

Condicionantes de la estabilidad de las playas. Análisis de la función polar de los salientes. (*)

Por CARLOS GARAU

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

La construcción de obras marítimas puede afectar de manera muy importante la morfología litoral. En el artículo se estudian algunos de estos efectos y su posible predicción mediante el empleo de la espiral logarítmica, con aplicaciones a ejemplos concretos de nuestra costa.

1.- RESUMEN

La previsión de los efectos que puede producir la difracción en los salientes de una obra marítima, proyectada en una playa, es trascendental a la hora de tomar decisiones. El autor expone como, en determinadas situaciones, se puede lograr una fácil y exacta predicción de algunos de estos efectos, utilizando la espiral logarítmica de ángulo, $\varphi = 30^\circ$, poniendo de relieve las diferencias entre el tipo de análisis que sugiere y los estudios de W.E. Yasso (12) y R. Silvester (8).

En primer lugar explica la motivación del presente artículo, destacando algunas conclusiones extraídas del contraste de los procesos de formación de sendos tómbolos a raíz de la construcción de los puertos de Comarruga y de Calafell. Seguidamente entra en unas aclaraciones sobre los términos de equilibrio y estabilidad, pasando a una clasificación de los distintos condicionantes de la estabilidad de las playas y a una visión sintética de los diferentes tipos de análisis de tales condicionantes.

Aclarado lo que se entiende por función polar de los salientes, entra en su análisis aportando una serie de ejemplos que ayudan a comprender la razón de ser de la "estabilidad formal por condicionantes de contorno" de algunas playas.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de marzo de 1981.

2.- MOTIVACION

2.1. Antecedentes

El conocimiento de algunos procesos de deformación de playas bajo la acción de oleajes de distinta dirección, especialmente la Playa de Lloret de Mar (en la que había proyectado y construido una obra mixta de defensa y estabilización parcial con evidente éxito) y el análisis del comportamiento de las bahías de San Felú de Guixols, de Blanes y de Palamós a raíz de la construcción de los respectivos puertos, me llevó a la concepción de lo que he llamado "procesos de llenado lateral" y "procesos de vaciado lateral". según expuse en los artículos publicados en la Revista de Obras Públicas de Julio y Agosto de 1973.

La adaptación de la forma en planta de la orilla de muchas playas a la espiral logarítmica había sido ya estudiada por W.E. Yasso (1964) y R. Silvester (1970). Sin embargo ambos investigadores se refieren a una concordancia entre la espiral de ángulo y centro determinados y la forma de la orilla, deduciendo en cada caso el ángulo (característico de la espiral) y el centro (que definirá la posición) que dan un mejor ajuste, mientras que yo parto de un ángulo característico determinado (probablemente relacionado con el ángulo de rozamiento de la arena, pero que en definitiva admito $\varphi = 30^\circ$) de manera que en los tramos sujetos a la acción primordial de un saliente aparecen sectores de espiral ($\varphi = 30^\circ$) con centros en dicho saliente.

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

Es preciso resaltar asimismo que mientras Yasso y Silvester analizan playas sin tener en cuenta si frente a ellas hay fondos indeformables, yo me refiero a playas constituídas por materiales sueltos en toda la zona sujeta a efectos de difracción.

Dada la divulgación que han tenido las investigaciones de Yasso (12) y Silvester, (8,9,10) no voy a repetir aquí todas aquellas aplicaciones y análisis de las formas en planta de las playas que son comunes con los estudios en base a mis teorías. Sí, en cambio considero importante recalcar las diferencias esenciales entre ambos planteamientos, según se resume en el cuadro siguiente.

Principales diferencias entre los análisis de las formas en planta de las playas realizados por W.E. Yasso y R. Silvester y las teorías de C. Garau.

W.E. YASSO y R. SILVESTER	C. GARAU
Espirales logarítmicas.	Curva de ángulo constante. En los tramos sujetos a un polo de difracción, será la espiral logarítmica.
Centro desconocido y único para cada playa.	Centro variable a lo largo del contorno del saliente.
Ángulo desconocido.	Ángulo fijo relacionado con el de rozamiento de la arena ($\varphi = 30^\circ$).
Prescinde de la existencia o no de fondos frontales indeformables.	Presupone fondos de materiales sueltos en toda la zona afectada por la difracción.
Aplicación a los estudios de la estabilidad por condicionantes de fondos frontales indeformables.	Aplicación a los estudios de la estabilidad por condicionantes de contorno.
R. Silvester trata de hallar una relación entre φ y el ángulo que forma el oleaje dominante con la alineación de los salientes.	Se relaciona la forma en planta con los procesos de acésión y de erosión lateral.

