

REFLEXION DEL OLEAJE SOBRE LA PLAYA (*)

INFLUENCIA DEL FENOMENO SOBRE LA CONFIGURACION DEL PERFIL Y DE LA FORMA EN PLANTA DE LA PROPIA PLAYA

Por CARLOS GARAU SAGRISTÁ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Se estudian en el artículo los efectos que la reflexión de las olas sobre la playa producen sobre ésta, en especial sobre la configuración del perfil de equilibrio y de la forma en planta de la playa. El artículo completa otros trabajos del autor publicados recientemente en la revista, sobre la configuración de playas en función del oleaje, considerando la aplicabilidad del método de los planos de oleaje. Se presentan ábacos en los que se indica la relación entre altura de ola residual, periodo de oleaje y talud límite de rotura. Asimismo, se considera la influencia de la reflexión sobre la formación y mantenimiento de barras submarinas.

1. INTRODUCCION

1.1. El fenómeno de la reflexión del oleaje fue ampliamente considerado por R. Iribarren, especialmente en los números 84 y 86 de su libro *Obras marítimas, oleajes y diques*. El objetivo de su estudio es primordialmente la determinación de las agitaciones que pueden presentarse por esta causa en el interior de un puerto y el diseño de las obras necesarias para eliminar, o por lo menos disminuir, sus efectos.

1.2. Otros autores han desarrollado estudios sobre la reflexión sobre taludes de suave pendiente. Así, J. Larras define el *coeficiente de reflexión* como relación entre la altura de la onda reflejada y la altura de la ola incidente, y establece un cuadro de valores de este coeficiente en función de la pendiente del talud de la obra o playa y del peralte de la ola.

1.3. Sin embargo, no conozco ningún estudio que contemple con suficiente detenimiento los efectos que la reflexión sobre la playa produce sobre la misma playa.

Y, a mi juicio, dicho fenómeno tiene una importancia trascendental, tanto en la configuración del perfil como en la forma en planta de la playa.

2. ALGUNAS OBSERVACIONES SOBRE LA REFLEXION DEL OLEAJE

2.1. Vamos a analizar el fenómeno de la reflexión de un oleaje que incide paralelamente a la playa. En la reflexión existen un punto y una línea singulares, según la contemplemos en alzado o en planta, que es el contacto del nivel del agua con el talud. Me interesa señalar este hecho aclarando que, a pesar de dicha singularidad, la reflexión no es puntual y la asimilación a un movimiento en el plano horizontal, si bien es útil para simplificar el estudio de la onda reflejada, desvirtúa el fenómeno intrínseco de la reflexión que se produce en la playa. Sin embargo,

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de marzo de 1975.

tampoco es todo el talud el que produce la reflexión, sino únicamente la franja correspondiente a un ancho del orden de la semilongitud de onda, siendo la orilla sensiblemente la línea media de esta franja.

2.2. Si la ola se refleja sobre un muro vertical de suficiente altura, tanto por encima como por debajo del nivel del agua, la reflexión de la energía será casi perfecta. Si no hay percolación y el rozamiento tiene muy escasa importancia por tratarse de una pared lisa, la onda reflejada transportará prácticamente la misma energía que tenía la de abordaje. Sin embargo, puede haber otro fenómeno de pérdida de energía, no en la propia reflexión, sino en la superposición de oleaje incidente y reflejado, cuando la onda incidente sea tan peraltada que al superponerse la onda reflejada se produzca el chapoteo.

2.3. La reflexión de la onda no es un fenómeno similar al del rebote de una pelota o de un rayo de luz. El símil es válido geoméricamente, pero mecánicamente precisa mayor aclaración. El rebote de la bola de billar se produce mediante una deformación elástica que se traduce en un cambio de sentido conservando la misma cantidad de movimiento, a excepción de la pequeña cantidad de energía perdida en los trabajos anelásticos inherentes a la deformación; en la reflexión de la ola, la energía cinética de la ola incidente se transforma en energía potencial, y la acción de la gravedad la transforma de nuevo en energía cinética que se traslada en el sentido correspondiente a la reflexión geométrica, conservando la misma cantidad de movimiento a excepción de las pérdidas por percolación y rozamiento.

2.4. La onda reflejada sobre la playa es aparentemente anulada antes de volver a alta mar, como efecto de la barrera de turbulencia que puede producir la ola siguiente del tren. Este fenómeno tiene especial importancia en los casos de playas de arena gruesa con fuertes pendientes, en las cuales, frente a determinados oleajes, se produce una rotura tan brusca al pie del reflujo que aparentemente la energía de la onda reflejada se convierte en un aumento de turbulencia y brusquedad de la rotura de la ola incidente que le sigue. Sin embargo, esta apreciación de nuestra vista es, en gran proporción, engañosa: la ola que rompe es la incidente que pierde gran cantidad de energía en el proceso, pero la residual reflejada sigue su curso hacia alta mar, y su energía es la que motiva los coeficientes de reflexión que indica J. Larras en el cuadro antes mencionado.

2.5. En la medida en que esta apreciación sea real, tendremos la formación de las corrientes de playa y los *rip-currents*.

2.6. Si analizamos la progresión del oleaje hacia la costa, tenemos que la onda trocoidal circular de alta mar ($H/L \geq 1$) se convierte en elíptica al alcanzar profundidades limitadas ($1 \geq H/L \geq 1/10$), y al alcanzar las proximidades de la orilla ($1/10 \geq H/L$) se inician los procesos de cesión de energía mediante las turbulencias de la rotura y el oleaje residual se convierte gradualmente en olas de traslación (Iribarren, página 86).

2.7. Esta onda de traslación asciende por la pendiente (flujo) y la acción de la gravedad produce su descenso (reflujo), de forma que tenemos una onda de traslación reflejada que avanza en sentido contrario.

2.8. Si esta onda de traslación reflejada puede convertirse otra vez en onda progresiva, en resumidas cuentas parte de la energía del oleaje incipiente se habrá disipado a través de unos procesos de turbulencia (rotura) y rozamiento (del líquido y del semifluido arena) y otra parte se habrá convertido en un oleaje residual que

progresar en sentido contrario debido a la reflexión, sin que de este proceso se derive la formación de corrientes.

