

EL CONCEPTO DE PERFIL DE EQUILIBRIO DEL FRENTE DE PLAYA: UNA REVISIÓN CRÍTICA

Carlos Garau Sagristá.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

RESUMEN

El concepto de perfil de equilibrio del frente de playa es la base de la mayor parte de los modelos utilizados para describir cuantitativamente y predecir las respuestas del perfil de playa. Pilkey y otros investigadores (Journal of Coastal Research, winter 1993) ponen en duda la validez del concepto tal como se utiliza en la ingeniería de costas, basado en diversos supuestos simplificativos sobre: (A.1) el papel de la geología subyacente; (A.2) el efecto de las corrientes unidireccionales; (A.3) la profundidad de cierre; (B.1) la influencia de las barras submarinas; (B.2) la importancia del clima marítimo respecto a la del tamaño del sedimento; (B.3) bidimensionalidad del sistema; (B.4) universalidad de una ecuación parabólica basada en el tamaño del sedimento. Pilkey y otros (1993) llegan a la conclusión de que, a la luz de diversos fenómenos oceanográficos y geológicos bien documentados, todos esos supuestos simplificativos dejan de cumplirse, en mayor o menor grado, en las situaciones reales.

En el presente artículo se contrastan estas afirmaciones con el modelo de perfil de equilibrio descrito por el autor (C.Garau, R.O.P., dic. 1974, dic. 1984, mar. 1985, ag. 1986, mar. 1989, mayo 1989, mayo 1990, dic. 1993) basado en los siguientes factores: (1) tamaño del sedimento (D_{50}); (2) clima local (K_a = coeficiente de abrigo = $H/0,1276 T^{3/2} = K_W K_r K_d$); (3) fondos subyacentes ($F_B = F_p F_b$); (4) transporte frontal (F_q). Se comprueba que el modelo de perfil "Garau", compuesto por dos rectas correspondientes a procesos diferentes en las zonas de rotura y reflexión, es confirmado por la revisión crítica de Pilkey y otros.

ABSTRACT

The concept of shoreface profile equilibrium is the basis for most models used to describe quantitatively and predict profile response on beaches. Pilkey and others (Journal of Coastal Research, winter 1993) question the validity of the concept as used in coastal engineering, based on different simplifying assumptions about: (A.1) underlying geology role; (A.2) unidirectional current flow effect; (A.3) closure depth; (B.1) offshore bars role; (B.2) wave climate versus grain size; (B.3) two-dimensional system; (B.4) all shorefaces in the world described by a simple equation (parabolic) with sediment grain size as the only variable. Pilkey and others (1993) concluded that to varying degrees, all these assumptions fail to be met in real world situations in the light of well documented oceanographic and geological phenomena.

Pilkey's analyses are contrasted with the profile equilibrium model described by C.Garau (R.O.P. Dec. 1974, Dec. 1984, Mar. 1985, Aug. 1986, Mar. 1989, May 1989, May 1990, Dec. 1993). Garau's profile equilibrium takes into account the following factors: (1) grain size (D_{50}); (2) local climate (K_a = sheltering coefficient = $H/0,1276 T^{3/2} = K_W K_r K_d$); (3) underlying geology ($F_B = F_p F_b$); (4) onshore-offshore transport (F_q). Garau's profile equilibrium, formed by two straight lines corresponding to the different processes dominating breaking and reflection zones, is confirmed by Pilkey's critical review.

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
noviembre de 1996.

Recibido en ROP:
julio de 1996

INTRODUCCIÓN

En el artículo que bajo el mismo título publican en el JOURNAL OF COASTAL RESEARCH (vol. 9, nº 1, 1993) los 6 autores O. H. Pilkey, R. S. Young, S. R. Riggs, A.W. Sam Smith, H. Wu y W. D. Pilkey, se presenta el siguiente resumen:

A) El concepto de perfil de equilibrio del frente de playa constituye la base para la mayor parte de los modelos que cuantitativamente describen y predicen las respuestas del perfil de las playas. El concepto de equilibrio del frente de playa se basa en los siguientes supuestos: (1) la geología subyacente no juega rol alguno en la determinación de la forma del perfil; (2) el sedimento del frente de playa es movido únicamente por la interacción de las órbitas de la ola con el fondo, no teniéndose en cuenta el flujo de corrientes unidireccionales; (3) no hay movimiento neto significativo del sedimento, lado mar, de la llamada "profundidad de cierre".

B) La ecuación del perfil de equilibrio del frente de playa implica: (1) las barras submarinas no juegan un papel importante en el transporte de sedimentos; (2) el tamaño del grano es la única variable que determina la variabilidad de la forma del perfil del frente de playa; (3) el sistema de trans-

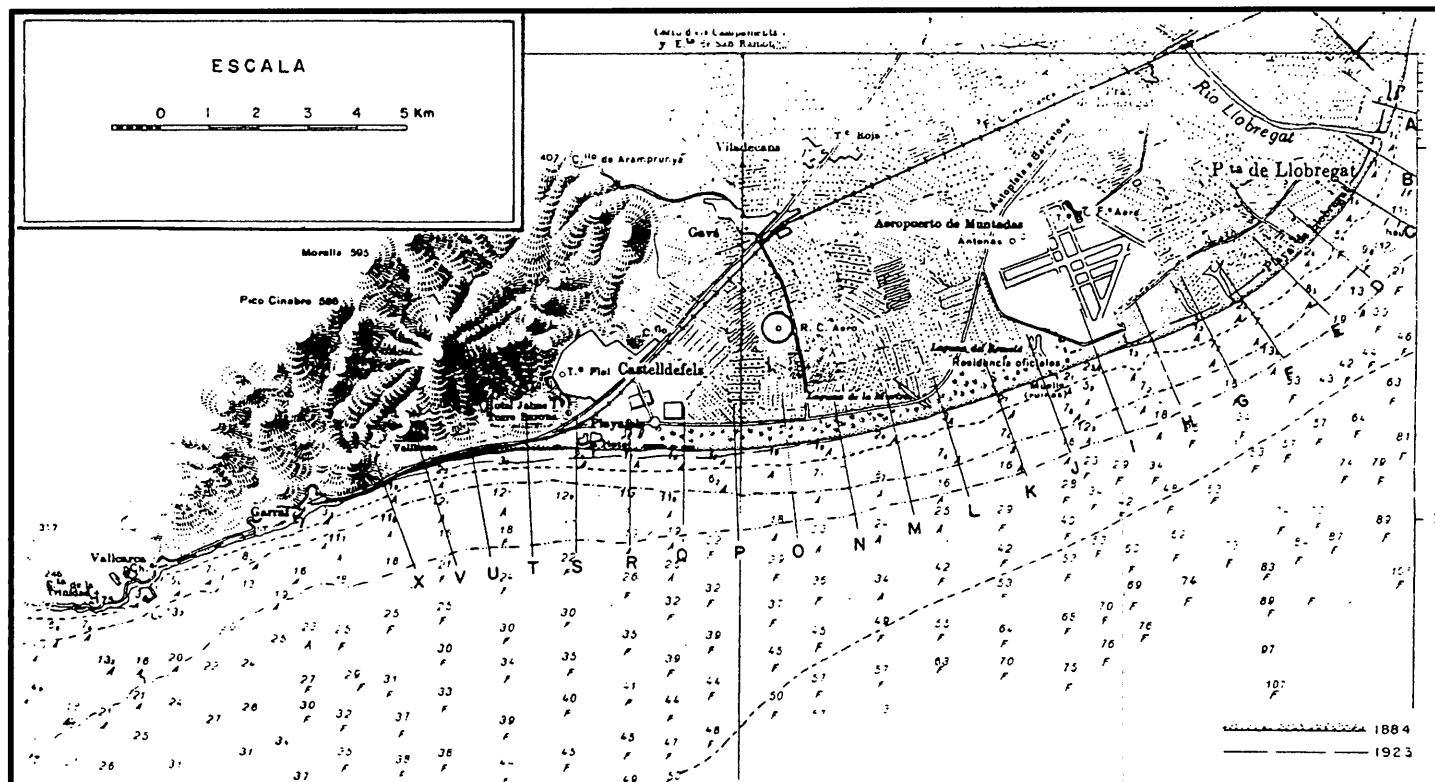
porte en el frente de playa es bidimensional; (4) todos los frentes de playa de todo el mundo pueden describirse mediante una única ecuación cuya única variable es el tamaño del grano.

