etapas:

- En primer lugar se realiza un breve repaso de los antecedentes en cuanto a estudios de perfil de equilibrio, prestándose especial atención a los que analizan la influencia de los fenómenos de refracción-difracción.
- Posteriormente se comprueba que la única formulación con la que se cuenta para tratar el problema planteado es la expresión de perfil de equilibrio con refracción propuesta por González et al. (1997). Sin embargo, dicha formulación no ha sido validada con suficientes datos de campo, por lo que se lleva a cabo una revisión de la misma.

## **SECCIÓN 4**

---

- Finalmente, con el anterior objetivo, se realiza una búsqueda de datos de perfiles en campo en playas del litoral español y en las zonas objeto de estudio. De la comparación con los datos de campo, se concluye que la formulación de González et al. (1997) posee una serie de limitaciones, siendo pues necesario la propuesta de una nueva formulación de perfil de equilibrio que considere ambos procesos (refracción y difracción), lo cual constituye el objetivo del resto de los capítulos de esta sección.

Como principales aportes del capítulo se destacan los siguientes:

- ❖ La determinación de que no existen formulaciones de perfil de equilibrio que tengan en consideración de forma acertada la variabilidad espacial del perfil de playa en zonas de refracción-difracción.

- ❖ La comprobación, mediante la utilización de datos de campo, de que la formulación de perfil de equilibrio con refracción propuesta por González et al. (1997) no es adecuada en zonas de refracción-difracción, subestimando el parámetro de forma del perfil en las zonas objeto de interés.

- ❖ El establecimiento de la necesidad del desarrollo de una nueva formulación de perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción.

### **CAPÍTULO 9**

En este capítulo se desarrolla la formulación de perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción, dividiéndose en las siguientes fases:

- En una primera fase se deriva la expresión analítica para definir el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción.

- Posteriormente se propone una expresión para la determinación del parámetro de forma asociado a la zona de refracción-difracción  $A_{ref-dif}$  presente en la formulación propuesta. Con este fin, se sigue en un principio la vía analítica y se avanza hasta un punto en el que, debido a las simplificaciones adoptadas, al requisito de incorporar unos parámetros determinados, así como a la necesidad de tener en consideración los datos de campo, es imprescindible establecer una expresión

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

---

simplificada, la cual incorpora estas consideraciones que no quedan recogidas con la derivación analítica.

- Finalmente se estudia el perfil de playa con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo, relacionándose con los parámetros de calibración de la formulación propuesta (véase figura 4.14 del capítulo 9). Como este perfil se encuentra asociado con el punto de mínima curvatura de la amplitud de onda a lo largo de la playa, se analizan las diferentes leyes de curvaturas.

Como principales aportes del capítulo se destacan los siguientes:

- ❖ La derivación de una expresión analítica para definir el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción (ecuaciones 4.42 y 4.43). Dicha expresión es similar a la obtenida por Dean (1977), pero en este caso el parámetro de forma total  $A_T$  del perfil está compuesto por un parámetro asociado al tamaño de grano  $A_d$  y un parámetro asociado a la zona de refracción-difracción  $A_{ref-dif}$ .

- ❖ La propuesta de una expresión para la determinación del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  presente en la formulación derivada (ecuación 4.59). La expresión establecida depende del ángulo  $\beta$  de delimitación de la zona de refracción-difracción, del ángulo  $\theta$  de localización del perfil y de dos parámetros de calibración ( $P_a$  y  $P_b$ ).

- ❖ El estudio del perfil de playa con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo, relacionándose dicho perfil con los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  de calibración de la formulación propuesta.

- ❖ La posible relación entre los parámetros de calibración  $P_a$  y  $P_b$  con el ángulo  $\beta$ , como resultado de las relaciones obtenidas entre el ángulo  $\beta$  y el perfil con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo.

### CAPÍTULO 10

En este capítulo se realiza la calibración de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  presentes en la formulación propuesta en el anterior capítulo para la determinación del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$ . Esta calibración se efectúa con base en los datos de

## SECCIÓN 4

---

campo de las playas del litoral español indicadas en el capítulo 8. El capítulo se divide en los siguientes apartados:

- En primer lugar se lleva a cabo la calibración para playas existentes ( $\beta$  de mejor ajuste).
- Posteriormente se realiza la calibración para diseño de playas (carácter predictivo,  $\beta=90-\alpha_{min}$ ).
- Finalmente se lleva a cabo una discusión de la formulación propuesta.

Como principales aportes del capítulo se destacan los siguientes:

❖ La calibración con datos de campo de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  presentes en la formulación propuesta para definir el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  para el caso de playas existentes, estableciéndose expresiones que relacionan los parámetros de interés (ecuaciones 4.85 y 4.88) con el ángulo  $\beta$ . Asimismo, se ha determinado una expresión (ecuación 4.86), en función de este último ángulo, para la obtención del ángulo  $\theta$  de localización del perfil con máximo valor del parámetro  $A_{ref-dif}$ .

❖ La calibración con datos de campo de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  presentes en la formulación propuesta para definir el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  para el caso de diseño de playas (playas no existentes, carácter predictivo), estableciéndose expresiones que relacionan los parámetros de interés (ecuaciones 4.89 y 4.91) con el ángulo  $\beta$ . Además, se ha determinado una expresión (ecuación 4.90), en función de este último ángulo, para la obtención del ángulo  $\theta$  de localización del perfil con máximo valor del parámetro  $A_{ref-dif}$ .

❖ La propuesta de una metodología para la utilización de la formulación obtenida en el caso de playas no desarrolladas.

❖ La comparación entre los resultados establecidos con la formulación propuesta frente a los estimados con los datos de campo, comprobándose que, tanto en tendencias, como en magnitud, la formulación propuesta reproduce adecuadamente el parámetro de forma de los perfiles de campo.

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

---

Del análisis de los resultados obtenidos se han podido observar dos tipos de comportamiento en función de si la playa posee un tamaño de grano más o menos uniforme longitudinalmente o no:

- En el primer caso el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  coincide con el cociente entre el parámetro de forma total del perfil estudiado (en un ángulo  $\theta$ ) con respecto al del perfil de comparación o exterior (en el ángulo  $\beta$ ). En la zona de refracción-difracción existe un perfil con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  y pendiente máxima, a partir del cual la pendiente comienza a decrecer, tendiendo hacia la pendiente del perfil de referencia o exterior, pero nunca puede ser menor que ésta.

- En el segundo caso, aunque el parámetro  $A_{ref-dif}$  sigue siempre la misma ley (creciente hasta el máximo y luego decreciente), la relación entre el parámetro de forma total del perfil estudiado (en un ángulo  $\theta$ ) con respecto al del perfil de comparación (en el ángulo  $\beta$ ) puede adoptar cualquier forma, dependiendo de la gradación longitudinal del sedimento, desde una tendencia idéntica a la del parámetro  $A_{ref-dif}$ , hasta una tendencia principalmente decreciente. En este último caso la pendiente del perfil de playa en la zona de refracción-difracción es menor que la del perfil exterior de comparación.

### CAPÍTULO 11

Finalmente, como resumen de la presente sección, en el capítulo 11 se detalla el procedimiento propuesto para la determinación del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción.

## SECCIÓN 4

---



## **CAPÍTULO 8**

### **ANTECEDENTES Y DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO**

---



## 8.1. INTRODUCCIÓN

Como ya ha sido indicado, uno de los objetivos específicos de la Tesis es aplicar el modelo de evolución de medio-largo plazo desarrollado en la sección 2 al caso de zonas donde los procesos de refracción-difracción son los preponderantes. Con este fin, se ha dividido el estudio en dos partes, que son: la propuesta de un método para la determinación de las características del oleaje en rotura en estas zonas y el desarrollo de una formulación de perfil de equilibrio para las mismas. La primera tarea ha sido el objetivo de la sección 3 y la segunda es de la presente sección.

El vacío existente en la actualidad en cuanto a formulaciones que tengan en consideración la variabilidad espacial del perfil de playa en zonas de refracción-difracción, tiene como consecuencia que no se dispone en el presente de modelos de evolución de playas de medio-largo plazo que contemplen este relevante fenómeno. Así pues, una limitación detectada en los modelos existentes es el hecho de asumir un perfil de equilibrio uniforme. Con la idea de explorar el fenómeno indicado, surge esta sección de la Tesis.

Como antecedente y punto de partida del problema a estudiar, se cuenta con los estudios realizados por varios investigadores (Vellinga, 1983 y Pilkey et al., 1993), en los que ya se puso de manifiesto la importancia de la variabilidad espacial del perfil de playa en las zonas objeto de interés, determinándose del estudio realizado de diferentes perfiles de playa que, adicionalmente al tamaño de grano, existían otros factores que condicionaban la forma del perfil y que eran especialmente variables en las zonas de refracción-difracción.

Siguiendo en esta línea, Bascom (1959) reconoció que, al igual que el tamaño de grano, la cantidad de energía que alcanzaba el perfil de playa era un factor relevante en la determinación del parámetro de forma del mismo. Así por ejemplo, en zonas donde los procesos de refracción-difracción son los preponderantes (diques exentos, cabos, salientes, etc.), se observó que el perfil de playa se volvía más rígido en el primer tramo, siguiendo el esquema que aparece indicado en la figura 4.1. En esta figura se muestra el cambio de forma que experimenta el perfil de playa de la

comparación entre el perfil en la zona sometida a la influencia de los fenómenos de refracción-difracción conjuntamente (PI) frente al perfil en la zona exterior (PE).

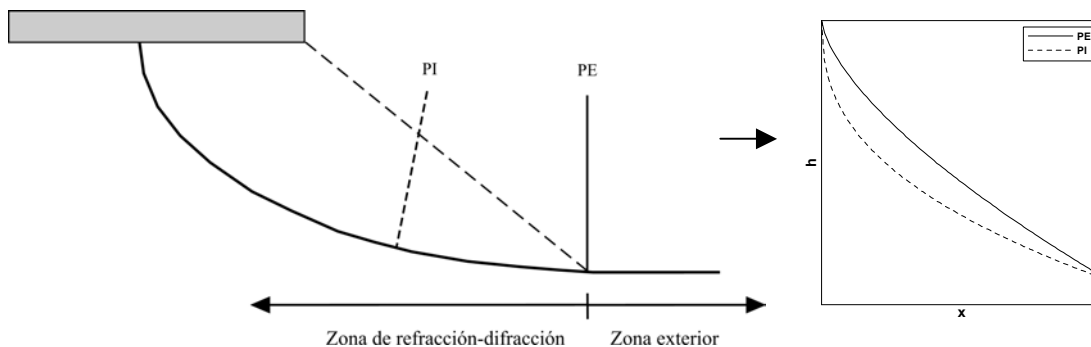


Figura 4.1- Comparación del perfil de playa en la zona de refracción-difracción (PI) frente al perfil en la zona exterior (PE)

Como fase inicial para abordar el problema planteado, en este capítulo se realizará un breve repaso de los antecedentes en cuanto a estudios de perfil de equilibrio, prestándose especial atención a los que analizan la influencia de los fenómenos de refracción-difracción.

Como resultado, se comprobará que la única formulación con la que se cuenta para tratar el problema planteado es la expresión de perfil de equilibrio con refracción propuesta por González et al. (1997). Sin embargo, dicha formulación no ha sido validada con suficientes datos de campo, por lo que se realizará una revisión de la misma.

Con el anterior objetivo, se realizará un trabajo de búsqueda de datos de perfiles en campo en playas del litoral español y en las zonas objeto de estudio. De la comparación con los datos de campo, se podrá comprobar que la formulación de González et al. (1997) posee una serie de limitaciones, siendo pues necesario la propuesta de una nueva formulación de perfil de equilibrio que considere ambos procesos (refracción y difracción), lo cual constituirá el objetivo del resto de los capítulos de esta sección.

## **8.2. ANTECEDENTES**

En este apartado se va a realizar un estudio de los antecedentes del problema dividido en dos apartados. En el primero se analizará el concepto de perfil de equilibrio, presentándose una de las formulaciones más utilizadas para la determinación de éste, como es la propuesta por Bruun (1954) y Dean (1977). En el segundo se desarrollará la formulación de perfil de equilibrio con refracción propuesta por González et al. (1997).

### **8.2.1. PERFIL DE EQUILIBRIO**

Las playas, cuando se ven sometidas a la acción de agentes externos, en especial a la acción del oleaje, responden modificando su forma hasta alcanzar una forma más o menos constante, que es lo que se denomina perfil de equilibrio. A lo largo de los tiempos se han utilizado diferentes definiciones de perfil de equilibrio, pero básicamente se puede decir que perfil de equilibrio es el perfil al que llega una playa, con una determinada arena, cuando es sometida a unas condiciones hidrodinámicas constantes a lo largo de un tiempo suficientemente largo (García, 2000). En ese momento, existirá un balance de fuerzas en cada punto del perfil, tal que el transporte neto sea nulo.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, y debido a las variaciones constantes de los distintos agentes dinámicos, la existencia de un perfil de equilibrio en la Naturaleza es prácticamente imposible. En sentido estricto, el perfil de equilibrio es un concepto teórico que únicamente será posible alcanzar en el laboratorio, donde las condiciones están controladas (Bernabéu, 1999). Sin embargo, las variaciones de los diferentes agentes (oleaje, marea, tamaño de grano) en una playa están acotadas, por lo que la variabilidad del perfil se encuentra también limitada, pudiéndose definir un estado modal o más frecuente, el cual se considera como perfil de playa de equilibrio (González, 1995).

El concepto de perfil de equilibrio ha despertado el interés de numerosos investigadores en los últimos años, los cuales han tratado de relacionar la forma del

perfil de playa de equilibrio con determinados parámetros físicos, como el tamaño de grano, el peralte del oleaje, etc.

Nótese que, a lo largo de esta sección de la Tesis, se va a emplear una notación diferente a la del resto de la misma. Este cambio de notación se va a realizar con el objetivo de ser consecuentes con la nomenclatura usual utilizada en la literatura del perfil de playa. El eje  $z$  va a representar exactamente lo mismo que en los anteriores capítulos, es decir, la cota vertical medida desde un nivel de referencia y siendo positiva hacia arriba. Sin embargo, el eje  $x$ , deja de indicar la coordenada longitudinal, pasando a representar la coordenada transversal, en la dirección del perfil de playa, como se puede observar en la figura 4.2.

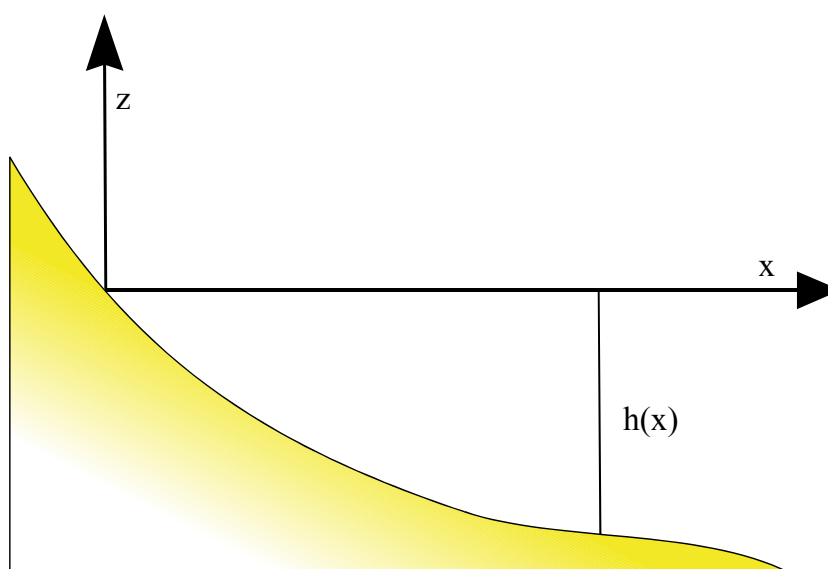


Figura 4.2- Sistema de referencia elegido

Una de las formulaciones de perfil de equilibrio más ampliamente usadas, al mismo tiempo que simple, es la planteada por Bruun (1954) y Dean (1977).

Bruun (1954) ajustó la expresión (4.1) con base en perfiles de playa de California y de la costa danesa del Mar del Norte.

$$h = A_d x^{\frac{2}{3}} \quad (4.1)$$

En la expresión (4.1),  $h$  representa la profundidad total de agua,  $A_d$  es el parámetro dimensional de forma del perfil y  $x$  es la distancia horizontal medida desde la línea de costa en la dirección del perfil.

Posteriormente, Dean (1977) ajustó la misma expresión a 504 perfiles de playa de la costa de Estados Unidos y del Golfo de México.

El parámetro de forma del perfil  $A_d$  (también denominado como parámetro de Dean) fue relacionado con el tamaño de grano del sedimento de la playa ( $D_{50}$ ) por Moore (1982) y, con posterioridad por Dean (1987b), que modificó la relación planteada por el anterior investigador e introdujo la velocidad de caída del grano.

Sin embargo, se pudo comprobar que el parámetro de forma del perfil era variable para un mismo tamaño de grano, por lo que Pilkey et al. (1993) sugirieron la necesidad de tener en consideración otras variables adicionales al tamaño de grano. Vellinga (1983) encontró una dependencia débil del parámetro de forma con el peralte del oleaje.

Aunque en experimentación en laboratorio sólo se ha encontrado una dependencia débil entre las características del oleaje y la forma del perfil de playa, son muchos los investigadores que, utilizando datos de campo, han mostrado que existe una gran dependencia entre la pendiente del perfil de playa y el grado de exposición al oleaje de éste. Bascom (1959), con base en datos de más de cuarenta playas en la costa del Pacífico en los Estados Unidos, determinó que la pendiente de playa estaba relacionada con el tamaño de grano y con la cantidad de energía que le llegaba al perfil.

### 8.2.2. PERFIL DE EQUILIBRIO CON REFRACCIÓN DE GONZÁLEZ ET AL. (1997)

Si bien la literatura disponible en relación con el perfil de equilibrio es muy extensa, el único trabajo que tiene en consideración la variabilidad del perfil de playa por efecto de la refracción, es el propuesto por González et al. (1997), siendo éste el punto de partida del presente estudio. La formulación presentada por los anteriores investigadores se basa en que, debido a la dificultad de estudiar la refracción y la difracción conjuntamente, se suele considerar 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*”, como ya fue comentado en la anterior sección, 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. De aquí surgió la idea de los anteriores autores de plantear una formulación de perfil de equilibrio para esta última zona, siendo pues una formulación de perfil de equilibrio con influencia de la refracción.

Así pues, tomando como punto de partida todos los trabajos mencionados en el anterior apartado, González et al. (1997) plantearon un modelo de perfil de equilibrio con refracción que se describe a continuación.

Del equilibrio de fuerzas constructivas y destructivas actuando sobre un perfil de playa, y asumiendo que la disipación de energía por unidad de volumen ( $D_*$ ) es la fuerza destructiva dominante, Dean (1977) planteó su modelo, en el que un tamaño de grano de sedimento se encuentra estable en un determinado nivel de energía por unidad de volumen  $D_*$ , cumpliéndose la ecuación (4.2) para un perfil de playa en equilibrio.

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (E C_g) = D_* \quad (4.2)$$



En la ecuación (4.2), el término de dentro del paréntesis representa el flujo de energía, siendo  $E$  la densidad de energía local (energía por unidad de superficie) y  $C_g$  la celeridad de grupo local. Integrando esta expresión, se obtiene el tan utilizado perfil de Dean (1977), una vez que se ha asumido que la disipación de energía por unidad de volumen es constante a lo largo del perfil, se ha utilizado la teoría lineal de ondas en profundidades reducidas para el cálculo del flujo de energía y se ha supuesto saturación de oleaje (relación de altura de ola con la profundidad constante). Esta última consideración se basa en la hipótesis de que, para condiciones de equilibrio, la energía de la onda se encuentra saturada dentro de la zona de rompientes (Miche, 1951), lo cual implica una relación constante entre la altura de ola incidente y la profundidad en cada punto del perfil de rotura. Posteriormente Thornton y Guza (1983), a partir de ensayos de campo, pudieron establecer la existencia de un nivel de saturación de las ondas, determinando dicha relación entre altura de ola y profundidad, a medida que la onda se acercaba a la playa.

De acuerdo con el trabajo de González et al. (1997), si la refracción es importante, la distancia entre los rayos del oleaje ( $b$ ) no puede ser considerada constante. Esta distancia debe ser introducida en la ecuación (4.2), obteniéndose la ecuación (4.3).

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (E C_g b) = D_* b \quad (4.3)$$

González et al. (1997) asumieron diferentes expresiones para determinar la anchura  $b$  entre rayos del oleaje (lineal y exponencial) y así derivaron a partir de la ecuación (4.3) una formulación de perfil de equilibrio con refracción que se indica en la ecuación (4.4).

$$h = A_r(x) A_d x^{\frac{2}{3}} \quad (4.4)$$

El perfil de equilibrio con refracción obtenido es similar al propuesto por Dean (1977), pero en este caso el parámetro de forma total se descompone en un parámetro de forma de Dean ( $A_d$ ) y un parámetro de forma que tiene en cuenta la refracción ( $A_r$ ). Asimismo, este parámetro de forma de refracción es función de la coordenada  $x$ , por lo que en este caso la relación deja de ser parabólica.

Las expresiones establecidas por González et al. (1997) para determinar el parámetro de forma de refracción adoptan diferentes valores, dependiendo de si la anchura  $b$  se asume lineal o bien exponencial.

- *Caso b lineal*

En el caso de que  $b$  varíe linealmente de la forma como se indica en la figura 4.3, el parámetro de forma de refracción se debe calcular con la ecuación (4.5).

$$b = r x + b_s \Rightarrow A_r(x) = \left( \frac{5}{8} \left( \frac{1}{\chi} \left( 1 - (1 + \chi)^{-\frac{3}{5}} \right) + 1 \right) \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4.5)$$

con:

$$\chi = \frac{(K_{r0}^2 - 1)x}{W} \quad (4.6)$$

$$K_{r0}^2 = \frac{b(x=W)}{b(x=0)} \quad (4.7)$$

En las ecuaciones (4.6) y (4.7) el parámetro  $W$  representa la anchura de la zona de rompientes (véase figura 4.3) y el parámetro  $K_{r0}$  tiene en cuenta la refracción que se ha producido en esta zona (desde la rotura a la costa).

En la figura 4.4 aparece representado el parámetro de forma de refracción para este caso ( $A_{rl}$ ), para diferentes valores del parámetro  $K_{r0}$  y en función de la distancia  $x$  adimensionalizada con  $W$ .