2.9. Cuando la onda de traslación reflejada no puede convertirse en onda progresiva en sentido contrario, total o parcialmente, debido al fenómeno de la rotura y especialmente de la última, queda un saldo de masa líquida acumulada en la zona de rotura y en la zona de flujo y reflujo, que debe volver al mar. Entonces se originan las corrientes de retorno uniformes y perpendiculares a la orilla (*undertow*) y las corrientes paralelas a la orilla o corrientes de playa (*longshore currents*), que discurren hasta puntos de discontinuidad en donde se forma la corriente de retorno de fondo concentrada (*rip-currents*).

3. INFLUENCIA DE LA REFLEXION SOBRE LA CONFIGURACION DEL PERFIL DE EQUILIBRIO

3.1. El estudio de los diques rompeolas se centra en los efectos que la ola incidente produce sobre los cantos al romper directamente sobre el talud de la obra. Pero una playa no puede resistir este efecto, ni tan siquiera frente a la acción de la ola residual que alcanza la orilla tras haber cedido la mayor parte de su energía en los fenómenos de rotura experimentados en su avance por la pendiente sumergida de la playa.

3.2. Es interesante recordar aquí estos párrafos de Iribarren:

"Ha habido quien ha supuesto que, independientemente de la violencia de la ola, cuando el talud es casi horizontal, aun la arena más fina se sostiene. Esto, que a primera vista pudiera parecer cierto, pues es el caso de las playas que se

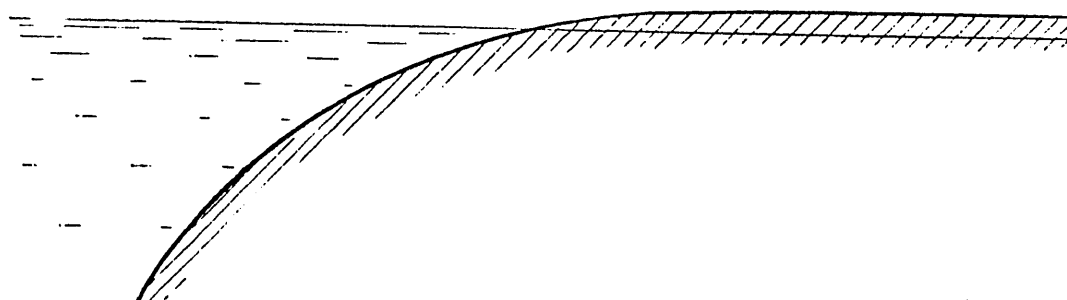
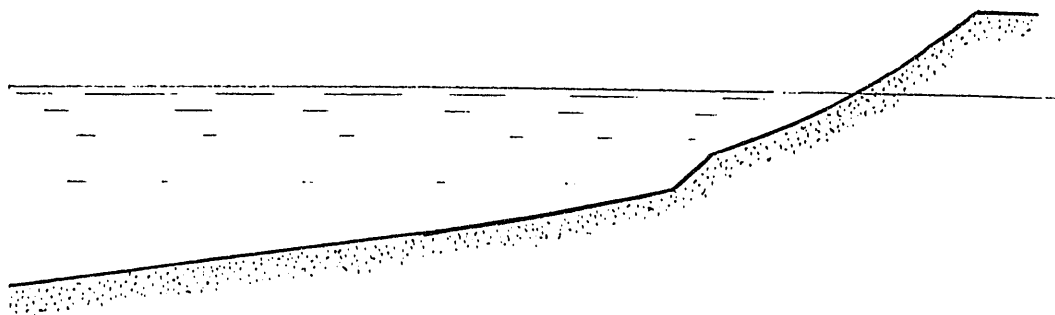


Fig. 1, b. — Perfil de rotura utilizado en tanques de ensayo en modelo reducido.

han querido asimilar a diques de escollera cuyos cantos fuesen los sutiles granos de arena, no lo es en realidad.

La analogía no es aceptable, puesto que los granos de arena aun en las playas estables se mueven, siendo sustituidos los que se van por una parte por los que afluyen por otra. En cambio, si los cantos de escollera se los lleva el mar, al no ser sustituidos naturalmente por otros, sobreviene la avería.

Los cantos de escollera deben permanecer fijos, cualquiera que sea la violencia del oleaje, y, por lo tanto, deben tener algún determinado peso mínimo por muy suave que fuese el talud."

3.3. Por otra parte, la orilla de la playa no presenta nunca la forma adecuada a la rotura total, pues para ello se requeriría un perfil con pendiente decreciente hasta su anulación en un plano horizontal (fig. 1).

3.4. A pesar de que la arena no puede resistir la rotura directa de la ola, el oleaje que alcanza la orilla no es nulo. Si no puede ser absorbido totalmente por los efectos de percolación y rozamiento, deberá ser reflejado por el talud de la playa en la zona de flujo y reflujo. Es decir, la ola residual que alcanza la orilla debe ser reflejada, con la única disminución de energía que representan los efectos de percolación y de rozamiento.

3.5. Hechas las anteriores observaciones, nos hacemos las siguientes preguntas: ¿Cuál es la naturaleza y la razón de ser del talud que tiene la playa en la zona de flujo y reflujo? ¿Cuál es la razón de ser del talud sumergido de la playa?

3.6. La respuesta es, a mi juicio, la siguiente:

1.º Bajo la acción de los mayores oleajes que pueden incidir sobre la playa, ésta adopta en la zona de rotura de la ola el talud necesario para que la ola de abordaje, en su recorrido, pueda ceder parte de su energía hasta convertirse en una ola residual tal que pueda ser reflejada en la zona de flujo y reflujo. La onda residual reflejada juega un papel importante en la configuración del perfil y de la forma en planta de la playa sumergida.

2.º La altura de la ola residual admisible depende de las características de las arenas y en función de las velocidades de arrastre y puesta en suspensión de las partículas.

3.º En la zona de reflujo y flujo la playa adopta en cada momento el "talud límite de rotura", frente a la ola residual que subsiste al terminar el fenómeno de rotura al pie de dicha zona.