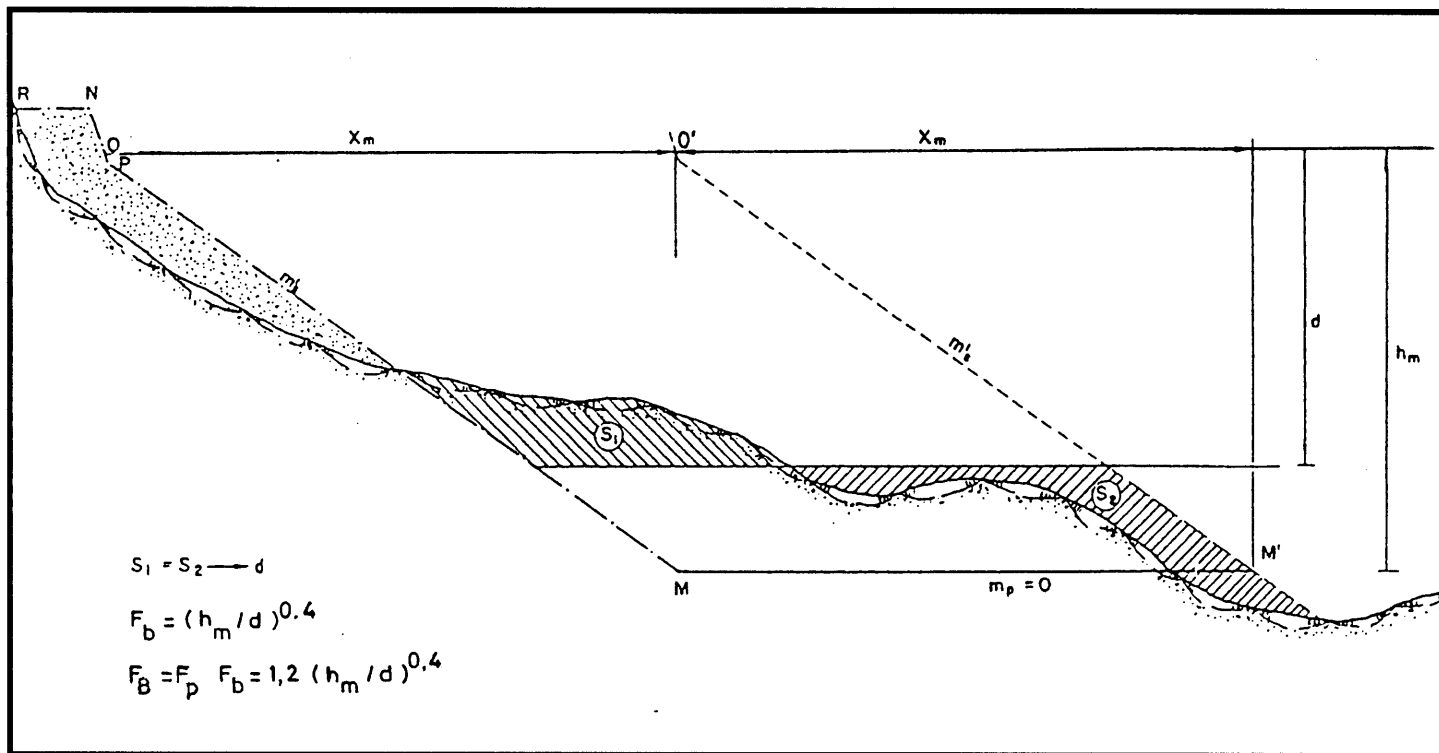
Todos y cada uno de estos supuestos fallan en algún grado en los casos reales, a la luz de ciertos fenómenos geológicos y oceanográficos bien documentados. Es necesaria una revisión fundamental de los métodos de la ingeniería que determinan la evolución del frente de playa. Frecuentemente tales métodos se basan en hipótesis oceanográficas deficientes."

PLANTEAMIENTO

Los autores presentan en el cuerpo del artículo numerosos estudios para detallar y demostrar el gran desfase que existe entre las teorías y modelos generalmente utilizados y la realidad. Más adelante se analizarán algunos casos concretos, pero lo que quiero señalar aquí es que tan fuerte crítica no afecta a mi teoría. Como se va a resaltar, algunos de los aspectos que cualitativamente ponen en evidencia los autores, en mi teoría no sólo se tienen en cuenta, sino que se evalúan cuantitativamente. A continuación se expone en que forma se

Figura 1. Delta del Llobregat. Situación de los 23 perfiles del estudio de J.Espinet, cuyo análisis indujo a la estimación del efecto F_p de los fondos situados por debajo del L.T.S. (Ver Fig. 5 y Tabla 1).





contempla en el perfil Garau cada uno de los aspectos descritos en el resumen transcrito:

A.1. GEOLOGÍA SUBYACENTE

La geología subyacente juega un rol fundamental en mi teoría:

a) Por la influencia del perfil "prácticamente indeformable" situado por debajo del "límite del transporte significativo" (LTS). Su evaluación se hace en base a la ecuación $F_p = 0,85 + 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ limitando con $F_p \leq 1,2$ (Garau, R.O.P. 1989, p.167). La intuición de este efecto, y su evaluación, fue fruto del análisis de los perfiles de las playas del delta del Llobregat en base a la amplia base de datos obtenidos por J. Espinet. La perplejidad que se derivaba de la variabilidad de la pendiente de rotura, a igualdad de tamaño del grano y clima marítimo, sólo se despejó al tener en cuenta que el perfil situado por debajo del LTS había sido configurado por procesos históricos localmente diferenciados, y que su variabilidad justificaba aquella que presentaba la pendiente de rotura (Fig. 1, ver R.O.P. dic. 1984).

Más adelante se volverá sobre el concepto de LTS y la indeformabilidad del perfil situado por debajo de él.