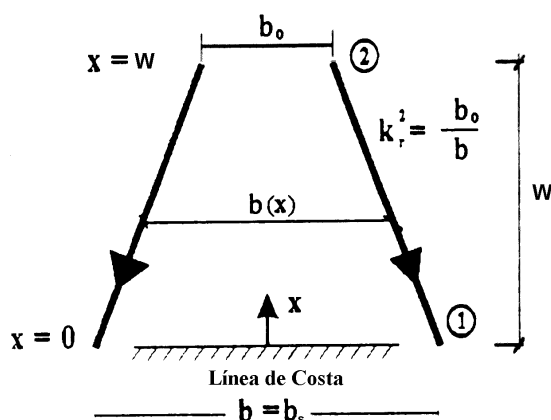


Figura 4.3- Esquema de variación lineal de la distancia entre rayos del oleaje y definición del coeficiente de refracción (modificada de González et al., 1997)

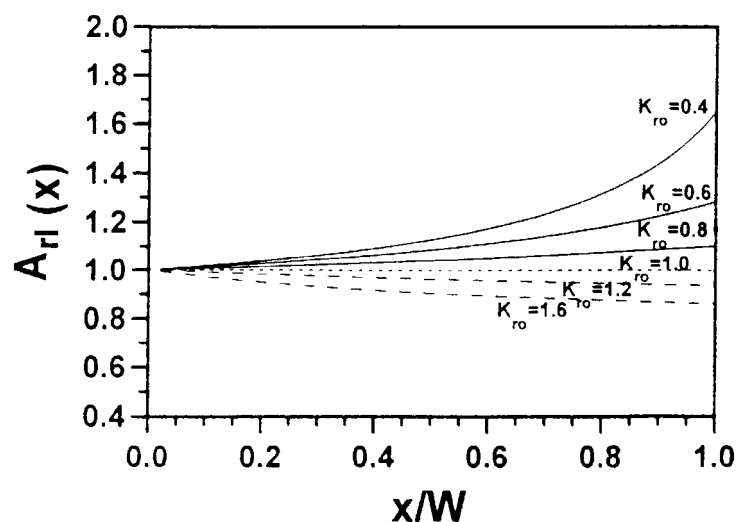


Figura 4.4- Parámetro de forma de refracción para el caso de variación lineal de la distancia entre rayos del oleaje ( $A_{rl}$ ) frente a la distancia horizontal ( $x$ ) adimensionalizada con la anchura de la zona de rompientes ( $W$ ), (tomada de González et al., 1997)

- Caso  $b$  exponencial

En el caso de que  $b$  varíe exponencialmente, el parámetro de forma de refracción se debe calcular con la ecuación (4.8).

$$b = b_s e^{-\Gamma x} \Rightarrow A_r(x) = \left( \frac{5}{3\Gamma x} \left( 1 - e^{-\frac{3}{5}\Gamma x} \right) \right)^{\frac{2}{3}} \quad (4.8)$$

con,

$$K_{r0}^2 = e^{-\Gamma W} \quad (4.9)$$

En las ecuaciones (4.8) y (4.9), el parámetro  $\Gamma$  indica el grado de convergencia o divergencia de los rayos del oleaje y el valor  $b_s$  indica la anchura entre ortogonales al final de la propagación (costa).

En la figura 4.5 aparece representado el parámetro de forma de refracción para este caso ( $A_{re}$ ), para diferentes valores del parámetro  $K_{r0}$  y en función de la distancia  $x$  adimensionalizada con  $W$ .

A pesar de que las expresiones que se obtienen para el parámetro de forma de refracción  $A_r$  ( $A_{rl}$  para  $b$  lineal o  $A_{re}$  para  $b$  exponencial) dependen de la ley que se ha asumido para la anchura entre ortogonales, para los valores usuales del parámetro  $K_{r0}$  (0.7-1.5), los resultados conseguidos son muy similares, obteniéndose (si se asume un valor de  $K_{r0}$  cercano a la unidad) la ecuación (4.10) para determinar el parámetro de forma de refracción en  $x=W$ .

$$A_r \sim K_{r0}^{\frac{4}{5}} \tag{4.10}$$

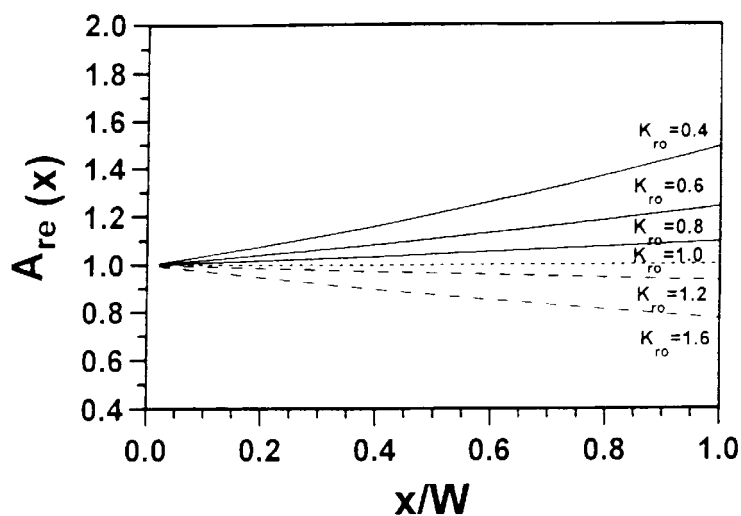


Figura 4.5- Parámetro de forma de refracción para el caso de variación exponencial de la distancia entre rayos del oleaje ( $A_{re}$ ) frente a la distancia horizontal ( $x$ ) adimensionalizada con la anchura de la zona de rompientes ( $W$ ), (tomada de González et al., 1997)

Por consiguiente, mediante la utilización de las expresiones propuestas por González et al. (1997), se dispone de una formulación de perfil de equilibrio con refracción. Así pues, según los anteriores autores, la forma del perfil de equilibrio con refracción puede ser representada por una expresión parabólica similar a la propuesta por Dean (1977), pero con un parámetro de forma que no sólo es función del tamaño de grano o de la velocidad de caída del grano ( $A_d$ ), sino también del coeficiente de refracción ( $A_r$ ). El nuevo parámetro de forma  $A_T$ , se calcula con la ecuación (4.11).

$$A_T = A_r A_d \tag{4.11}$$

Como se ha podido comprobar, la formulación de González et al. (1997) sigue en la línea de que la forma del perfil de playa está muy relacionada a la forma

de transformación de la energía a lo largo del perfil. Se debe tener en cuenta que, aunque en un principio las áreas expuestas al oleaje tienen un perfil de playa con menor pendiente que las áreas abrigadas, debido a la clasificación que experimenta el sedimento este fenómeno puede incluso invertirse (la clasificación del sedimento trabaja en sentido contrario a la refracción del oleaje).

### **8.3. COMPARACIÓN DEL PERFIL DE EQUILIBRIO CON REFRACCIÓN DE GONZÁLEZ ET AL. (1997) CON DATOS DE CAMPO**

Como la formulación de González et al. (1997) descrita en el anterior apartado es teórica, habiendo sido contrastada con pocos datos reales, es imprescindible realizar una recopilación de datos de campo, los cuales permitan determinar la validez de dicha formulación. A continuación se describirán los datos de campo con los que se ha contado para la realización de esta Tesis, y posteriormente se aplicará la formulación de González et al. (1997) a los mismos.

#### **8.3.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO**

La base de datos de las diferentes playas del litoral español utilizada en la presente Tesis ha sido extraída del archivo de la Dirección General de Costas. Esta base de datos no sólo se ha empleado para analizar la formulación de González et al. (1997), sino que también ha servido para calibrar la formulación de perfil de equilibrio con refracción-difracción que se va proponer en el resto de los capítulos de esta sección de la Tesis.

Las playas que constituyen la base de datos aparecen indicadas en la tabla 4.1. Asimismo, la localización geográfica de cada una de estas playas se puede consultar en la figura 4.6 (con el objetivo de la identificación de las playas de esta figura, téngase presente que la numeración coincide con la establecida en la tabla 4.1).

En cada una de las playas de la tabla 4.1 se determinó la planta de equilibrio (véase González y Medina, 2001), verificándose que dichas playas se encontraban en este estado (véase anejo III). Téngase presente que cada planta de equilibrio queda definida con el ángulo de influencia o de delimitación de la zona de refracción-difracción, denotado como ángulo  $\alpha_{min}$ , o lo que es equivalente, con el ángulo  $\beta$  complementario a este último, el cual se mide con respecto a la orientación de la parte recta de la playa en la zona que deja de estar afectada por la estructura (dicha dirección se suele asociar a la dirección del flujo medio de energía del oleaje).

<b><i>NÚMERO</i></b>	<b><i>NOMBRE</i></b>	<b><i>LOCALIZACIÓN</i></b>
<b><i>1</i></b>	Cubelles	Barcelona
<b><i>2</i></b>	Altafulla	Tarragona
<b><i>3</i></b>	Salou	Tarragona
<b><i>4</i></b>	Almazora 1	Castellón
<b><i>5</i></b>	Almazora 2	Castellón
<b><i>6</i></b>	Garrucha	Almería
<b><i>7</i></b>	Benalmádena	Málaga
<b><i>8</i></b>	Nueva Andalucía 1	Málaga
<b><i>9</i></b>	Nueva Andalucía 2	Málaga
<b><i>10</i></b>	Nueva Andalucía 3	Málaga

Tabla 4.1- Descripción de las playas de la base de datos

Con el objetivo de analizar la variabilidad espacial del perfil de playa, en cada una de las playas de la tabla 4.1 se estudiaron varios perfiles en la zona de influencia de refracción-difracción, así como el perfil de comparación, ubicándose éste en una zona en la que el efecto de la refracción-difracción conjuntamente se puede considerar despreciable y que se define o bien con el ángulo  $\beta$  o bien con el ángulo  $\alpha_{min}$  ( $\beta=90-\alpha_{min}$ , véase la anterior sección de la Tesis). Estos ángulos, así como el esquema de ubicación de los perfiles, aparecen definidos en la figura 4.7.

Así pues, existen dos posibilidades para definir el ángulo de influencia que delimita la zona de refracción-difracción:

1. La primera opción se puede utilizar si se dispone de la playa y consiste en, siguiendo la propuesta de Hsu y Evans (1989) o la de Tan y Chiew (1994), el ángulo  $\beta$  se establece como el ángulo de mejor ajuste a la forma en planta de equilibrio de la playa.

2. La segunda opción es la que se debe emplear para el diseño de una playa (carácter predictivo) y consiste en obtener el ángulo  $\beta$  a partir de la formulación del ángulo  $\alpha_{min}$  propuesta por González y Medina (2001). Dicha formulación fue especificada en la anterior sección de la Tesis.



Figura 4.6- Localización de las playas de la base de datos

En el anejo III se puede consultar la localización de cada uno de los perfiles analizados en las diferentes playas de la figura 4.6 y para ambas posibilidades de definición del ángulo  $\beta$ . Asimismo, en el mencionado anejo se indica el sistema de



referencia con respecto al que se definen los perfiles, similarmente a lo especificado en el esquema de la figura 4.7.

Otra de las características necesarias de los perfiles de playa analizados es el tamaño de grano del sedimento, caracterizado con el  $D_{50}$ . Entre las playas estudiadas, existen casos de tamaños de grano más o menos uniformes longitudinalmente (como es el caso de las playas de Salou, Almazora1, Almazora 2, Garrucha y Benalmádena), y otros en los que la variabilidad longitudinal del sedimento es un parámetro importante a tener en cuenta (Cubelles, Altafulla, Nueva Andalucía 1, Nueva Andalucía 2 y Nueva Andalucía 3). Como en esta sección se estudia el perfil de equilibrio de rotura (zona intermareal), los valores del tamaño de grano deben ser representativos de la zona de rompientes, considerándose con tal fin los valores del tamaño de grano en la zona sumergida más próxima a la línea de costa. Los valores del tamaño de grano de los diferentes perfiles de las playas estudiadas también se pueden consultar en el anejo III.

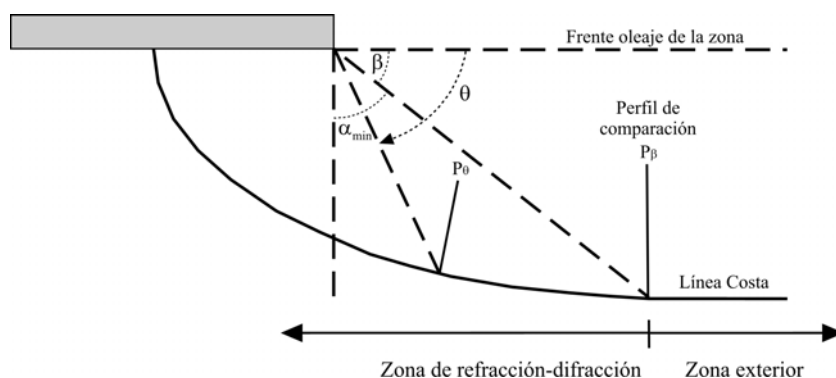


Figura 4.7- Parámetros de ubicación de los perfiles de playa

### 8.3.2. APLICACIÓN DEL PERFIL DE EQUILIBRIO CON REFRACCIÓN

En este apartado se pretende determinar el grado de validez de la formulación de perfil de equilibrio con refracción de González et al. (1997) descrita en el apartado 8.2.2. en su aplicación a zonas de refracción-difracción. Recuérdese que la

formulación anterior surgió de considerar 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. Por consiguiente, tal y como se indica en la figura 4.8, es una formulación de perfil de equilibrio aplicable en esta última zona, teniendo en consideración sólo la influencia de la refracción.

En la formulación de González et al. (1997) el perfil de equilibrio con refracción se expresa mediante la ecuación (4.4), quedando definido el parámetro de forma total  $A_T$  como el producto de un parámetro de forma asociado al tamaño de grano o velocidad de caída del grano ( $A_d$ , el cual es el parámetro de forma típico) por un parámetro de forma asociado a la refracción ( $A_r$ ), (véase ecuación 4.11). Es precisamente este último parámetro el que se va a analizar.

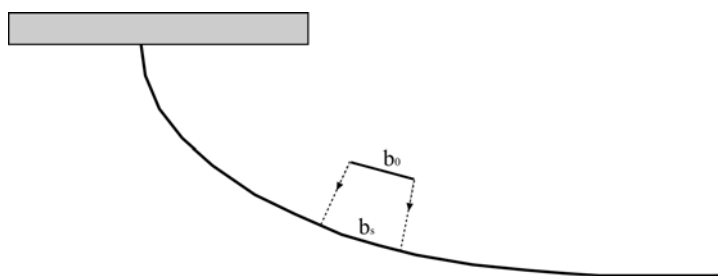


Figura 4.8- Esquema de la zona de aplicación del perfil de equilibrio con refracción de González et al. (1997)

Siguiendo el esquema del párrafo anterior, en cada uno de los perfiles de playa medidos se ajustó por mínimos cuadrados el parámetro  $A_T$ . Posteriormente se calculó el parámetro  $A_d$ . Aunque existen diferentes expresiones para estimar este último parámetro, en la presente Tesis se utilizó la formulación de Dean (1987b). Finalmente el parámetro de forma de refracción buscado  $A_r$  se obtuvo dividiendo el parámetro de forma total  $A_T$  entre el parámetro de forma asociado al tamaño de grano  $A_d$ , como se deduce de la ecuación (4.11). Este proceso está detalladamente especificado en el anejo IV. Es importante recalcar que, aunque el parámetro de forma de refracción es variable con la coordenada  $x$ , esta variabilidad es débil; por consiguiente, como este apartado tiene un carácter comparativo, y a efectos de

simplificar, se ha ajustado un parámetro de forma de refracción medio en cada perfil medido.

Con el objetivo de poder comparar los parámetros de forma de refracción de los perfiles medidos con respecto a los correspondientes parámetros determinados con la formulación propuesta por González et al. (1997), se obtuvieron los mencionados parámetros utilizando las expresiones (4.5), (4.6) y (4.7) obtenidas por los anteriores investigadores para perfil con refracción en el caso de que la anchura  $b$  entre rayos del oleaje varíe linealmente. El coeficiente de refracción presente en las anteriores ecuaciones se determinó gráficamente de los datos medidos (cociente entre la anchura de los rayos).

El estudio descrito se llevó a cabo para todas las playas indicadas en la figura 4.6. En el anejo IV se presentan para todas las playas las comparaciones entre parámetro de forma de refracción medido frente al establecido con la formulación de González et al. (1997) para anchura entre rayos variando linealmente. En cada playa los perfiles se han ubicado teniendo en cuenta el esquema que aparece indicado en la figura 4.7, determinándose el ángulo  $\beta$  con la opción para playas existentes. Por lo tanto, téngase en cuenta que todas las comparaciones efectuadas se han representado en unos ejes de referencia que tienen en consideración el esquema de la figura 4.7. En concreto, en el eje de abscisas se representa la localización de cada perfil mediante el cociente del ángulo  $\theta$  del perfil analizado con respecto al ángulo  $\beta$  del perfil de comparación ubicado en la zona exterior.

En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se presentan tres ejemplos de la comparación realizada, correspondientes a las playas de Garrucha, Benalmádena y Nueva Andalucía 1, respectivamente.

Del estudio de las figuras 4.9, 4.10 y 4.11, así como del resto de las playas analizadas (las cuales se pueden consultar en el anejo IV), se puede observar que, en el mejor de los casos, sólo un tercio de la magnitud del parámetro de forma no asociado al tamaño de grano se puede obtener con la formulación de González et al. (1997). En la playa de Garrucha (véase figura 4.9), el parámetro de forma de refracción  $A_r$  medido es cuatro veces mayor que el determinado con la mencionada

formulación. En la de Benalmádena (véase figura 4.10), seis veces mayor y en la de Nueva Andalucía 1 (véase figura 4.11), cinco veces más grande. Todavía se pueden encontrar casos donde las diferencias son más espectaculares; así por ejemplo, en la playa de Nueva Andalucía 2 (véase anejo IV), los valores medidos son once veces mayores que los estimados con la formulación de González et al. (1997).

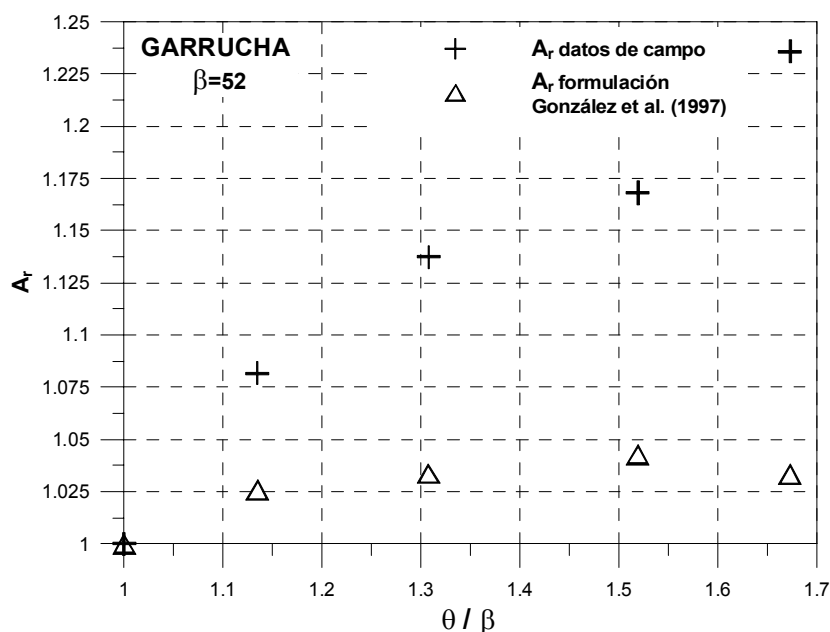


Figura 4.9- Comparación del parámetro de forma de refracción estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Garrucha

Como resultado de este estudio, se concluye que en las zonas sometidas a la influencia de los procesos de refracción-difracción conjuntamente (como por ejemplo: zonas con diques exentos, diques de abrigo en puertos, cabos, salientes, etc.), la formulación del perfil de equilibrio con refracción propuesta por González et al. (1997) subestima el parámetro de forma. Así pues, la mencionada formulación no es capaz de representar por sí sola la forma de equilibrio del perfil en las zonas de refracción-difracción. Por lo tanto, se requiere el desarrollo de una nueva formulación para estudiar el perfil de equilibrio en estas zonas, lo cual constituirá el objetivo del resto de los capítulos de esta sección de la Tesis.

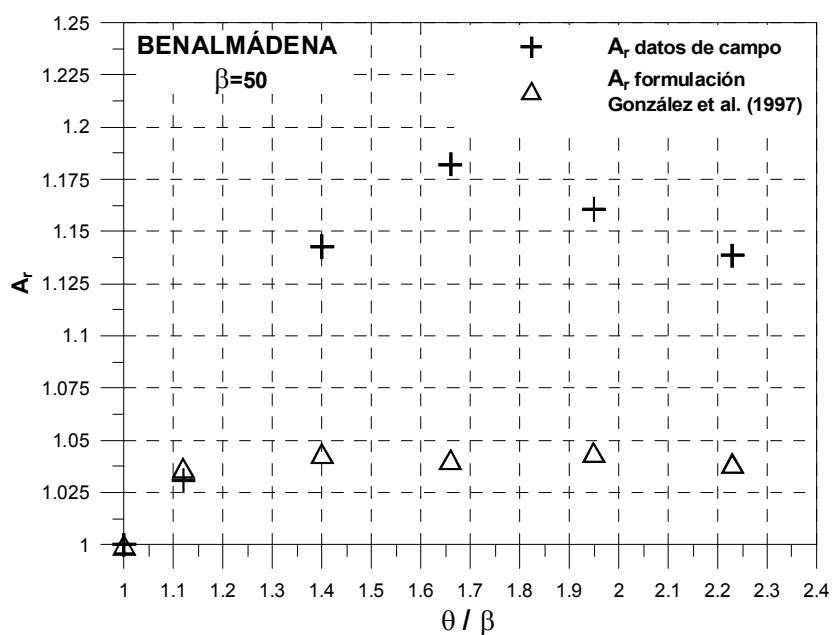


Figura 4.10- Comparación del parámetro de forma de refracción estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Benalmádena

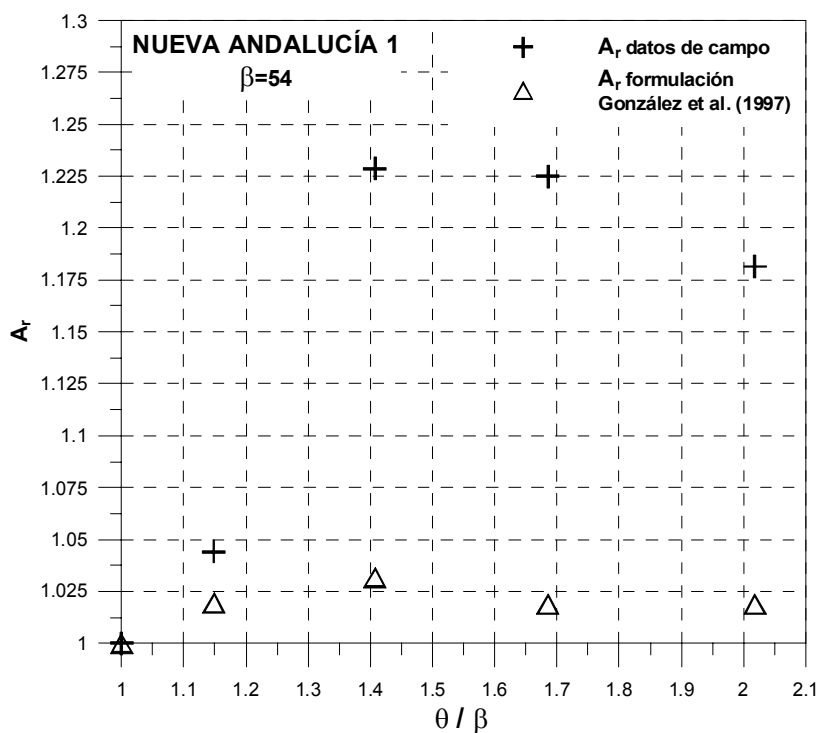


Figura 4.11- Comparación del parámetro de forma de refracción estimado con los datos de campo y el obtenido con la formulación de González et al. (1997) en la playa de Nueva Andalucía 1

## 8.4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este capítulo son las siguientes:

- ❖ En la actualidad no existen formulaciones de perfil de equilibrio que tengan en consideración de forma acertada la variabilidad espacial del perfil de playa en zonas de refracción-difracción.
- ❖ Con base en los datos de campo analizados, la formulación de perfil de equilibrio con refracción propuesta por González et al. (1997) no es adecuada en zonas de refracción-difracción, subestimando el parámetro de forma del perfil en dichas zonas.
- ❖ Se requiere el desarrollo de una nueva formulación para definir el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción.