3.7. Estas afirmaciones tienen una notable importancia en cuanto al mejor conocimiento de los fenómenos de configuración de las playas. Aunque no nos resuelven la cuestión, puesto que no sabemos cuál es la altura de la ola residual, nos señala un camino que nos ayudará a aclarar muchos fenómenos, hasta hoy inexplicados.

3.8. R. Iribarren, al estudiar este tema en el número 86 de su libro, hace la siguiente observación:

"El talud límite teórico, en primera aproximación, que tratamos aquí de determinar es siempre un talud rígido y de gran inclinación..."

3.9. Es preciso tener en cuenta que, como ya he dicho, el autor contemplaba el fenómeno desde un punto de vista y con una finalidad muy concreta, que era el efecto de la ola de alta mar, con las únicas alteraciones que se deducen de los planos de oleaje, sobre la obra. Es lógico, por tanto, que hiciese la anterior afirmación, sin preocuparse de la posibilidad de que, reducida la altura de la ola por

los efectos de rotura en su recorrido por la suave pendiente de la playa, la ola residual pudiera reflejarse sobre el talud de la zona de flujo y reflujó, que tiene relativamente escasa inclinación si lo comparamos con el talud de una obra.

3.10. Vamos a analizar las fórmulas que Iribarren expone sobre el talud teórico, a la vista del perfil de la playa de la figura 2 que responde al caso más sim-

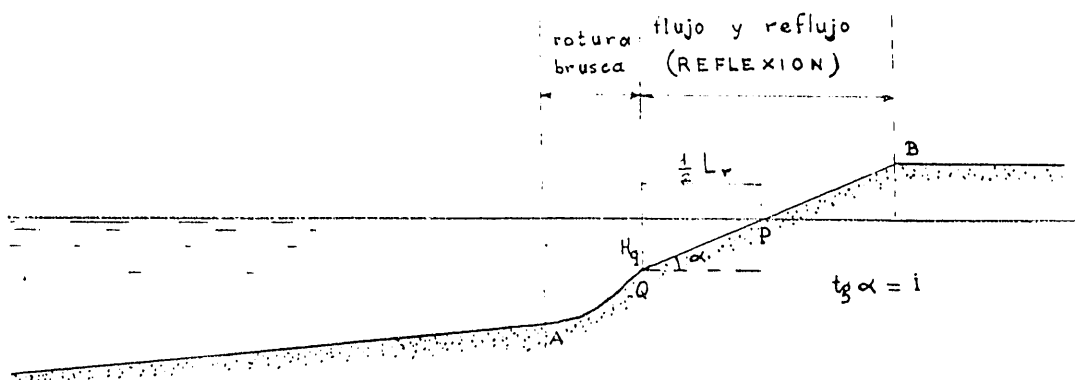


Fig. 2. — Perfil de la playa en las proximidades de la orilla.

ple de una playa de arena gruesa, en un mar sin marea. (Este perfil podría ser, con las debidas escalas y bajo la acción de un determinado temporal, el de la playa de Lloret, Playa de Aro, Tossa..., y otras playas similares de la Costa Brava).

3.11. La pendiente límite entre reflexión y rotura, con la simbología utilizada por Iribarren, es:

$$\operatorname{tg} \alpha = i = \frac{4}{T} \sqrt{\frac{h_r}{g}}, \quad (1)$$

siendo $2h_r$ la altura de la ola residual y T el semiperíodo de la ola de alta mar, ya que $T_r = T$.

El talud ha de tener, como mínimo, una longitud de:

$$\frac{L_r}{2} = \frac{T}{2} \sqrt{g h_r}$$

y la profundidad en el extremo Q será:

$$H_q = 2H = 2h_r.$$

3.12. Si examinamos la fórmula (1) vemos que la pendiente i disminuye al crecer el período y aumenta al crecer la altura de la ola residual. Existe, pues, una clara diferencia cualitativa entre esta fórmula y la del mismo Iribarren para el cálculo de diques rompeolas, que a nuestro objetivo podemos expresar, tomando como variable la pendiente del talud y la altura de la ola residual, de la siguiente forma:

$$f \cdot \cos \alpha - \sin \alpha = \sqrt[3]{\frac{N'_a \cdot \gamma \cdot \gamma_1 \cdot f^3}{P \cdot (\gamma - \gamma_1)^3}} \cdot A = \text{Cte. } 2h_r,$$

y puesto que el campo de aplicación es para valores de α tales que $\operatorname{tg} \alpha \leq f = \operatorname{tg} \varphi'$, siendo φ' el ángulo de talud natural de la escollera ($\varphi' < 45^\circ$), la pendiente i debe disminuir al crecer la altura de la ola, si extrapolamos la aplicación de dicha fórmula al caso de las arenas de la playa, es decir, para valores muy pequeños de α y de A .

Esta diferencia entre ambas fórmulas expresa matemáticamente la distinción entre el "equilibrio estático" de una obra de escollera y el "equilibrio dinámico" de una playa en la zona de reflexión.

Por otra parte, la aparente similitud de los fenómenos derivada del hecho de que un oleaje fuerte produce menor pendiente del perfil de la playa que un oleaje débil, se explica por la intervención del período como variable determinante del talud de la playa en la zona de reflexión. Un talud menor provocaría la rotura de la ola directamente sobre él y, por tanto, el arrastre de arenas hacia tierra con el consiguiente aumento de la pendiente; un talud mayor implicaría que la acción del reflujo no quedase compensada por la resultante de los fenómenos de flujo, percolación y rozamiento y, por tanto, las arenas serían arrastradas hacia el mar con la consiguiente disminución de la pendiente.