El efecto que se pretende evaluar con F_p corresponde a la capacidad reguladora que los fondos, asimilados a una recta de pendiente m_p , ejercen sobre los oleajes limitando las alturas de ola máxima incidente sobre la playa activa, acción muy especialmente efectiva sobre los máximos temporales.

b) Por la influencia del “perfil indeformable” situado por encima del LTS. Es decir, por la existencia de barras rocosas cuyo efecto se evalúa por la expresión $F_b = (h_m/d)^{0.4}$ en relación con la Figura 2 (*R.O.P. marzo 1989, p.168*). Dicha evaluación se hizo en base a las diferencias que, con el perfil Garau, presentaban varios perfiles de la Bahía de Alcudia (Mallorca) (Figura 3).

c) Por el efecto de refracción, K_r , sobre los oleajes oblicuos antes de incidir sobre la playa activa. Su evaluación se hace, en la aplicación de mi teoría, a través de la determinación del coeficiente de abrigo característico de la playa, $K_a = K_r \cdot K_d \cdot K_W$ (R.O.P. dic 1993). Este efecto es evidentemente tridimensional.

d) Por otra parte los autores describen otros casos en que el espesor de la capa de arena es tan reducido en la playa activa que los grandes oleajes dejan al descubierto y actúan sobre el sustrato rocoso subyacente. Es lógico presumir la influencia de tal sustrato en el perfil de equilibrio de la playa activa. En muchos casos podrá

Figura 2. Esquema del perfil para la estimación de efecto barrera de los fondos indeformables situados por encima del L.T.S.

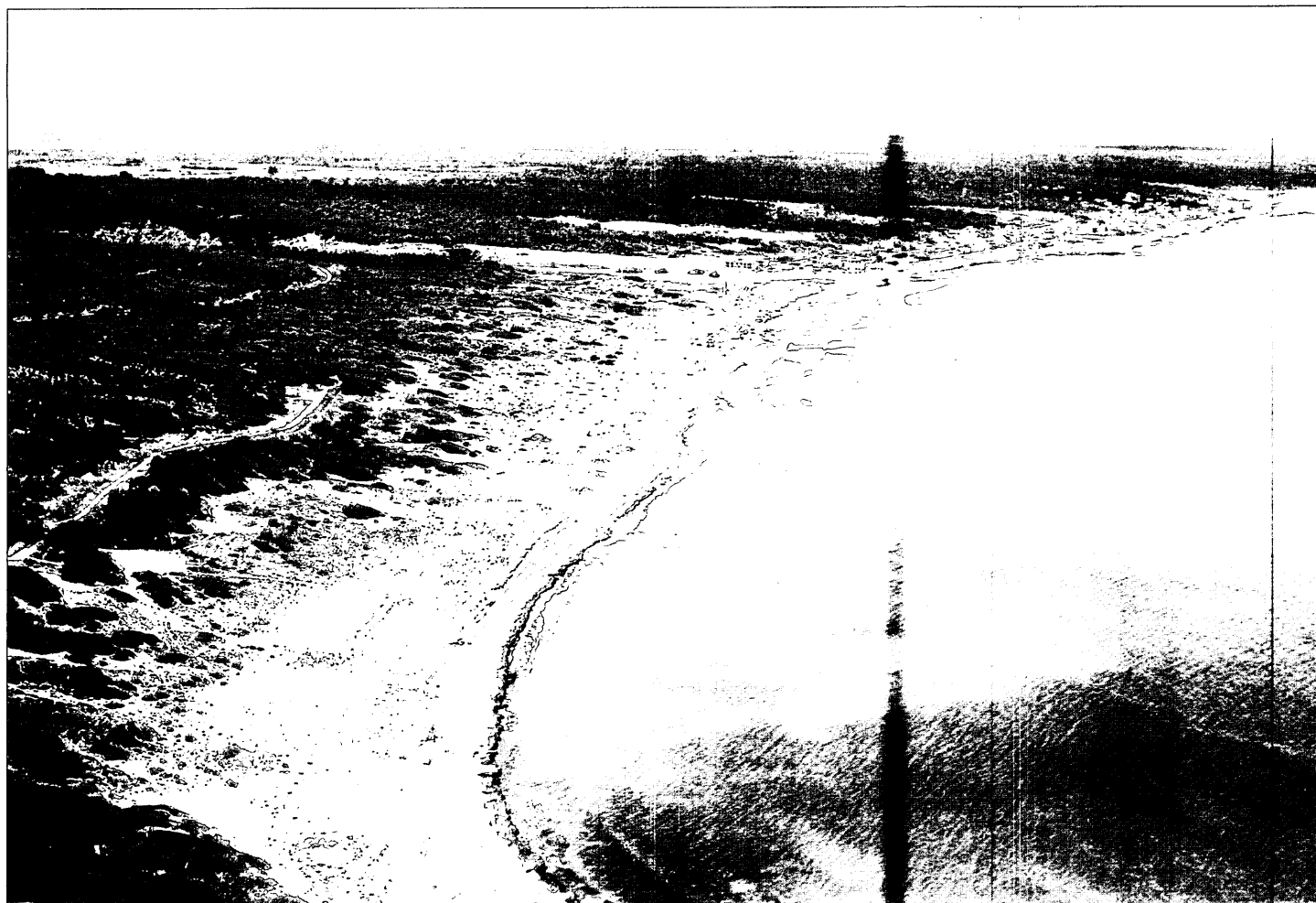


Figura 3. Playas de la Bahía de Alcudia, cuyo estudio de perfiles permitió evaluar la influencia del "perfil indeformable" situado por encima del L.T.S. en la pendiente de equilibrio del "perfil activo" (ejemplos de playas de perfil "ligeramente incompleto").

evaluarse su efecto en base a los factores F_p y F_B descritos. Generalmente, el perfil tendrá dos partes bien diferenciadas funcionalmente, aunque a primera vista no sean fáciles de identificar: la parte inferior con afloramientos rocosos en cualquier tiempo y cuya arena puede considerarse relictas por estar atrapada entre dichos afloramientos; la parte superior formada sólo por arena incluso bajo las máximas acciones de los oleajes. La parte inferior representa una plataforma de apoyo prácticamente indeformable, mientras que la superior es lo que yo he denominado "perfil incompleto", representado en la Figura 2 (*R.O.P. marzo 1989, p. 167-168*).

A mi juicio es un error frecuente considerar que las suaves plataformas de roca con zonas de arena relictas, de reducida profundidad, forman parte del perfil activo. Y el error se completa al no considerar a estos fondos indeformables como dato de entrada o condicionante del equilibrio del perfil "incompleto" superior. Un ejemplo de este tipo de

playa es la de Ses Roquetes, T.M. Ses Salines, Mallorca, la cual presenta una plataforma rocosa de pendiente inferior a 0,005, con manchas arenosas, en profundidades superiores a 2 metros, siendo a esta profundidad donde se apoya la playa activa (Figura 4). Téngase en cuenta que con el tamaño de arena de dicha playa ($D_{50} \approx 0,25$ mm) y su clima local, la profundidad del L.T.S. para un perfil completo sería $h_m > 13$ m.

A.2. ACCIÓN DE OLAS Y CORRIENTES

El supuesto de que no se tiene en cuenta el flujo de corrientes unidireccionales, sólo puede referirse a algunos planteamientos teóricos. En mi teoría se parte de los procesos fundamentales que conducen a la configuración del perfil (rotura y reflexión de la ola) y se busca la relación entre los principales factores (sedimento, clima marítimo, topografía próxima y su efecto en planta, topogra-



fía local y su efecto frontal, variaciones del nivel del mar) que determinan la respuesta de la formación sedimentaria (pendientes del perfil de equilibrio).