## **CAPÍTULO 9**

# **FORMULACIÓN DE PERFIL DE EQUILIBRIO EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN**

---





## 9.1. INTRODUCCIÓN

Como se comprobó en el anterior capítulo, no existen formulaciones adecuadas para la determinación del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción. Las expresiones propuestas por González et al. (1997) para el establecimiento del perfil de equilibrio con refracción no son acertadas en estas zonas. Por consiguiente, es imprescindible la propuesta de una formulación de perfil de equilibrio para las zonas analizadas.

En este capítulo se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- En una primera fase se va a derivar la expresión analítica para definir el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción.
- Posteriormente se propondrá una expresión para la determinación del parámetro de forma asociado a la zona de refracción-difracción  $A_{ref-dif}$  presente en la formulación propuesta.
- Finalmente se estudiará el perfil de playa con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo, relacionándose con los parámetros de calibración de la formulación propuesta. Como este perfil se encuentra asociado con el punto de mínima curvatura de la amplitud de onda a lo largo de la playa, se analizarán las diferentes leyes de curvaturas.

## 9.2. EXPRESIÓN ANALÍTICA DEL PERFIL DE EQUILIBRIO EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN

En este apartado se deriva una expresión analítica para la determinación del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción. Con este fin, se parte de la *ecuación de la pendiente suave* (“*mild slope equation*”) de Berkhoff (1972), que incluye ambos fenómenos, obteniéndose después de una serie de operaciones una ecuación de balance del flujo de energía aplicable en las zonas objeto de estudio.

La *ecuación de la pendiente suave* fue descrita en el capítulo 6 (véase el mencionado capítulo para más detalles), escribiéndose de nuevo mediante la ecuación (4.12).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( CC_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( CC_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + k^2 CC_g \phi = 0 \quad (4.12)$$

con:  $C$  la celeridad de la onda,  $C_g$  la celeridad de grupo,  $\phi$  el potencial del flujo y  $k$  el número de onda, definido como  $k=2\pi/L$  ( $L$  es la longitud de onda).

Así pues, comenzando con el proceso de derivación, en la ecuación (4.12) se asume que el potencial puede escribirse con la expresión (4.13). En esta ecuación, tanto la amplitud de onda  $a$ , como la fase  $S$ , son dos funciones reales.

$$\phi = a(x, y) e^{iS(x, y)} \quad (4.13)$$

Introduciendo la expresión (4.13) en la ecuación (4.12) y separando la parte real y la parte imaginaria, se obtiene la *ecuación eiconal* indicada en la expresión (4.14) y que corresponde a la parte real y la *ecuación del transporte* expresada mediante la ecuación (4.15) y que corresponde a la parte imaginaria.

$$|\nabla S|^2 = k_m^2 = k^2 + \frac{\nabla^2 a}{a} + \frac{\nabla(CC_g) \nabla a}{CC_g a} \quad (4.14)$$

$$\nabla(CC_g a^2 \nabla S) = 0 \quad (4.15)$$

En la *ecuación eiconal*,  $k_m$  es el número de onda real correspondiente a la *ecuación de la pendiente suave* y  $k$  es el número de onda que se obtiene con la ecuación de dispersión. Asimismo, existen dos términos adicionales, el primero incorpora la información de la difracción y el segundo hace referencia a la refracción-difracción.

La ecuación (4.15) es la *ecuación del transporte*, que deriva en la ecuación de conservación del flujo de energía cuando se introduce en la mencionada ecuación la expresión de la energía y se asume el período del oleaje  $T$  constante.

Con el objetivo de obtener una formulación del perfil de equilibrio (expresión analítica), se utiliza la aproximación parabólica de la *ecuación de la pendiente suave*. Esta aproximación se basa en asumir que las ondas se propagan en una dirección principal de propagación ( $x$ ), como queda expresado en la ecuación (4.16). Nótese que en la expresión (4.16) se ha introducido la ecuación (4.14).

$$\nabla S = \left( \frac{\partial S}{\partial x}, \frac{\partial S}{\partial y} \right) = (k_x, k_y) = (k_x, 0) = \left( \left( k^2 + \frac{\nabla^2 a}{a} + \frac{\nabla(CC_g)\nabla a}{CC_g a} \right)^{\frac{1}{2}}, 0 \right) \quad (4.16)$$

Por otra parte, si a la *ecuación del transporte* (ecuación 4.15) se le impone la existencia de una disipación  $D_I$  se obtiene la expresión (4.17).

$$\nabla(CC_g a^2 \nabla S) = D_I \quad (4.17)$$

La ecuación (4.17) se transforma en la expresión (4.18), al introducir la expresión de la energía del oleaje y asumir que la densidad del fluido y la gravedad son uniformes (no existe variación espacial de estas magnitudes).

$$\nabla \left( CC_g \frac{I}{2} \rho g a^2 \nabla S \right) = \frac{I}{2} \rho g D_1 \Rightarrow \nabla (CC_g E \nabla S) = D_2 \quad (4.18)$$

En la expresión (4.18),  $\rho$  representa la densidad del fluido,  $g$  hace referencia a la aceleración de la gravedad,  $E$  es la energía del oleaje por unidad de superficie definida como  $E=1/2\rho g a^2$  y  $D_2$  es el término de disipación definido como  $D_2=1/2\rho g D_1$ .

Al introducir la aproximación parabólica en la ecuación (4.18) se obtiene la expresión (4.19).

$$\frac{\partial}{\partial x} (CC_g E k_x) + \frac{\partial}{\partial y} (CC_g E k_y) = D_2 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} (CC_g E k_x) = D_2 \quad (4.19)$$

Por otra parte, la componente del número de onda en la dirección principal de aproximación ( $x$ ) de la ecuación (4.16) se puede expresar mediante la ecuación (4.20).

$$k_x = \left( k^2 + \frac{\nabla^2 a}{a} + \frac{\nabla(CC_g) \nabla a}{CC_g a} \right)^{\frac{1}{2}} = k \left( 1 + \frac{\nabla^2 a}{a k^2} + \frac{\nabla(CC_g) \nabla a}{CC_g a k^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.20)$$

Llegados a este punto, se asume que el número de onda viene principalmente determinado por la parte asociada a la relación de dispersión, siendo la contribución de la difracción y la refracción despreciable con respecto a la anterior. Esta aproximación queda matemáticamente indicada mediante la ecuación (4.21).

$$\frac{\nabla^2 a}{a} + \frac{\nabla(CC_g)\nabla a}{CC_g a} \ll k^2 \quad (4.21)$$

Téngase presente que la ecuación (4.21) es equivalente a la expresión (4.22).

$$\frac{\nabla^2 a}{ak^2} + \frac{\nabla(CC_g)\nabla a}{CC_g ak^2} \ll 1 \quad (4.22)$$

Con el objetivo de simplificar la expresión de  $k_x$ , se va a tener en cuenta la aproximación matemática que se indica en la ecuación (4.23).

$$\delta \ll 1 \Rightarrow (1 + \delta)^n \sim 1 + \delta n \quad (4.23)$$

Utilizando la ecuación (4.22) y haciendo uso de la aproximación matemática (4.23), la ecuación (4.20) queda aproximada con la ecuación (4.24).

$$k_x \sim k \left( 1 + \frac{\nabla^2 a}{2ak^2} + \frac{\nabla(CC_g)\nabla a}{2CC_g ak^2} \right) \quad (4.24)$$

La celeridad de la onda  $C$  se determina con la expresión (4.25). En esta expresión:  $L$  es la longitud de onda;  $T$  es el período del oleaje;  $\omega$  es la frecuencia angular ( $\omega=2\pi/T$ ) y  $k$  es el número de onda ( $k=2\pi/L$ ).

$$C = \frac{L}{T} = \frac{2\pi}{k} \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\omega}{k} \quad (4.25)$$

Considerando que en el caso habitual de flujo estacionario, el período del oleaje se puede suponer constante (en  $x$ ) y haciendo uso de las ecuaciones (4.24) y (4.25), la ecuación (4.19) se expresa mediante la ecuación (4.26).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( \omega EC_g \left( 1 + \frac{\nabla^2 a}{2ak^2} + \frac{\nabla(CC_g)\nabla a}{2CC_g ak^2} \right) \right) &= D_2 \Rightarrow \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( EC_g \left( 1 + \frac{\nabla^2 a}{2ak^2} + \frac{\nabla(CC_g)\nabla a}{2CC_g ak^2} \right) \right) &= \frac{D_2}{\omega} = \varepsilon \end{aligned} \quad (4.26)$$

En la expresión (4.26) el parámetro  $\varepsilon$  representa la disipación por unidad de área.

Con el objetivo de poder comparar la expresión (4.26) con la propuesta por Dean (1977), se representa la misma en función de la disipación por unidad de volumen  $D_*$ , mediante la ecuación (4.27).

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( EC_g \left( \frac{\nabla^2 a}{2ak^2} + \frac{\nabla(CC_g)\nabla a}{2CC_g ak^2} \right) \right) = \frac{\varepsilon}{h} = D_* \quad (4.27)$$

Nótese que la ecuación (4.27) está compuesta del término determinado por Dean (1977) y un término adicional que tiene en consideración la refracción y difracción conjuntamente. Este último término se encuentra a su vez compuesto de dos sumandos, los cuales se pueden desarrollar. En el caso de las zonas objeto de

estudio se asume que el primero de ellos tiene mayor importancia que el segundo, tal y como se indica en la expresión (4.28).

$$\frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \gg \frac{2}{C} \frac{\partial C}{\partial y} \frac{\partial a}{\partial y} \quad (4.28)$$

Téngase en cuenta que lo obtenido en el párrafo anterior, también se pudo comprobar en el capítulo 8, en el que se verificó que la influencia de la refracción estimada con la formulación de González et al. (1997) en el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción tenía un efecto menor que el de la difracción.

Así pues, con estas consideraciones, se puede despreciar la componente del número de onda asociada a la refracción-difracción en la ecuación (4.27), obteniéndose la expresión (4.29).

$$\frac{I}{h} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) + \frac{I}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( EC_g \frac{\nabla^2 a}{2ak^2} \right) = D_* \quad (4.29)$$

En las zonas objeto de estudio, las derivadas segundas de la amplitud de onda en la dirección de propagación  $x$  son despreciables en comparación con las mismas derivadas con respecto a la dirección  $y$ . Por consiguiente, se puede utilizar la aproximación indicada en la expresión (4.30).

$$\nabla^2 a = \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \sim \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \quad (4.30)$$

Asimismo, se hace uso de la simplificación definida mediante la ecuación (4.31), la cual representa que las variaciones en la dirección  $x$  (a lo largo del perfil) de la derivada segunda (curvatura) de la amplitud de onda en la dirección transversal a la dirección de propagación principal se asume que son despreciables.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) \sim 0 \quad (4.31)$$

La ecuación (4.29), una vez tenido en cuenta las expresiones (4.25), (4.30) y (4.31), queda representada con la ecuación (4.32).

$$\begin{aligned} \frac{I}{h} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) + \frac{I}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( EC_g C^2 \frac{\partial^2 a}{2a\omega^2} \right) &= D_* \Rightarrow \\ \frac{I}{h} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) + \frac{I}{h} \frac{I}{2\omega^2} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \frac{\partial}{\partial x} \left( EC_g \frac{C^2}{a} \right) &= D_* \end{aligned} \quad (4.32)$$

Con el objetivo de determinar los términos de la ecuación (4.32), se utilizan las ecuaciones (4.33), (4.34) y (4.35).

La ecuación (4.33) indica la hipótesis de que, para condiciones de equilibrio, la energía de la onda se encuentra saturada dentro de la zona de rompientes (Miche, 1951), lo cual implica una relación constante ( $\gamma_b$ ) entre la altura de ola incidente ( $H$ ) y la profundidad en cada punto del perfil de rotura ( $h$ ).

$$H = \gamma_b h \quad (4.33)$$



Con la ecuación (4.34) se determina el valor de la celeridad de la onda en profundidades reducidas y haciendo uso de la teoría lineal de ondas. En este caso el valor de la celeridad de grupo es idéntico al de la celeridad de la onda.

$$C = C_g = \sqrt{gh} \quad (4.34)$$

Al combinar las expresiones (4.33) y (4.34) se obtiene la ecuación (4.35).

$$\frac{C^2}{a} = \frac{gh}{\frac{\gamma_b h}{2}} = \frac{2g}{\gamma_b} \quad (4.35)$$

Introduciendo la ecuación (4.35) en la (4.32) se obtiene la expresión (4.36).

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) + \frac{1}{h} \frac{1}{2\omega^2} \frac{2g}{\gamma_b} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) = D_* \quad (4.36)$$

La ecuación (4.36) se puede presentar de una forma más simple mediante la ecuación (4.37).

$$\boxed{\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) \left( 1 + \frac{g}{\gamma_b \omega^2} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) = D_*} \quad (4.37)$$

Es relevante diferenciar los dos términos siguientes en la ecuación (4.37): el primero de ellos es el clásico término del perfil de Dean (1977) y el segundo es el asociado a la zona de refracción-difracción. Este último está compuesto de un factor más o menos constante (sólo dependiente del período del oleaje), el cual se multiplica por la derivada segunda (curvatura) de la amplitud de onda en la dirección transversal a la dirección de propagación principal.

Con el fin de relacionar el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción con el perfil de equilibrio de Dean (1977), se va a derivar en primer lugar este último. Con este objetivo, se va a hacer nulo el término asociado a la zona de refracción-difracción, tal y como queda indicado en la expresión (4.38).

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) = D_* \Rightarrow \frac{5}{16} \rho g^{\frac{3}{2}} \gamma_b^2 h^{\frac{1}{2}} \frac{\partial h}{\partial x} = D_* \quad (4.38)$$

Integrando la expresión (4.38) entre el punto de la costa (0,0) y un punto genérico (x,h), se obtiene el perfil de Dean (1977). Téngase presente el significado del parámetro de forma de Dean ( $A_d$ ) de la ecuación (4.39). La determinación de este último parámetro se suele efectuar con expresiones que lo relacionan con el tamaño de grano del sedimento o con la velocidad de caída de grano del mismo (a su vez, esta velocidad se suele relacionar con el tamaño de grano del sedimento).

$$h = \left( \frac{D_*}{\frac{5}{24} \rho g^{\frac{3}{2}} \gamma_b^2} \right)^{\frac{2}{3}} x^{\frac{2}{3}} \Rightarrow h = A_d x^{\frac{2}{3}} \quad (4.39)$$

Una vez obtenido el perfil de equilibrio sin el término asociado a la zona de refracción-difracción, se va a derivar el perfil de equilibrio incluyendo dicho término

a partir de la ecuación (4.37). Previamente se va a utilizar el cambio de notación indicado mediante la expresión (4.40).

$$1 + \frac{g}{\gamma_b \omega^2} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} = F_D \quad (4.40)$$

A la ecuación (4.37) se le introduce la expresión (4.40) y se realiza el proceso de derivación representado en la ecuación (4.41).

$$\frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} (EC_g) F_D = D_* \Rightarrow \frac{5}{16} \rho g^{\frac{3}{2}} \gamma_b^2 h^{\frac{1}{2}} \frac{\partial h}{\partial x} F_D = D_* \quad (4.41)$$

Integrando la expresión (4.41) entre el punto de la costa (0,0) y un punto genérico (x,h), se obtiene el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción, como se expresa en la ecuación (4.42). En esta expresión se ha denotado el parámetro de forma del perfil con el símbolo  $A_T$ .

$$h = \left( \frac{D_*}{\frac{5}{24} \rho g^{\frac{3}{2}} \gamma_b^2 F_D} \right)^{\frac{2}{3}} x^{\frac{2}{3}} \Rightarrow h = A_T x^{\frac{2}{3}} \quad (4.42)$$

En este caso el parámetro de forma del perfil  $A_T$ , se puede descomponer, al igual que se realizó en la expresión (4.11) del anterior capítulo para el caso de perfil con refracción propuesto por González et al. (1997), en un parámetro de forma de Dean (es el parámetro  $A_d$  indicado en la ecuación 4.39 y que se suele asociar con el tamaño de grano del sedimento) y un parámetro de forma asociado a la zona de

refracción-difracción ( $A_{ref-dif}$ ). Esta descomposición aparece representada en la ecuación (4.43).

$$A_T = \left( \frac{D_*}{\frac{5}{24} \rho g^{\frac{3}{2}} \gamma_b^2 F_D} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{I}{F_D} \right)^{\frac{2}{3}} \left( \frac{D_*}{\frac{5}{24} \rho g^{\frac{3}{2}} \gamma_b^2} \right)^{\frac{2}{3}} \Rightarrow A_T = A_{ref-dif} A_d \quad (4.43)$$

Finalmente, el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$ , al tener en consideración el cambio de notación indicado en la expresión (4.40), se calcula con la ecuación (4.44). Nótese que en el caso de que las derivadas segundas de la amplitud de onda fueran nulas, el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  adoptaría un valor unitario.

$$A_{ref-dif} = \left( \frac{I}{F_D} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{I}{I + \frac{g}{\gamma_b \omega^2} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2}} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{I}{\left( I + \frac{g}{\gamma_b \omega^2} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (4.44)$$

### 9.3. EXPRESIÓN PROPUESTA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO DE FORMA $A_{ref-dif}$

En este apartado se propondrá una formulación para la determinación del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  obtenido analíticamente mediante la expresión (4.44). Una vez determinado este parámetro, y teniendo en cuenta la expresión (4.43), el parámetro de forma total del perfil de playa en zonas de refracción-difracción quedará plenamente establecido, y consecuentemente también el perfil de equilibrio de la playa.

El estudio del presente apartado se llevará a cabo en las siguientes fases:

- En primer lugar se especificarán una serie de parámetros necesarios para el desarrollo y entendimiento del resto de la sección.

- En segundo lugar y siguiendo el funcional establecido mediante la expresión (4.44), se tratará de encontrar analíticamente expresiones para obtener la curvatura de la amplitud de onda. Esto se realizará tomando como base las expresiones propuestas en la anterior sección de la Tesis para la determinación de las características del oleaje en rotura en las zonas objeto de estudio.

- Finalmente, con las expresiones analíticas se avanzará hasta un punto en el que, debido a las simplificaciones adoptadas, al requisito de incorporar los parámetros indicados en el primer punto, en el que el ángulo  $\beta$  es un parámetro de comparación obligado, así como a la necesidad de tener en consideración los datos de campo, será imprescindible determinar una expresión simplificada, que incorpore estas consideraciones que no quedan recogidas con la derivación analítica.

### 9.3.1. PARÁMETROS NECESARIOS

Previamente a la propuesta de la expresión para obtener el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  y para el entendimiento de los apartados posteriores, se debe considerar el esquema de ubicación de perfiles indicado en el anterior capítulo y que se presenta de nuevo en la figura 4.12.

Así pues, siguiendo el esquema representado en la figura 4.12, en cada playa se analizan una serie de perfiles en la zona de refracción-difracción, que quedan definidos con el ángulo  $\theta$  para ser consecuentes con la nomenclatura original de Hsu y Evans (1989). Asimismo, se define un perfil de playa de comparación en la zona en la que el efecto de la refracción-difracción conjuntamente se puede considerar despreciable y que queda localizado mediante el ángulo  $\beta$  (playas existentes) o equivalentemente con el ángulo  $\alpha_{min}$  ( $\beta=90-\alpha_{min}$ , diseño de playas, carácter predictivo). En el apartado 8.3.1. del anterior capítulo quedaron detalladamente

especificadas estas dos posibilidades para determinar el ángulo de influencia que delimita la zona de refracción-difracción. En el anejo III también se puede consultar la localización de los perfiles analizados en cada playa y para ambas opciones de determinación del ángulo  $\beta$ .

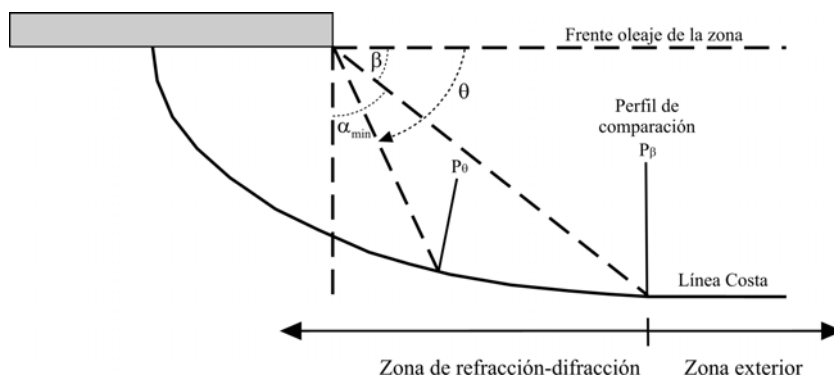


Figura 4.12- Parámetros necesarios para la ubicación de los perfiles de playa

Basándose en el esquema de representación indicado, el parámetro de forma de cada uno de los perfiles denotado como  $A_{T\theta}$  se va a estudiar por comparación con el parámetro de forma del perfil localizado en el ángulo  $\beta$  y denotado como  $A_{T\beta}$  (este es el motivo por el que este último perfil se denota como perfil de comparación). El cociente  $F$  entre ambos parámetros aparece indicado en la ecuación (4.45). En esta ecuación se ha introducido la expresión (4.43) que descompone el parámetro de forma total de cada perfil en un parámetro de forma asociado a la zona de refracción-difracción y un parámetro de forma asociado al tamaño de grano.

$$F = \frac{A_{T\theta}}{A_{T\beta}} = \frac{A_{ref-dif\theta} A_{d\theta}}{A_{ref-dif\beta} A_{d\beta}} \tag{4.45}$$

Adicionalmente, se debe tener en consideración la ecuación (4.46) y el cambio de notación representado mediante la expresión (4.47).

$$A_{ref-dif \beta} = I \quad (4.46)$$

$$A_{ref-dif \theta} \Rightarrow A_{ref-dif} \quad (4.47)$$

Después de tener en cuenta las expresiones (4.46) y (4.47), la ecuación (4.45) queda especificada mediante la expresión (4.48).

$$F = \frac{A_{r \theta}}{A_{r \beta}} = \frac{A_{ref-dif \theta} A_{d \theta}}{A_{ref-dif \beta} A_{d \beta}} = \frac{A_{ref-dif} A_{d \theta}}{A_{d \beta}} \quad (4.48)$$

Dependiendo de la variación longitudinal del tamaño de grano en cada playa, se pueden diferenciar dos casos de estudio:

1. Por una parte existen playas con tamaño de grano más o menos uniforme longitudinalmente (Salou, Almazora 1, Almazora 2, Garrucha y Benalmádena). En estos casos se cumple la relación (4.49).

$$A_{d \theta} = A_{d \beta} \quad (4.49)$$

Al introducir la expresión (4.49) en la ecuación (4.48), se obtiene que en playas con tamaño de grano uniforme longitudinalmente el parámetro  $A_{ref-dif}$  calculado en cada perfil es equivalente al cociente  $F$ . Así pues, en el caso particular de que no exista una variación longitudinal del tamaño de grano del sedimento en la zona de refracción-difracción, el parámetro  $A_{ref-dif}$  en el punto del perfil de playa analizado expresa precisamente el cociente  $F$  entre el parámetro de forma total del

perfil en este punto de la zona de influencia ( $A_{T\theta}$ ) frente al del perfil en la zona no afectada o zona exterior ( $A_{T\beta}$ ).

