

Perfil de la playa y tamaño de la arena (3) (*)

Por CARLOS GARAU SAGRISTA
Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

En el artículo se describen las relaciones que ligan los diferentes parámetros del «perfil esquemático» de las playas con las características del clima marítimo y con el tamaño de la arena.

El perfil medio de una playa, correspondiente a una formación arenosa sujeta a las variaciones aleatorias de la acción de los oleajes, es asimilable a una línea quebrada compuesta por las tres rectas RN, NP, PM de la Fig. 1 a, que se denomina «perfil esquemático completo». Estas rectas definen la masa sedimentaria activa, la cual se asienta sobre una plataforma litoral que a partir del punto M hacia altamar será generalmente asimilable a una recta de pendiente m_p . En el artículo se describen las relaciones que ligan los diferentes parámetros del «perfil esquemático» con las características del clima marítimo y con el tamaño de la arena, en aquellas playas constituidas por arenas suficientemente bien clasificadas como para ser representadas por su tamaño mediano (D_{50}) y no sujetas a un transporte frontal apreciable.

El desarrollo del modelo es fruto de la esencial distinción entre la rotura de la ola en su recorrido sobre la pendiente sumergida m'_s , antes de alcanzar el punto P con cierta altura residual H_r y la reflexión de dicha ola residual sobre cierto tramo del frente de la playa, de pendiente $\tan \delta'$ (Fig. 1, b). La evaluación de H_r se logra a partir de los resultados de los ensayos de R. Gourlay, 1980, y el talud de reflexión se ajusta a la expresión de Iribarren, 1954, mientras que los límites del perfil activo se basan en las ecuaciones de Swart, 1974. El contraste del modelo con numerosas playas del Mediterráneo (costas catalana y balear) ha permitido comprobar la sensibilidad de la pendiente de rotura m'_s al coeficiente de abrigo K_a (que evalúa el efecto reductor de altura de ola debido a la refracción y difracción de los máximos oleajes) y al fac-

tor F_p de los fondos frontales (que evalúa la influencia de la plataforma de asiento tanto por su efecto bidimensional reductor de energía, como por su efecto tridimensional reductor de la oblicuidad).

El modelo es aplicable a los casos de perfil incompleto, y en el artículo se presenta su ajuste en el caso de playas abiertas, $K_a \approx 1$, (Fig. 3). El modelo permite también una correcta descripción del retroceso imputable a una elevación de nivel (retroceso potencial) o bien a una sobre elevación eventual (retroceso restringido), (Fig. 4). Para una mejor comprensión de los mecanismos dominantes en uno u otro tramo de perfil, se describen los diferentes tiempos de relajación de cada uno de los tramos de la formación sedimentaria (Fig. 5). Finalmente, tras comprobar el correcto ajuste del «perfil esquemático» a los resultados de los ensayos de Chesnut y Galvin, 1974 (Fig. 6), se estudian las variaciones de pendiente de equilibrio en función del régimen de transporte frontal.

1. INTRODUCCION

Los avances de la Ingeniería de Costas en el conocimiento de los mecanismos que operan e interrelacionan las acciones del mar y la respuesta de la formación sedimentaria, tanto en la forma del perfil como en su composición granulométrica, son realmente importantes. La descripción de la ola real bajo sus aspectos estadístico y espectral es cada vez más sofisticada y los modelos matemáticos más perfeccionados. Sin embargo, el comportamiento de las playas es tan complejo, que aún hoy no se ha llegado a una correcta descripción de las relaciones que ligan: tamaño de la arena clima marítimo-pendientes de equilibrio.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 1 de mayo de 1989.

Tres son a mi juicio las razones de la falta de ajuste entre la teoría y la realidad, imputables a un inadecuado enfoque de tres efectos o mecanismos fundamentales:

a) El mecanismo regulador de la ola residual máxima que puede reflejarse sobre la arena de la playa.

b) El efecto regulador de los fondos frontales indeformables y del coeficiente de abrigo.

c) La fundamental importancia de las sobre-elevaciones en la deformación de la zona próxima a la reflexión, conocida por perfil en escalón o en barra.

El primero de ellos es prácticamente ignorado a pesar de haberlo propuesto reiteradamente (C. Garau, 1974, 1984, 1985, 1986 a,b,c). El segundo es harto conocido, pero es irreproducible en el laboratorio puesto que la profundidad del tanque y las dimensiones del modelo, necesarias para abarcar toda la zona que influye sobre el clima real hasta determinar las características de los olas incidentes sobre la playa activa, resultan inadmisibles. En el laboratorio se supone que tales efectos tridimensionales son conocidos (refracción, difracción, prerrotura, soldadura, filtrado...) y que se limitan a condicionar el oleaje incidente, el cual se supone bidimensionalmente reproducido en el modelo. El tercero ofrece la dificultad contraria: no se pueden cuantificar en la naturaleza las variaciones de nivel imputables a diferentes causas ni se pueden separar sus efectos respecto de otros movimientos de la masa sedimentaria. A este último se le está prestando mucha atención los últimos años (Kriebel y Dean, 1985; P. Vellinga, 1982, 1984; Van de Graaf, 1986).

Otra causa indirecta que ha dificultado la comprensión de la importancia del mecanismo regulador de la ola residual máxima admisible, es la descripción del perfil de la playa como parabólico. El buen ajuste de una curva única de pendiente decreciente, ha inducido a prescindir de la diferente razón de ser de las tres pendientes reales: la zona de prerrotura m_p , la zona de rotura m'_s y el frente de reflexión $\tan \delta'$, por cumplirse generalmente la condición ($m_p < m'_s < \tan \delta'$), aunque la primera queda fuera de la zona activa y no es variable de res-

puesta en al actualidad, la segunda es gobernada por mecanismo de rotura y la tercera lo es por el mecanismo de reflexión.

Para remarcar la posibilidad $m_p > m'_s$, este caso se representa en la Figura 1.a, el cual es frecuente en las formaciones sedimentarias completas, como puede verse en las playas del delta del Llobregat (Barcelona), cuyos 24 km de orilla ofrecen: $m_p > m'_s$ en 14 km; $m_p \approx m'_s$ en 4 km; y $m_p < m'_s$ en 6 km (Garau, 1984). La condición $m_p \leq m'_s$ depende del proceso genético del tramo de frente deltaico en cuestión. Cuando el perfil activo RNPM se asienta en una base rocosa es frecuente que a causa del proceso genético se dé la condición $m_p < m'_s$, aunque también puede ocurrir que la pendiente de rotura sea superior a la de la base (C. Garau, 1986, c).

2. EL PERFIL ESQUEMATICO COMPLETO

En la Figura 1.a se representa el alzado esquemático de una playa de perfil completo, que se puede determinar partiendo de cuatro datos principales: 1. El tamaño de la masa sedimentaria, supuesta una distribución típica de una playa de material homogéneo, y por tanto representable por su tamaño mediano D_{50} ; 2. El período característico T_s de los máximos oleajes, determinado por las cuñas del fetch geográfico según la expresión de Iribarren [1]; 3. El coeficiente de abrigo K_a , o relación entre la altura de ola incidente H'_s y la de altamar H_s , para los máximos oleajes; 4. La pendiente de la plataforma de apoyo m_p .

Las fórmulas de Iribarren y la definición del coeficiente de abrigo:

$$T_s = 4.456 F^{1/6} \quad [1]$$

$$H_s = 0.1276 T_s^{3/2} \quad [2]$$

$$K_a = H'_s/H_s = H'_s/0.1276 T_s^{3/2} \quad [3]$$

son ecuaciones dimensionalmente incorrectas, siendo válidas para las unidades especificadas en la Figura 1.c: F (km); T_s (seg); H_s (m).