Los mecanismos de transporte, tanto primarios (interacción de la ola) como secundarios (corrientes unidireccionales), van implícitos en el contraste a que se somete la teoría con la realidad. Ello no obsta para que pueda haber situaciones excepcionales que desvirtúen el concepto de perfil de equilibrio, como ocurre en las bocas de desagüe de marea (Santander, Santoña,...).

A.3. EL LÍMITE DEL TRANSPORTE SIGNIFICATIVO (LTS)

El problema de la posibilidad de movimiento neto en el LTS (concepto de mi teoría equiparable, en ciertos aspectos, a lo que los autores aluden como "profundidad de cierre) y por debajo de él, es excesivamente complejo para abordarlo

aquí con un rigor adecuado. Sin embargo, quiero señalar dos aspectos:

1) Cuando los mecanismos reguladores del perfil de equilibrio frontal actúan durante un cierto período, de forma que se puede considerar despreciable el avance o retroceso del perfil de la playa en dicho período, el concepto de LTS es suficientemente operativo como para quedar registrado en una progradación deltaica resultante de la suma de múltiples períodos. Precisamente en el delta del Llobregat se tuvieron que dar, entre otras, estas circunstancias ya que el avance de la playa activa dio lugar a la formación del acuífero superior de dicho delta, cuyo espesor medio (unos 15 m) coincide con la altura del paralelogramo de transporte significativo ($h_p = h_o + h_m$ en el perfil Garau). La permeabilidad del acuífero es el resultado de la buena clasificación del sedimento que, como es sabido, produce la acción de los oleajes sobre la playa activa. La impermeabilidad

Figura 4. Playa de Ses Roquetes. T. M. de Ses Salines. Marca. Obsérvese la plataforma rocosa de suave pendiente y la playa activa propiamente dicha cuyo pie queda a unos 2 metros de profundidad (ejemplo de playa de perfil "fuertemente incompleto").

del substrato inferior es claro indicativo de la diferencia cualitativa entre los mecanismos del equilibrio activo de la zona superior y los del equilibrio pasivo (proceso histórico) de la zona inferior. La formación del substrato inferior requirió la presencia de materiales más finos que los del frente de playa. Tales finos eran aportados por el río Llobregat, mientras que, durante el proceso genético del delta, las arenas procedían en su mayor parte del transporte longitudinal desde el NE (tramo de costa de unos 70 km, conocida por Maresme).

2) Cuando el ritmo de avance o retroceso del frente de la playa es relativamente importante, o bien cuando existe un transporte hacia el mar o hacia tierra respectivamente, el concepto de LTS se desvirtúa ya que en muchos casos habrá un transporte hacia el mar o hacia tierra, respectivamente, a través de dicho límite teórico. Ello conlleva una modificación (aumento o disminución, respectivamente) de la pendiente de rotura (Garau, R.O.P. mayo 1989, Fig. 10; R.O.P. mayo 1990, p. 41). Una aproximación cuantitativa se puede tener aplicando la ecuación $q = 25 \{1 - F_q\}$, siendo q el caudal en $m^3/año$ que pasa a través del LTS en un metro de longitud de playa, y F_q la relación entre la pendiente real (m'_s)^a y la pendiente teórica (m'_s)^t, definidas en el perfil Garau para la zona de rotura de la ola.

Las situaciones de modificación del perfil de equilibrio frontal por la presencia de un transporte frontal hacia arriba o hacia abajo, son complejas y diversas. Sólo a título de ejemplo se describen algunos casos:

a) Con transporte hacia el mar. Frecuentemente corresponde a un tramo alimentado por un cierto caudal de transporte longitudinal, que tras repartirse en todo el tramo: a.1) se compensa con una pérdida hacia un sumidero situado por debajo del LTS; a.2) si el caudal de aportación aumenta, se producirá un avance de la orilla en el tramo, un aumento de pendiente de su zona activa y se alcanzará un nuevo perfil de equilibrio si el sumidero admite tal aumento de caudal; a.3) si el sumidero es despreciable, apoyándose la playa activa sobre una plataforma indeformable de suave pendiente, se producirá el avance de todo el frente de playa, manteniendo su pendiente de equilibrio mayorada por la presencia del transporte hacia el mar; a.4) la

disminución de caudal produce efectos contrarios, de retroceso de la orilla y disminución de pendiente de equilibrio.

El recrecido de una playa, con aportación de arena en la orilla y en la berma, generalmente implica una pendiente excesiva que obliga a la suavización por transporte hacia el mar. Que el transporte de reajuste del perfil pueda o no superar el L.T.S. depende de la geometría local, así como del volumen y tipo de arenas aportado.

b) Con transporte hacia tierra. Corresponde a gran parte de los procesos de reajuste que siguieron a la estabilización del nivel del mar, hace unos 2.500 años, y que en muchos casos todavía continúan actualmente. Generalmente se trata de tramos de playa sujetos a una pérdida de materiales en el entorno de la orilla, bien sea para alimentar la capacidad de transporte longitudinal de los oleajes, o bien sea resultado de la acción eólica y el rebase del oleaje.

La suavización del perfil, resultante del retroceso de la orilla, se traduce en un transporte frontal hacia arriba. Todo ello implica una migración hacia tierra, frecuente en algunos cordones litorales. Las grandes formaciones dunares debieron implicar, durante su génesis, un proceso de este tipo. Como ejemplo está el cordón de islas holandesas y alemanas del Mar del Norte.

Véase *The Dutch Coast en los Proceedings de la 22th Coastal Engineering Conference, 1990*, capítulos 140 a 152 (p. 1862 - 2020). Muy especialmente el c. 141: *Reconstruction of the holocene evolution of the Dutch Coast*, de J.J. Zitman, M.J.F. Stive y H.J. Wiersma, y también c. 146: *Prediction of coast line evolution for the Holland Coast*, de M.J. Dijkman, W.T. Bakker y J.H. Vroeg. En este artículo se mencionan transportes frontales $q = 6 m^3/m/año$ y $q = 10 m^3/m/año$.

Véase *la Isla de Sylt en Dette 1977; Dette y Führboter 1974, 1976; Gärtner y Dette 1987, citados en mi artículo "Ingeniería de Costas: soluciones duras o blandas versus condiciones genéticas", R.O.P. mayo 1989.*

B.1. LAS BARRAS SUBMARINAS Y EL CONCEPTO DE PERFIL

No es cierto que el concepto de perfil de equilibrio implique el supuesto de que las barras submarinas no juegan un papel importante en el transporte de sedimentos. Quizás en algunos modelos teóricos sea así, pero lo que ocurre, al me-

No es cierto que el concepto de perfil de equilibrio implique el supuesto de que las barras submarinas no juegan un papel importante en el transporte de sedimentos

nos en mi teoría, es que, a pesar de la importancia de los mecanismos de formación de barras, tanto para el transporte sedimentario como para los procesos hidráulicos inherentes a la rotura del oleaje, tales barras son variables y de reducida importancia relativa en el perfil completo.

Es conveniente distinguir tres conceptos del perfil de una playa:

- a) **perfil instantáneo:** perfil teórico o real que presenta la playa en un instante determinado;
- b) **perfil medio:** perfil teórico que en cada punto tiene la profundidad media de las distintas posiciones a lo largo del tiempo, siendo susceptible de muchas modalidades la manera de tomar dicha media;
- c) **perfil de equilibrio:** perfil teórico o real que alcanza la playa en cada sección, bajo la acción indefinida de un determinado oleaje. Este último concepto se atribuye con frecuencia a los perfiles de ensayo en modelo reducido, pero puede inducir a error ya que raramente se alcanza debido a la larga duración requerida.