2. Por otra parte se encuentran las playas en las que el tamaño de grano del sedimento no es uniforme longitudinalmente (Cubelles, Altafulla, Nueva Andalucía 1, Nueva Andalucía 2 y Nueva Andalucía 3). En estos casos la ecuación (4.49) pierde su validez, quedando el parámetro  $A_{ref-dif}$  relacionado con el cociente  $F$  mediante la ecuación (4.48).

### 9.3.2. ESTUDIO DE LA CURVATURA DE LA AMPLITUD DE ONDA

En el apartado 9.2. se derivó una expresión (ecuación 4.44) para la obtención del parámetro de forma del perfil de playa en zonas de refracción-difracción, quedando este parámetro, mediante la mencionada expresión, directamente relacionado con la curvatura de la amplitud de onda (como ya fue definido en el correspondiente apartado la curvatura de la amplitud de onda hace referencia a la derivada segunda de esta magnitud con respecto a la dirección transversal a la dirección de propagación principal). Este es el motivo por el que en el presente apartado se explorará la vía analítica para la obtención de la curvatura de la amplitud de onda. Con base en el estudio realizado se propondrá el funcional a utilizar para estimar la curvatura, y como consecuencia también el del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$ .

Como el término de la curvatura de la amplitud de onda se calcula en rotura, se utilizan las expresiones derivadas en el capítulo 7 de la anterior sección de la Tesis para determinar las características del oleaje en rotura en las zonas objeto de estudio. En concreto, se utilizan las ecuaciones (3.38) y (3.40) para la estimación del coeficiente de difracción. Ambas expresiones se combinan en la ecuación (4.50). Los términos de esta ecuación tienen el mismo significado que el indicado en el mencionado capítulo de la Tesis.



$$K_d(\theta_D) = \sqrt{\left(\frac{50(\tanh(\gamma\theta_D) + 1)}{100}\right)^\alpha} \quad (4.50)$$

Con la idea de obtener un funcional para la curvatura, la curvatura de la amplitud de onda se puede asimilar a la curvatura del coeficiente de difracción. Adicionalmente, las variaciones en la dirección  $y$  se equiparan a las variaciones en el ángulo  $\theta_D$ . Téngase en cuenta que calcular las derivadas segundas en este último ángulo, es idéntico que obtener las derivadas segundas en el ángulo  $\theta$ , que fue definido en la figura 4.12. En la ecuación (4.51) se presenta la relación geométrica entre ambos ángulos (son complementarios). En dicha ecuación  $\theta$  está expresado en grados y  $\theta_D$  debe ser expresado en radianes. Todas las consideraciones expuestas en este párrafo quedan indicadas mediante la expresión (4.52).

$$\theta_D = (90 - \theta) \frac{\pi}{180} \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \simeq \frac{\partial^2 K_d}{\partial y^2} \simeq \frac{\partial^2 K_d}{\partial \theta_D^2} = \frac{\partial^2 K_d}{\partial \theta^2} \quad (4.52)$$

Nótese que cuando se está haciendo referencia al ángulo  $\theta$  se ha definido medido en la línea de costa (véase figura 4.12), aunque en realidad debiera ser el ángulo en el punto de rotura, pues así se obtuvo la formulación en la anterior sección de la Tesis. Sin embargo, este matiz será tratado y solventado posteriormente.

Realizando la doble derivación indicada en la ecuación (4.52) del coeficiente de difracción de la ecuación (4.50) se obtiene la expresión (4.53). A partir de este momento se va a denotar a la expresión (4.53) como la *curvatura completa*.

$$\frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \approx \frac{\partial^2 K_d}{\partial \theta_D^2} = \frac{-\alpha \gamma^2}{2^{\frac{\alpha+1}{2}}} \left( \frac{2(\tanh(\gamma\theta_D) + 1)^{\frac{\alpha-1}{2}} \sinh(\gamma\theta_D)}{\cosh^3(\gamma\theta_D)} + \frac{\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) (\tanh(\gamma\theta_D) + 1)^{\frac{\alpha-2}{2}}}{\cosh^4(\gamma\theta_D)} \right) = \quad (4.53)$$

$$\frac{-\alpha \gamma^2 (\tanh(\gamma\theta_D) + 1)^{\frac{\alpha-2}{2}}}{2^{\frac{\alpha+1}{2}} \cosh^4(\gamma\theta_D)} \left( 2(\tanh(\gamma\theta_D) + 1) \sinh(\gamma\theta_D) \cosh(\gamma\theta_D) + \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \right)$$

Llegados a este punto, se debe prestar atención a la ecuación (4.54) en la que se expresa el valor del parámetro  $\gamma\theta_D$ . Con tal fin, se ha utilizado la ecuación (4.51) y se ha tenido en cuenta la forma de calcular el parámetro  $\gamma$ , que fue indicada en el capítulo 7 de la anterior sección de la Tesis.

$$\gamma\theta_D = \frac{C_l(90-\theta) \frac{\pi}{180}}{\alpha_{min} \frac{\pi}{180}} = \frac{C_l(90-\theta)}{\alpha_{min}} = \frac{C_l(90-\theta)}{90-\beta} \quad (4.54)$$

En la ecuación (4.54),  $C_l$  es un coeficiente que consigue que el coeficiente de difracción sea la unidad en  $\theta$  igual a  $\beta$ . Por lo tanto, su valor se calcula despejándolo de la ecuación (4.55).

$$K_d = 1 = \sqrt{\left( \frac{50(\tanh(C_l) + 1)}{100} \right)^\alpha} \quad (4.55)$$

El principal problema que se encuentra en la utilización de la *curvatura completa*, independientemente de lo farragosa que es la ecuación (4.53), es el hecho de que no se cumple que la curvatura sea nula en  $\theta$  igual a  $\beta$  (lo cual fue analizado para diferentes valores del parámetro  $\alpha$  y del  $\beta$ , observándose que el grado de acercamiento es mayor para valores de  $\alpha$  y de  $\beta$  menores). Esta condición es imprescindible pues, como ya se comentó previamente, en el perfil exterior ( $\theta=\beta$ ) el valor del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  vale la unidad, y siguiendo la expresión (4.44) esto sólo ocurre cuando la curvatura es nula.

Así pues, con la idea de que la expresión de la curvatura debe ser un funcional de los parámetros relevantes  $\theta$  y  $\beta$ , se buscan expresiones para definir ésta, con base en los mencionados parámetros.

Como fase previa se presentan en las expresiones (4.56) y (4.57) las *curvaturas completas* para los dos valores extremos del parámetro  $\alpha$  establecidos en el capítulo 7 de la anterior sección de la Tesis ( $\alpha=1$  en la ecuación 4.56 y  $\alpha=2$  en la ecuación 4.57).

$$\alpha = 1 \Rightarrow \frac{\partial^2 K_d}{\partial \theta_D^2} = \frac{-\gamma^2 \left( 2(\tanh(\gamma\theta_D) + 1) \sinh(\gamma\theta_D) \cosh(\gamma\theta_D) + \frac{1}{2} \right)}{2^{\frac{3}{2}} \cosh^4(\gamma\theta_D) (\tanh(\gamma\theta_D) + 1)^{\frac{3}{2}}} \quad (4.56)$$

$$\alpha = 2 \Rightarrow \frac{\partial^2 K_d}{\partial \theta_D^2} = -\gamma^2 \frac{\sinh(\gamma\theta_D)}{\cosh^3(\gamma\theta_D)} \quad (4.57)$$

Las expresiones (4.56) y (4.57) aparecen gráficamente representadas en la figura 4.13 (en concreto la magnitud representada es la curvatura escalada con el parámetro  $\gamma$  elevado al cuadrado). En esta figura se puede observar la forma que adopta la curvatura. Independientemente del valor del parámetro  $\alpha$  utilizado (es

decir, utilizar la ecuación 4.56 o bien la 4.57), la tendencia que sigue la curvatura es similar: en primer lugar es decreciente, más tarde alcanza un mínimo y posteriormente vuelve a crecer. Sin embargo, el funcional expresado mediante la ecuación (4.57) posee ventajas con respecto al expresado con la ecuación (4.56), como son su mayor simplicidad analítica y, en especial, el hecho de que para valores del parámetro  $\gamma\theta_D$  nulos la curvatura sea nula también.

Como consecuencia de todo lo comentado, el funcional que se propone es similar a la ecuación (4.57). Ahora bien, el parámetro  $\gamma\theta_D$  debe ser sustituido por otro parámetro que incluya el ángulo  $\theta$  y el ángulo  $\beta$ . Adicionalmente, este parámetro se debe escoger de tal forma que en el perfil exterior ( $\theta=\beta$ ) el valor del parámetro de forma  $A_{ref-dif\beta}$  sea la unidad (curvatura nula).

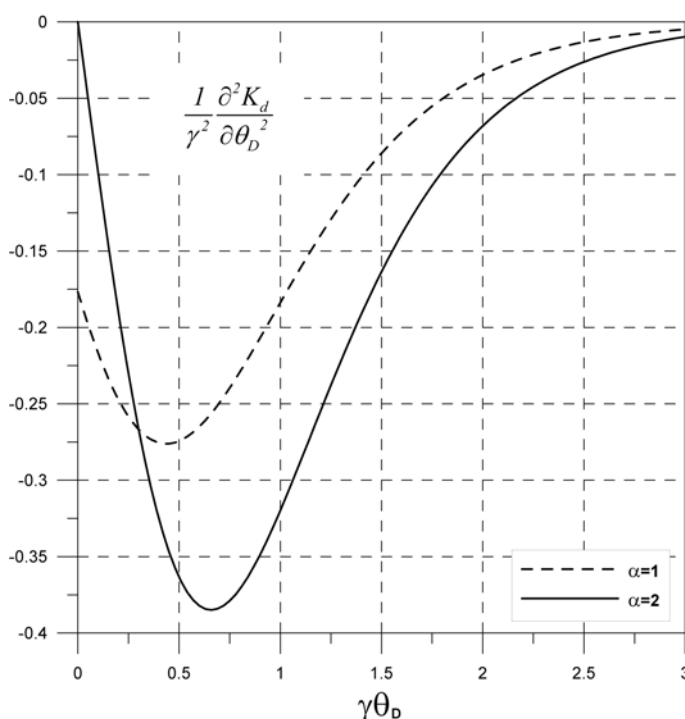


Figura 4.13- Forma que adopta la *curvatura completa* para los valores extremos del parámetro  $\alpha$

Finalmente y con estas consideraciones, la expresión que se propone para la curvatura queda recogida mediante la ecuación (4.58), denotándose como *curvatura simplificada* para diferenciarla de la *curvatura completa*. Merece la pena comentar que la expresión propuesta en la ecuación (4.58) ya lleva incluido el coeficiente multiplicador de la curvatura de la ecuación (4.44), adicionalmente a ésta.

$$\frac{g}{\gamma_b \omega^2} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} = P_a \frac{\sinh \left( P_b \left( \frac{\theta}{\beta} - 1 \right) \right)}{\cosh^3 \left( P_b \left( \frac{\theta}{\beta} - 1 \right) \right)} \quad (4.58)$$

Mediante la expresión propuesta en la ecuación (4.58), la curvatura queda definida por medio de dos parámetros de calibración: el parámetro  $P_a$  y el parámetro  $P_b$ . Ambos parámetros se calibrarán con base en los datos de campo indicados en el apartado 8.3.1. del anterior capítulo. La expresión (4.58) puede ser introducida en la ecuación (4.44), obteniéndose el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  del perfil de playa mediante la ecuación (4.59).

$$A_{ref-dif} = \left( \frac{I}{I + \frac{g}{\gamma_b \omega^2} \frac{\partial^2 a}{\partial y^2}} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{I}{\left( I + P_a \frac{\sinh \left( P_b \left( \frac{\theta}{\beta} - 1 \right) \right)}{\cosh^3 \left( P_b \left( \frac{\theta}{\beta} - 1 \right) \right)} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (4.59)$$

Con carácter ilustrativo, en la figura 4.14 se representa la formulación propuesta para determinar el parámetro  $A_{ref-dif}$  indicada en la ecuación (4.59) para un caso particular de valores de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$ . Es muy interesante prestar

atención a la forma de esta curva: en primer lugar es creciente, más tarde alcanza el máximo y posteriormente vuelve a decrecer. Este comportamiento del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  es acorde con el comportamiento de la curvatura, pues siguen tendencias opuestas. Al determinar el punto de mínima curvatura se está obteniendo el perfil con máximo valor del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$ .

Adicionalmente, en la figura 4.14 se indica el significado de los dos parámetros de calibración de la ecuación (4.59). El parámetro  $P_b$  está relacionado con la localización del perfil de playa en el que se obtiene un valor del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo. Una vez determinado este parámetro, el parámetro  $P_a$  define la magnitud del parámetro  $A_{ref-dif}$  en este perfil (es decir, en el perfil de playa con valor máximo de  $A_{ref-dif}$ ). El parámetro  $P_a$ , como ya se pudo observar en la figura 4.13 y como posteriormente se podrá verificar al analizar los perfiles medidos en playas, es siempre negativo (la curvatura es negativa).

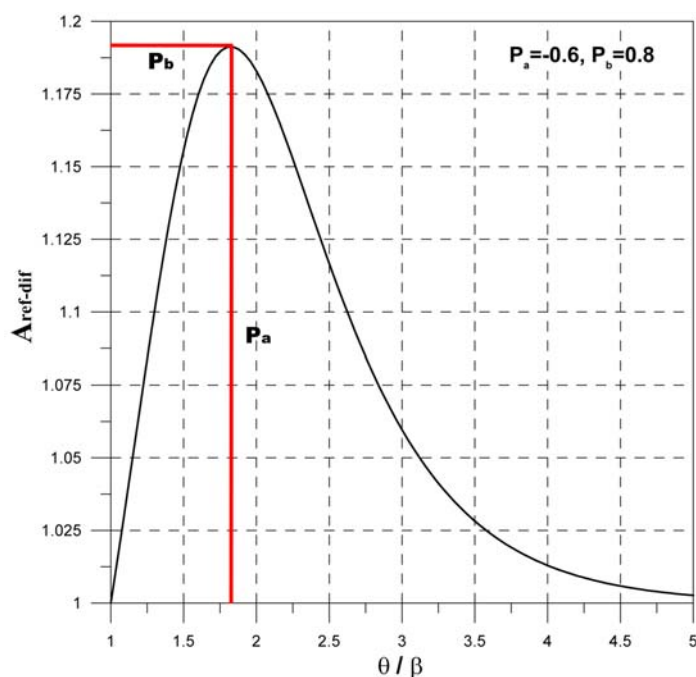


Figura 4.14- Formulación propuesta para el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  y significado de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  de esta formulación

## 9.4. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO DE FORMA $A_{ref-dif}$ MÁXIMO

Tal y como se ha determinado en el anterior apartado, el perfil de playa con  $A_{ref-dif}$  máximo queda localizado al identificar el punto de curvatura mínima de la amplitud de onda a lo largo de la playa. De ahí la importancia de estudiar las leyes de curvaturas para la definición de este punto. Por consiguiente, en este apartado se obtendrán diferentes expresiones que definen el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo. Asimismo, téngase presente que como el perfil de máximo  $A_{ref-dif}$  está ligado con los parámetros de calibración  $P_a$  y  $P_b$  de la formulación (4.59) propuesta, las relaciones que se van a derivar para definir este parámetro de forma máximo van a contribuir en el establecimiento de expresiones para estos parámetros de calibración.

### 9.4.1. CURVATURA COMPLETA

En una primera fase se estudia la ley de mínimos para la *curvatura completa* de la ecuación (4.53). El valor del parámetro  $\gamma\theta_D$  que minimiza esta curvatura, y por lo tanto, que determina el perfil con  $A_{ref-dif}$  máximo, denotado como  $\gamma\theta_{D \max}$ , se expresa mediante la ecuación (4.60). En esta ecuación *ArcCosh* representa el arco coseno hiperbólico.

$$\gamma\theta_{D \max} = \frac{\text{ArcCosh} \left( \frac{8 + 12\alpha + 2\alpha^2 + 3\alpha^3 + (\alpha - 2) \left( (2 + \alpha)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2 + 5\alpha} \right)}{8\alpha^2} \right)}{2} \quad (4.60)$$

Haciendo uso de la expresión (4.54), la ecuación (4.60) se puede representar mediante la ecuación (4.61).

$$\left(\frac{90-\theta}{\alpha_{min}}\right)_{max} = \left(\frac{90-\theta}{90-\beta}\right)_{max} = f(\alpha) \quad (4.61)$$

con,

$$f(\alpha) = \frac{\text{ArcCosh}\left(\frac{8+12\alpha+2\alpha^2+3\alpha^3+(\alpha-2)\left((2+\alpha)^{\frac{3}{2}}\sqrt{2+5\alpha}\right)}{8\alpha^2}\right)}{2C_1} \quad (4.62)$$

Operando en la expresión (4.61) se deriva la ecuación (4.63).

$$\boxed{\left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} = \left(\frac{90}{90-\beta} - f(\alpha)\right)\left(\frac{90}{\beta} - 1\right)} \quad (4.63)$$

La ecuación (4.63) es relevante, pues está indicando que para cada valor del parámetro  $\alpha$  (es decir, para un tipo de oleaje) y del parámetro  $\beta$ , existe un valor del cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  que minimiza la curvatura de la amplitud de onda, o equivalentemente que maximiza  $A_{ref-dif}$ . La relación establecida mediante la ecuación (4.63) queda gráficamente representada en la figura 4.15 para los dos valores extremos del parámetro  $\alpha$ . Se observa que esta relación no es especialmente sensible con este último parámetro. Asimismo, en la figura 4.15 se puede observar el correspondiente ángulo  $\theta$  que maximiza  $A_{ref-dif}$  en función de  $\beta$ .

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, como se comentó con anterioridad, aunque se está empleando el valor del ángulo  $\theta$  en la línea de costa, como se utiliza



la formulación propuesta en el capítulo 7 de la anterior sección de la Tesis, para ser estrictos se debiera tomar el valor del ángulo en el punto de rotura.

Con la idea de contemplar el matiz descrito en el párrafo anterior, se introduce un nuevo coeficiente  $C_2$ , el cual permite convertir el valor del ángulo  $\alpha_{min}$  medido en rotura al correspondiente valor equivalente en la costa  $\alpha_{equi}$ , (véase figura 4.16).

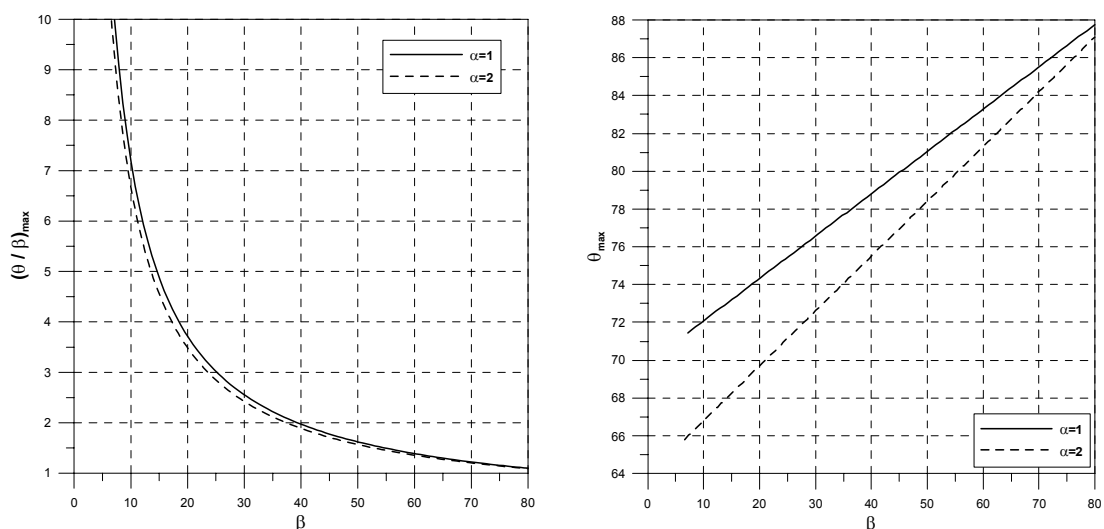


Figura 4.15- Relaciones entre el cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  (izquierda) y el ángulo  $\theta$  (derecha) que definen el perfil de playa con  $A_{ref-dif}$  máximo con respecto al ángulo  $\beta$  (curvatura completa mínima)

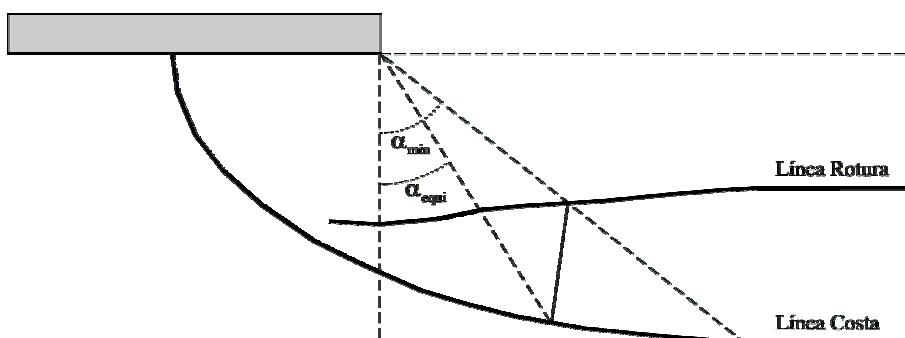


Figura 4.16- Equivalencia para realizar el cambio de ángulos medidos en rotura a ángulos medidos en costa

El ángulo  $\alpha_{equi}$  se expresa mediante la ecuación (4.64).

$$\alpha_{equi} = \frac{\alpha_{min}}{C_2} \quad (4.64)$$

Teniendo en cuenta la expresión (4.64), la expresión (4.54) se redefine mediante la ecuación (4.65).

$$\gamma\theta_D = \frac{C_1(90-\theta)\frac{\pi}{180}}{\frac{\alpha_{min}}{C_2}\frac{\pi}{180}} = \frac{C_1C_2(90-\theta)}{\alpha_{min}} = \frac{C_1C_3(90-\theta)}{\beta} \quad (4.65)$$

con,

$$C_3 = C_2 \frac{\beta}{\alpha_{min}} \quad (4.66)$$

Haciendo uso de la expresión (4.65), la expresión (4.61) se expresa mediante la ecuación (4.67), con  $f(\alpha)$  determinado, al igual que anteriormente, con la ecuación (4.62).

$$\left( \frac{C_2(90-\theta)}{\alpha_{min}} \right)_{max} = \left( \frac{C_3(90-\theta)}{\beta} \right)_{max} = f(\alpha) \quad (4.67)$$

Operando en la expresión (4.67) se deriva la ecuación (4.68).

$$\begin{aligned} \left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} &= \left(C_2 \frac{90}{90-\beta} - f(\alpha)\right) \left(\frac{90}{\beta} - 1\right) \frac{1}{C_2} = \\ &\left(C_3 \frac{90}{\beta} - f(\alpha)\right) \left(\frac{90}{\beta} - 1\right) \frac{\beta}{90-\beta} \frac{1}{C_3} = \\ &\frac{90}{90-\beta} \left(\frac{90}{\beta} - 1\right) + \frac{f(\alpha)}{C_3(90-\beta)} (\beta - 90) \end{aligned} \quad (4.68)$$

En este caso, a diferencia de en la ecuación (4.63), existe un valor del cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  que minimiza la curvatura de la amplitud de onda, o equivalentemente que maximiza  $A_{ref-dif}$ , pero que no sólo depende de los parámetros  $\alpha$  (tipo de oleaje) y  $\beta$ , sino también del coeficiente  $C_2$  o del  $C_3$ . Posteriormente se describirán diferentes formas de definir estos dos últimos coeficientes.