3.13. Es un hecho conocido que la playa de arena fina tiene pendientes más suaves que la de arena gruesa, y esto se cumple no sólo para el perfil de la zona sumergida permanentemente, sino también en la zona de flujo y reflujo. Este hecho, examinado a través de la fórmula (1), puede expresarse diciendo que, para un determinado período, la playa de arena fina requiere una h_r más pequeña que una playa de arena gruesa. Su explicación estriba en la diferencia que existe entre las velocidades necesarias para mantener en suspensión un tipo u otro de partículas. Al encontrarse la ola con el talud reflejante, la velocidad máxima del agua será del orden de:

$$V_{\max} = \sqrt{g \cdot h_r \max}$$

entonces la masa de agua asciende por la pendiente hasta la anulación de dicha velocidad, iniciándose a continuación la caída libre hasta volver a alcanzar el mismo valor, salvo pérdidas por percolación o rozamiento.

Por otra parte, sabemos que la posibilidad de arrastre de las partículas relaciona su diámetro medio con el cuadrado de la velocidad. Es decir:

$$\varnothing_{\text{medio}} = K_1 \cdot V_{\max}^2$$

siendo K_1 una función de las características físicas de las partículas.

Entonces, tendremos:

$$h_{r \max} = \frac{K_1}{g} \cdot V_{\max}^2 = K_2 \cdot \varnothing_{\text{medio}} \quad (*)$$

3.14. También es un hecho fácilmente observable que la cota superior de la playa horizontal está relacionada con las características de la arena. En las playas de Cataluña pueden estimarse las cotas máximas, que sólo se dan en zonas expuestas a mar abierto, que se indican en el cuadro de la figura 3.

(*) NOTA: Se refiere al $\varnothing_{\text{medio}}$ de la arena que constituye la capa que mantiene el equilibrio dinámico. Si la granulometría es muy heterogénea dicho $\varnothing_{\text{medio}}$ puede ser muy diferente al del conjunto (playas con montera de gravas).

Tipo de arena	Ejemplos típicos	Cota máxima (m) (1)	$2 h_{r \text{ máx}}$ (m)
			(2) = $\frac{(1)}{1,5}$
Arena granítica de grano grueso $mm_{50} = 2$ $\gamma = 2,65$	Lloret, Fanals, Playa de Aro...	4,70	3,13
Arena caliza de grano medio $mm_{50} = 0,25$ $\gamma = 2,7$	Castelldefels, delta del Ebro	2,00	1,33
Arena caliza de grano fino	Delta del Ebro	0,90	0,60

Figura 3.

Conviene resaltar que todas estas playas están sujetas a acciones del mar muy similares por estar en un tramo de costa de unos 300 Km de longitud, en el mar Mediterráneo. Para estimar las cotas máximas en el caso de arenas de grano medio y fino se han considerado las zonas en que la arena ha sido movida por temporales (crestas de *beach ridges*), aunque en las inmediaciones pueden existir dunas que adquieren cotas muy superiores debido a la acción del viento.

Teniendo en cuenta ahora que la ola residual que es reflejada será la cicloide de altura $2 h_r$, tras la última (o la única) rotura al pie del talud reflejante, la cota superior de dicho talud será $1,5 \times 2 h_r$. Para los casos típicos considerados tendremos los valores de $2 h_{r \text{ máx}}$ que se indican en la última columna del cuadro de la figura 3.

3.15. No olvidemos que para un determinado oleaje siempre es más rígido el talud de reflexión que el de rotura. Únicamente al pie del talud reflejante de la zona de flujo y reflujo se produce un talud aún más fuerte que corresponde a una zona de enlace entre ambos tipos de equilibrio. En esta zona puede llegarse a formar el ángulo φ' de talud natural de la arena bajo el agua correspondiente al de-

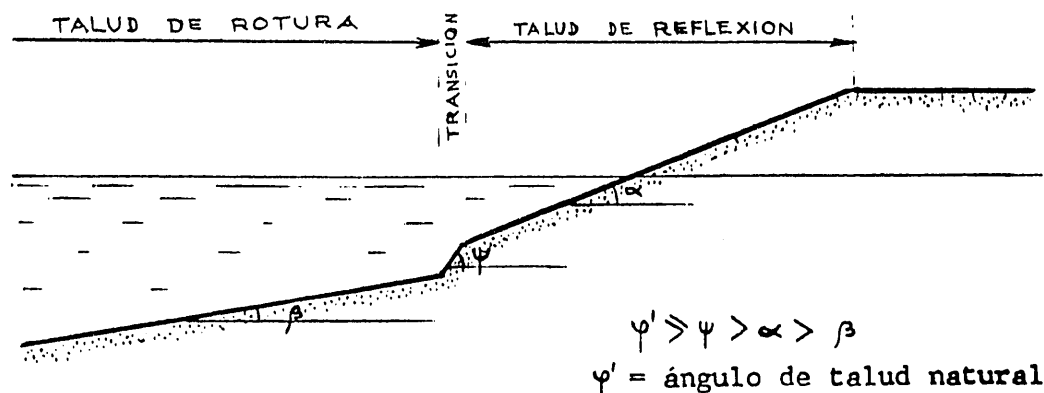


Fig. 4. — Discontinuidad entre los dos tipos de equilibrio.

rrame de la arena, es decir, $\psi = \varphi'$. Nótese que en esta zona existe una discontinuidad en el perfil que pasa de un tipo de equilibrio a otro (fig. 4).

3.16. En el gráfico de la figura 5 se representan las curvas que relacionan los valores de T y de h_r en abscisas y ordenadas, respectivamente, para distintos valores de $i = \operatorname{tg} \alpha$. Serán las parábolas:

$$(2 h_r) = \frac{g \cdot i^2}{32} \cdot (2 T)^2.$$

3.17. En dicho gráfico se señalan las horizontales correspondientes a los tres tipos de arenas. No olvidemos, sin embargo, que estas líneas corresponden a la h_r máxima y que, por tanto, es válido todo el gráfico que queda por debajo de cada línea, puesto que, en general, la ola residual tendrá menor altura que la máxima, debido a las características de la ola de alta mar y a los efectos del perfil sumergido preexistente.

3.18. Esta tesis desemboca en una amplia gama de posibilidades para el talud ante un mismo temporal, hecho que la Naturaleza nos confirma, pues la variación de la pendiente de la zona de flujo y reflujos, frente a un determinado temporal, es notable especialmente en las zonas de playa expuestas a oleaje de altura de ola decreciente por expansión lateral.