El perfil Garau pretende ajustarse al perfil medio de una playa sujeta a la acción real del mar, esquematizando dicho perfil esencialmente por dos rectas: la de rotura con pendiente m'_s y la de flujo y reflujo con pendiente $\tan \delta$. Cuando se contempla un perfil instantáneo, la zona de flujo y reflujo es esencialmente de reflexión y tiene la pendiente $\tan \delta'$. Cuando se pretende comparar el perfil teórico Garau a un perfil instantáneo, la recta m'_s debe situarse de tal forma que las áreas de crestas de barras, situadas por encima, iguallen las áreas de senos, situadas por debajo. En cuanto al perfil medio, es frecuente que no se aprecien las barras debido a su gran movilidad y al consiguiente intercambio posicional de crestas y senos. (Figura 6.b)

B.2. EL TAMAÑO Y EL PERFIL PARABÓLICO

No creo necesario insistir en que, a pesar de su gran rol, no es el tamaño del sedimento la única variable que en mi teoría determina el perfil de una playa. En realidad, los autores se refieren a la forma de perfil decreciente del tipo Dean o Bruun $h = A y^n$, donde (h) es la profundidad, (y) la distan-

cia a la orilla, (n) un coeficiente inferior a la unidad, y (A) un parámetro de escala dependiente de las características del sedimento. Los autores analizan numerosos perfiles y llegan a la conclusión de que no es razonable dar validez a esta ecuación atribuyendo su variación exclusivamente a las diferencias de tamaño. Esta conclusión, basada en el contraste de perfiles reales, es conforme con la clara distinción que se hace en mi teoría de los dos tramos de playa con diferente acción del oleaje: a) la zona de rotura de pendiente m'_s ; b) la zona de reflexión, flujo y reflujo $\tan \delta$. La segunda, en el entorno de la orilla, es siempre más fuerte que la primera, y ello permite el fácil ajuste de un perfil parabólico, pero su diferente naturaleza es contraria a cualquier intento de ajustar una curva continua.

Como ya he dicho muchas veces, el proceso de reflexión implica una mayor pendiente para mayor altura de ola e igualdad de las restantes variables, mientras que la pendiente de rotura debe suavizarse si la altura de ola aumenta. Mezclar ambos tramos en una misma ecuación, aún teniendo en cuenta todas las variables que intervienen además del tamaño del sedimento, desvirtúa los planteamientos teóricos y la interpretación de los resultados de la mayor parte de las investigaciones. En este punto, por tanto, creo plenamente justificada la crítica de los autores sobre lo que, para mí, es el "nefasto concepto de perfil parabólico".

B.3. SISTEMA TRIDIMENSIONAL Y CONCEPTOS BIDIMENSIONALES

Es obvio que en una playa real el sistema de transporte es tridimensional. Lo que al parecer presuponen los autores es que el transporte longitudinal desvirtúa el concepto de perfil de equilibrio bidimensional, y cuestionan el contraste de los perfiles naturales con los resultados de los ensayos de laboratorio bidimensionales.

En cierto modo, y para unos casos muy peculiares, creo que aciertan en sus críticas los autores, aunque de forma indirecta y casi contraria a su presunción. Me refiero a situaciones como las ya indicadas anteriormente y más ampliamente descritas en mi artículo "Ingeniería de costas: soluciones duras o blandas versus condiciones genéticas" (R.O.P. mayo 1989) y que corresponden a: a) Zonas que, por efecto de la interrupción del transporte longitudinal neto por un saliente, expe-

Hay que distinguir tres conceptos del perfil de playa:

- a) Perfil instantáneo
- b) Perfil medio
- c) Perfil de equilibrio

rimentan un transporte hacia el mar (que puede significar transporte a través del LTS o un avance del perfil, según sea la pendiente de la plataforma sobre la que se avanza mayor o menor que la de equilibrio m'_s), como es el caso del extremo suroeste de la playa de Torredembarra (Tarragona) y el extremo sureste de la playa de Artá, en la Bahía de Alcudia (Mallorca); en estos casos la pendiente

m'_s aumenta respecto a la de equilibrio normal. b) Zonas que, por efecto del retroceso de la orilla, inducido por el transporte longitudinal, el transporte eólico y el rebase del oleaje, el perfil de equilibrio se suaviza y con ello permite el transporte hacia tierra a través del LTS, como es el caso de la Isla de Sylt, en la costa del Mar del Norte de la Península de Jutlandia, unida a la tierra firme de Alemania en las proximidades de su frontera con Dinamarca (Véanse las referencias indicadas al final del epígrafe A.3).

Salvados estos casos excepcionales, en donde la influencia del transporte longitudinal es indirecta, y donde es precisamente el transporte frontal inducido por el avance o retroceso de la orilla el que altera el perfil de equilibrio normal, creo que los autores se equivocan respecto a la influencia directa del transporte longitudinal. Para que el transporte longitudinal pueda darse, en un tramo de playa de cierta longitud, tiene que existir el equilibrio frontal del perfil (bidimensional), en toda la longitud del tramo.

Esta última afirmación puede resultar extraña para muchos especialistas, entre ellos los autores, y voy a tratar de justificarla. Para ello me ceñiré al caso concreto del frente arenoso del delta del Llobregat, Barcelona (Figura 1). Se trata de una playa continua de unos 23 km de longitud, orientada al sureste, en la cual se ha detectado un transporte longitudinal neto de unos 200.000 m³/año, que se dirige de NE a SO. En la génesis de este delta, desde hace unos 2.500 años hasta la construcción del Puerto de Barcelona que hoy se extiende prácticamente hasta el P-A de la Figura 1, jugó un papel fundamental el transporte longitudinal de arenas procedente del gran volumen de depósitos acumulados en el tramo de unos 70 km, comprendido entre el puerto de Barcelona y la Punta Palomera en Blanes (Gerona), al NE.

El avance del frente deltaico se produjo a expensas del caudal de transporte longitudinal neto procedente del NE (unos 215.000 m³/año) y los aportes del río Llobregat (unos 110.000 m³/año de arena de playa activa, además de los materiales más finos capaces de constituir la base de apoyo m_p . Desde hace años, cortados los aportes del NE por la construcción del Puerto de Barcelona y regulado el río Llobregat, los oleajes mantienen su acción de transporte extrayendo la arena del tramo AE, y depositándola al SO del P-S (Fig. 1). Así pues, el tramo AE está en franco retroceso, mientras el tramo SX experimenta un rápido avance y, lo que más interesa aquí destacar, el tramo ES