#### 9.4.2. CURVATURA SIMPLIFICADA

El mínimo de la *curvatura simplificada* indicada en la ecuación (4.58) y máximo de la expresión (4.59) propuesta en la Tesis para la determinación del parámetro  $A_{ref-dif}$ , adopta una expresión más sencilla, expresándose mediante la ecuación (4.69). En esta ecuación  $ArcTanh$  representa la arco tangente hiperbólica.

$$\left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} = \frac{ArcTanh\left(\sqrt{\frac{1}{3}}\right)}{P_b} + 1 \quad (4.69)$$

La relación expresada mediante la ecuación (4.69) es interesante, pues como se especificó en el apartado 9.3.2., existe una relación directa entre el parámetro  $P_b$  y la localización del perfil cuyo parámetro  $A_{ref-dif}$  es máximo (mínima curvatura).

### 9.4.3. OTRAS RELACIONES: HÍBRIDOS

En este apartado se van a describir una serie de relaciones para determinar la ubicación del perfil con  $A_{ref-dif}$  máximo (mínima curvatura). Estas relaciones surgen de híbridos entre los dos anteriores apartados.

#### 9.4.3.1. Primera alternativa

Una primera alternativa consiste en, basándose en la ecuación (4.68) (*curvatura completa*), tener en cuenta una serie de consideraciones para definir el término  $C_3$ . Como ya se comentó en previos apartados, el principal problema que tenía el utilizar la *curvatura completa* tal cual era que no se cumplía que en  $\theta$  igual a  $\beta$  la curvatura fuese nula. Sin embargo, por el hecho de introducir el coeficiente  $C_3$ , se pretende solventar esta deficiencia.

En el caso de que el coeficiente  $\alpha$  sea dos es imposible que la curvatura sea nula, a no ser que  $C_3$  sea nulo también, lo cual carece de sentido. En el caso de que el coeficiente  $\alpha$  sea uno, la condición para que la curvatura se anule en  $\theta$  igual a  $\beta$  queda reflejada mediante la expresión (4.70).

$$\gamma_{\theta_D} = -\text{ArcCosh}\left(\frac{3}{2\sqrt{2}}\right) = \frac{C_1 C_3 (90 - \beta)}{\beta} \Rightarrow C_3 = \frac{-\text{ArcCosh}\left(\frac{3}{2\sqrt{2}}\right)\beta}{C_1 (90 - \beta)} \quad (4.70)$$

Así pues, teniendo en cuenta las ecuaciones (4.68) y (4.70), se obtiene una nueva relación para el cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  que minimiza la curvatura de la amplitud de onda, o equivalentemente que maximiza  $A_{ref-dif}$ , en función de  $\beta$ . Esta relación se indica en la ecuación (4.71). No se debe olvidar que esta expresión sólo es válida para un valor de  $\alpha$  igual a la unidad. La ecuación (4.71) se representa en la figura 4.17. Asimismo, en esta figura se puede observar el correspondiente ángulo  $\theta$  que maximiza  $A_{ref-dif}$  en función de  $\beta$ .

$$\left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} = \frac{90}{90-\beta} \left(\frac{90}{\beta} - 1\right) + \frac{C_1 f(\alpha)}{ArcCosh\left(\frac{3}{2\sqrt{2}}\right)} \left(\frac{90}{\beta} - 1\right) \quad (4.71)$$

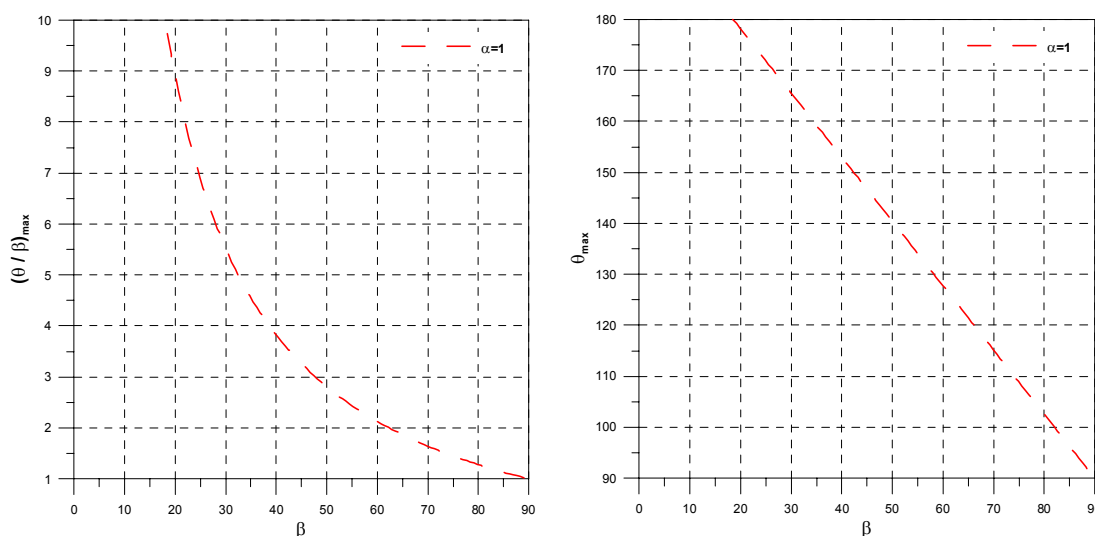


Figura 4.17- Relaciones entre el cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  (izquierda) y el ángulo  $\theta$  (derecha) que definen el perfil de playa con  $A_{ref-dif}$  máximo con respecto al ángulo  $\beta$  para  $\alpha=1$  (*curvatura completa mínima, ángulo corregido con  $C_3$* )

#### 9.4.3.2. Segunda alternativa

Otra alternativa consiste en hacer uso de la forma de la *curvatura simplificada* pero manteniendo la forma original del parámetro  $\gamma\theta_D$ . Por lo tanto, en

el caso en el que la curvatura venga representada con una función del tipo de la expresión (4.72), el mínimo de ésta (y máximo de  $A_{ref-dif}$ ) se obtiene con la expresión (4.73).

$$\frac{\partial^2 a}{\partial y^2} = f\left(\frac{\sinh(\gamma\theta_D)}{\cosh^3(\gamma\theta_D)}\right) \quad (4.72)$$

$$(\gamma\theta_D)_{max} = ArcTanh\left(\sqrt{\frac{I}{3}}\right) \quad (4.73)$$

Por otra parte se puede hacer uso de la definición del parámetro  $\gamma\theta_D$  de la ecuación (4.65) y de la expresión de  $C_3$  derivada en la ecuación (4.70), quedando la expresión (4.73) representada con la ecuación (4.74).

$$\begin{aligned} ArcTanh\left(\sqrt{\frac{I}{3}}\right) &= \left(\frac{C_1 C_3 (90 - \theta)}{\beta}\right)_{max} = \\ &= \frac{-ArcCosh\left(\frac{3}{2\sqrt{2}}\right)\beta}{(90 - \beta)} \left(\frac{90}{\beta} - \left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max}\right) \end{aligned} \quad (4.74)$$

Operando en la expresión (4.74) se obtiene la ecuación (4.75).

$$\boxed{\left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} = \frac{90}{\beta} + \frac{ArcTanh\left(\sqrt{\frac{I}{3}}\right)(90 - \beta)}{ArcCosh\left(\frac{3}{2\sqrt{2}}\right)\beta}} \quad (4.75)$$

La ecuación (4.75) aparece representada en la figura 4.18. Al igual que la alternativa anterior, esta curva sólo es válida para un valor del parámetro  $\alpha$  igual a la unidad. En la figura 4.18 también se puede observar el correspondiente ángulo  $\theta$  que maximiza  $A_{ref-dif}$  en función de  $\beta$ .

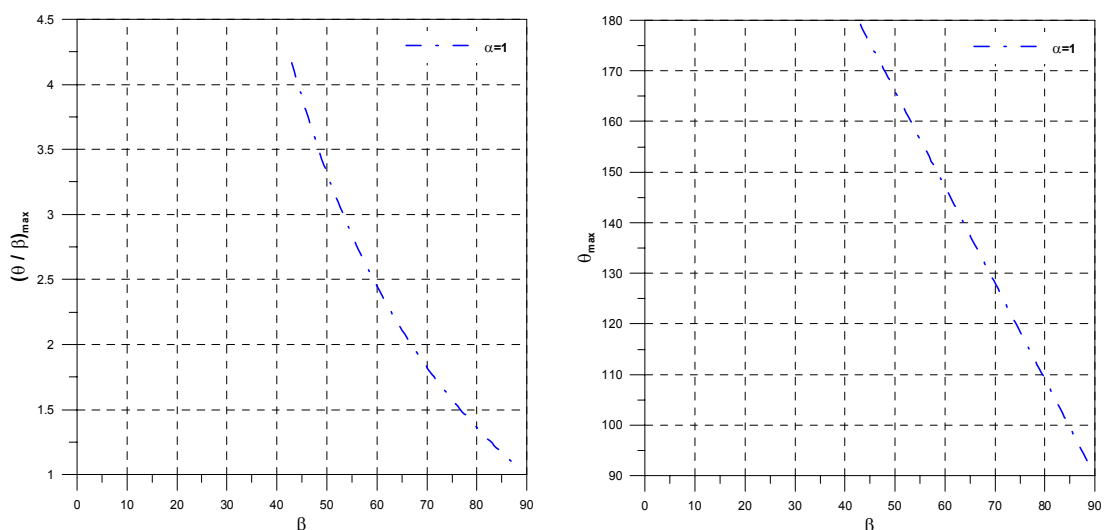


Figura 4.18- Relaciones entre el cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  (izquierda) y el ángulo  $\theta$  (derecha) que definen el perfil de playa con  $A_{ref-dif}$  máximo con respecto al ángulo  $\beta$  para  $\alpha=1$  (*curvatura simplificada* mínima, ángulo corregido con  $C_3$ )

### 9.4.3.3. Tercera alternativa: óptima

Finalmente, esta alternativa utiliza la expresión del mínimo de la *curvatura completa* (ecuación 4.68), pero para definir el valor del coeficiente  $C_3$  tiene en cuenta las siguientes consideraciones.

En primer lugar, el parámetro  $\gamma\theta_D$  en ambas curvaturas (*curvatura completa* y *curvatura simplificada*) debe ser idéntico, como aparece indicado en la ecuación (4.76).

$$\gamma\theta_D = \frac{C_1 C_3 (90 - \theta)}{\beta} = P_b \left( \frac{\theta}{\beta} - I \right) \quad (4.76)$$

A continuación se impone que los máximos de ambas curvaturas sean coincidentes. Esto se consigue definiendo el parámetro  $P_b$  a partir de la relación que minimiza la *curvatura simplificada* y que quedó expresada mediante la ecuación (4.69). Teniendo en cuenta este valor del parámetro  $P_b$  en la ecuación (4.76), resulta la expresión (4.77).

$$\gamma_{\theta_{D \max}} = \left( \frac{C_1 C_3 (90 - \theta)}{\beta} \right)_{\max} = \frac{\text{ArcTanh} \left( \sqrt{\frac{1}{3}} \right)}{\left( \left( \frac{\theta}{\beta} \right)_{\max} - 1 \right)} \left( \left( \frac{\theta}{\beta} \right)_{\max} - 1 \right) = \text{ArcTanh} \left( \sqrt{\frac{1}{3}} \right) \quad (4.77)$$

Por consiguiente, de la expresión (4.77) se puede obtener el valor del coeficiente  $C_3$  (véase ecuación 4.78).

$$C_3 = \frac{\text{ArcTanh} \left( \sqrt{\frac{1}{3}} \right)}{C_1 \left( \frac{90}{\beta} - \left( \frac{\theta}{\beta} \right)_{\max} \right)} \quad (4.78)$$

El valor del coeficiente  $C_3$  de la ecuación (4.78) se introduce en la expresión del mínimo de la *curvatura completa* indicado en la ecuación (4.68), resultando la ecuación (4.79).



$$\left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} = \frac{90}{90-\beta} \left(\frac{90}{\beta} - 1\right) - \frac{C_1 f(\alpha) \left(\frac{90}{\beta} - \left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max}\right)}{ArcTanh\left(\sqrt{\frac{1}{3}}\right)} \quad (4.79)$$

Operando en la expresión (4.79) se obtiene la ecuación (4.80).

$$\left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} = \frac{\frac{90}{90-\beta} \left(\frac{90}{\beta} - 1\right) - \frac{C_1 f(\alpha)}{ArcTanh\left(\sqrt{\frac{1}{3}}\right)} \frac{90}{\beta}}{1 - \frac{C_1 f(\alpha)}{ArcTanh\left(\sqrt{\frac{1}{3}}\right)}} \quad (4.80)$$

Esta relación es válida para cualquier valor del parámetro  $\alpha$ , lo cual es una ventaja con respecto a las anteriores. La ecuación (4.80) se ha estudiado para diferentes valores del parámetro  $\alpha$  y se ha podido determinar que la relación obtenida es única, siendo independiente del valor elegido de dicho parámetro. Es más, haciendo nulo el término dependiente del parámetro  $\alpha$ , se obtiene la misma curva. Por lo que la ecuación (4.80) se redefine mediante la ecuación (4.81), siendo esta última una expresión que proporciona idénticos valores y que es más simple.

$$\boxed{\left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} = \frac{90}{90-\beta} \left(\frac{90}{\beta} - 1\right) = \frac{90}{\beta}} \quad (4.81)$$

La relación expresada mediante la ecuación (4.81) se representa en la figura 4.19. Adicionalmente, en esta figura se puede observar el correspondiente ángulo  $\theta$

que maximiza  $A_{ref-dif}$  en función de  $\beta$ . Nótese que este ángulo adopta un valor de noventa grados, siendo independiente de  $\beta$ .

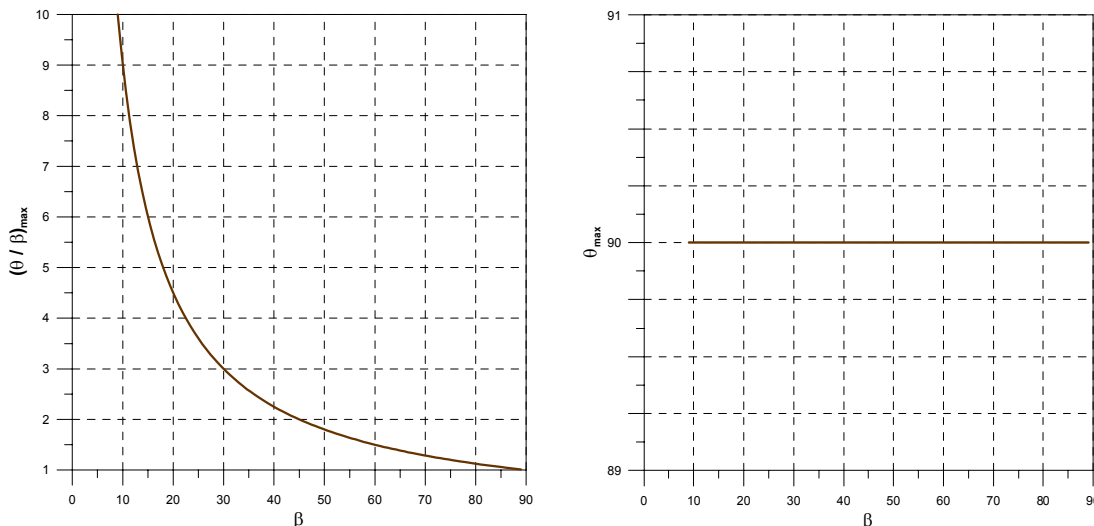


Figura 4.19- Relaciones entre el cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  (izquierda) y el ángulo  $\theta$  (derecha) que definen el perfil de playa con  $A_{ref-dif}$  máximo con respecto al ángulo  $\beta$  (*curvatura completa* y *curvatura simplificada* mínima, ángulo corregido con  $C_3$ )

Con carácter comparativo, todas las relaciones que han sido derivadas en este apartado para determinar la localización del perfil de playa con  $A_{ref-dif}$  máximo (*curvatura mínima*) se indican en la figura 4.20. Téngase presente que todas estas relaciones determinadas analíticamente, al establecer una dependencia entre el perfil con máximo  $A_{ref-dif}$  y el ángulo  $\beta$ , sugieren la posible relación entre los parámetros de calibración de la formulación propuesta ( $P_a$  y  $P_b$ ) con el ángulo  $\beta$ . Aunque todo esto será analizado en el siguiente capítulo por comparación con datos de campo, se adelanta que en dicho capítulo se comprobará que los perfiles medidos en campo siguen una ley similar a la indicada en la ecuación (4.81), pudiéndose determinar el parámetro  $P_b$  de la formulación propuesta, una vez definido el ángulo  $\beta$  de la playa. El parámetro  $P_a$  también se podrá relacionar con este último ángulo.

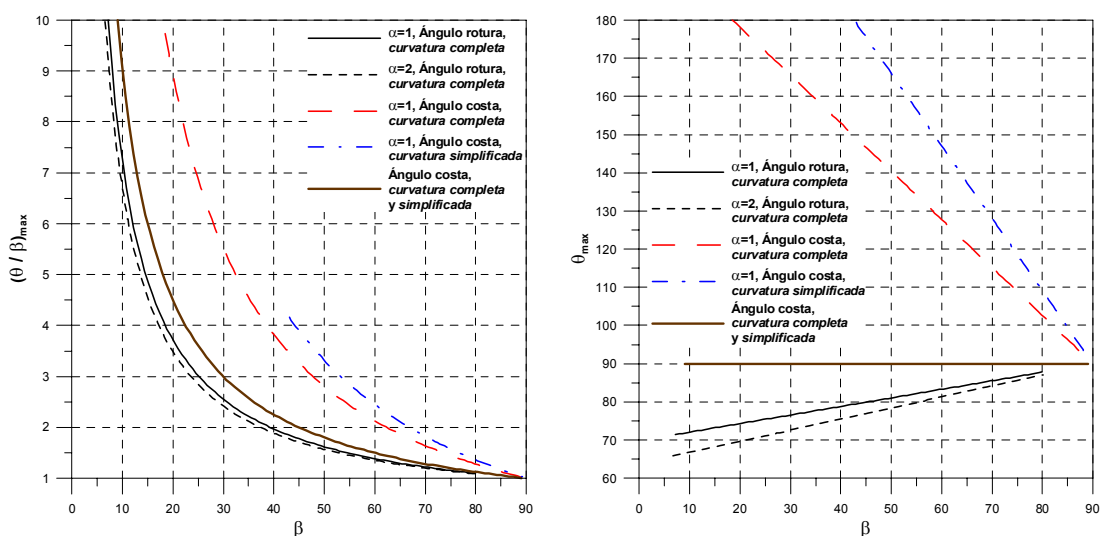


Figura 4.20- Relaciones entre el cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  (izquierda) y el ángulo  $\theta$  (derecha) que definen el perfil de playa con  $A_{ref-dif}$  máximo con respecto al ángulo  $\beta$

### 9.5. CONCLUSIONES

Los principales aportes de este capítulo son los siguientes:

- Se ha derivado una expresión analítica para definir el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción (ecuaciones 4.42 y 4.43). Dicha expresión es similar a la obtenida por Dean (1977), pero en este caso el parámetro de forma total  $A_T$  del perfil está compuesto por un parámetro asociado al tamaño de grano  $A_d$  y un parámetro asociado a la zona de refracción-difracción  $A_{ref-dif}$ .
- Se ha propuesto una expresión para la determinación del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  presente en la formulación derivada (ecuación 4.59). Esta expresión, además de poseer base analítica (ecuación 4.44), incorpora unos parámetros imprescindibles y tiene en consideración los datos de campo. La expresión establecida depende del ángulo  $\beta$  de delimitación de la zona de refracción-difracción, del ángulo  $\theta$  de localización del perfil y de dos parámetros de calibración ( $P_a$  y  $P_b$ ).
- Se ha estudiado el perfil de playa con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo (el cual se encuentra asociado con el punto con mínima curvatura de la amplitud de

onda a lo largo de la playa), relacionándose dicho perfil con los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  de calibración de la formulación propuesta. Se han analizado diferentes leyes de curvatura de la amplitud de onda, observándose la relación existente entre el ángulo  $\beta$  y el perfil con  $A_{ref-dif}$  máximo.

- Las relaciones establecidas entre el ángulo  $\beta$  y el perfil con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo han permitido sugerir que los parámetros de calibración  $P_a$  y  $P_b$  pueden también estar relacionados con este ángulo  $\beta$ .

## **CAPÍTULO 10**

### **CALIBRACIÓN CON DATOS DE CAMPO Y DISCUSIÓN DE LA FORMULACIÓN PROPUESTA**

---



## 10.1. INTRODUCCIÓN

En el anterior capítulo se propuso una expresión para la determinación del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción. Con el objetivo de definir completamente dicha formulación, es imprescindible la propuesta de expresiones para la determinación de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  presentes en la misma.

En este capítulo se va a realizar la calibración de ambos parámetros con base en los datos de campo de las playas del litoral español indicadas en el capítulo 8 y para las dos alternativas especificadas de definición del ángulo  $\beta$ : playas existentes ( $\beta$  de mejor ajuste) y diseño de playas (carácter predictivo,  $\beta=90-\alpha_{min}$ ). Finalmente se llevará a cabo una discusión de la formulación propuesta.

## 10.2. CALIBRACIÓN PARA PLAYAS EXISTENTES

De las dos posibilidades descritas en el capítulo 8 para la determinación del ángulo  $\beta$  que define la zona de refracción-difracción, en este apartado se seguirá la primera alternativa que corresponde a la indicada para playas existentes.

En cada uno de los perfiles de las playas de la base de datos, los cuales se indican en el anejo III, se determinó el parámetro  $A_{ref-dif}$  siguiendo el proceso que se encuentra detalladamente descrito en el anejo V. Posteriormente y con base en la expresión (4.59) propuesta en el anterior capítulo para determinar el parámetro  $A_{ref-dif}$ , en cada una de las playas se obtuvieron los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  óptimos que consiguen minimizar las diferencias entre valores medidos y valores determinados con la formulación propuesta.

En el anterior capítulo se establecieron una serie de relaciones entre el ángulo  $\beta$  y el perfil con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  máximo. Como este perfil se encuentra relacionado con los parámetros  $P_a$  y  $P_b$ , dichas relaciones sugieren la posible dependencia entre el ángulo  $\beta$  y los parámetros mencionados. Así pues, se van a proponer expresiones que consideran esta dependencia.

Una vez determinados los parámetros  $P_a$  y  $P_b$ , se mostrarán algunos resultados comparativos entre la formulación propuesta para determinar  $A_{ref-dif}$  y el mismo parámetro estimado con los perfiles medidos.