2.2. Resultados recientes

Uno de los fenómenos que pueden predecirse fácilmente utilizando el que yo vengo llamando "Compás de playas", es el de la formación de tómbolos, tal como exponía en el epígrafe 5.6. (pag. 651 a 653 de la Revista de Obras Públicas, julio 1973) del artículo mencionado (3).

El reciente proyecto y construcción de los puertos deportivos de Comarruga y de Calafell y su posterior comportamiento constituyen sendos modelos a escala natural, del proceso litoral que conduce a la formación de tómbolos.

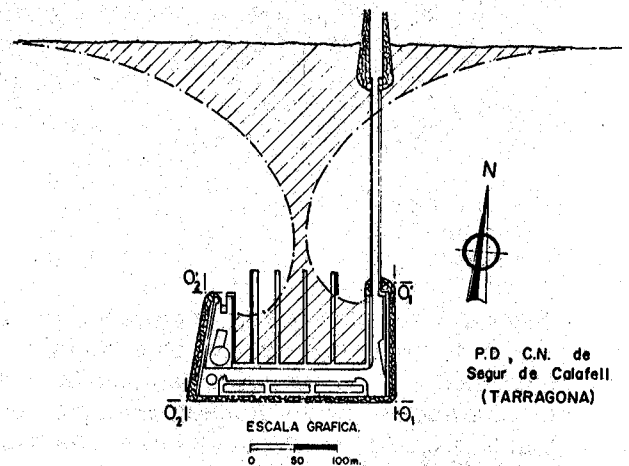
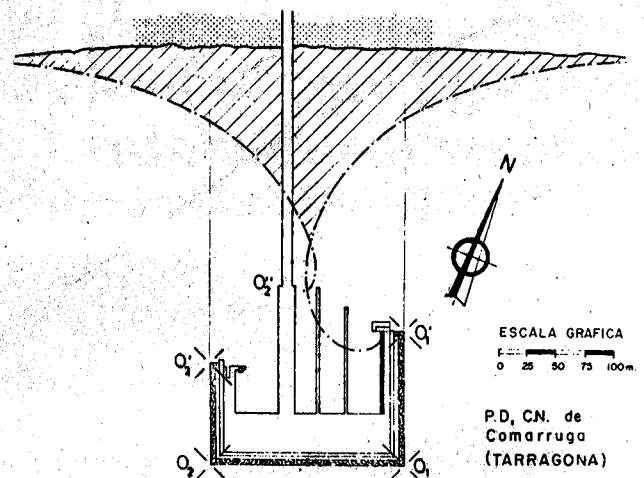


Figura 1. Plantas de los proyectos de los Puertos Deportivos de Comarruga y Calafell (Tarragona). Predicción de la forma de los tómbolos en base a la condición $\varphi = 30^\circ$, trazada por sectores de espiral mediante el "Compás de Playas".

En la figura 1 aparecen las plantas de los dos puertos, sobre las cuales se han trazado las curvas compuestas de sectores de espiral logarítmica ($\varphi = 30^\circ$) con centros en los salientes de las obras proyectadas. Dichas espirales se inician con centros en O_1 y O_2 , respectivamente, y tangentes a la orilla primitiva de la playa, no teniéndose en cuenta el retroceso de dicha orilla toda vez que, dada la notable longitud de las playas contiguas, la erosión necesaria para compensar la formación del tómbolo se debe limitar a unos pocos metros, inapreciables a la escala del dibujo.

De acuerdo con mi segundo postulado, referente al "límite de vaciado", si se llega a rellenar el área rayada en ambas figuras, ningún tipo de oleaje podrá hacer retroceder la orilla más atrás que la

posición de la línea de trazo y punto. El exámen de ambas figuras cuyo trazado es cuestión de segundos, pone en evidencia que la construcción de ambas obras implica un serio riesgo de fracaso. Sin embargo es evidente que ni el proyectista ni los técnicos de la Administración que han informado favorablemente ambos proyectos, han tomado en serio mi "compás de playas".

Quiero decir en su descargo, que si bien las espirales trazadas en la Figura 1 constituyen una cuantificación de los movimientos irreversibles que se podían derivar de la construcción de ambas obras, el mecanismo de llenado y vaciado que describía en mis artículos, no implica por sí sólo la ineludible formación del tómbolo.