Puede extrañar el uso de la simplificación determinística del clima marítimo, pero no debe olvidarse que T_s representa el conjunto de acciones del mar y no una sola en concreto. Probablemente en el futuro deba sustituirse por

PERFIL DE LA PLAYA Y TAMAÑO DE LA ARENA

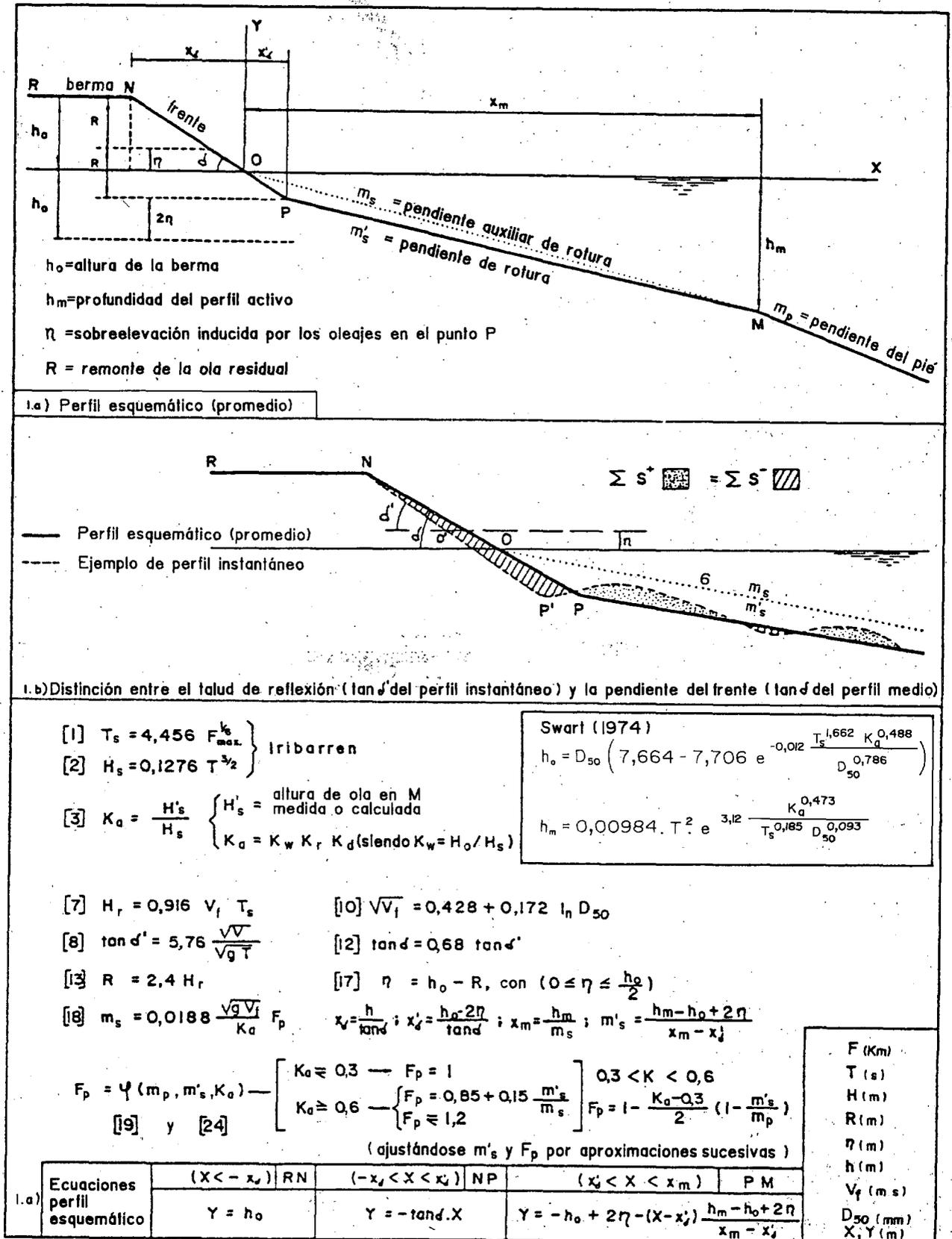


Fig. 1.—Perfil esquemático completo (Garau, 1986).

el período correspondiente a la máxima energía, cuando el conocimiento experimental derivado de una extensa red de registro de oleaje lo permita (en cuyo momento habrá que reajustar los coeficientes de las formulaciones de la Figura 1.c) pero hoy por hoy la red de datos es incipiente, al menos por lo que respecta a los procesos litorales. La altura de ola de altamar H_s , que se utiliza para definir el coeficiente de abrigo según la ecuación [2], representa el límite de separación entre mar viva y mar de fondo del oleaje teórico, siendo tal desviación imputable tanto a los efectos locales de la difracción y de la refracción (K_d , K_r), como a la transformación del oleaje fuera del área de generación (decay).

El modelo de perfil que se propone está constituido por tres rectas:

El tramo **RN**, horizontal a la cota $+h_o$, corresponde a la berma de una playa programada. Sería la superficie que ofrecería un delta, si no fuese recubierta por dunas (acción eólica) o por lodos fluviales (top sets). Puede estar ausentes en muchas playas.

El tramo **NP**, de pendiente tan δ , corresponde al frente de playa sometido al fenómeno de flujo y se extiende desde el límite o borde de la berma de cota $+h_o$, hasta la profundidad del punto P de cota $(2\eta - h_o)$. Aunque η corresponde a una sobre elevación del nivel medio del mar, se considera como una característica del perfil medio dependiente del tamaño del sedimento y del clima marítimo.

El tramo **PM**, de pendiente m'_s , corresponde a la playa activa, sometida al proceso de rotura del oleaje. Se extiende, en las formaciones de perfil completo, hasta la profundidad del límite de transporte significativo h_m . En las playas de perfil incompleto, el tramo PM quedará restringido por su intersección con el perfil de la plataforma rocosa de apoyo (Ver Figura 3).

2.1. Límites del perfil activo (perfil medio)

Los límites del perfil activo, h_o y h_m , se obtienen introduciendo en las expresiones de Swart (1974) los máximos valores determinados por el fetch geográfico y las fórmulas de Iribarren [1], [2] y el coeficiente de abrigo [3]. Se

ha comprobado que los límites así obtenidos se ajustan a los que presentan las playas abiertas ($K_a = 1$), siempre que se trate de perfil completo. Ha resultado reveladora la comprobación de que la altura del paralelogramo de transporte significativo en las playas del delta del Llobregat ($h_o + h_m \approx 15.3$ m) ha quedado registrada geológicamente en el espesor del acuífero de dicho delta, cuyo valor medio está entre 15 y 16 m. En las playas abrigadas, la altura de ola viene afectada por el coeficiente de abrigo $K_a = H'_s/H_s$.

El contraste del modelo que aquí se describe se ha hecho en las playas del Mediterráneo, donde se puede admitir que la ecuación [3] equivale a la siguiente:

$$K_a = K_d \cdot K_r \quad [4]$$

siendo K_d y K_r los coeficientes de difracción y de refracción, respectivamente, calculados para oleaje regular de período T_s dado por la ecuación [1]. En grandes mares y océanos, las expresiones [2] y [4] pueden resultar excesivamente alejadas del clima real debido a la importancia que adquieren los oleajes tipo swell a medida que el fetch aumenta en relación a las dimensiones típicas de los sistemas meteorológicos que producen los temporales.

2.2. Altura de ola residual H_r y ángulo de reflexión δ' (perfil instantáneo de equilibrio)

El principal mecanismo regulador del perfil de la playa consiste en la limitación de la altura de ola residual $H_{r\text{máx}}$ que puede reflejarse sobre un talud de arena de un determinado tamaño. La arena no puede resistir la rotura directa de la ola, pero sí adoptar el talud de ola H_r , con que las olas alcanzan la zona de flujo y reflujo, tras su recorrido por la zona de rompientes.

Llamando tan δ' a la pendiente instantánea de reflexión (Fig. 1.b) tendremos, según la fórmula de Iribarren:

$$\tan \delta' = \frac{8}{\sqrt{2g}} = \frac{\sqrt{Hr}}{T} \quad K_1 \quad [5]$$

siendo g la aceleración de la gravedad y K_1 un coeficiente de reajuste para la reflexión óptima.

La ecuación [5] fue formulada por Iribarren (1954) para determinar el talud límite entre reflexión y rotura de la ola. Iribarren estableció ambas condiciones para la profundidad virtual d' del «Cuadrilátero de avance» en la orilla, de la forma siguiente:

$$\text{Condición de reflexión: } d' = \frac{T}{8} \sqrt{gd'} \tan \delta'$$

$$\text{Condición de rotura: } d' = H_r/2$$

donde H_r es la altura de ola al pie de la pendiente de reflexión y T el período. El «Cuadrilátero de avance» implica un cuarto de la longitud de onda del entorno del punto en cuestión, y su profundidad media determina la longitud de onda en función del período.