### 10.2.1. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO $P_b$

En la figura 4.21 se presentan los valores de  $P_b$  óptimos determinados a partir de los datos de campo (siguiendo el proceso indicado previamente) en función del ángulo  $\beta$ . Por otra parte y con carácter comparativo, en esta figura también se indican las relaciones derivadas en el apartado 9.4 del anterior capítulo (véase figura 4.20) entre el parámetro  $\beta$  y el cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  que maximizan el parámetro  $A_{ref-dif}$  para las diferentes condiciones. A partir de cada una de estas relaciones se ha determinado el parámetro  $P_b$  con la ecuación (4.82), (recuérdese que esta relación se obtuvo en el anterior capítulo, en concreto en la ecuación 4.69, indicando el mínimo de la curvatura simplificada, que corresponde al máximo de la expresión 4.59 propuesta en la Tesis para determinar el parámetro  $A_{ref-dif}$ ).

$$P_b = \frac{\text{ArcTanh}\left(\sqrt{\frac{I}{3}}\right)}{\left(\frac{\theta}{\beta}\right)_{max} - 1} \quad (4.82)$$

De la observación de la figura 4.21, se puede verificar la existencia de una relación entre el parámetro  $P_b$  y el ángulo  $\beta$ . Asimismo, se puede comprobar que de todas las curvas derivadas en el anterior capítulo, la más adecuada es la asociada a la línea más gruesa y que corresponde a la tercera de las alternativas del apartado 9.4.3. del capítulo 9, por eso fue denotada en el mencionado apartado como óptima.



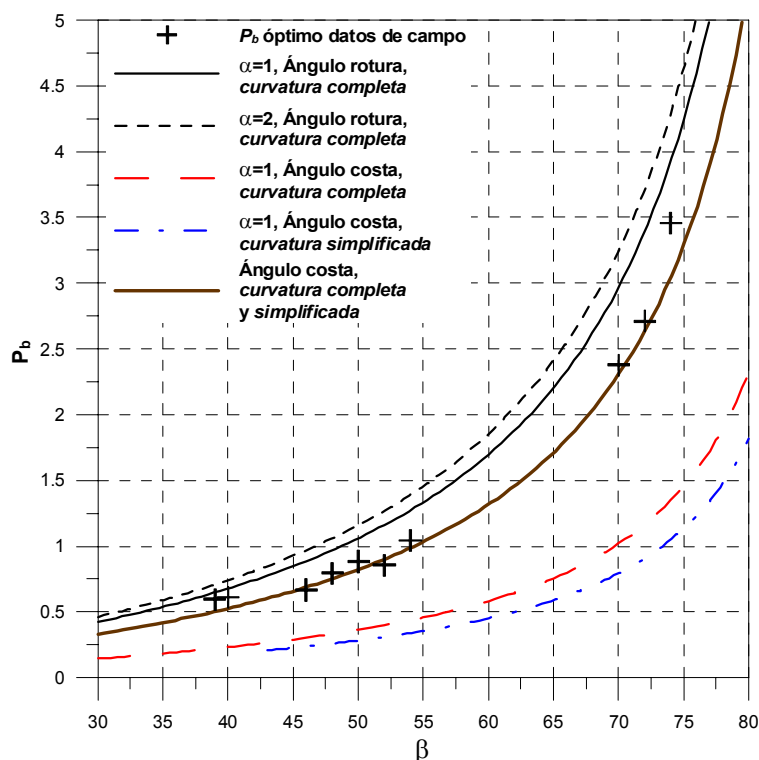


Figura 4.21- Comparación del parámetro  $P_b$  determinado con todas las relaciones obtenidas entre el parámetro  $\beta$  y el cociente  $\theta$  con respecto a  $\beta$  que definen el perfil de playa con parámetro  $A_{ref-dif}$  máximo frente al valor óptimo determinado con los datos de campo

Así pues, teniendo en cuenta las consideraciones del párrafo anterior, se buscan relaciones similares a la curva óptima. Esta curva se indica en la expresión (4.83) y ha sido determinada al introducir la ecuación (4.81) derivada en el anterior capítulo dentro de la ecuación (4.82).

$$P_b = \frac{\text{ArcTanh}\left(\sqrt{\frac{1}{3}}\right)}{\frac{90}{\beta} - 1} = \frac{\text{ArcTanh}\left(\sqrt{\frac{1}{3}}\right)}{\frac{90 - \beta}{\beta}} = \text{ArcTanh}\left(\sqrt{\frac{1}{3}}\right) \frac{\beta}{90 - \beta} \quad (4.83)$$

La expresión (4.83) es de considerable relevancia, pues permite establecer el funcional entre el parámetro  $P_b$  y el ángulo  $\beta$ . Consecuentemente, respetando el funcional expresado por la ecuación (4.83), se puede determinar el coeficiente  $K_{PB}$  de mejor ajuste a los datos de campo, siguiendo la ecuación (4.84).

$$P_b = \frac{K_{PB}}{\frac{90}{\beta} - 1} = \frac{K_{PB}}{90 - \beta} = K_{PB} \frac{\beta}{90 - \beta} \quad (4.84)$$

En la figura 4.22 se presenta una comparación entre la curva “teórica” indicada mediante la ecuación (4.83), cuyo  $K_{PB}$  es 0.658, frente a la curva de “mejor ajuste”, con un  $K_{PB}$  de 0.705. Como se puede observar, los valores del coeficiente son similares. Con el objetivo de poder identificar las playas en esta figura, éstas se han definido siguiendo la numeración de la tabla 4.1 del capítulo 8 (asimismo, en la figura 4.6 del mencionado capítulo se puede consultar la localización de cada playa).

Así pues, para la determinación del parámetro  $P_b$  se debe utilizar la expresión (4.85).

$$P_b = \frac{0.705}{\frac{90}{\beta} - 1} = \frac{0.705}{90 - \beta} = 0.705 \frac{\beta}{90 - \beta} \quad (4.85)$$

Nótese que con la expresión (4.85) el parámetro  $P_b$  es sólo función del ángulo  $\beta$ . Al aumentar el ángulo  $\beta$  el punto  $\theta$  con respecto a  $\beta$  donde se produce el máximo disminuye, aumentando de esta forma el valor del parámetro  $P_b$ .

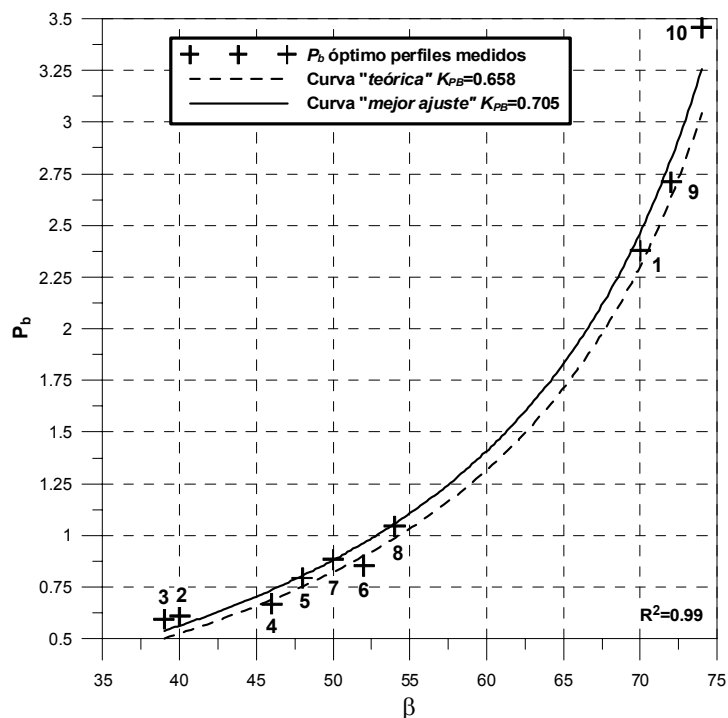


Figura 4.22- Relación entre el parámetro  $P_b$  y el ángulo  $\beta$  para la curva “teórica” y la curva de “mejor ajuste” frente a los valores óptimos de los datos de campo

Con carácter ilustrativo, para cada una de las playas se ha determinado el ángulo  $\theta$  (denotado como  $\theta_{max}$ ) de ubicación del perfil con máximo valor del parámetro  $A_{ref-dif}$ . Con este fin, se han utilizado los valores de  $P_b$  óptimos estimados con los datos de campo y la relación (4.69) derivada en el anterior capítulo. Estos valores se representan en la figura 4.23 frente al ángulo  $\beta$ . También se presentan los obtenidos con las relaciones derivadas en el apartado 9.4 del anterior capítulo (véase figura 4.20). Como se puede observar en la figura 4.23, los valores del ángulo  $\theta_{max}$  oscilan entre los 82 y 92 grados.

Otra relación interesante consecuencia de los cálculos anteriores se obtiene al introducir en la expresión (4.82) la ecuación (4.85) determinada para la obtención del parámetro  $P_b$ . Esta relación se presenta en la ecuación (4.86) y permite determinar el ángulo  $\theta_{max}$  en función del ángulo  $\beta$ . Dicha relación también se puede observar en la figura 4.23.

$$\theta_{max} = \beta + \frac{\text{ArcTanh}\left(\sqrt{\frac{I}{3}}\right)}{0.705}(90 - \beta) \approx 84.06 + 0.066\beta \quad (4.86)$$

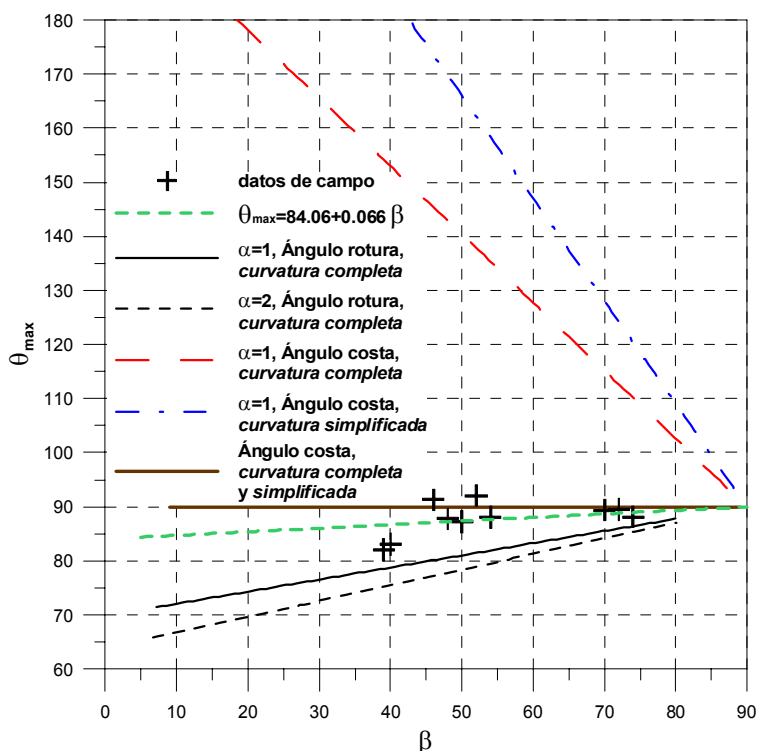


Figura 4.23- Comparación del ángulo  $\theta_{max}$  en función del ángulo  $\beta$  determinado con todas las relaciones obtenidas y la relación propuesta frente al valor determinado con los datos de campo

### 10.2.2. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO $P_a$

Así como el parámetro  $P_b$  está relacionado con la localización del perfil de playa con valor máximo del parámetro  $A_{ref-dif}$ , el parámetro  $P_a$  está ligado con la magnitud de este valor máximo.

A la expresión (4.59) para obtener el parámetro  $A_{ref-dif}$  se le introduce la expresión (4.84) del parámetro  $P_b$  y se particulariza para el punto de máximo, obteniéndose la ecuación (4.87), demostrándose lo comentado de que el valor de  $A_{ref-dif}$  máximo es función directa del parámetro  $P_a$ .

$$A_{ref-dif\ max} = \frac{I}{\left( I + P_a \frac{\sinh K_{PB}}{\cosh^3 K_{PB}} \right)^{\frac{2}{3}}} \quad (4.87)$$

Con la idea de obtener una estimación del parámetro  $P_a$  más precisa, que no sólo se base en el perfil medido de máximo valor del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$ , sino que utilice todos los perfiles definidos en cada playa, se tienen en cuenta los valores óptimos del parámetro en cuestión, determinados tal y como se especificó previamente (minimizando las diferencias entre valores medidos y valores estimados con la formulación propuesta para el parámetro  $A_{ref-dif}$ ).

En la figura 4.24 se representan los valores de  $P_a$  óptimos frente al ángulo  $\beta$  para todas las playas analizadas. Con el objetivo de poder identificar las playas en esta figura, éstas se han definido siguiendo la numeración de la tabla 4.1 del capítulo 8 (asimismo, en la figura 4.6 del mencionado capítulo se puede consultar la localización de cada playa).

Del estudio de la figura 4.24 se puede obtener una relación directa y simple entre el ángulo  $\beta$  y el parámetro  $P_a$ , la cual queda especificada mediante la ecuación (4.88), (en esta ecuación el ángulo  $\beta$  debe ser introducido en grados).

$$\boxed{P_a = -0.0238\beta + 0.6} \quad (4.88)$$

Como se adelantaba en previos apartados, el parámetro  $P_a$  siempre adopta valores negativos (curvatura negativa), y consecuentemente, el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  es siempre superior a la unidad (excepto en el perfil de referencia en  $\theta$  igual a  $\beta$  en el que  $A_{ref-dif}$  vale la unidad). A medida que aumenta el valor del ángulo  $\beta$  el parámetro  $P_a$  se hace más negativo, alcanzando  $A_{ref-dif}$  valores más elevados.

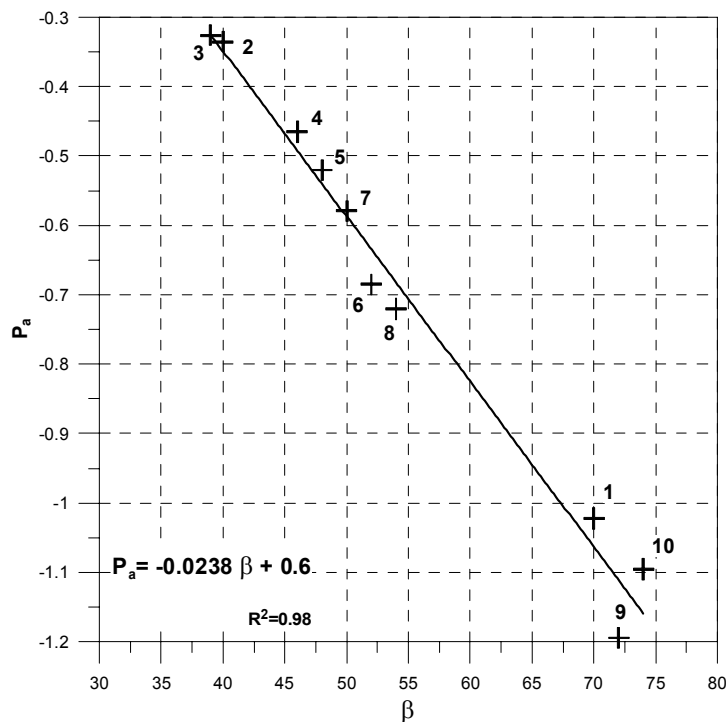


Figura 4.24- Relación entre el parámetro  $P_a$  y el ángulo  $\beta$

### 10.2.3. RESULTADOS

En este apartado se van a presentar los resultados obtenidos con la formulación propuesta para el perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción frente a los valores estimados con los datos de campo. Aunque con objeto de una mayor claridad en la lectura de este apartado en este capítulo sólo se muestran varios de estos resultados, en el anejo V se encuentran todos los casos estudiados, que corresponden a las playas descritas en el apartado 8.3.1. del capítulo 8.

Entre las playas analizadas se pueden distinguir dos casos:

1. Por una parte existen playas con tamaño de grano más o menos uniforme longitudinalmente (Salou, Almazora 1, Almazora 2, Garrucha y Benalmádena), en las que el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  coincide con el cociente  $F$  entre el parámetro de forma total del perfil estudiado (en un ángulo  $\theta$ ) con respecto al del perfil de comparación (en el ángulo  $\beta$ ). Esta relación quedó demostrada en el apartado 9.3.1. del anterior capítulo (véase ecuaciones 4.48 y 4.49 del capítulo 9). Un ejemplo de

este tipo de casos queda representado en la figura 4.25, en la que se muestran los resultados para la playa de Almazora 2. En esta figura se puede observar la capacidad de la fórmula propuesta de predecir no sólo las tendencias, sino también la magnitud del parámetro  $A_{ref-dif}$ , o equivalentemente del cociente indicado  $F$ . Merece la pena resaltar que en la zona de refracción-difracción, existe un perfil con parámetro  $A_{ref-dif}$  y pendiente máxima, a partir del cual la pendiente comienza a decrecer, tendiendo hacia la pendiente del perfil exterior o de referencia (ubicado en el ángulo  $\beta$ ), pero nunca puede ser menor que ésta.

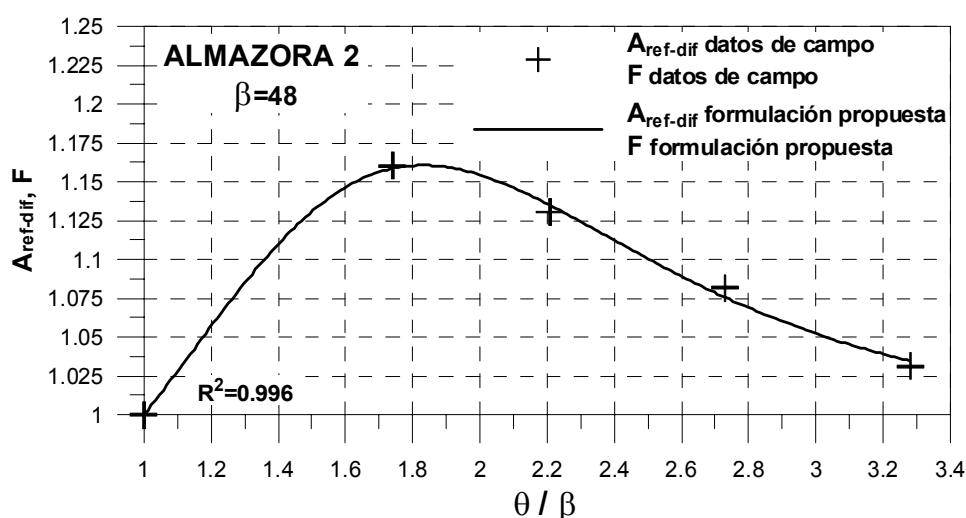


Figura 4.25- Comparación de  $A_{ref-dif}$  y el cociente  $F$  estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Almazora 2

2. Por otra parte se encuentran las playas en las que el tamaño de grano del sedimento no es uniforme longitudinalmente (Cubelles, Altafulla, Nueva Andalucía 1, Nueva Andalucía 2 y Nueva Andalucía 3). En estas situaciones, el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  no coincide con el cociente  $F$  entre el parámetro de forma total del perfil estudiado (en un ángulo  $\theta$ ) con respecto al del perfil de comparación (en el ángulo  $\beta$ ), (véase apartado 9.3.1. y ecuación 4.48 del capítulo 9). En las figuras 4.26 y 4.27 se muestran ambos valores ( $A_{ref-dif}$  y  $F$ ) para las playas de Cubelles y Nueva Andalucía 2, respectivamente. Es de considerable relevancia tener en cuenta que en los casos de tamaño de grano variable longitudinalmente, aunque el parámetro  $A_{ref-dif}$

sigue siempre la misma ley (creciente hasta el máximo y luego decreciente), el cociente  $F$  puede adoptar cualquier forma, dependiendo de la gradación longitudinal del sedimento, desde una tendencia idéntica a la del parámetro  $A_{ref-dif}$ , como en la playa de Cubelles (véase figura 4.26), hasta una tendencia principalmente decreciente, como es el caso de la playa de Nueva Andalucía 2 (véase figura 4.27). En este último caso, en la zona de influencia de los procesos de refracción-difracción, la pendiente del perfil de playa (caracterizada por el parámetro  $A_T$ ) es menor que la del perfil exterior de comparación, lo cual en el caso de tamaños de grano uniformes era imposible.

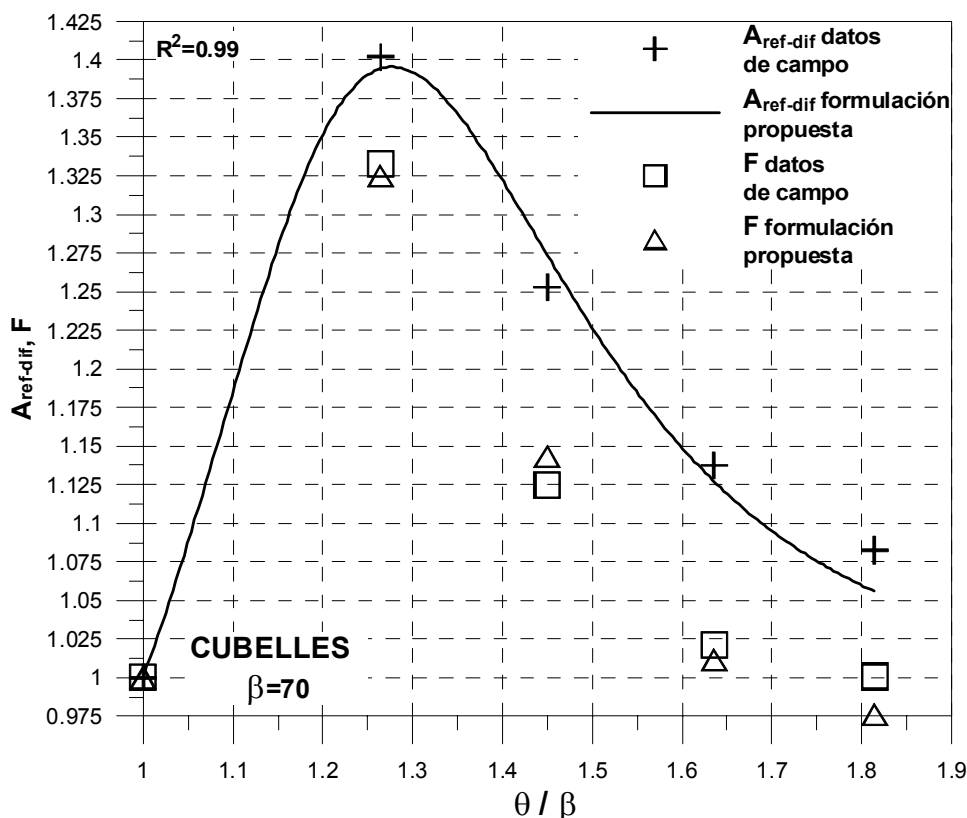


Figura 4.26- Comparación de  $A_{ref-dif}$  y el cociente  $F$  estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Cubelles



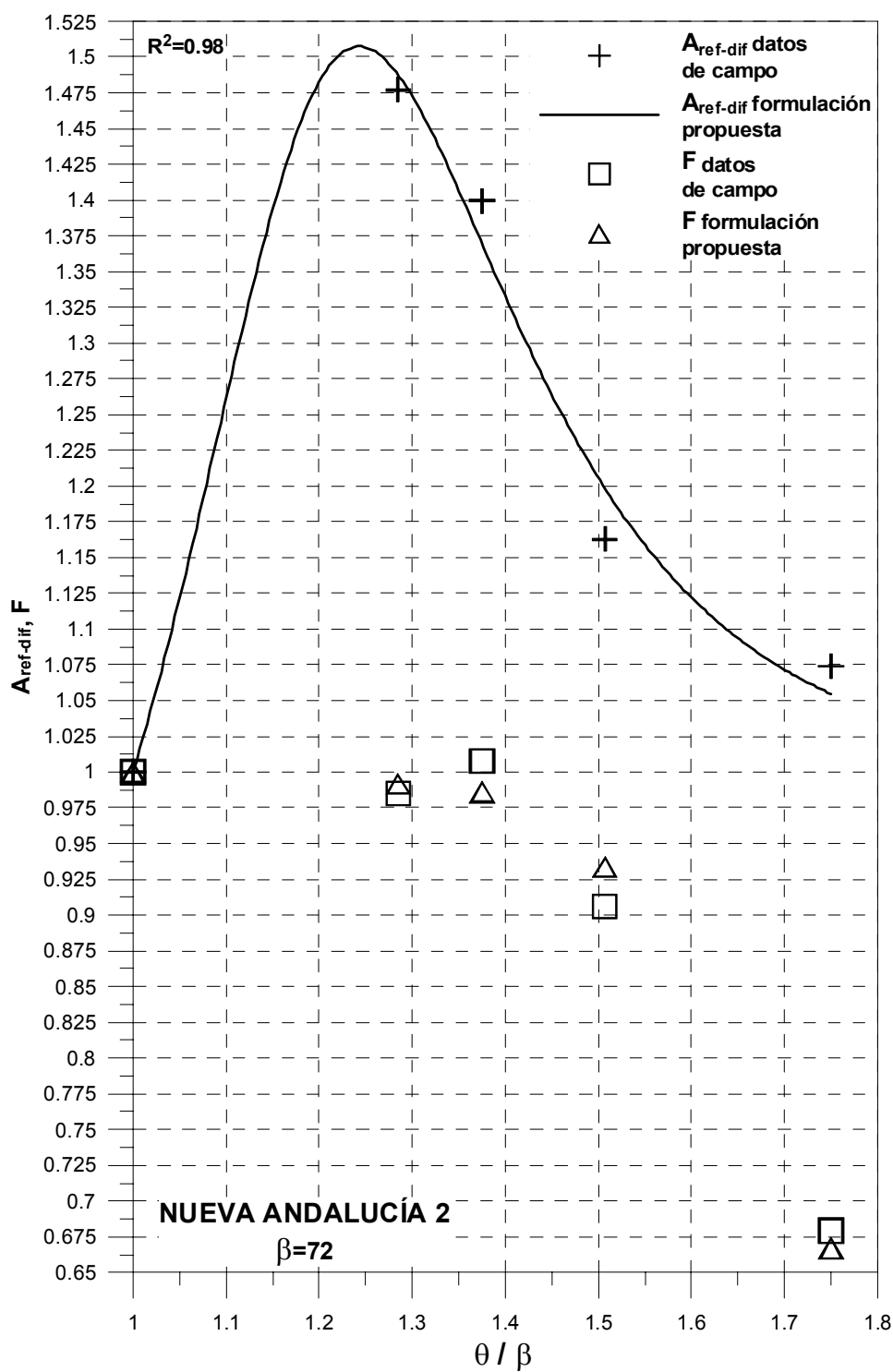


Figura 4.27- Comparación de  $A_{ref-dif}$  y el cociente  $F$  estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Nueva Andalucía 2

### 10.3. CALIBRACIÓN PARA DISEÑO DE PLAYAS

Este apartado es similar al anterior. Sin embargo, de las dos posibilidades descritas en el capítulo 8 para la determinación del ángulo  $\beta$  que define la zona de refracción-difracción, en este apartado se seguirá la segunda alternativa que corresponde a la indicada para diseño de playas (carácter predictivo,  $\beta$  determinado a partir del ángulo  $\alpha_{min}$  propuesto por González y Medina (2001) sabiendo que  $\beta=90-\alpha_{min}$ ).