3.19. Sin embargo, también nos dice que un determinado talud en la zona de flujo y reflujos puede corresponder a una amplia gama de temporales, hecho que también la Naturaleza confirma, ya que las playas a mar abierto, sensiblemente rectilíneas y de gran longitud, presentan una pendiente poco variable, por lo menos bajo la acción de fuertes oleajes.

3.20. Para cada $(2 h_r)$ tendremos una relación entre la pendiente y el período. En el gráfico de la figura 6 se toman $(2 T)$ en abscisas e (i) en ordenadas, por lo que las curvas correspondientes a cada altura de ola residual serán las hipérbolas:

$$(i) = \sqrt{\frac{32}{g} \cdot 2 h_r \cdot \frac{1}{(2 T)^2}}.$$

3.21. Estos gráficos no serán aplicables a los casos de $i = \operatorname{tg} \alpha$ inferiores a un determinado valor, a partir del cual los efectos de percolación y rozamiento evitarán la reflexión del oleaje. El fenómeno tiene, además, tres tipos de limitación: la altura de la máxima ola residual que admite la arena ($2 h_{r \max}$), la relación entre períodos y altura de ola en alta mar

$$\left[2 h_0 = 1,2 \left(\frac{g}{62 \pi} \right)^{3/4} \cdot (2 T_0)^{3/2} \right]$$

y el *fetch* máximo y el talud máximo de la arena, que no puede ser superior al de rozamiento en el seno del agua (talud natural = φ'). Por otra parte, para su aplicación cuantitativa será preciso el contraste de estos valores teóricos con taludes observados en la Naturaleza o en el laboratorio.

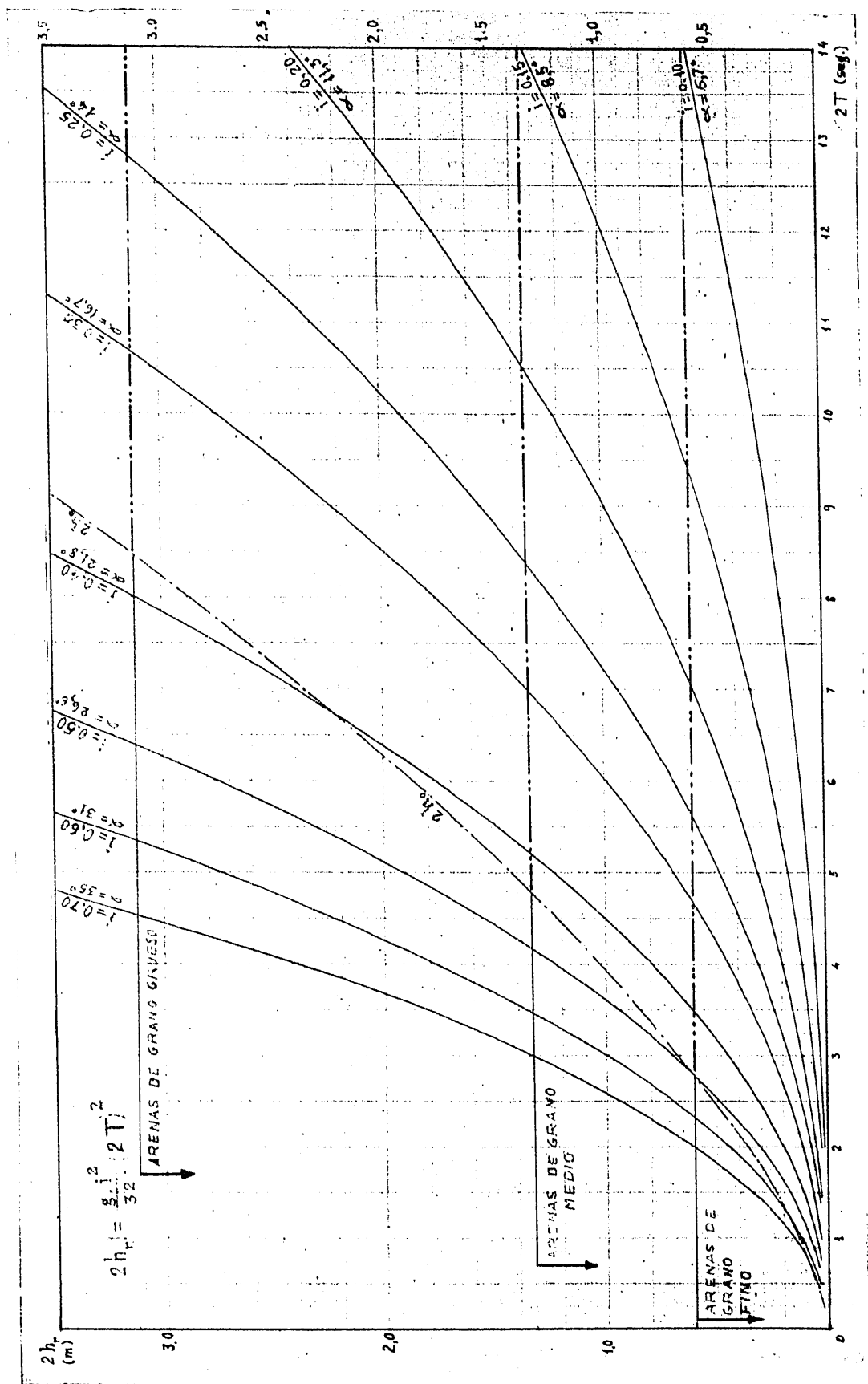


Fig. 5.—Relación entre altura de la ola residual, período del oleaje y el talud límite de rotura.