El valor máximo que puede alcanzar H_r viene determinado por el tamaño del sedimento y por el período del oleaje. El tamaño determina la velocidad de caída de la partícula V_f y el período T limita el tiempo en que la partícula, puesta en suspensión al paso de la cresta, puede volver a depositarse. Así llegamos a la expresión

$$H_r \leq K_2 V_f T \quad [6]$$

en la cual K_2 no depende de las características de la arena ni del período de oleaje. Los resultados obtenidos en los ensayos de R. Gourlay (1980, 3.2.b, c y f) permiten una estimación de la constante K_2 (C. Garau, 1984) por lo que

$$H_{r \text{ máx}} = 0,916 V_f T \quad [7]$$

y sustituyendo en [5]

$$\tan \delta' \leq 5,414 = \frac{\sqrt{V_f}}{\sqrt{gT}} K_1 \quad [8]$$

la constante K_1 es, según la Figura 3.2.g de R. Gourlay:

$$K_1 \approx 1 \quad [9]$$

La velocidad de caída de la partícula V_f varía sustancialmente con el tamaño por lo que, prescindiendo de otras pequeñas variaciones en función de la naturaleza del sedimento, de la temperatura y de la salinidad local del agua, para la gama de tamaños de las arenas de playa

podemos utilizar la expresión

$$V_f = 0,428 + 0,172 \ln D_{50} \quad [10]$$

que se ajusta correctamente a la curva de Schulz (1954) para $D_{50} > 0,15$ mm.

Así con las expresiones [7] Y [10] podemos determinar los valores de $H_{r \text{ máx}}$ para cualquier oleaje. Para evaluar la pendiente de la zona de flujo y reflujo aplicaremos las expresiones [8] Y [10] salvo cuando la altura de ola residual sea inferior al valor límite, en cuyo caso la ola incidente no habrá roto y será de aplicación la ecuación [5] que podemos escribir:

$$\tan \delta = \frac{8}{\sqrt{2g}} \frac{\sqrt{H_o K_s K_r K_d}}{T} K_1 \quad [11]$$

con la condición $H_r = H_o K_s K_r K_d < (H_r)_{\text{máx}}$ y siendo K_s el coeficiente de asomeramiento (shoaling) y H_o la altura de ola de altamar.

2.3. Pendiente del frente de playa (perfil medio)

Tal como se indica en la Figura 1.b, el frente de la playa presenta generalmente una pendiente más suave que el perfil instantáneo de reflexión ($\tan \delta < \tan \delta'$). Ello se debe a dos causas: de un lado, los grandes oleajes que afectan a toda la playa activa y remodelan la berma, producen generalmente «perfil en barra» durante el temporal, pero al mismo tiempo que amaina el oleaje se produce la nueva remodelación de tipo acretivo, con desplazamiento de la orilla hacia el mar sin alterar la barra de flujo. Por consiguiente la pendiente resultante $\tan \delta$ será más suave que la de respuesta instantánea $\tan \delta'$. La estimación del talud del frente de playa NP, en playas con marea muy reducida, prácticamente despreciable, puede hacerse con la expresión:

$$\tan \delta = 0,68 \tan \delta' = 3,913 \sqrt{V_f/gT_s} \quad [12]$$

Por otra parte, en las playas sujetas a una apreciable carrera de marea, el frente presenta una pendiente intermedia entre $\tan \delta'$ y m'_s . Si la carrera de marea es grande en relación a h_o , $\tan \delta$ tendrá valores más suaves, por identificarse más con la zona de rotura m'_s que con la

PERFIL DE LA PLAYA Y TAMAÑO DE LA ARENA

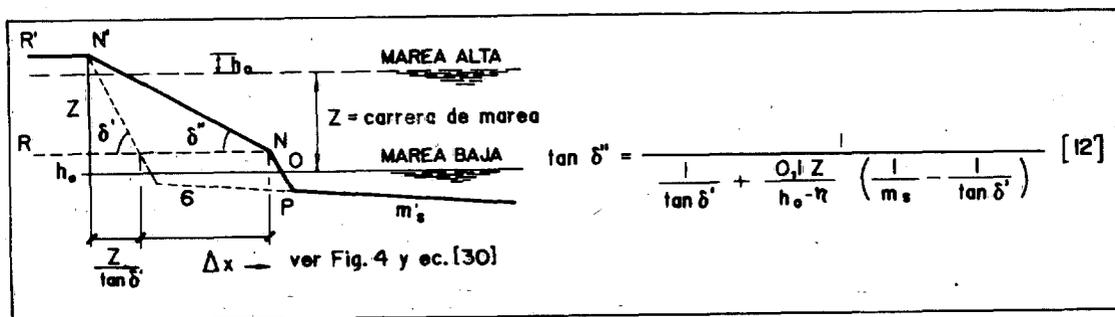


Fig. 2.—Modificación de la pendiente del frente de la playa con la marea.

zona de reflexión $\tan \delta'$, y la pendiente del frente se puede estimar utilizando la ecuación [30], que será introducida más adelante, y con referencia a la Figura 2.

2.4. Límite inferior del frente de playa

La observación de la naturaleza indica que el límite inferior del frente de la playa queda más alto de lo que le correspondería por simetría de h_0 respecto al nivel del mar en reposo. El perfil esquemático de la Fig. 1 reproduce esta característica mediante la introducción de la sobreelevación η , típica del perfil medio de la playa. La evaluación de η se consigue al haber observado que, en las condiciones de reflexión, el remonte R (run-up) viene dado por la expresión:

$$R = 2.4 H_r \quad [13]$$

Según se dedujo (C. Garau, 1986 c) al aplicar los gráficos del S.P.M. a diversas situaciones teóricas de playas ajustadas al modelo de la Fig. 1. Por otra parte, esta ecuación concuerda con el resultado de R. Gourlay (1980, Fig. 3.2.c) y corresponde a la conocida expresión $R/H_r = \xi$ dada por Hunt (1959), Battjes (1974), Ahrens (1985), siendo el parámetro de rotura $\xi = \tan \delta' / (H_r/L_0)^{1/2}$ y $L_0 = g T^2 / 2 \pi$. Introduciendo el valor de $\tan \delta'$ dado por [5] resulta:

$$\frac{R}{H_r} = \frac{\tan \delta'}{(H_r/gT^2/2\pi)^{1/2}} = \frac{4}{\sqrt{\eta}} K_1 \quad [14]$$

Para que las ecuaciones [13] y [14] concuerden exactamente, la constante K_1 de reflexión óptima

debe ser:

$$K_1 = \frac{2.4}{4/\sqrt{\pi}} = 1.064 \quad [15]$$

siendo K_1 el mismo coeficiente de las expresiones [5], [8] y [9]. La evaluación de los coeficientes K_2 y K_1 (ec. [7] y [15]) se basó en la estimación gráfica de los resultados de Gourlay (1980). Cuando se disponga de datos más aproximados es conveniente reajustar estos valores. Sin embargo, la pequeña variación de estos coeficientes apenas influye en el perfil esquemático puesto que no alteran el valor de R , toda vez que la ec. [13] se basa en otros resultados experimentales (S.P.M.), pudiéndose expresar en función de V_f y T exclusivamente:

$$R = 2.2 H_r / K_2 = 2.2 V_f T \quad [16]$$

Dado que el run-up evaluado por [16] al introducir $T = T_s$ se refiere al nivel medio de las situaciones extremas de temporal, en el punto P , la diferencia con el máximo ascenso de la ola debe atribuirse a la sobreelevación de dicho nivel medio respecto del mar en reposo. Se ha comprobado que la sobreelevación típica del perfil esquemático se ajusta correctamente a la realidad al calcularla por la ecuación

$$\eta = h_0 - R \quad [17]$$

para los sedimentos más frecuentes, tales que $D_{50} < 0.5$ mm con los cuales las fórmulas de Swart (1974) tienen validez, debiéndose cumplir la condición