Así pues, también en este caso en cada uno de los perfiles de las playas de la base de datos (véase anejo III) se determinó el parámetro  $A_{ref-dif}$ . Posteriormente y con base en la expresión (4.59) propuesta en el anterior capítulo para determinar el parámetro  $A_{ref-dif}$ , en cada una de las playas se obtuvieron los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  óptimos que consiguen minimizar las diferencias entre valores medidos y valores determinados con la formulación propuesta.

Una vez propuestas las correspondientes expresiones para la obtención de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$ , se mostrarán algunos resultados comparativos entre la formulación propuesta para determinar  $A_{ref-dif}$  y el mismo parámetro estimado con los perfiles medidos.

Merece la pena destacar que las expresiones que se van a proponer en este apartado poseen carácter predictivo, a diferencia de las del anterior apartado, pues estas últimas sólo podrán ser aplicables en el caso de que se estime el ángulo  $\beta$  de la playa real.

El estudio de este apartado se va a dividir en función de si las playas son desarrolladas o no lo son. Una playa que no es desarrollada se termina antes de que se alcance el perfil de comparación ubicado en el ángulo  $\beta$ , pudiendo existir incluso influencia de estructuras difractantes, solapándose de esta forma varias zonas de refracción-difracción. Esta es la razón por la que las playas no desarrolladas no se pueden utilizar para la calibración de los parámetros de la formulación propuesta. Por consiguiente, en una primera fase se determinarán los parámetros de calibración ( $P_a$  y  $P_b$ ) con base en las playas completas o desarrolladas. Posteriormente se

determinará la validez de la calibración efectuada en el caso de su aplicación a playas no desarrolladas, y finalmente se propondrá la forma de calcular este tipo de playas.

### **10.3.1. PLAYAS DESARROLLADAS**

En el apartado 10.2., al obtenerse el ángulo  $\beta$  de mejor ajuste, todas las playas de la base de datos eran desarrolladas y sin influencia entre zonas de refracción-difracción. Por lo que todas ellas pudieron ser utilizadas en la calibración de los parámetros de la formulación propuesta. Sin embargo, en este apartado al determinarse el ángulo  $\beta$  a partir del ángulo  $\alpha_{min}$  propuesto por González y Medina (2001), bastantes playas son no desarrolladas. Las únicas playas desarrolladas, que son las que se van a considerar para la calibración, son: Altafulla, Salou, Almazora 1, Almazora 2 y Benalmádena.

Como este apartado de calibración es similar al correspondiente del punto anterior, no se van a repetir todas las consideraciones y deducciones realizadas, pues son extensibles al presente. Se va a prestar atención a las expresiones de calibración, las cuales pudieran ser diferentes.

#### **10.3.1.1. Determinación del parámetro $P_b$**

El proceso de determinación de este parámetro es idéntico al del apartado 10.2.1. En la figura 4.28 se representan los valores de  $P_b$  óptimos en función del ángulo  $\beta$ . En esta figura también se presentan las curvas obtenidas en el apartado 10.2.1., tanto la curva “teórica” (véase ecuación 4.83), como la de “mejor ajuste” (véase ecuación 4.85). Adicionalmente, se determina en este caso la curva de “mejor ajuste”. Con el objetivo de poder identificar las playas en esta figura, éstas se han definido siguiendo la numeración de la tabla 4.1 del capítulo 8 (asimismo, en la figura 4.6 del mencionado capítulo se puede consultar la localización de cada playa).

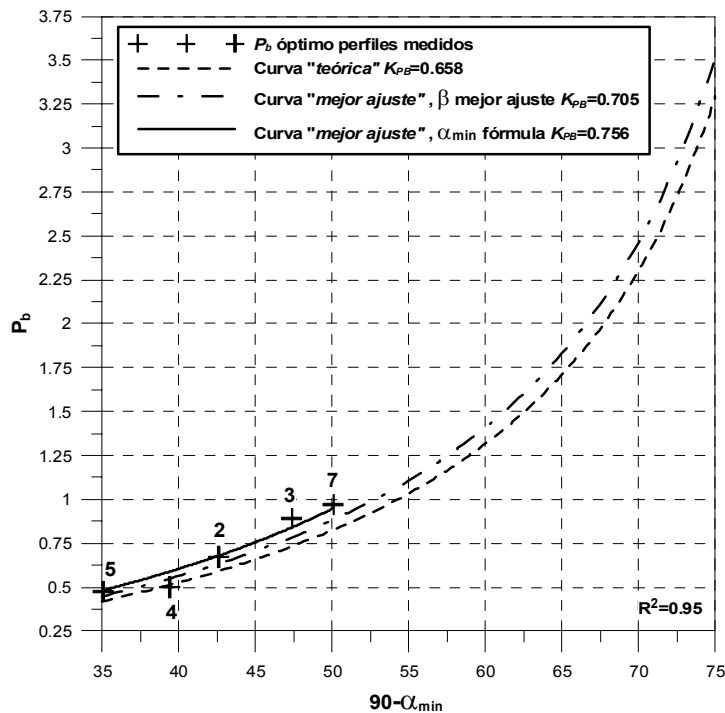


Figura 4.28- Relación entre el parámetro  $P_b$  y el ángulo  $\beta$  para la curva “teórica”, la curva de “mejor ajuste” en el caso de playas existentes y la curva de “mejor ajuste” en el caso de diseño de playas (carácter predictivo) para las playas desarrolladas frente a los valores óptimos de los datos de campo

Del análisis de la figura 4.28, se puede observar que cualquiera de las tres expresiones es válida para la obtención del parámetro  $P_b$ . Ahora bien, si se quiere afinar lo más posible, se debe utilizar la ecuación (4.89); aunque también se podría utilizar la misma ecuación que en el apartado 10.2.1. (es decir, la ecuación 4.85).

$$P_b = 0.756 \frac{\beta}{90 - \beta} = 0.756 \frac{90 - \alpha_{min}}{\alpha_{min}} \tag{4.89}$$

Al igual que en el apartado 10.2.1., se puede introducir en la expresión (4.82) la ecuación (4.89) determinada en este caso para la obtención del parámetro  $P_b$ . Esta

relación se presenta en la ecuación (4.90) y permite determinar el ángulo  $\theta_{max}$  en función del ángulo  $\beta$  o equivalentemente del ángulo  $\alpha_{min}$ .

$$\theta_{max} = \beta + \frac{\text{ArcTanh}\left(\sqrt{\frac{1}{3}}\right)}{0.756}(90 - \beta) \approx 78.39 + 0.129\beta = 90 - 0.129\alpha_{min} \quad (4.90)$$

### 10.3.1.2. Determinación del parámetro $P_a$

Para la determinación de este parámetro, además de utilizar los datos de  $P_a$  óptimos obtenidos en las cinco playas desarrolladas ya mencionadas, se ha añadido un punto más, el cual tiene su base en la figura 3.23 del capítulo 7, y que fue propuesta por González y Medina (2001) para la determinación del ángulo  $\alpha_{min}$ . Tal y como se puede observar en esta figura, para estructuras difractantes muy alejadas de la costa, la curva que relaciona el ángulo  $\alpha_{min}$  con la distancia a la misma escalada con una longitud de onda se vuelve constante. Para este valor del ángulo  $\alpha_{min}$  se puede considerar que la influencia de la difracción es despreciable. Por lo tanto, para  $\alpha_{min}=26$  ( $\beta=64$ )  $P_a$  debe ser nulo.

En la figura 4.29 se representa la relación entre el parámetro  $P_a$  y el ángulo  $\beta$ . Con el objetivo de poder identificar las playas en esta figura, éstas se han definido siguiendo la numeración de la tabla 4.1 del capítulo 8 (asimismo, en la figura 4.6 del mencionado capítulo se puede consultar la localización de cada playa). A partir de la figura 4.29 se puede obtener una relación directa y simple entre el ángulo  $\beta$  y el parámetro  $P_a$ , que queda especificada mediante la ecuación (4.91), (en esta ecuación el ángulo  $\beta$  y el ángulo  $\alpha_{min}$  deben ser introducidos en grados).

$$\boxed{P_a = 0.0194\beta - 1.21 = 0.0194(90 - \alpha_{min}) - 1.21} \quad (4.91)$$

En este caso, al igual que en la opción de playas existentes, el parámetro  $P_a$  siempre adopta valores negativos (curvatura negativa), y consecuentemente el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  es siempre superior a la unidad (excepto en el perfil exterior o de comparación en  $\theta$  igual a  $\beta$  en el que  $A_{ref-dif}$  vale la unidad). Sin embargo, la tendencia es opuesta al caso de playas existentes. La razón de este hecho es que ahora la determinación del ángulo  $\beta$  posee un carácter físico asociado, quedando relacionado con la distancia de la estructura difractante a la costa, como se puede observar en la figura 3.23 del capítulo 7. A medida que aumenta la distancia de la estructura a la costa, el ángulo  $\beta$  se vuelve más grande ( $\alpha_{min}$  más pequeño), y como resultado el parámetro  $P_a$  debe tender a cero, pues el efecto de la difracción es cada vez más pequeño.

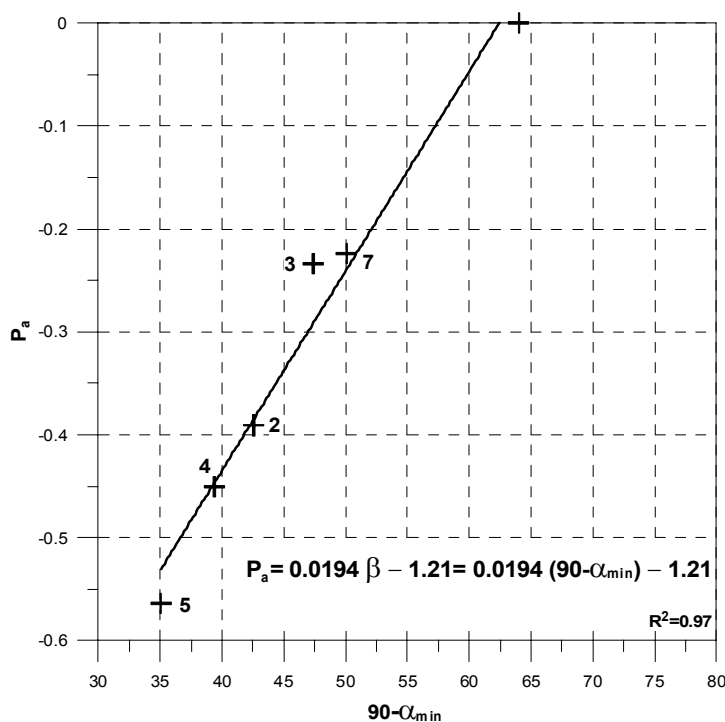


Figura 4.29- Relación entre el parámetro  $P_a$  y el ángulo  $\beta$  para las playas desarrolladas

### 10.3.1.3. Resultados

En este apartado se van a presentar algunos resultados obtenidos con la formulación propuesta para este caso de  $\beta$  determinado a partir del ángulo  $\alpha_{min}$ . Sin embargo, en el anejo V se pueden consultar las comparaciones efectuadas entre medidas y resultados obtenidos con la formulación propuesta para todas las playas.

Todos los comentarios de estas comparaciones son análogos a los indicados en el apartado 10.2.3. para el caso de playas existentes. En general se puede decir que aunque con ambas opciones los ajustes obtenidos son buenos, son aún mejores con la opción para playas existentes.

Entre las playas desarrolladas utilizadas para la calibración, se pueden distinguir dos casos:

1. Por una parte existen playas con tamaño de grano más o menos uniforme longitudinalmente (Salou, Almazora 1, Almazora 2 y Benalmádena), en las que el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  coincide con el cociente  $F$  entre el parámetro de forma total del perfil estudiado (en un ángulo  $\theta$ ) con respecto al del perfil de comparación (en el ángulo  $\beta$ ), (véase ecuaciones 4.48 y 4.49 del apartado 9.3.1. del capítulo 9). Un ejemplo de este tipo de casos se presenta en la figura 4.30 para la playa de Salou.

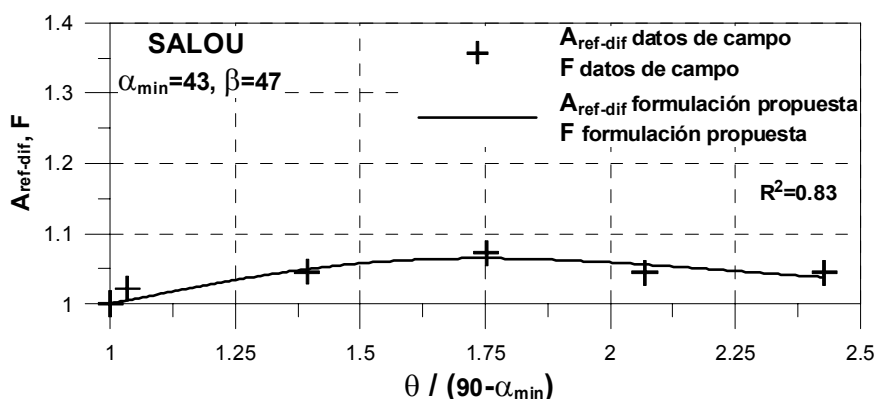


Figura 4.30- Comparación de  $A_{ref-dif}$  y el cociente  $F$  estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Salou

2. Por otra parte se encuentran las playas en las que el tamaño de grano del sedimento no es uniforme longitudinalmente (Altafulla). En estas situaciones el parámetro de forma de difracción  $A_{ref-dif}$  no coincide con el cociente  $F$  entre el parámetro de forma total del perfil estudiado (en un ángulo  $\theta$ ) con respecto al del perfil de comparación (en el ángulo  $\beta$ ), (véase ecuación 4.48 del apartado 9.3.1. del capítulo 9). En la figura 4.31 se muestran ambos valores ( $A_{ref-dif}$  y  $F$ ) para la playa de Altafulla.

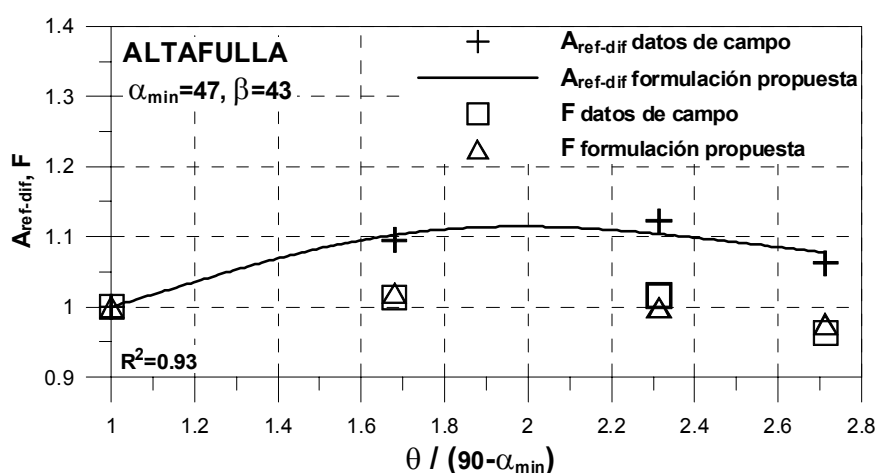


Figura 4.31- Comparación de  $A_{ref-dif}$  y el cociente  $F$  estimados con los datos de campo y los obtenidos con la formulación propuesta en la playa de Altafulla

### 10.3.2. PLAYAS NO DESARROLLADAS

Este apartado se divide en dos puntos: en una primera fase se va a estudiar el grado de validez de la calibración efectuada para el caso de las playas desarrolladas en su aplicación a las playas no desarrolladas, y en una segunda fase se propondrá una metodología para el análisis de las playas no desarrolladas.

Téngase presente que las playas no desarrolladas son: Cubelles, Garrucha, Nueva Andalucía 1, Nueva Andalucía 2 y Nueva Andalucía 3.



### 10.3.2.1. Aplicación de la calibración efectuada a playas no desarrolladas

Una vez calibrados los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  con las playas desarrolladas, se va a estudiar el grado de validez de esta calibración en su aplicación al estudio de las playas no desarrolladas. Por consiguiente, se calculan los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  óptimos para estas playas y se representan con las curvas de calibración obtenidas en el anterior apartado.

En la figura 4.32 se presentan los valores del parámetro  $P_b$ . Como se puede observar, el coeficiente  $K_{PB}$  de ajuste de la curva considerando todas las playas, es decir, incluyendo las playas no desarrolladas, es similar que el determinado con sólo las playas desarrolladas. Sin embargo, el coeficiente de correlación en este caso se reduce considerablemente (de 0.95 a 0.6).

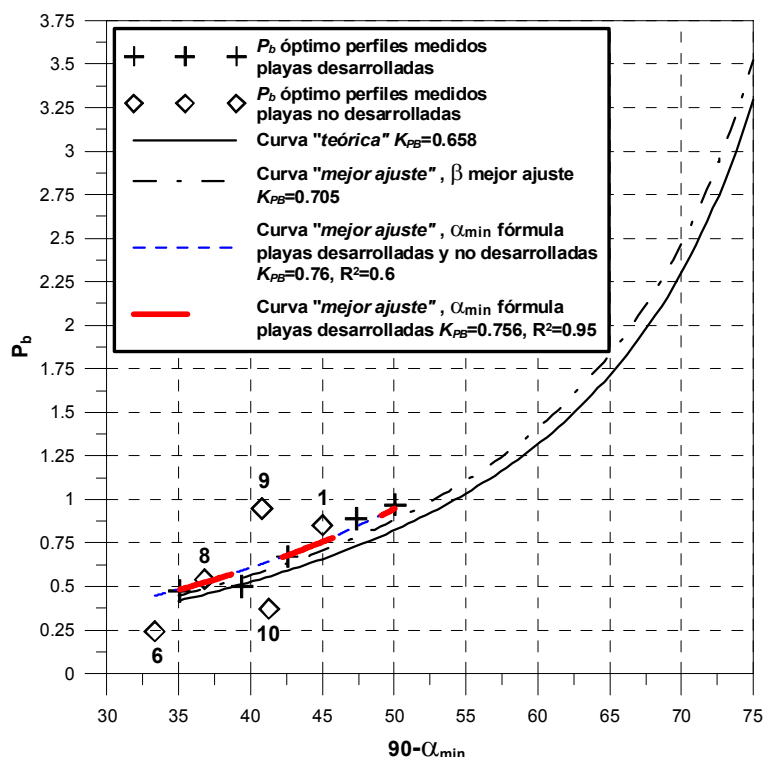


Figura 4.32- Relación entre el parámetro  $P_b$  y el ángulo  $\beta$  para la curva "teórica", la curva de "mejor ajuste" en el caso de playas existentes, la curva de "mejor ajuste" en el caso de diseño de playas (carácter predictivo) considerando las playas desarrolladas, así como teniendo en cuenta todas las playas, frente a los valores óptimos de los datos de campo

En la figura 4.33 se muestran los valores del parámetro  $P_a$ . De la observación de esta figura queda claro que la calibración del correspondiente parámetro no se puede aplicar al caso de playas no desarrolladas. Por consiguiente, para este tipo de playas es necesario proponer un método diferente.

Téngase en cuenta que con el objetivo de una mayor claridad de las figuras 4.32 y 4.33, sólo se han numerado las playas no desarrolladas (recuérdese que la numeración utilizada se indica en la tabla 4.1 del capítulo 8 y la localización de las playas se puede consultar en la figura 4.6 del mencionado capítulo).