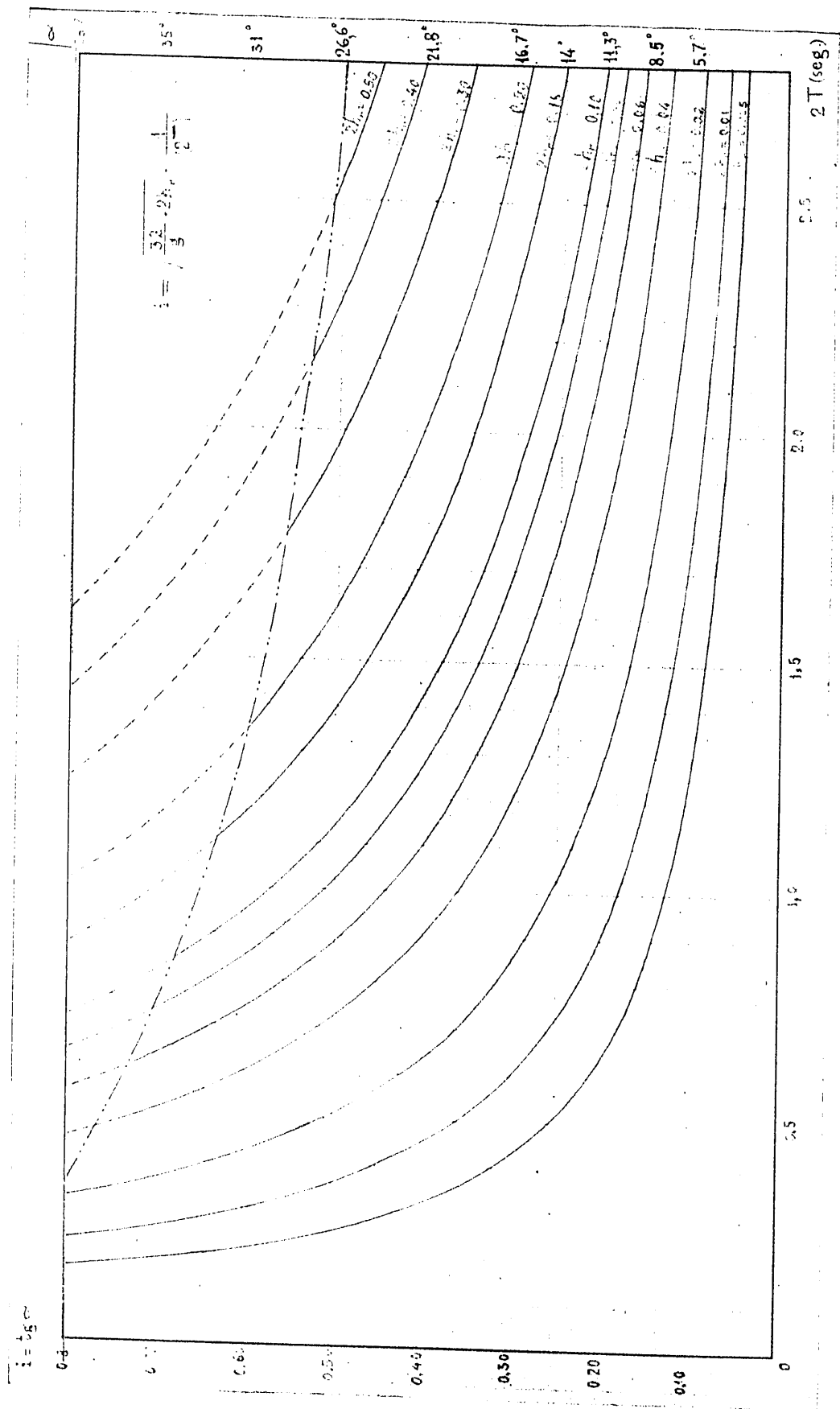


Fig. 6.—Relación entre el talud límite de rotura, período del oleaje y altura de la ola residual.

4. INFLUENCIA DE LA REFLEXION SOBRE LA FORMACION DE LAS BARRAS

4.1. La formación de las barras submarinas (*submarine bars*) ha sido un tema muy estudiado y debatido. Se acepta una correlación entre estas formaciones naturales submarinas paralelas a la orilla de la playa y la barra que se forma en el punto de rotura de la ola en los ensayos en modelo reducido (*break-point bar*) (C. A. M. King, *Beaches and Coasts*, pág. 336).

4.2. Se acepta, asimismo, una correlación entre las barras emergidas (*ridges*) que se forman en el borde superior de la playa, en determinados casos, y las barras que se forman en el extremo superior de la zona de flujo y refluo (*swash bar*) en el modelo.

4.3. Existe una diferencia de carácter entre ambas formaciones que se pone de manifiesto con la imposibilidad de que, sin cambios del nivel del agua, una barra sumergida pueda crecer hasta emerger y convertirse en barra emergida.

Los resultados de los ensayos indican que si tenemos un perfil de equilibrio frente a un determinado temporal, que presenta la formación de barra submarina, y aumentamos la altura del oleaje manteniendo sus otras características, la alteración que se producirá en el perfil será el desplazamiento de la barra hacia el mar. Si disminuimos dicha altura de ola, la barra se desplaza hacia la orilla, pero, aunque sigamos disminuyéndola, no lograremos que la barra emerja, sino que antes desaparecerá.

4.4. Existe una relación entre el peralte de la ola y la posibilidad de formación de la barra, pero no se ha encontrado una justificación clara del por qué aparece en momentos determinados en unas playas y en otras no.

4.5. Veamos como con las teorías generalmente admitidas, complementadas con lo anteriormente expuesto sobre la reflexión de un oleaje residual, se puede justificar más satisfactoriamente esta diferencia de carácter.

El proceso, ante la acción de un oleaje frontal sin componente oblicua respecto a la playa, puede describirse de la siguiente forma:

1. En la zona de prerrotura, el oleaje tiende a arrastrar arenas hacia la playa, como resultante de las distintas acciones hacia adelante, con el paso de la cresta, y hacia atrás, con el paso del seno, siempre que la pendiente del perfil sea inferior a un cierto valor, por encima del cual la acción de la gravedad produce el efecto contrario.

2. Esta tendencia aumenta cuanto más escarpada sea la onda.

3. Tras la rotura, la ola residual tiene menor energía, menor altura de ola y menor peralte, por lo que su capacidad de transporte hacia adelante habrá disminuido. En consecuencia, se produce la acumulación de arena en la zona de post-rotura y el aumento de pendiente en la zona de prerrotura.