$$0 \leq \eta \leq \frac{h_0}{2}$$

Para $D_{50} > 0.5$ mm se tomará $\eta = 0$

2.5. Pendiente de la zona de rotura

La playa activa sumergida viene definida en la Fig. 1.a por los puntos P y M. El primero queda determinado por las ecuaciones [12] y [17], mientras que del punto M hasta aquí sólo hemos definido su profundidad h_m . Para determinar el punto M utilizamos la pendiente auxiliar m_s correspondiente a la recta definida por la orilla y el límite del transporte significativo, habiéndose comprobado que se ajusta a la ecuación:

$$m_s = 0.0188 \frac{\sqrt{g} V_f}{K_a} F_p \quad [18]$$

(C.Garau, 1984, 1986 a,b,c,) donde F_p es una medida de la influencia de la plataforma de asiento y que depende de la relación entre las pendientes de la zona de rotura m'_s y de prerrotura m_p . El coeficiente F_p , en playas abiertas ($K_a = 1$) y de perfil completo, varía entre 0,85 y 1,2 pudiéndose estimar por la relación

$$F_p = 0,85 + 0,15 \frac{m'_s}{m_p} F_p \quad [19]$$

obtenida tras el análisis de los perfiles del delta del Llobregat, sujetos a un mismo clima y con un tamaño similar (Garau, 1984, 1986b). La pendiente m'_s se obtendrá a partir de la ecuación [18], teniendo en cuenta que según la Fig. 1

$$X_m = \frac{h_m}{m_s} \quad [20]$$

$$X'_{\delta'} = \frac{h_0 - 2\eta}{\tan \delta'} \quad [21]$$

$$m'_s = \frac{h_m - h_0 + 2\eta}{x_m - x'_{\delta'}} \quad [22]$$

Dado que las ecuaciones [18], [19] y [22] constituyen un sistema, y siendo así que el cálculo de F_p se modifica cuando el coeficiente de abrigo disminuye sustancialmente respecto de la unidad, es aconsejable proceder por aproximaciones sucesivas, comenzando por introducir en la ecuación [18] una primera estimación del coeficiente F_p .

Cuando la playa en cuestión presenta un abrigo importante, la influencia de los fondos frontales que se pretende evaluar con el coeficiente F_p pierde importancia. El factor F_p es una medida de la capacidad de los fondos de prerrotura para regular el estado del mar y consumir puntas de energía (aspecto bidimensional) y también de su capacidad de limitación de la componente oblicua del oleaje (aspecto tridimensional) no evaluable a través de K_a . Téngase en cuenta que K_a sólo evalúa la refracción y la difracción por su efecto reductor de la altura de la ola, y no su efecto reductor de la oblicuidad, pero los valores pequeños de K_a implican generalmente importantes efectos reguladores de la orientación de los oleajes.

El contraste del modelo con diversas playas de las Islas Baleares sugiere que para $K_a < 0,3$, el efecto de los fondos frontales es despreciable y para aplicaciones prácticas $F_p = 1$. También sugiere que para valores de $K_a > 0,6$ es válido el valor de F_p dado por [19]. Cuando K_a adquiere valores comprendidos entre 0,3 y 0,6 se puede aplicar un valor intermedio.

$$F_p = 1 - \frac{K_a - 0,3}{0,3} (1 - [Ec. 19]) \quad [23]$$

o bien

$$F_p = 1 - \frac{K_a - 0,3}{2} \left(1 - \frac{m'_s}{m_p} \right) \quad [24]$$

3. PERFIL INCOMPLETO

Tanto en la naturaleza como en el diseño de una playa artificial, la formación arenosa se asienta frecuentemente sobre fondos rocosos de profundidad inferior a h_m . Ello significa que tales fondos ejercen un «efecto barrera» (Fig. 3). Para evaluar tal efecto, en primer lugar admitimos que al dibujar el perfil esquemático determinado con $m_p = 0$ y $F_p = 1,2$, resulta que el perfil de la cubeta de apoyo puede ser sustituido por una plataforma horizontal situada a la profundidad d , tal que las áreas S_1 y S_2 sean iguales (Fig. 3). También admitimos que en el supuesto $d = h_m$, el coeficiente F_p tomaría su valor límite ($F_p = 1,2$) y que en caso de

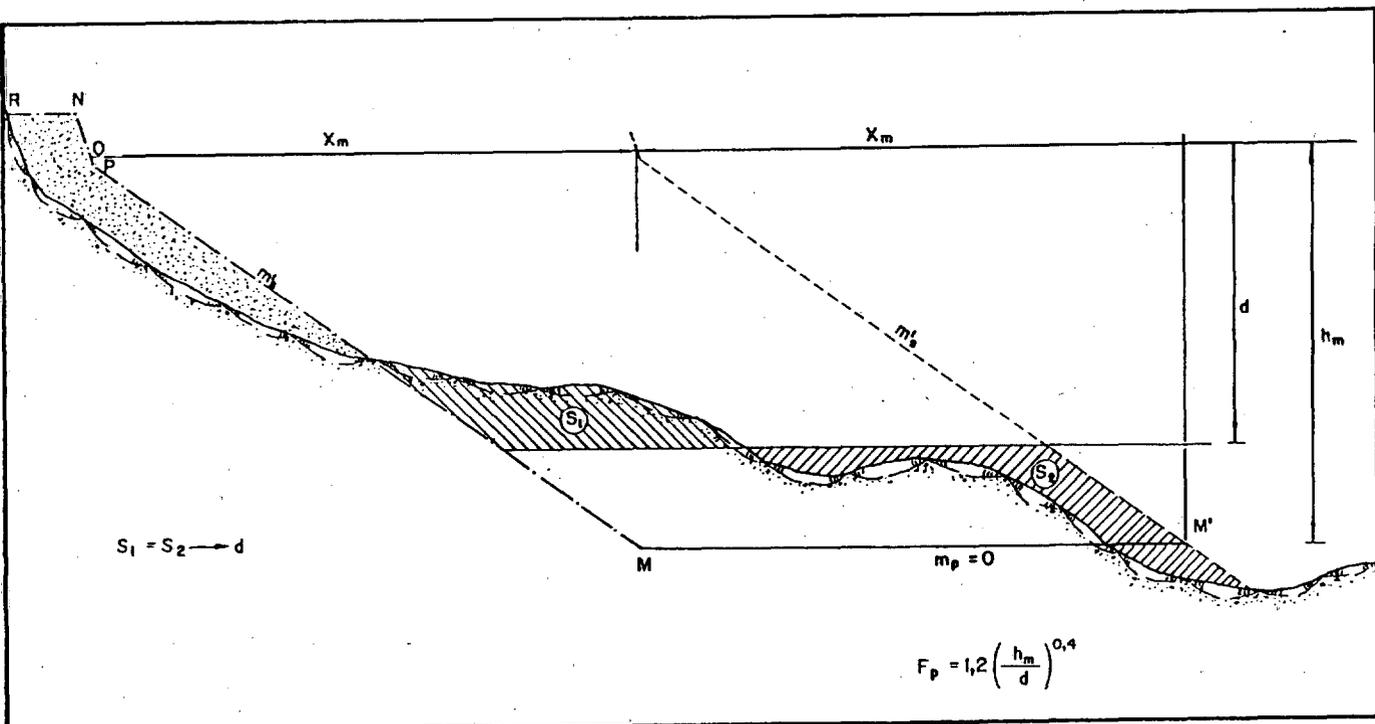


Fig. 3.—Perfil incompleto. Estimación de efecto barrera.

ser $d < h_m$, el coeficiente debe mayorarse con otro factor F_B .

El contraste del modelo con varios perfiles de las playas de la Bahía de Alcudia (Mallorca) sujetos a un mismo clima marítimo y a igual efecto de abrigo, sugiere la posibilidad de estimar F_B por la relación

$$F_B = \left(\frac{h_m}{d} \right)^{0,4} \quad [25]$$

y por consiguiente:

$$F_p = 1,2 \left(\frac{h_m}{d} \right)^{0,4} \quad (\text{para } K_a \approx 1) \quad [26]$$

Aunque hacen falta nuevos contrastes para confirmar la bondad de esta ecuación, esta aproximación al tema abre el camino hacia una evaluación más afinada y aporta una estimación orientativa muy útil en múltiples problemas de Ingeniería de Costas. Hasta ahora no se ha dispuesto de datos para poder estimar el efecto «barrera» cuando el abrigo es importante.