TABLA 1

	$(m'_s)^a$	m_p	F_p	$(m'_s)^T$	D_{50}
A	0,0196	0,0093	1,044	0,0120	0,125
B	0,0123				0,533
C	0,0111				0,456
D	0,0087	0,0194	0,934	0,0108	0,353
E	0,0115	0,0189	0,936	0,0108	0,265
F	0,0124	0,0222	0,922	0,0106	0,333
G	0,0118	0,0221	0,923	0,0106	0,213
H	0,0112	0,0188	0,937	0,0108	0,185
I	0,0124	0,0177	0,943	0,0109	0,208
J	0,0125	0,0173	0,945	0,0109	0,228
K	0,0106	0,0147	0,964	0,0111	0,208
L	0,0116	0,0163	0,951	0,0110	0,460
M	0,0115	0,0160	0,954	0,0110	0,197
N	0,0112	0,0150	0,961	0,0111	0,198
O	0,0118	0,0143	0,967	0,0112	0,206
P	0,0128	0,0127	0,984	0,0113	0,183
Q	0,0125	0,0102	1,023	0,0118	0,170
R	0,0140	0,0085	1,067	0,0123	0,227
S	0,0153	0,0078	1,091	0,0126	0,275
T	0,0179	0,0072	1,118	0,0129	0,224
U	0,0148	0,0069	1,134	0,0131	0,156
V	0,0142	0,0069	1,134	0,0131	0,204
X	0,0128	0,0069	1,134	0,0131	0,206
1	2	3	4	5	6

1. Designación del perfil
2. Pendiente real de la zona de rotura
3. Pendiente real de la zona situada por debajo de la playa activa obtenida de los datos de campo o de las cartas marinas
4. Factor $F_p = 0,85 + 0,15 (m'_s)^T / m_p$
5. Pendiente teórica $(m'_s)^T$ de la zona de rotura dada por el perfil Garau, tomando: $D_{50} = 0,264$ mm; $T = 12$ s; $K_a = 1$.
Los valores F_p y $(m'_s)^T$ de las columnas 4 y 5 se ajustan por iteración.
6. Tamaño mediano asignable a cada perfil, en mm. Se admite que es igual a la media de los tamaños medianos de todas las muestras del perfil.

puede considerarse prácticamente estable y se comporta como simple conductor del transporte longitudinal.

Al analizar los 23 perfiles de estas playas, cuyo clima marítimo es prácticamente idéntico en toda su extensión, hay que señalar en primer lugar que la aleatoriedad de la distribución del tamaño del sedimento a lo largo de la playa induce a la conclusión de que puede considerarse una misma masa sedimentaria, de tamaño $D_{50} = 0,264$ mm.

Los procesos frontales de reclasificación del sedimento producen la clásica localización de los tamaños mayores en la orilla y en las crestas de las barras, y una disminución con la profundidad. En sentido longitudinal la distribución de tamaños es sensiblemente aleatoria, si bien los perfiles sujetos a la erosión del transporte longitudinal (BCDEF) acusan un mayor tamaño que llega a doblar el tamaño medio de la masa sedimentaria, en el perfil B (Figuras 1 y 5 y Tabla 1).

El valor $D_{50} = 0,264$ mm se obtiene, sin apenas variación, como: a) media de los valores medios de los tamaños medianos correspondientes a todas las muestras de cada perfil; b) media de los tamaños medianos de todas las muestras; c) media de los tamaños medianos de las muestras tomadas en la berma. En los dos primeros cálculos intervienen 340 muestras de arena tomadas a distancias de 100 m sobre los perfiles de la Fig. 1 en el estudio de J.Espinete, si bien la media en el pri-

mero es secuencial, ya que se parte de la media de los tamaños medianos de todas las muestras de cada perfil (tamaño mediano asignable a cada perfil) y después se determina la media de dichos valores. El tercer cálculo se basa en otras 14 muestras tomadas a lo largo de la playa y fuera de la zona de flujo y reflujo (berma).

En la Figura 5 se representan los siguientes valores: a) el D_{50} medio de cada perfil, en línea de trazo y dos puntos (columna 6 de la Tabla 1); b) el factor F_p obtenido mediante la teoría Garau, en cada perfil, tomando ($T = 12$ s; $D_{50} = 0,264$; $K_a = 1$), grafiado en trazo continuo (columna 4 de la Tabla 1); c) la relación entre la $(m'_s)^R$ real de cada perfil y el valor medio de los 22 perfiles, $(m'_s)^T =$

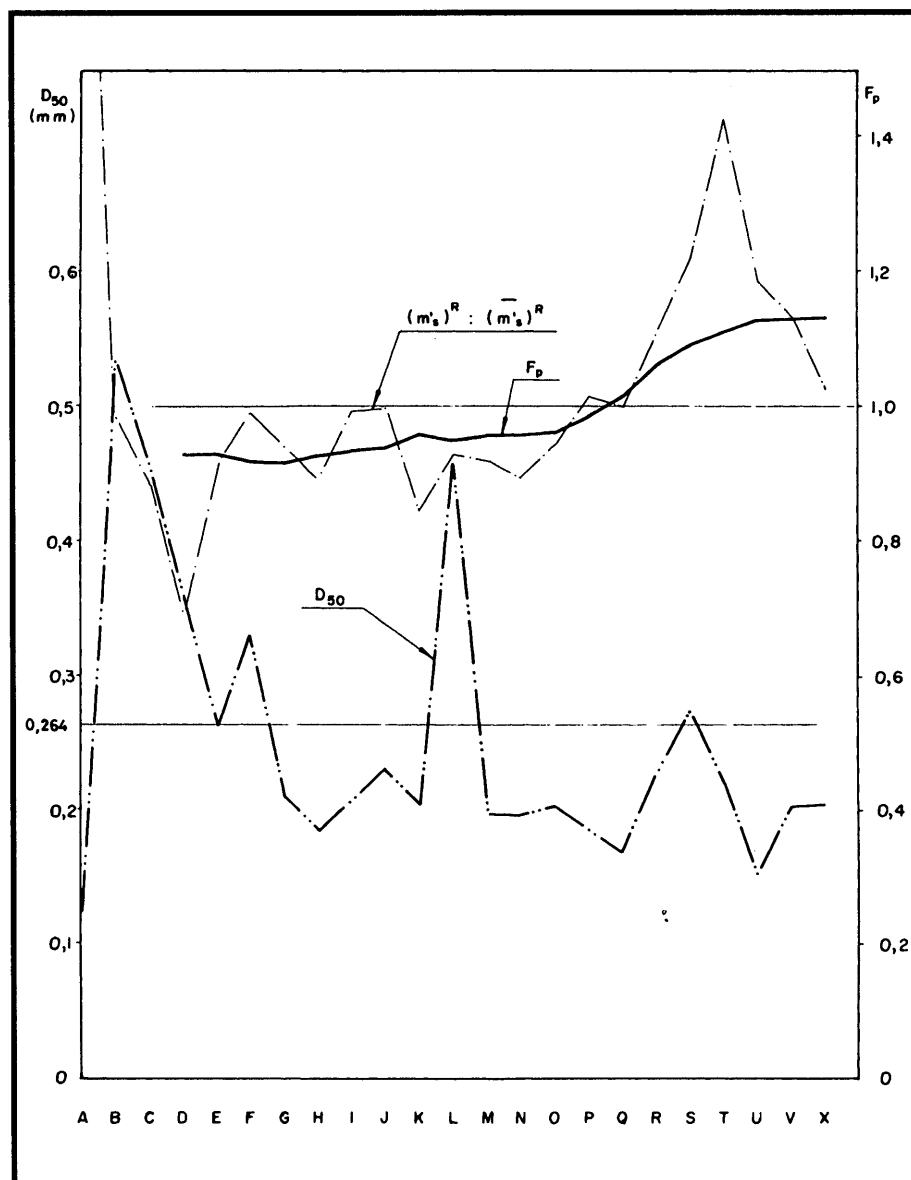


Figura 5. Perfiles del Delta del Llobregat. Análisis de la relación entre: el tamaño de la arena D_{50} , la pendiente de rotura $(m'_s)^R$ y el factor de fondos indeformables F_p según el perfil Garau.

los perfiles de los tramos D y T. Las pequeñas desviaciones no se corresponden con las variaciones del tamaño del sedimento (trazo y dos puntos) y pueden considerarse aleatorias. Todo ello sugiere lo siguiente:

1) Dado que cada perfil representa un tramo de 1 km (500 m a cada lado) y se le asigna la media de los tamaños medianos de todas las 14 ó 15 muestras tomadas sobre el perfil y por encima del L.T.S., era de esperar que las desviaciones entre las curvas de trazo continuo y de trazo y punto se corresponderían con las variaciones del tamaño. Sin embargo no resulta así, y la fuerte variación del tamaño en el tramo L, no correspondida en las otras curvas, prueba la aleatoriedad de los efectos locales de reclasificación de tamaños.