4. Con los tres puntos anteriores se puede explicar el proceso de formación de la barra. Pero no se justifica que ésta se mantenga con una determinada altura al llegar al equilibrio.

5. Si consideramos, en cambio, la intervención del oleaje residual reflejado que avanza en sentido contrario, la formación y la persistencia de la barra al llegar al equilibrio se justifica por dos fenómenos cualitativamente simétricos respecto a la cresta. De un lado, tendremos un equilibrio dinámico en el lado mar de la barra, debido a la acción predominante del oleaje incidente actuando contra la pendiente general de la playa. De otro, tendremos un equilibrio dinámico en el lado de tie-

rra, debido a la acción predominante del oleaje residual reflejado que actúa a favor de la pendiente general de la playa. En la cresta de la barra se equilibran las acciones dinámicas sobre los fondos.

6. Dicho de otro modo, la rotura de la ola en la situación de equilibrio no se debe a una simple acción o respuesta de los fondos recorridos, sino que depende de todo el proceso que se produce entre el punto de rotura y la orilla. En esta zona la reflexión de la onda residual tiene una específica repercusión sobre la configuración del perfil.

La superposición del oleaje incidente y del residual reflejado pueden originar un fenómeno estacionario que se traduce en el mantenimiento de la barra en la situación de equilibrio. Téngase en cuenta que para una ola incidente que está muy próxima a su rotura la superposición de la onda reflejada puede desencadenar fácilmente la rotura brusca.

7. Hasta aquí se ha justificado la formación y el mantenimiento de las barras. Sin embargo, la reflexión de la ola residual no implica necesariamente su formación. Cuando la pendiente de la playa es fuerte (arenas gruesas), aunque la altura de la ola residual puede ser mayor, su importancia relativa h'_r/h rápidamente se hace muy pequeña, ya que la altura de la ola incidente se mantiene sensiblemente en su avance sobre profundidades decrecientes y, en cambio, la altura de la onda residual reflejada disminuye con rapidez a medida que la longitud de onda se adapta a la profundidad creciente.

Por otra parte, la localización de la barra por un fenómeno estacionario implica una persistencia del oleaje y una regularidad que sólo su fusión y filtrado, en los casos de suaves pendientes, puede facilitar.

4.6. Para mayor comprensión, en la figura 7 se describe gráficamente el siguiente proceso:

Supongamos un perfil (t_0) de una playa que ha alcanzado el equilibrio frente a un temporal que ha formado una barra. Supongamos que ahora actúa un temporal que, manteniendo las demás características, tiene mayor altura de ola ($h_{II} > h_0$).

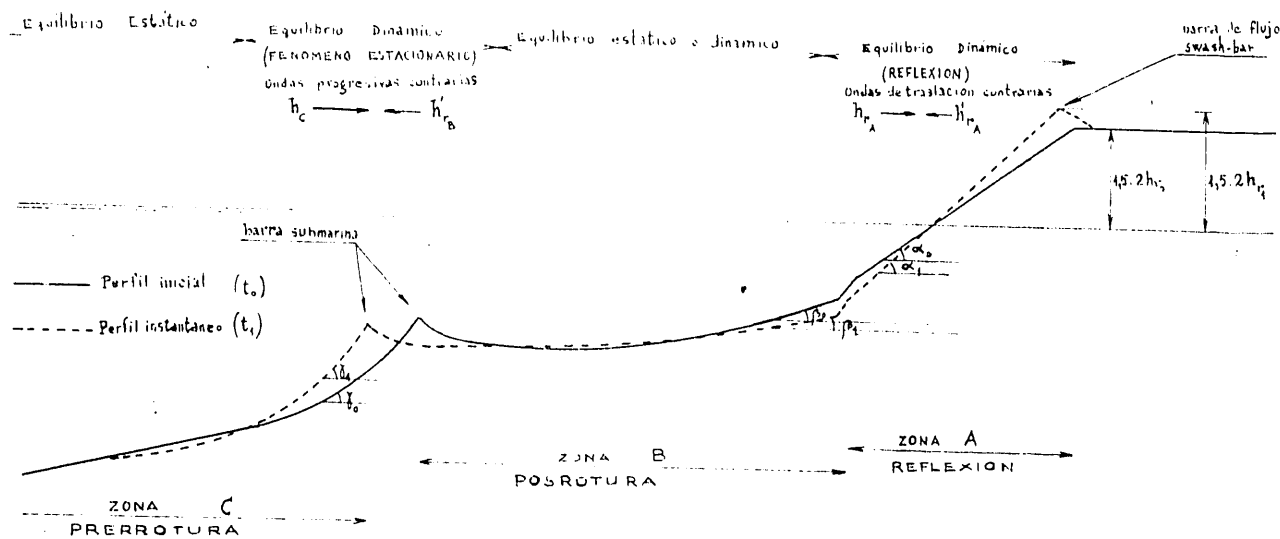


Fig. 7.—Variación del equilibrio dinamoestático del perfil con formación de barra al aumentar la altura del oleaje.

Inicialmente el talud α crecerá ($\text{tg } \alpha = 4/T \sqrt{h_r/g}$), puesto que, por lo menos antes de que se produzca un reajuste del perfil sumergido, tendremos $h_{r1} > h_{r0}$. Es decir: $\alpha_1 > \alpha_0$.

El talud γ también crecerá, puesto que es la zona donde los efectos de la onda reflejada son muy pequeños, y, al ser $h_1 = h_n > h_0$, tendremos $\gamma_1 > \gamma_0$. Por otra parte, esta afirmación concuerda con la hipótesis general de que a mayor escarpe corresponde mayor pendiente.

En la zona B , la altura de la ola incidente es mayor que antes, pero la altura de la ola reflejada, también. Sin embargo, en las proximidades de A el efecto de la ola reflejada es relativamente mayor que antes, es decir, $h_{r1}/h_n > h_{r0}/h_0$, puesto que el talud en A es más reflejante que antes (tanto por su mayor pendiente como por el hecho de ser mayor el peralte del oleaje). Entonces tendremos $\beta_1 < \beta_0$.