4. SOBREELEVACION Y BASCULAMIENTOS FRONTALES

Como es sabido, el reajuste del perfil a diferentes situaciones del mar se suele clasificar en **PERFIL EN ESCALON** y **PERFIL EN BARRA**. El cuadro siguiente indica las relaciones que generalmente se admiten entre los diferentes tipos de acción (oleaje, clima) y de respuesta (tipicidad del proceso, tipicidad del perfil).

TABLA 1

TIPO DE OLAJE	TIPO DE CLIMA	TIPO DE PROCESO	TIPO DE PERFIL
Swell	Verano	Accesión	Escalón
Sea	Invierno	Erosión	Barra
A C C I O N		R E S P U E S T A	

Tradicionalmente este fenómeno se ha atribuido a las diferencias de pendiente de ola, pero recientemente se ha llamado la atención sobre la importancia de la sobreelevación que

PERFIL DE LA PLAYA Y TAMAÑO DE LA ARENA

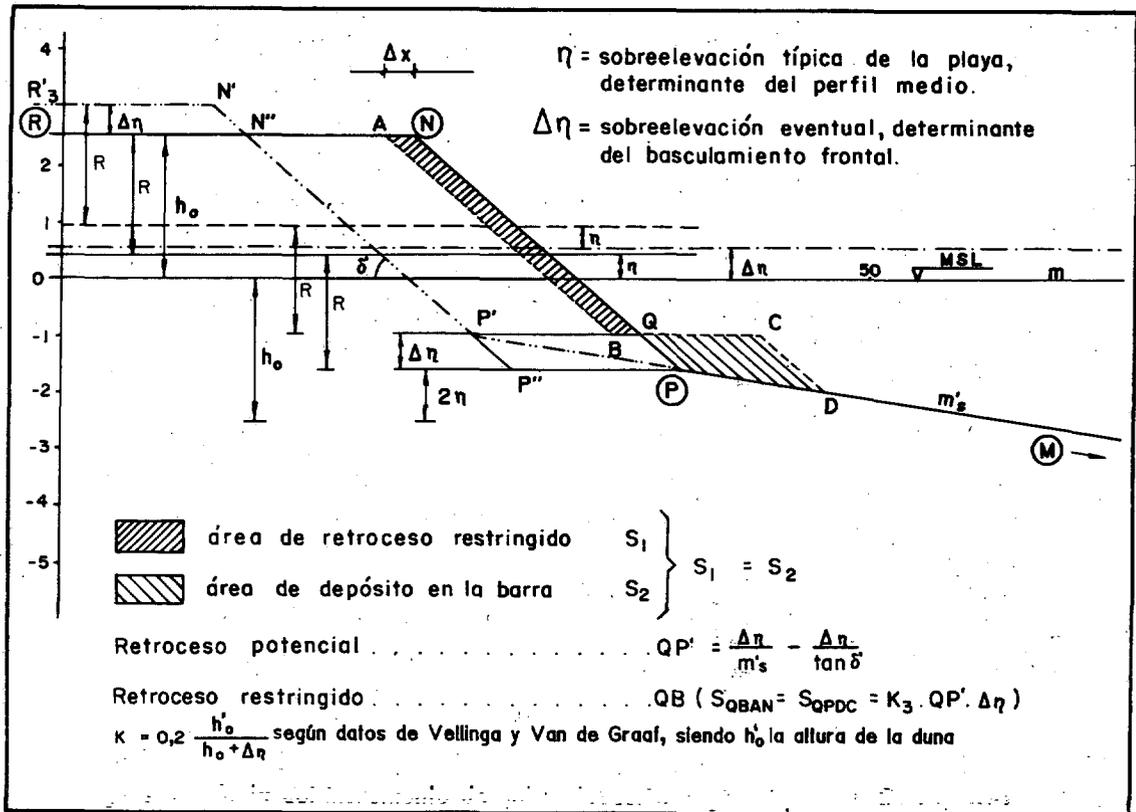


Fig. 4.— Efecto del incremento de sobreelevación según el perfil C. Garau, 1986.

experimenta el nivel del mar durante el temporal (Storm surge), (Kriebel y Dean, 1985; P. Vellinga, 1978, 1982, Van de Graaff, 1986). Vamos a ver cómo esta conclusión es coherente con el modelo de la Fig. 1.

Para ello en la Figura 4 se representa el efecto de una elevación del nivel del mar $\Delta\eta$, considerada bajo dos perspectivas diferentes: como una elevación permanente o como una sobreelevación excepcional. En ambos suponemos que se dan los máximos oleajes del clima marítimo local, y la permanencia o eventualidad nos conduce a dos tipos de retroceso que llamaremos potencial (QP') y restringido (QB), respectivamente.

4.1. Retroceso potencial

El incremento de nivel del mar $\Delta\eta$ implica una modificación de los tramos RN y NP de la Figura 1, que a la larga conduciría a un perfil idéntico al primitivo, con el tramo superior desplazado sobre la recta PM de pendiente $m's$.

De esta forma el retroceso potencial a largo plazo sería:

$$P'Q = \frac{\Delta\eta}{m's} - \frac{\Delta\eta}{\tan\delta} \quad [27]$$

Para que ello fuese posible, sería preciso que toda la arena del cuadrilátero $N''NPP'$ fuese desplazada, ya sea hacia el trasdós de la playa o bien hacia altamar. Esto significa un largo proceso de reajuste, con intervención de otros mecanismos como pueden ser el transporte eólico y el transporte longitudinal, que es escapan al proceso bidimensional.

4.2. Retroceso restringido

Sin embargo, debe haber una respuesta inmediata a la acción frontal, puesto que el incremento de sobreelevación implica que la ola residual que alcanza la orilla sea superior a la admisible $H_r(t) > H_{r\max}(D50, T)$ y ello produce una modificación del entorno de la orilla de modo que la arena del paralelogramo de re-

troceso QBAN se deposita formando la barra QPDC. De ahí resulta un retroceso BQ, relativamente rápido, como son todos los ligados al entorno de la orilla.

Nótese que el incremento de altura de ola, si no fuese acompañado de un incremento de la sobreelevación normal, induce tan sólo modificaciones en la zona de rotura, cuyo tiempo de relajación es muy largo respecto al que corresponde a los reajustes del entorno de la orilla. El proceso de rotura absorbe el incremento de altura de ola, de modo que H_r apenas sufre modificación a corto plazo, si no se incrementa la sobreelevación.

En los primeros estadios de respuesta, es decir, mientras no se hayan producido reajustes importantes del perfil en la zona de rotura, el retroceso del frente de la playa quedará restringido a un cierto valor BQ. Si admitimos que el área QPDC debe guardar una relación sencilla K_3 con el área QPP''P', que es el paralelogramo definido por $\Delta \eta$ como altura y el retroceso potencial P'Q como base, los datos de Vellinga y Van de Graaff (1986) permiten confirmar la hipótesis y estimar dicha relación con la ecuación:

$$K_3 = 0,2 \frac{h'_o}{h_o + \Delta \eta} \quad [28]$$

siendo h'_o la cota de las dunas o trasdos de la playa.