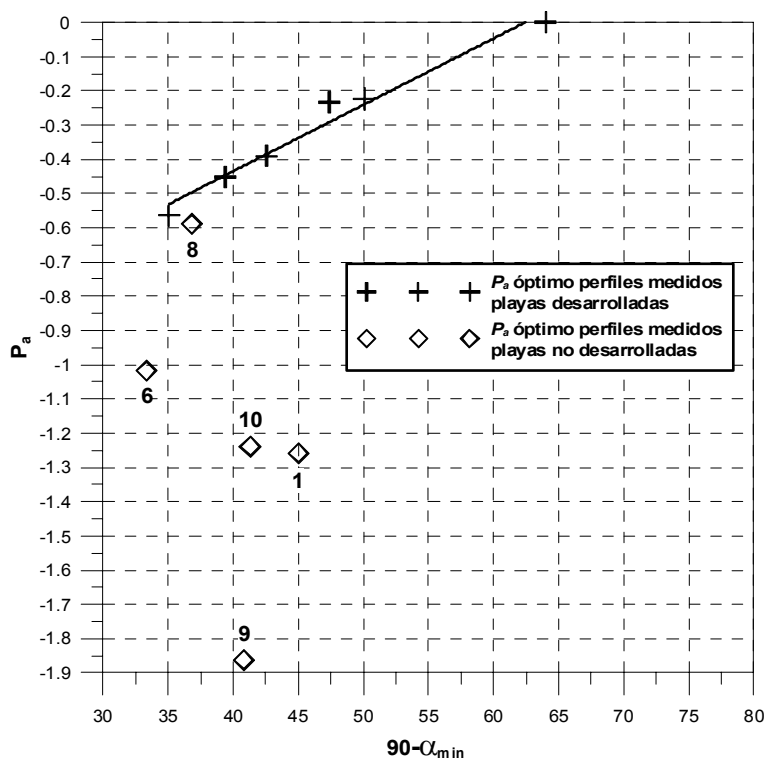


Figura 4.33- Relación entre el parámetro  $P_a$  y el ángulo  $\beta$  para las playas desarrolladas y comparación con las playas no desarrolladas

No es de extrañar que esta calibración no sea aplicable al caso de playas no desarrolladas, pues en estas playas, además de la influencia entre varias zonas de refracción-difracción (con la consecuente modificación del patrón de la curvatura de la amplitud de onda), no se dispone del parámetro de forma total de comparación en

el ángulo  $\beta$ , habiéndose utilizado el mismo parámetro de comparación que en el apartado 10.2. (opción playas existentes).

Todas las consideraciones del párrafo anterior se ven reflejadas en la figura 4.33, con una desacertada predicción del parámetro  $P_a$ . Sin embargo, el no disponer del parámetro de forma total de comparación en el perfil exterior (ángulo  $\beta$ ), no afecta en la determinación de la localización del perfil con máximo valor del parámetro de forma  $A_{ref-dif}$ . Esta es la razón por la que la predicción del parámetro  $P_b$  no es tan desafortunada.

### **10.3.2.2. Metodología propuesta en el caso de playas no desarrolladas**

Como la anterior calibración no es aplicable al caso de playas no desarrolladas, habiéndose explicado en el anterior apartado las razones para este hecho, es imprescindible la propuesta de una metodología para el estudio de estas playas.

Con la idea de una mayor claridad en la explicación del método que se propone para las playas no desarrolladas, se va a hacer referencia a la figura 4.34, en la que aparece el caso de la playa de Nueva Andalucía 1. Las figuras equivalentes para el resto de las playas no desarrolladas (Cubelles, Garrucha, Nueva Andalucía 2, Nueva Andalucía 3) se pueden consultar en el anejo VI.

La metodología propuesta consta de los siguientes puntos:

1. Se determina la planta de equilibrio de la playa para cada uno de los puntos difractantes, utilizando para la definición del ángulo  $\beta$  de influencia de cada morro difractante la formulación del ángulo  $\alpha_{min}$  propuesta por González y Medina (2001). En la figura 4.34 las dos plantas de equilibrio aparecen representadas en línea fina. También aparecen delimitadas las zonas de influencia de cada morro, pudiéndose observar que existe influencia de ambos y que la playa no está desarrollada.

2. Se determina el punto de intersección de ambas plantas de equilibrio.

3. A partir de este punto de intersección se busca el mejor ajuste para la forma en planta de equilibrio, cuya zona de influencia (ángulo  $\beta$ ) venga marcada precisamente por este punto de intersección y no por la formulación de González y Medina (2001). Esta planta aparece en línea gruesa en la figura 4.34.

4. A partir de este momento se aplica la formulación desarrollada en el apartado 10.2. para playas existentes.

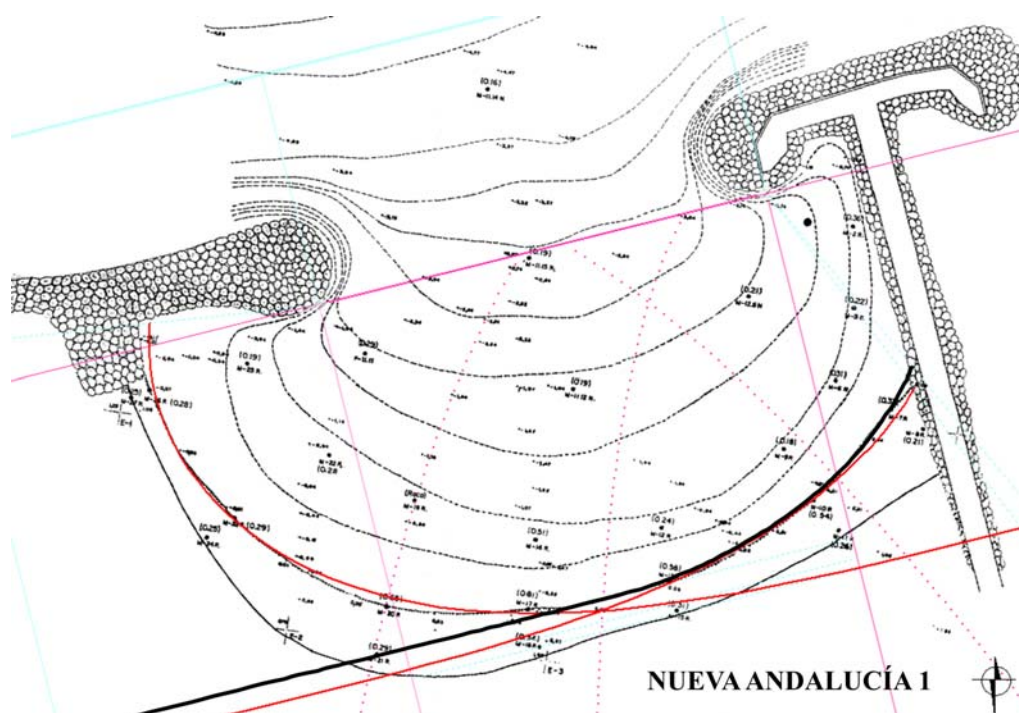


Figura 4.34- Metodología propuesta en playas no desarrolladas, ejemplo de la playa de Nueva Andalucía 1

#### 10.4. DISCUSIÓN

Llegados a este punto, es relevante destacar una serie de aspectos con respecto a la formulación propuesta de perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción:

□ La formulación de perfil de equilibrio que se propone en este capítulo es aplicable en zonas de refracción-difracción. Así pues, no se limita su uso al caso de

diques exentos, es válida para cualquier zona en la que los procesos de refracción-difracción sean los preponderantes (diques de abrigo en puertos, cabos, salientes, grandes bajos, etc.).

□ Es una formulación con base teórica en la que, con el objetivo de poder establecer una expresión analítica, se han tenido que asumir algunas hipótesis. Sin embargo, por el hecho de calibrar los parámetros de la formulación propuesta con datos de campo, adquiere valor en su aplicación a situaciones reales.

□ Aunque se podría tratar de conseguir diferentes expresiones para el perfil de playa en las zonas objeto de interés, por el hecho de hacer uso de la hipótesis de disipación de energía por unidad de volumen constante y utilizar la expresión típica para definir el flujo de energía, el funcional obtenido es idéntico al establecido por Dean (1977), pero con un valor del parámetro de forma variable.

Sin embargo, no se debe olvidar que el método propuesto es totalmente genérico, no hay más que introducir diferentes expresiones para definir el flujo de energía y se obtendrán diferentes formulaciones para definir el perfil de equilibrio de la playa. Además, aunque se obtuvieran otras expresiones en condiciones diferentes, se podría comparar el perfil de playa en el ángulo  $\beta$  frente a los perfiles en la zona de refracción-difracción y las tendencias observadas en el perfil de playa serían exactamente las mismas (creciente, punto de máximo y decreciente), simplemente cambiarían los parámetros de calibración.

Tampoco se debe olvidar las enormes ventajas que posee el hecho de utilizar una expresión de tipo Dean (1977): con una formulación simple se puede analizar la variabilidad de la pendiente en la zona de rompientes, que en última instancia es la magnitud fundamental.

□ Merece la pena recalcar el hecho de que la formulación propuesta es una formulación de perfil de equilibrio para la zona de rompientes. No se ha contado con datos de campo como para poder establecer expresiones para las zonas más exteriores. Ahora bien, en líneas generales se puede decir que en las zonas objeto de interés, fuera de la zona de rompientes, la batimetría consiste en una gran planicie.

□ Asimismo, se debe mencionar que como resultado del proceso de búsqueda intensivo, se consiguieron una serie de datos de campo (véase apartado 8.3.1. del capítulo 8 y anejo III), los cuales han determinado, con su precisión y su definición batimétrica, la profundidad límite hasta la que se pudieron ajustar los parámetros de forma de la formulación propuesta para cada uno de los perfiles estudiados.

□ Es interesante tener en consideración que la formulación propuesta no es excesivamente complicada, siendo sólo necesario establecer para cada playa: el punto de difracción, la dirección de referencia a partir de la cual se van a medir los ángulos de ubicación de los perfiles de playa (esta dirección coincide con la parte recta de la playa en playas desarrolladas y se suele asociar a la dirección del flujo medio de energía) y el ángulo  $\beta$  de definición de la zona de refracción-difracción. Para la definición de este último ángulo existen dos posibilidades: si la playa existe se calcula el ángulo  $\beta$  de mejor ajuste de la forma en planta de equilibrio (Hsu y Evans, 1989; Tan y Chiew, 1994), y si se quiere diseñar una playa (carácter predictivo) se obtiene el ángulo  $\beta$  a partir de la formulación del ángulo  $\alpha_{min}$  propuesta por González y Medina (2001).

A partir de este momento sólo es necesario definir el ángulo  $\theta$  del perfil en el que se quiere obtener la formulación de equilibrio y estimar los parámetros de calibración  $P_a$  y  $P_b$ , los cuales son función directa del ángulo  $\beta$  para cualquiera de las dos posibilidades de elección de este ángulo. Nótese que con una expresión no demasiado complicada, se introduce la influencia en el parámetro de forma del perfil, tanto del tamaño de grano, como del período del oleaje (véase sección 3 de la Tesis), así como de la altura de ola (ángulo  $\theta$ ).

□ Se debe prestar especial atención a la aplicación de la formulación propuesta en las proximidades de la estructura o elemento difractante (que corresponde, en función de la playa analizada, a relaciones del ángulo  $\theta$  con respecto al  $\beta$  del orden de 2-4), ya que, en estas zonas, como la energía del oleaje es tan baja, se suelen producir acumulaciones de sedimento que permanecen con poca movilidad.

Así pues, el concepto de perfil de playa como perfil del tramo de rompientes condicionado por la rotura del oleaje, en estas zonas puede carecer de sentido.

## 10.5. CONCLUSIONES

Los principales aportes de este capítulo son los siguientes:

❖ Se ha realizado la calibración con datos de campo de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  presentes en la formulación propuesta para definir el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  para el caso de playas existentes, estableciéndose expresiones que relacionan los parámetros de interés (ecuaciones 4.85 y 4.88) con el ángulo  $\beta$ . Asimismo, se ha determinado una expresión (ecuación 4.86), en función de este último ángulo, para la obtención del ángulo  $\theta$  de localización del perfil con máximo valor del parámetro  $A_{ref-dif}$ .

❖ Se ha efectuado la calibración con datos de campo de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  presentes en la formulación propuesta para definir el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  para el caso de diseño de playas (playas no existentes, carácter predictivo), estableciéndose expresiones que relacionan los parámetros de interés (ecuaciones 4.89 y 4.91) con el ángulo  $\beta$ . Además, se ha determinado una expresión (ecuación 4.90), en función de este último ángulo, para la obtención del ángulo  $\theta$  de localización del perfil con máximo valor del parámetro  $A_{ref-dif}$ .

❖ Se ha propuesto una metodología para la utilización de la formulación obtenida en el caso de playas no desarrolladas.

❖ Se ha realizado la comparación entre los resultados establecidos con la formulación propuesta frente a los estimados con los datos de campo, comprobándose que, tanto en tendencias, como en magnitud, la formulación propuesta reproduce adecuadamente el parámetro de forma de los perfiles de campo.

Del análisis de los resultados obtenidos se han podido observar dos tipos de comportamiento en función de si la playa posee un tamaño de grano más o menos uniforme longitudinalmente o no:

- En el primer caso el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  coincide con el cociente  $F$  entre el parámetro de forma total del perfil estudiado (en un ángulo  $\theta$ ) con respecto al del perfil de comparación o exterior (en el ángulo  $\beta$ ). En la zona de refracción-difracción existe un perfil con parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  y pendiente máxima, a partir del cual la pendiente comienza a decrecer, tendiendo hacia la pendiente del perfil de referencia o exterior, pero nunca puede ser menor que ésta.

- En el segundo caso el parámetro  $A_{ref-dif}$  no coincide con el mencionado cociente  $F$ , y aunque el parámetro  $A_{ref-dif}$  sigue siempre la misma ley (creciente hasta el máximo y luego decreciente), el cociente  $F$  puede adoptar cualquier forma, dependiendo de la gradación longitudinal del sedimento, desde una tendencia idéntica a la del parámetro  $A_{ref-dif}$ , hasta una tendencia principalmente decreciente. En este último caso la pendiente del perfil de playa (caracterizada por el parámetro  $A_T$ ) en la zona de refracción-difracción es menor que la del perfil exterior de comparación, lo cual en el caso de tamaños de grano uniformes era imposible.



## **CAPÍTULO 11**

# **PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE EQUILIBRIO EN ZONAS DE REFRACCIÓN-DIFRACCIÓN**

---



## 11.1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de una mayor claridad de lo expuesto a lo largo de esta sección, y una vez propuesta la formulación de perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción, así como calibrados los parámetros existentes en dicha formulación, en este capítulo se va a realizar un resumen de la presente sección de la Tesis (desde el capítulo 8 al 10), presentándose directamente el procedimiento propuesto para la determinación del perfil de equilibrio en las zonas objeto de estudio. Solamente se va a describir el método de cálculo o procedimiento, pues todas las derivaciones analíticas, justificaciones y el estudio detallado ya han sido el objetivo de los anteriores capítulos de esta sección.

## 11.2. PROCEDIMIENTO

Así pues, el procedimiento propuesto se compone de los siguientes puntos:

1. En primer lugar se debe determinar para cada playa, el punto de difracción, la dirección de referencia a partir de la cual se van a medir los ángulos de ubicación de los perfiles de playa (esta dirección coincide con la parte recta de la playa en playas desarrolladas y se suele asociar a la dirección del flujo medio de energía) y, adicionalmente, se debe establecer el ángulo  $\beta$  que delimita la zona de refracción-difracción. Para determinar este último ángulo existen dos posibilidades. La primera de ellas se utiliza para playas existentes y consiste en obtener el ángulo  $\beta$  de mejor ajuste de la forma en planta de equilibrio (Hsu y Evans, 1989; Tan y Chiew, 1994). La segunda opción es la que se debe emplear para el diseño de playas (carácter predictivo), calculándose el ángulo  $\beta$  a partir de la expresión del ángulo  $\alpha_{min}$  de González y Medina (2001).

Con los tres elementos definidos en el párrafo anterior (punto difractante, dirección de referencia y zona de refracción-difracción, definida con el ángulo  $\beta$  mediante una de las dos alternativas especificadas) queda establecido el sistema de referencia con el que se van a definir cada uno de los perfiles (ángulo  $\theta$  indicado en

la figura 4.35), así como el perfil de playa de referencia (perfil denotado como exterior o de comparación) ubicado en el ángulo  $\theta = \beta$  (con  $\beta = 90 - \alpha_{min}$ ). En la figura 4.35 aparece representado este esquema.

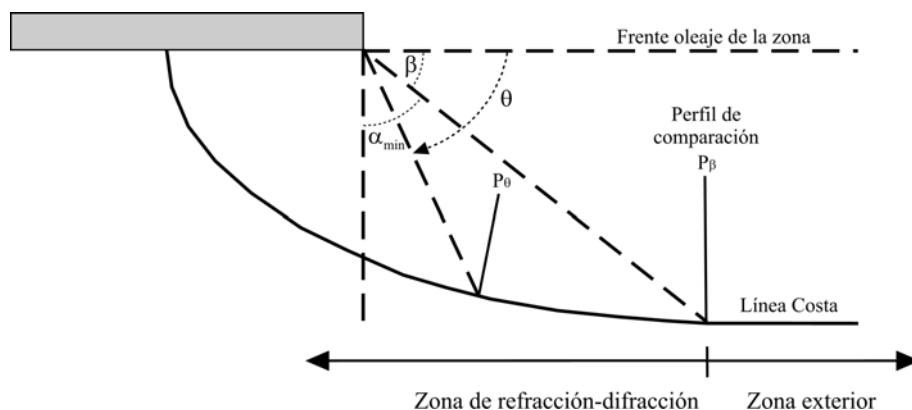


Figura 4.35- Ubicación de los perfiles de playa

2. El perfil de equilibrio en la zona de refracción-difracción queda definido siguiendo la expresión (4.92).

$$h = A_T x^{\frac{2}{3}} \tag{4.92}$$

En la ecuación (4.92) el parámetro de forma total del perfil  $A_T$  se descompone en un parámetro de forma relacionado con el tamaño de grano  $A_d$  y un parámetro de forma asociado a la zona de refracción-difracción  $A_{ref-dif}$ , como queda indicado en la expresión (4.93).

$$A_T = A_{ref-dif} A_d \tag{4.93}$$

3. A continuación se obtiene el parámetro de forma asociado al tamaño de grano  $A_d$ . Con este fin, se pueden utilizar diferentes expresiones. En esta Tesis se ha utilizado la formulación de Dean (1987b), con la cual se relaciona el parámetro de forma asociado al tamaño de grano con la velocidad de caída del grano  $w_s$ , mediante la ecuación (4.94). En esta ecuación la velocidad de caída del grano debe ser expresada en metros por segundo.

$$A_d = 0.51w_s^{0.44} \quad (4.94)$$

La velocidad de caída del grano se puede calcular con la formulación de van Rijn (1993), que para el caso de arenas con densidad de 2.65 toneladas por metro cúbico ( $\rho_s=2.65$ ) se indica en las ecuaciones (4.95), (4.96) y (4.97). En estas ecuaciones  $D_{50}$  debe ser expresado en metros y  $w_s$  en metros por segundo.

$$w_s = 1.1 \cdot 10^6 D_{50}^2 \Rightarrow D_{50} \leq 0.1 \text{ mm} \quad (4.95)$$

$$w_s = 273 D_{50}^{1.1} \Rightarrow 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm} \quad (4.96)$$

$$w_s = 4.36 D_{50}^{0.5} \Rightarrow D_{50} > 1 \text{ mm} \quad (4.97)$$

4. Posteriormente se determina el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$ . Para obtener este parámetro se utiliza la formulación propuesta en el capítulo 9 de la Tesis y que se presenta en la expresión (4.98).

$$A_{ref-dif} = \frac{l}{\left( \frac{1 + P_a \frac{\sinh\left(P_b\left(\frac{\theta}{\beta} - 1\right)\right)}{\cosh^3\left(P_b\left(\frac{\theta}{\beta} - 1\right)\right)}}{\right)^{\frac{2}{3}}} \tag{4.98}$$

La expresión (4.98) depende del ángulo  $\beta$ , que ya fue determinado en el primer punto, y del ángulo  $\theta$  de ubicación del perfil estudiado, siguiendo lo comentado en el primer punto también. Asimismo, depende de dos parámetros: el parámetro  $P_a$  y el parámetro  $P_b$ . Para determinar ambos parámetros se utilizan las expresiones obtenidas en el anterior capítulo de la Tesis. En la figura 4.36 se representa la forma que adopta el parámetro de forma  $A_{ref-dif}$  según la ecuación (4.98), así como el significado de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$ .

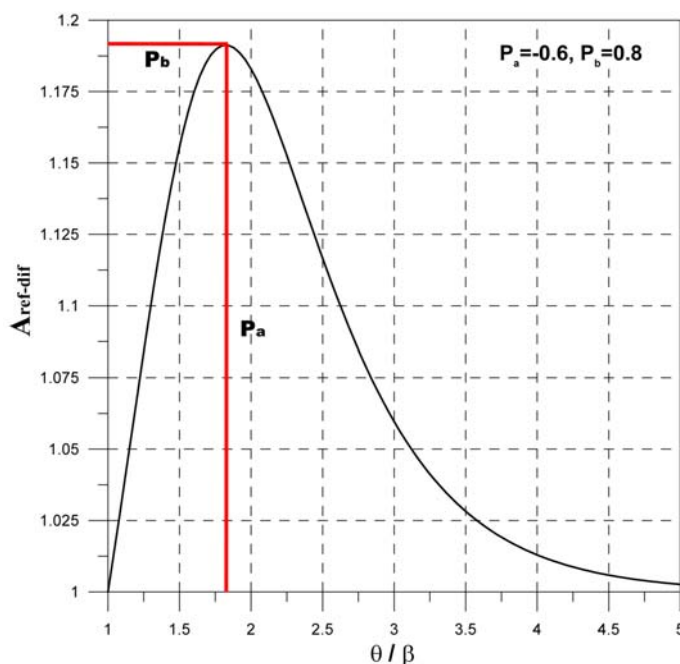


Figura 4.36- Forma que adopta el parámetro  $A_{ref-dif}$

5. Finalmente se calculan los parámetros  $P_a$  y  $P_b$ . Existen diferentes expresiones para su determinación en función del método de obtención del ángulo  $\beta$ :

- *Caso de playas existentes: ángulo  $\beta$  de mejor ajuste.*

El cálculo del parámetro  $P_a$  se realiza mediante la expresión (4.99). Siguiendo esta expresión el parámetro en cuestión solamente es función del ángulo  $\beta$ .

$$P_a = -0.0238\beta + 0.6 \quad (4.99)$$

La determinación del parámetro  $P_b$  se lleva a cabo mediante la ecuación (4.100). Este parámetro, al igual que el parámetro  $P_a$ , solamente depende del ángulo  $\beta$ .

$$P_b = 0.705 \frac{\beta}{90 - \beta} \quad (4.100)$$

- *Caso de diseño de playas (carácter predictivo): ángulo  $\beta$  obtenido a partir del ángulo  $\alpha_{min}$ .*

En este caso, si la playa es desarrollada se utilizarán las expresiones (4.101) y (4.102) para la obtención de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$ , respectivamente.

$$P_a = 0.0194\beta - 1.21 = 0.0194(90 - \alpha_{min}) - 1.21 \quad (4.101)$$

$$P_b = 0.756 \frac{90 - \alpha_{min}}{\alpha_{min}} \quad (4.102)$$

Si la playa no es desarrollada o existe influencia de puntos difractantes y solapamiento de zonas de refracción-difracción se debe utilizar la metodología descrita en el anterior capítulo y que se indica a continuación. Se determinan las plantas de equilibrio con el ángulo  $\beta$  de influencia obtenido a partir de la formulación de González y Medina (2001) para el ángulo  $\alpha_{min}$ . A continuación se calcula el punto de intersección de ambas plantas y se ajusta una nueva planta de equilibrio con un ángulo de influencia  $\beta$  que quede encajado en el punto de intersección definido previamente. A partir de este momento se aplica para la determinación de los parámetros  $P_a$  y  $P_b$  las ecuaciones (4.99) y (4.100), respectivamente (pues estas expresiones fueron obtenidas para el caso de ángulo  $\beta$  de mejor ajuste).

### 11.3. CONCLUSIONES

❖ En este capítulo se ha descrito el procedimiento propuesto para la determinación del perfil de equilibrio en zonas de refracción-difracción.