Con estas condiciones, y teniendo en cuenta que las áreas diferenciales entre los sucesivos perfiles instantáneos o isócronos deben compensarse, puesto que contemplamos la acción de oleajes frontales, la situación del perfil al cabo de un tiempo (t_1) tendrá la forma que se indica de puntos en la figura 7. Para claridad de exposición utilizaremos los subíndices 1, 2, ..., n , para las características del oleaje y del perfil en cada zona al cabo de los tiempos $t_1, t_2, \dots, t_n$, siendo t_n el tiempo en que se termina el reajuste entre perfil y oleaje y, por tanto, se alcanza el equilibrio. Este perfil de equilibrio frontal (t_n) tendrá unas zonas en equilibrio estático y otras en equilibrio dinámico, similares a las que tenía el perfil (t_0). No se dibujan los sucesivos perfiles para mayor claridad de la figura.

Si continuamos examinando el reajuste del perfil a partir de la posición (t_1) tendremos que, al haber avanzado hacia el mar la cresta de la barra, la ola efectuará un mayor recorrido por la zona de rotura y, por tanto, la altura de la ola residual será $h_{r2} < h_{r1}$. El talud en A se suavizará ($\alpha_2 < \alpha_1$), la reflexión será menor y la barra se desplazará hacia la orilla ($\beta_2 > \beta_1$). De esta forma, por aproximaciones sucesivas, se llegará a un perfil (t_n) de equilibrio.

En las hipótesis del proceso, la altura de la onda residual final debe ser $h_{rn} > h_{r0}$ y, por tanto, al ser $T_n = T_0$, $\alpha_n > \alpha_0$ siempre que la h_{rn} no sea excesivamente grande para las posibilidades de la arena.

Si la arena es de granulometría, densidad, etc., demasiado pequeña en la zona A para resistir en algún momento la h_{ri} , se seguirá un proceso de transporte hacia el mar hasta lograrse una pendiente suave de suficiente longitud en la zona B para producir la reducción de la ola residual de forma que h_{rn} se ajuste a las cualidades de la arena.

Si suponemos que la altura h_{r0} era ya el límite que permitía la arena, entonces tendremos $h_{rn} = h_{r0}$, y al ser $T_1 = T_2 = \dots = T_n > T_0$, el talud del estrán será más suave al alcanzarse el equilibrio ($\alpha_n < \alpha_0$).

4.7. Con lo anteriormente expuesto se ha pretendido visualizar un proceso esquemático y simplificado de lo que realmente ocurre, puesto que la reflexión lleva implícitos otros procesos de transportes por corrientes, según se ha indicado en el apartado 2, con el fin de resaltar que el talud reflejante del estrán explicita un proceso de autorregulación del perfil general de la playa frente a cada oleaje frontal.

Dicho de otro modo, frente a cada oleaje frontal se produce una mutua interacción entre la pendiente ($\text{tg } \beta$) y la altura de la onda residual ($2h_r$), de forma que la variación de β produce la variación de $2h_r$, de tal manera que tiende a retornar a su estado original, es decir, con retroalimentación negativa (*negative feedback*), y consiguiente autorregulación del proceso.

En el caso simplificado del ejemplo podría establecerse también esta relación de interacción entre la pendiente $\text{tg } \alpha$ y la pendiente $\text{tg } \beta$, siempre que se cumpliera la condición de que $2h_{r,i}$ no rebasase las posibilidades de la granulometría de la arena.

4.8. Esta idea de retroalimentación también puede expresarse diciendo que todo oleaje incidente es en sí mismo constructivo de la playa y su propia reflexión es la que regula el proceso.

5. INFLUENCIA DE LA REFLEXION SOBRE LA CONFIGURACION DE LA FORMA EN PLANTA

5.1. Ya se ha dicho que la orilla constituye una línea singular que representa el eje de reflexión de las formas en planta del oleaje.

5.2. Además de las repercusiones sobre las isóbatas que se derivan de la influencia de la reflexión sobre la configuración del perfil anteriormente expuesta (por la interdependencia entre perfil y planta), existen también efectos específicos sobre la forma de la orilla.

5.3. Las "curvas de llenado lateral" y las "curvas de vaciado lateral" que se describen en mi anterior artículo, conducen a dos tipos de equilibrio: "equilibrio sin refracción" y "equilibrio con refracción óptima".

5.4. En el caso de equilibrio sin refracción (llenado), la intervención del fenómeno de reflexión anteriormente descrito no implica ninguna alteración de la forma en planta.

5.5. Pero en el caso de equilibrio con refracción (vaciado) sí se produce una alteración, puesto que en la zona en donde es sensible la acción de la onda residual reflejada ($h'_{r,i}$) tenderá a anularse la refracción de la onda residual incidente. Es decir, que las curvas de vaciado sufrirán una modificación que repercutirá en las isóbatas comprendidas en dicha zona, en la cual la refracción debida al rozamiento se ve contrarrestada por la reflexión de la ola residual.

5.6. Este fenómeno en la Naturaleza tiene escasa importancia, debido a la pequeña anchura de la zona de influencia de la reflexión de la onda residual (correspondiente a profundidades del orden o inferiores a la altura de la ola de alta mar h_0) respecto a la zona de refracción (que alcanza profundidades del orden de la semilongitud de onda).

5.7. Por el contrario, en los ensayos en modelo reducido podremos tener importantes repercusiones, puesto que al utilizar alturas de ola muy pequeñas la arena o el material del ensayo resistirá fácilmente la reflexión de una ola residual desproporcionada.

5.8. Con respecto a la discusión que hacía en mi artículo (página 786 de la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS de agosto de 1973) sobre los resultados del ensayo de R. Silvester, es importante añadir que la aparición de la forma circular en las proximidades del polo se debe, seguramente en mayor proporción que a las razones que yo exponía, al hecho de que en dicha zona la altura de la onda residual reflejada es del mismo orden que la onda incidente. La reflexión es casi total y afecta prácticamente a todos los fondos comprendidos entre la orilla y la zona de influencia de la perturbación local debida a la brusquedad de la expansión alrededor del muro laminar vertical. En estas condiciones no se mantiene la "espiral logarítmica" que tiende a formar el oleaje incidente.