La determinación del basculamiento frontal $QB = \Delta x$, correspondiente a una sobreelevación eventual $\Delta \eta$ se puede evaluar aplicando el modelo de perfil esquemático de la Figura 1 a la playa en cuestión. Cuando la medición del nivel del mar durante el temporal (storm surge = $\Delta \eta$) incluye la sobreelevación inducida por la rotura del oleaje η (wave setup), y en el trasdós de la playa existen reservas de arena a una cota tal que $h'_o > h_o + \Delta \eta$, una vez conocidos los parámetros del perfil, el retroceso restringido se puede evaluar con la siguiente ecuación:

$$\Delta x = \left(\frac{1}{m's} - \frac{1}{\tan \delta'} \right) \frac{K_3}{h'_o + h_o - \Delta \eta - \eta} (\Delta \eta - \eta)^2 \quad [29]$$

Tal basculamiento se producirá si la sobreelevación va unida a una acción extrema del oleaje, típica del clima de dicha playa. Cuando la sobreelevación del nivel del mar $\Delta \eta$ no incluye la debida al oleaje, como es el caso de la carrera de marea, y la altura del trasdós de la playa h'_o es aproximadamente igual a $h_o + \Delta \eta$, la ecuación [29] se convierte en la siguiente:

$$\Delta x = \left(\frac{1}{m's} - \frac{1}{\tan \delta'} \right) = \frac{0,1}{h'_o - \eta} (\Delta \eta)^2 \quad [30]$$

5. TIEMPOS DE RELAJACION

El reajuste de las pendientes de una playa a la climatología local implica tiempos de relajación muy diferentes en las distintas zonas del perfil. Aunque la predicción de dicho tiempo es difícil de precisar con exactitud, el conocimiento del orden de magnitud aporta una orientación muy valiosa. En la Fig. 5 se representa el perfil esquemático y una hipotética situación del perfil instantáneo. En la parte superior de dicha Fig. 5 se indican las diferentes zonas del perfil esquemático y las ecuaciones que determinan las pendientes en función del tamaño del sedimento y de las características del clima, del fetch geográfico y de la topografía litoral próxima, representadas por las variables T_s , H_s y F_p/K_a . En la parte inferior se indican las diferentes zonas del perfil instantáneo, sujeto a un oleaje (H,T), en el cual cierto tramo intermedio entre la zona de reflexión y la zona de rotura está sujeto a importantes procesos de reajuste, según que la altura de ola residual H_r (sujeta a cambios rápidos durante la evolución del perfil hacia su equilibrio sea mayor o menor que $H_{r\text{máx}}$ dada por la ecuación [7]. Si es mayor, situación que se corresponde generalmente con una fuerte sobreelevación eventual $\Delta \eta$, la arena puesta en suspensión en el mecanismo de la reflexión pasa a formar una barra submarina, a costa del retroceso de la orilla. Si por el contrario, la H_r es inferior al valor dado por la ecuación [7], situación que se da generalmente si existe una barra previamente formada, la orilla avanzará a costa de la disminución de la barra submarina.

Debajo de la designación del mecanismo característico de cada zona del perfil instantáneo de la Figura 5, se indica la ecuación que go-

PERFIL DE LA PLAYA Y TAMAÑO DE LA ARENA

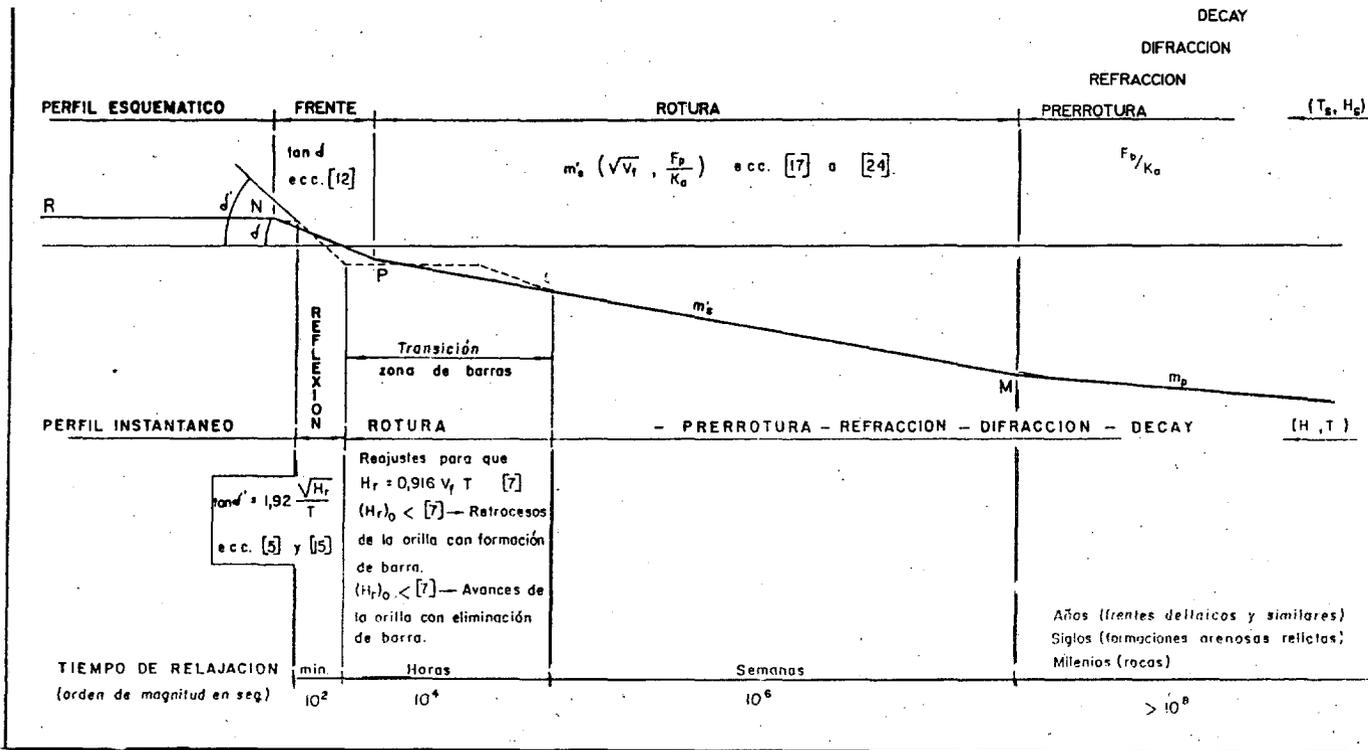


Fig. 5.—Tiempos de relajación de las pendientes de una playa de perfil completo.

bierna el proceso de readaptación de dicho perfil. En la zona de transición, la formación y eliminación de las barras conduce el ajuste de la ecuación [7], mientras que en la zona de reflexión se reajusta la pendiente al valor dado por las ecuaciones [5] y [15]. Finalmente, en la línea inferior de la Figura 5 se indica el orden de magnitud del tiempo de relajación de cada tramo. Puede destacarse que para las duraciones normales de los temporales, la mayor parte de la zona de rotura se comporta como indeformable ya que su tiempo de relajación es superior a la duración del oleaje. Sin embargo, a lo largo de tantos años en que toda la playa ha estado sometida a las acciones del clima marítimo, el perfil real se habrá ajustado sensiblemente a los oleajes de máxima capacidad de deformación, la cual está relacionada con el producto del flujo de energía y la duración. De ahí la estrecha relación entre el tamaño del sedimento y la pendiente de la zona de rotura de perfil medio que ponen de relieve las ecuaciones [10] y [18].

También puede destacarse que el tiempo de reajuste de la pendiente de reflexión $\tan \delta'$ es

del orden de escasos minutos, mientras que la zona de rotura precisa algunas horas para reajustarse. Ello pone de relieve la diferencia existente entre ambos mecanismos, que no es sólo cuantitativa. Sin embargo, la rápida respuesta de la pendiente de reflexión a las características de la ola residual (H_r , T) es difícil de apreciar en la naturaleza porque la altura de ola residual media varía muy lentamente, al ritmo de relajación de la zona de barras submarinas que hemos denominado de transición. En el laboratorio no se presta la suficiente atención a la diferencia de ritmo de relajación correspondiente al comportamiento reológico de las distintas zonas de la masa sedimentaria.