2) La apreciable desviación de las curvas en los tramos D y T no se justifica por el tamaño de la arena, y es atribuible a los efectos de erosión y depósito, respectivamente, que implican un transporte frontal hacia tierra en D (consecuencia de la suavización del perfil), inherente al retroceso de la orilla, y un transporte hacia el mar en T (resultante del aumento de pendiente, inherente al avance de la orilla).

3) Tan notable desviación indica que la sensibilidad de la pendiente de equilibrio a la existencia de un transporte frontal es mucho más fuerte que la variación inducida por los fondos frontales situados por debajo del L.T.S.

4) Dada la reducida importancia relativa de las desviaciones indicadas en (2), y siendo de sentido contrario en ambos extremos como resultado de procesos contrarios (erosión en D y acesión en T correspondientes a alimentación y depósito del transporte longitudinal, respectivamente), cabe concluir que en el tramo ER la pendiente de equilibrio de la zona de rotura no se ve afectada por el transporte longitudinal uniforme.

5) Debe entenderse que un tramo de costa que se comporta como simple conductor del transporte longitudinal saturado (capacidad de transporte de los oleajes invariante a lo largo del tramo, y saturada por haberse alimentado aguas arriba) debe tener el perfil medio asimilable al de equilibrio frontal. Este perfil debe ajustarse a la acción de los grandes temporales y no varía sus-

tancialmente bajo los transportes hacia la izquierda o hacia la derecha. De no ser así, las oscilaciones periódicas de la orilla serían muy grandes, cuando en la realidad son pequeñas. Pienso que un reajuste de la pendiente en un 10%, para los valores $m'_s = 0,0125$ que tienen estas playas, significaría una oscilación de la orilla superior a 100 metros, ya que el LTS (invariante ante tales oscilaciones) queda a más de 1.000 metros de la orilla; sin embargo, se ha comprobado que las oscilaciones de la orilla de las playas del delta del Llobregat, en el tramo ER de transporte saturado, son inferiores a 10 m.

B.4. ECUACIÓN ÚNICA Y ÚNICA VARIABLE EL TAMAÑO

Después de lo expuesto, solo basta repetir que la crítica de los autores no va contra la teoría C.Garau sobre el perfil esquemático de equilibrio frontal de una playa (Figura 6).

La descripción de los diferentes fenómenos según mi teoría concuerda con las afirmaciones cualitativas de los autores.

La aplicación de las correspondientes ecuaciones aporta una primera aproximación cuantitativa de la relación que liga las características del perfil esquemático con los principales factores del equilibrio frontal.

OTROS ASPECTOS

Hasta aquí he presentado un resumido contraste de mi teoría sobre el perfil de equilibrio de una playa, con respecto a los puntos de discusión planteados por los 6 autores. Sin embargo hay varios aspectos, incluso de mayor importancia que los contemplados, que alejan de la realidad a los modelos críticamente revisados por dichos autores.

C.1. ALTURA DE OLA RESIDUAL, H, Y REFLEXIÓN FINAL

Recordaré en primer lugar que mi modelo nació de la intuición de la importancia del papel que desempeña la reflexión del oleaje residual, de altura H, en la orilla y de que, a través de este mecanismo, el tamaño del sedimento juega un papel fundamental en las pendientes de equilibrio (R.O.P. dic 1974). Esta intuición fue confirmada 10 años más tarde al interpretar los ensayos de

M.R. Gourlay (17th Coastal Engineering pp. 1320-1339), aunque dicho investigador no se percató de que los resultados obtenidos permitían definir la limitación de la altura de ola residual por la ecuación $H_r = 0,916.V_f.T$, siendo V_f la velocidad de caída de las partículas en el seno del agua y T el período del oleaje (R.O.P. dic 1984, p. 951).

C.2. INFLUENCIA DE LA CARRERA DE MAREA, Z, Y OTRAS VARIACIONES DE NIVEL

La reflexión de la ola residual es muy clara en las playas de arena gruesa, carentes de marea, y la influencia de sus características en la pendiente de la zona de flujo y reflujo se hace patente. También en las playas de arena fina se aprecia la reflexión de una pequeña ola residual. Sin embargo, cuando la carrera de marea, z , u otra variación del nivel del mar, es importante, hay momentos en que la zona de reflexión en nivel bajo pasa a ser zona de rotura cuando el nivel es alto. En estos casos, la zona de flujo y reflujo está sujeta a dos procesos físicos diferentes a lo largo del tiempo, y en consecuencia adquiere una pendiente intermedia entre la más fuerte, de reflexión, y la más suave, de rotura. No tener en cuenta la importancia de este efecto conduce fácilmente a graves errores en la interpretación de los resultados obtenidos de una investigación sobre las relaciones causales que ligan las variables de proceso (tamaño del sedimento, alturas de ola, período, etc) con las de respuesta (pendientes de rotura y de reflexión y otras características del perfil) (ver R.O.P. diciembre 1993).

C.3. LA RELACIÓN ENTRE ALTURA DE OLA Y PERÍODO, K_W

Cuando el sucesivo análisis de múltiples playas en base al factor $K_a = H'_s/H_o$, siendo H'_s la altura de ola incidente y H_o la altura de ola dada por la fórmula de Iribarren $H_o = 0,1276 T^{3/2}$ (T en segundos y H en metros), me llevó a la conclusión de que $K_a = K_W.K_r.K_d$, siendo K_W el coeficiente Sea-Swell en altamar, K_r el coeficiente de refracción y K_d el coeficiente de difracción, pasé a analizar el coeficiente K_W con mayor detenimiento.

En primer lugar, partiendo del supuesto de que la relación de Iribarren debía basarse en un

fenómeno físico derivado del proceso de generación del oleaje, pasé a comparar las fórmulas que da el Shore Protection Manual (SPM) para la altura de ola H y el período T , generados por un viento de velocidad V en un fetch F , que son

$$\frac{gH}{V^2} = 1,6 \times 10^{-3} \left[\frac{gF}{V^2} \right]^{1/2}$$

$$\frac{gT}{V} = 2,857 \times 10^{-1} \left[\frac{gF}{V^2} \right]^{1/3}$$

y entre ambas se puede eliminar el fetch, llegándose a la ecuación:

$$H = 1,05 T^{3/2} (g.V)^{1/2}$$

Aunque esta ecuación en las fórmulas empíricas del SPM implica una influencia de la velocidad del viento, no deja de ser sorprendente la igualdad de los exponentes respecto a la ecuación de Iribarren, extendida por mí a la descripción del perfil de equilibrio de las playas.