Chesnut y Galvin (1974) estudiaron las deformaciones del perfil y las variaciones del coeficiente de reflexión. Para interpretar sus resultados es preciso tener en cuenta que los datos de perfil se tomaban cada varias horas, salvo durante la primera hora, lo cual implica un ritmo correcto para las variaciones globales de la playa sumergida pero probablemente inadecuado para apreciar los reajustes en las proximidades de la orilla. Los ensayos de Chesnut y Gal-

vin (1974) sugieren multitud de comentarios en relación al perfil esquemático (Garau, 1974, 1984, 1986a, 1986b), pero alargarían innecesariamente el presente artículo. A modo de resumen, en la Figura 6 se representa el perfil teórico sobre los resultados de laboratorio, limitándonos a recordar que en este caso interviene la pendiente δ' (pues en el ensayo en modelo reducido no se produce el proceso de transformación de δ' en δ) y a señalar que el valor de m_p se toma de perfil correspondiente a la 375 horas. ¿Cabe mayor coincidencia entre la teoría y el resultado final del ensayo? Para mayor relevancia de tal ajuste, en las Figuras 6.A, 6.B y 6.C se representa la superposición del perfil teórico con las posiciones inicial, de las 150 horas y de las 375 horas, respectivamente, haciendo coincidir la posición de la orilla. Las figuras 6.A y 6.B indican la necesidad de retroceso del perfil para adaptarse al teórico y sugieren la posibilidad de predecir el retroceso en base a la necesaria compensación de áreas. Sin embargo, para la exactitud de dicha predicción, el perfil teórico ofrece una ambigüedad, toda vez que no se conoce previamente al ensayo el valor de m_p , el cual depende de la profundidad relativa del tanque respecto de h_m y de otras variables. En las circunstancias del ensayo, donde $k_a = 0.33$, la influencia de m_p en el perfil teórico es muy escasa, pero para la compensación de áreas dicha influencia es substancial.

El perfil esquemático de la Figura 6 se determina para:

$$T = 1,9 \text{ seg}; H = 0,11;$$

$$K_a = \frac{0,11}{0,1276 \cdot 1,9^{3/2}} = 0,33; m_p = 0,125;$$

$$D_{50} = 0,2 \text{ mm}$$

Obteniéndose los siguientes valores de las variables de la figura 1.

TABLA 2

F_p	h_o	H'_r	η	h_m	$\tan \delta'$	m_s	$x'_{\delta'}$	$x''_{\delta'}$	x_m	m'_s
0.99	0.094	0.0398	0	0.239	0.202	0.0268	0.47	0.47	8.92	0.0172
	(m)	(m)	(m)	(m)			(m)	(m)	(m)	

Puede observarse que, en este ensayo, m_p se extiende desde la profundidad $d = h_m = 0,239 \text{ m}$ hasta la profundidad del tanque $d = 0,72 \text{ m} > 2 h_m$, siendo m_p mucho más pendiente que m'_s ($m_p \approx 7.27 m'_s$).

6. VARIACIONES DEL PERFIL DE EQUILIBRIO SEGUN EL REGIMEN DE TRANSPORTE

La pendiente de equilibrio de la playa activa m'_s mantiene su relación con los factores de tamaño D_{50} , clima marítimo T_s , coeficiente de abrigo K_a y efecto de los fondos frontales F_p anteriormente descritas, sin que las variaciones del régimen de transporte longitudinal implique modificaciones importantes. Sin embargo, la existencia de transporte frontal altera substancialmente la relación.

1. **Mayoración de la pendiente.** Cuando un tramo de playa está sujeto a un importante transporte frontal hacia el mar (offshore) tanto si el equilibrio volumétrico es regulado por una aportación local desde el trasdós, como si se debe a una aportación lateral del transporte longitudinal neto, el perfil de equilibrio se hace más fuerte. Ello es lógico puesto que el exceso de pendiente debe posibilitar el transporte frontal hacia el mar. Un ejemplo de ello lo tenemos en la playa de Torredembarra (Tarragona) en el tramo de unos 500 m inmediato al Cabo Gros, cuyo análisis sugiere que para un transporte frontal de unos 25 m³/año por metro lineal de orilla, hacia el mar, se necesita un factor 1,8 de mayoración de la pendiente (en este caso:

$$T_s = 13 \text{ seg}; K_a = 0,85; F_p = 1;$$

$$D_{50} = 0,26 \text{ mm}; \frac{m'_s \text{ real}}{m'_s \text{ teórica}} = \frac{0,026}{0,0144} = 1,8$$

2. **Minoración de la pendiente.** Es lógico que si un tramo de playa está sujeto a un proceso frontal hacia tierra (onshore) se produzca una minoración de la pendiente de equilibrio. Si bien cabe pensar que tal sería la situación de las pendientes de la mayoría de las playas durante el proceso transgresivo, que terminó

PERFIL DE LA PLAYA Y TAMAÑO DE LA ARENA

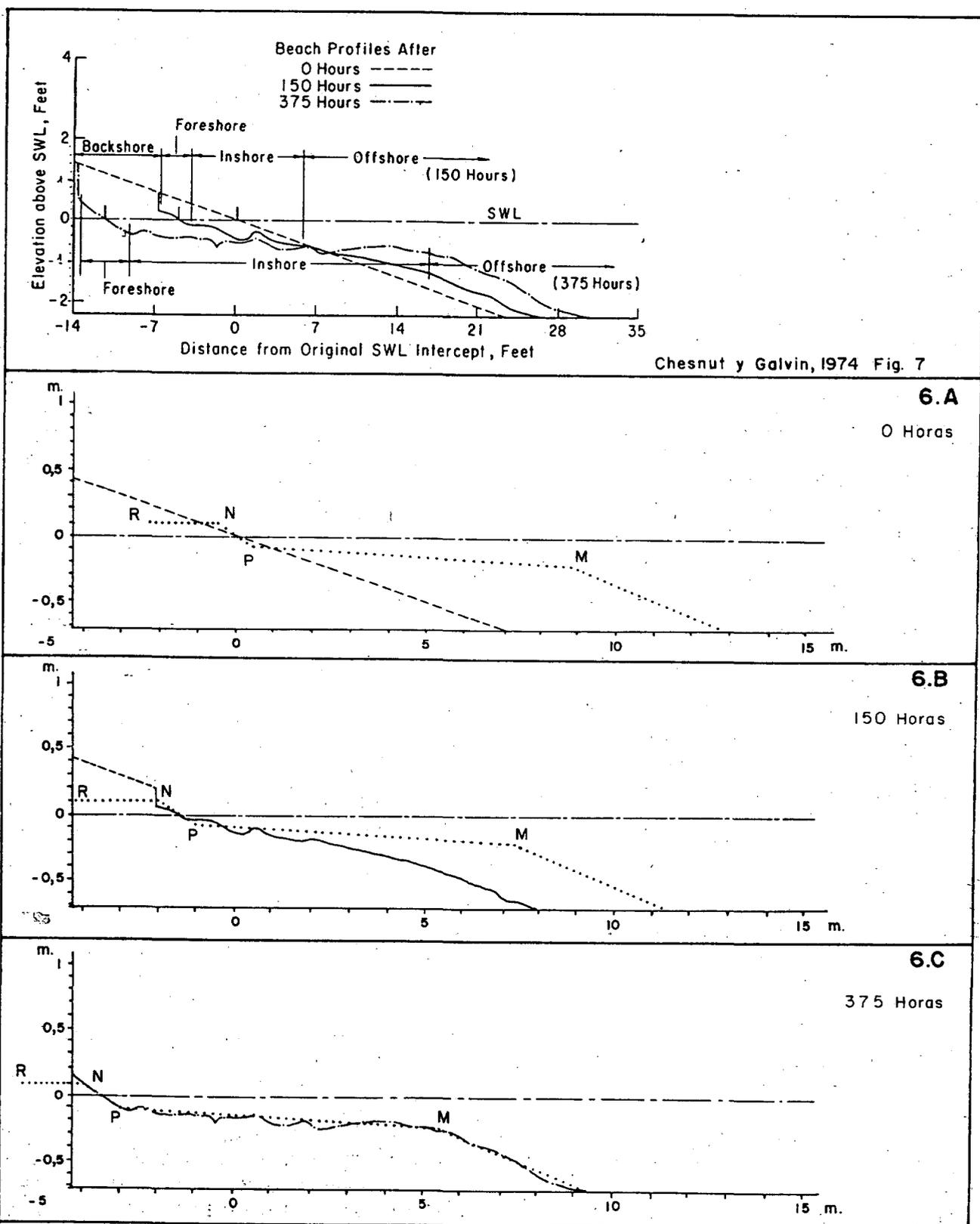


Fig. 6.— Superposición del perfil esquemático (C. Garau) a los resultados de los ensayos de Chesnut y Galvin (1974).

hace unos 2.500 años, y durante el subsiguiente período de reajuste tras la estabilización del nivel del mar relativo, hoy es una situación excepcional.

Hay sin embargo una situación más frecuente que consiste en una suavización de la pendiente en el tramo de playa próximo a una aportación fluvial, en los casos en que las condiciones de contorno dificultan la formación de la típica protuberancia de la línea de la orilla en planta y determinan el sentido del transporte longitudinal neto. Un ejemplo de tal situación lo tenemos en la playa de S'Arenal de Artá (Alcudia -Mallorca) en la cual se observa que para permitir que la aportación fluvial, equivalente a unos 2 m³/año por metro lineal de orilla, se incorpore al transporte longitudinal, el perfil real adquiere una pendiente minorada en 0,86 respecto a la del perfil teórico (en este caso: T_s = 13,31 seg; K_a = 1; F_p = 1,1; D₅₀ = 0,357 mm;

$$\frac{\text{m's real}}{\text{m's teórica}} = \frac{0,013}{0,0151} = 0,86$$

7. CONCLUSIONES

(1) El «perfil esquemático» propuesto constituye un método intermedio entre las teorías de absoluta caja negra (black box approaches) y las más detalladas descripciones de la hidráulica marítima. Una ventaja del presente modelo es que aporta una interpretación física de los parámetros y así permite una mejor comprensión de las diferencias entre los procesos naturales y los de laboratorio (Swart).

(2) La máxima altura de ola residual (H_{r máx} = K₂ V_f T, siendo K₂ ≈ 0.92) es un parámetro muy útil, prácticamente despreciado hasta ahora.

(3) Se puede definir un coeficiente K_w de tipificación del carácter SEA-SWELL del oleaje (K_w = H_o/H_s), dado por la relación entre la altura de ola de altamar H_o y la altura de ola característica H_s. Esta última, dada por la ecuación [2], puede escribirse en la forma dimensionalmente correcta H_s = K₄ g^{2/3} v^{1/6} T^{3/2}, siendo v la viscosidad cinemática del líquido, de dimensiones (L² T⁻¹), y K₄ una constante tal que para los valores medios del mar K₄ g^{2/3}

v^{1/6} = 0,1276 (m s^{-3/2}). Entonces K_w ≥ 1 caracteriza las olas de mar fresca (SEA) mientras que los valores K_w < 1 cuantifican el carácter de mar de fondo (SWELL).

(4) El coeficiente de abrigo puede definirse como:

$$K_a = K_w K_d K_r$$

(5) Las ecuaciones [8] y [18] implican dos diferentes parámetros de semejanza para el perfil de equilibrio:

parámetro de reflexión

$$Gr = \frac{\sqrt{V_f}}{gT} \rightarrow \tan \delta' = 5,414 Gr$$

parámetro de rotura

$$Gs = \frac{Gr}{H/gT^2} = \frac{\sqrt{g} V_f}{0,1276 (m s^{-3/2}) K_a T} \rightarrow$$

$$m_s = 0,024 Gs F_p$$

Puede remarcarse que el parámetro de rotura G_s es directamente proporcional a la inclinación de la ola incidente. También es proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad de caída de las partículas e inversamente proporcional al coeficiente de abrigo. Sin embargo, la geometría del perfil de equilibrio esquematizado por las rectas definidas por ambas pendientes viene distorsionado según la importancia de las medidas de η, h_o y h_m.

8. AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento al Dr. Harry Swart por su calurosa acogida al reconocer el potencial de este modelo de perfil y posteriormente sus consejos y ayuda en la versión inglesa. El punto (1) de las conclusiones es afirmación suya. También desea agradecer los consejos y ayuda del Dr. Michael R. Barnett vertidos en su revisión del artículo. Finalmente quiere expresar su agradecimiento al Dr. Robert G. Dean quien, tras ver la primera versión del artículo, no sólo aceptó con humor la sugerencia de que después de la Conferen-

cia Internacional de Ingeniería de Costas de Torremolinos se dejaría de utilizar el «perfil Dean» (continuo y de pendiente decreciente) sustituyéndolo por el «perfil Garau» (discontinuo y de trazos rectos), sino que apoyó la inclusión del artículo entre los pocos aceptados a última hora por el Comité de la A.S.C.E.

REFERENCIAS

1. AHRENS, J.P. and TITUS, M.F. 1985: «Wave runup formulae form smooth slopes». Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. III n.1, Jan: pp. 128 - 133.
2. BATTJES, J.A. 1974: «Surf similarity». Proceedings 14 th Coastal Engineering: pp. 466 - 480.
3. CESNUT, Ch.B. and Galvin, C.J. Jr. 1974: «Lab. profile and reflection changes for H/L = 0.02». Proceedings 14 th Coastal Engineering: pp. 958 - 977.
4. GARAU, C. 1974: «Reflexión del oleaje sobre la playa». R.O.P. dic. 1974: pp. 869-882 (R.O.P. = Revista de Obras Públicas).
5. GARAU, C. 1984: «Las pendientes de la playa y el tamaño de la arena». R.O.P. dic 1984: pp. 943-960.
6. GARAU, C. 1985: «Discusión sobre el artículo anterior» R.O.P. marzo 1985: pp. 195-198.
7. GARAU, C. 1986 b: «Un model de perfil de la platja». Espais (Generalitat de Catalunya) n. 2: pp. 41-47.
8. GARAU, C. 1986 c: «Litoral processes on the Maresme Coast: Man's impact or natural effects?». Proceedings IGU Comision on Coastal Environment: THALASSAS 1986.4: pp. 71-78.
9. GOURLAY, M.R. 1980: «Beaches: Profiles, processes and permeability»: Proceeding 17 th Coastal Engineering: pp. 1320-1339.
10. GRAAFF, J.Van de 1986: «Probabilistic design of dunes; an example from the Nether lands». Coastal Engineering, febr. 1986: pp. 479-500.
11. INMAN, D.L. 1983: «Application of coastal dynamics to the reconstruction of paleocoastlines in the vicinity of La Jolla, California». Quaternary Coastlines and Marine Archeology. Academic Press: pp. 1-49.
12. IRIBARREN, R. 1954: «Obras marítimas. Oleajes y diques». Dossat, S. A.

13. JOHNSON, D.L. 1983: «The California Continental Borderland: Landbridges, watergaps and biotic dispersals». Quaternary Coastlines and Marine Archeology. Academic Press: pp. 481-527.
14. KRIBEL, D.L. and DEAN, R.G. 1984: «Beach and dune response to severe storms». Proceeding 19th Coastal Engineering, Houston: pp. 1584-1599.
15. KRIEBEL, D.L. and DEAN R.G. 1985: «Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion». Coastal Engineering, sep. 85: pp. 221-245.
16. SWART, D.H. 1974: «A schematization of onshore-offshore transport». Proceedings 14th Coastal Engineering: pp. 884-900.
17. U.S. ARMY, C.E.R.C. 1973-1977-1984: «Shore Protection Manual» VELLINGA, P. 1984 «A tentative description of universal erosion profile for sandy beaches and rock beaches». Coastal Engineering, 8: pp. 177-188.

Carlos Garau Sacrista



Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, promoción 1960.

DAD-IESE (Universidad de Navarra, 1972). Es ingeniero jefe de la Zona Portuaria II-III de la Comissió de Ports de Catalunya. Ha sido jefe regional de Costas de Cataluña, 1964-1973; jefe de la División de Aprovechamientos Hidráulicos (CAPO), 1974-1977; director del Grupo de Puertos de Barcelona-Tarragona, 1977-

1981; director de la Comisión de Puertos de Cataluña, 1977-1981; profesor de «Puertos» y «Puertos Obras» en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Canales, Caminos y Puertos de Barcelona, 1976-1979.

Autor de numerosos proyectos de obras portuarias y de Ingeniería de Costas. Ensayos en modelo reducido en el tanque (modificado) del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, 1973-1975. Autor de diversos artículos, comunicaciones y conferencias, sobre movimientos de arenas y playas. Proyectos destacados: Puerto y Marina interior en la Urbanización Bahía Blanca, Villajoyosa, Alicante. Plan de Infraestructura de las Playas de Levante de Barcelona (director del proyecto).