Posteriormente, he analizado múltiples datos de oleaje, presentados en diversos artículos nacionales e internacionales, y he comprobado que los fuertes temporales presentan valores K_W próximos a la unidad. Mi conclusión es que la clasificación SEA-SWELL, generalmente admitida, es sólo un calificativo del tipo alto-bajo, y a mi juicio debería tomarse el coeficiente $K_W = H_s/H_o$ (altura de ola en altamar dividida por la altura de ola de Iribarren) como característica fundamental del oleaje. Entonces SEA significaría valores $0,7 < K_W < 1,4$ (rara vez he encontrado valores superiores y sólo en algunas puntas valores mayores que la unidad), mientras que SWELL significaría valores $K_W < 0,7$. No creo que la ingeniería oceanográfica deba seguir contentándose con calificar de "alto" (mar de viento o SEA) o "bajo" (mar de fondo o SWELL) a los oleajes.

C.4. VISCOSIDAD Y ECUACIONES ADIMENSIONALES

En la publicación de artículos en revistas internacionales existe una fuerte preocupación por la adimensionalidad de las ecuaciones. A los efectos de facilitar los cambios de unidades que en cada país son habituales, esta preocupación está

No creo que la ingeniería oceanográfica deba seguir contentándose con calificar de "alto" (mar de viento o SEA) o "bajo" (mar de fondo o SWELL) a los oleajes

bien justificada. Y también lo estaría por la presunción de que ello obliga a una mejor adaptación a la realidad física que se pretende describir. Sin embargo, creo que cuando se pretende obtener unas fórmulas empíricas, esta presunción puede resultar equivocada.

Para aclarar el sentido de esta afirmación, me remito a las ecuaciones del SPM antes expuestas. Es fácil comprobar que ambas son dimensionalmente correctas, y que no implican ningún coeficiente dimensional. Sin embargo, hay un error muy grave al no tener en cuenta la viscosidad cinemática, ν , del agua del mar. La viscosidad de los líquidos varía sustancialmente, y disminuye muy rápidamente al aumentar la temperatura. A pesar de ello, puede ser admisible considerar que es una característica poco variable respecto a las observaciones empíricas que se hacen en ingeniería oceanográfica, pero creo que prescindir de ella en la pretendida adimensionalidad de las ecuaciones puede inducir a errores importantes, sobretodo de interpretación física de los fenómenos que se pretende cuantificar.

La importancia de tal error se me hizo patente al observar una pequeña playa situada a levante de la Isla del Espalmador (Formentera, Baleares). Observé que bajo el ligero oleaje que incidía con crestas sensiblemente paralelas a la orilla, las olas rompían en derrame a lo largo de toda la cresta hasta unos 10 m de la orilla. Al acercarse más, se distinguían dos zonas de la playa claramente diferenciadas. En una las olas seguían rompiendo hasta su pequeña reflexión en la orilla. En la otra las olas dejaban de romper. Extrañado ante tan diferente comportamiento, examiné con detenimiento las aguas y observé que en la zona donde las olas dejaban de romper las aguas tenían en suspensión una gran concentración de alga muerta y triturada. Al recorrer dicha zona pude comprobar que la suspensión de alga era sensiblemente uniforme en toda la masa de agua y que ésta era apreciablemente más viscosa que en la zona limpia de algas. La conclusión me pareció evidente: a mayor viscosidad, mayor era la altura de ola compatible con una misma profundidad y un mismo período del oleaje.

A título de sugerencia, teniendo en cuenta que la viscosidad cinemática tiene las dimensiones ($L^2 T^{-1}$), la fórmula de Iribarren quedaría adimensional en la forma

$$H_0 = K T^{3/2} g^{2/3} \nu^{1/6}$$

COMENTARIO FINAL

Realmente es complejo y difícil el concepto de equilibrio frontal de las playas y de ello es prueba la discrepancia entre los autores del artículo y la numerosa familia de investigadores que sigue el "modelo de perfil parabólico".

El hecho de haber comprobado que los autores corroboran mi teoría y justifican mi fobia por el "nefasto modelo parabólico", constituye una pequeña satisfacción personal. Satisfacción muy exigua si se compara con el gran esfuerzo realizado para elaborar, a lo largo de 30 años de dedicación de mi trabajo como profesional y de la mayor parte de mi tiempo de ocio, mi "modelo de dos rectas" enmarcado en una visión tridimensional y genética de las formaciones sedimentarias.

A pesar de la sencillez conceptual de mis modelos, su justificación es compleja y su asimilación complicada, pues ha requerido una elaboración a través de numerosos trabajos y artículos. Ello hace muy difícil, para mi, su transmisión al mundo de habla inglesa.

Hay que tener presente que el perfil de una playa es algo más real y menos variable de lo que creen muchos investigadores. Quien ha contemplado y se ha bañado en muchas playas sabe que cada una tiene unas características definidas, entre las cuales figura un perfil con determinada pendiente que, salvo modificaciones locales en las barras, es prácticamente invariante. Mi teoría pretende definir la relación existente entre dicha pendiente (o más bien pendientes de rotura y de reflexión), el clima marítimo, los condicionantes de contorno (salientes próximos), los fondos indeformables y el tamaño de la arena (hay también situaciones singulares cuando existen transportes frontales, con posibles avances o retrocesos del perfil).

Como me decía H.Swart, mi teoría está intermedia entre las de "simple caja negra" y las de "hidráulica teórica pura". Las primeras tienen el problema de desvincularse excesivamente de los fenómenos físicos implicados; las segundas conducen generalmente a la desvinculación entre el modelo teórico y el prototipo real. Con mi perfil teórico se puede contrastar el perfil real con los principales factores que lo determinan, aunque tan sólo queden implícitos los mecanismos de transporte del sedimento. Y al decir "perfil real"

El perfil de una playa es algo más real y menos variable de lo que creen muchos investigadores

puede incluirse el perfil de un ensayo en modelo reducido, pero con una aclaración muy importante: la duración del ensayo tiene que ser suficiente para que la evolución del perfil se aproxime a su equilibrio real.

Creo que algunos de mis planteamientos implican una revolución en la forma de interpretar los ensayos en modelo reducido y cuestionan los modelos matemáticos generalmente admitidos para el perfil de equilibrio de las playas. Quizás por esta razón ninguno de los centros españoles de investigación o enseñanza, que no tienen pro-

blemas de lenguaje, se ha atrevido a contrastar o rebatir mis teorías.

A mi juicio lo que más falta en la Ingeniería de Costas es una discusión clara, profunda y constructiva, sobre la abundante información que se obtiene de los enormes esfuerzos de investigación que se desarrollan en todo el mundo, y hoy por hoy debería enfocarse hacia una comprensión intuitiva y práctica del comportamiento de las formaciones sedimentarias, más que hacia la profundización de los mecanismos hidrodinámicos teóricos que implican sus procesos de equilibrio. ●

GERENCIA, DIRECCIÓN DE PROYECTOS
❖❖❖
PLANIFICACIÓN Y SEGUIMIENTO DE OBRAS
❖❖❖
DISEÑO DE APARCAMIENTOS
❖❖❖

Manuel Sobreviola
Ingeniero de Caminos
35 años Director Técnico de COMYLSA, Empresa Constructora

Rey Francisco, 16-3º Derecha
28008 Madrid. Tel.: 542 09 57