Pero tal como puede apreciarse en las Figuras 13 y 15, y según se analiza más adelante, el comportamiento real ha constituido, desgraciadamente para los promotores de ambas obras y para los usuarios de las playas contiguas, una rotunda confirmación de la exactitud de la predicción que se puede hacer con suma facilidad, mediante la utilización del "Compás de playas".

A la vez, dicho comportamiento pone de relieve que el mecanismo de llenado lateral y de vaciado lateral, no es el único que contribuye a la adaptación de la forma de la orilla a la espiral. Tanto la rápida formación de los tómbolos de Comarruga y de Calafell, como los estudios de R. Gourlay (1) sobre la generación de corrientes por efecto de un gradiente de la sobreelevación inducida por la rotura del oleaje, así como los resultados de unos ensayos realizados por mí en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (6), sugieren que las "corrientes de expansión lateral" intuídas por Iribarren en los años 40, pueden conducir la forma de la orilla hacia la espiral. Este mecanismo adquiere importancia cuando la orilla se aproxima al polo, de manera que el torbellino producido por la difracción en las inmediaciones del polo influye en el transporte longitudinal; entonces se produce el transporte de materiales "hacia el polo", pero la orilla rebasa el "límite de llenado por onda circular" y tiende hacia la espiral logarítmica.

El análisis de los procesos desarrollados a raíz de la construcción de los puertos de San Feliu de Guixols, Palamós, Blanes y Cambrils sugiere que la forma circular como "límite de llenado" se mantiene siempre que el polo quede situado fuera de la zona de rotura de la ola para todos los oleajes que puedan incidir en el saliente. Por el contrario, el examen de los procesos desarrollados a raíz de la construcción de los puertos de Comarruga y de

Calafell sugiere que el "EFECTO DE REMOLINO" conduce a la adaptación directa de la orilla a la espiral ($\varphi = 30^\circ$), cuando el polo queda ubicado más hacia tierra que la línea de rotura de los grandes temporales.

A la vista de la exactitud de las predicciones efectuadas mediante las teorías sobre los procesos de "vaciado lateral" y de "llenado lateral", considero interesante insistir de nuevo en el tema.

Esencialmente se trata de un enfoque original para captar la realidad de uno de los principales mecanismos que intervienen en los procesos de erosión-depósito, tema fundamental en morfología litoral. La idea tradicional de que la orilla de la playa tiende siempre a ponerse paralela a las crestas del oleaje incidente, implica una movilidad de las playas, ante oleajes de diferente dirección, que la realidad desmiente. Ello se justifica generalmente en base a la hipótesis de que los oleajes reales tienen duraciones relativamente escasas y, en consecuencia, la playa no llega al límite de remodelación correspondiente a la dirección del temporal. En mi enfoque, además de admitir evidentemente tal justificación, se introduce una nueva limitación consistente en que, bajo determinadas circunstancias, la playa puede mantenerse en equilibrio formando un ángulo φ ($\varphi = 30^\circ$) con el oleaje incidente, el cual se refracta sobre fondos de materiales sueltos.

Este enfoque se traduce en algo de sorprendente sencillez, como es la herramienta de estudio que denomino "compás de playas". Pero la comprensión del por qué de su utilización es difícil y precisa sutiles matizaciones. Ejemplo de ello es la necesidad de formular los postulados en base a una mera "tendencia" hacia determinadas formas. El contraste de la veracidad de la hipótesis requiere complicados estudios, inabordables con los medios de que he dispuesto hasta ahora. No obstante, considero que la comprobación de la exactitud de las predicciones, como ha ocurrido con los tómbolos de los puertos de Comarruga y de Calafell, puede conducir a la aceptación de la teoría.

3. CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD

3.1. Conceptos de equilibrio y de estabilidad

En la descripción de los procesos litorales se utilizan una serie de términos que, debido a la gran variedad de fenómenos y de puntos de vista de cada análisis, no siempre pueden tener el mismo significado. Es conveniente, establecer unas defi-

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

niciones que distinguan claramente determinados conceptos sobre equilibrio y estabilidad (5).

a) *Forma de equilibrio* ante la acción definida de un temporal que mantiene constantes sus características y dirección, es la forma final que adopta la superficie de la masa de arena que constituye la playa, una vez remodelada por dicho temporal. Es frecuente entender que nos referimos a las curvas de

nivel o isóbatas, y más concretamente a la forma de la orilla o isóbata cero.

Dada la dificultad de precisar, en la práctica, cuando se ha llegado a la situación de equilibrio, en los ensayos en modelo reducido se suele explicar el criterio adoptado (determinada duración; lentitud en los cambios; desaparición de turbiedad, etc.).

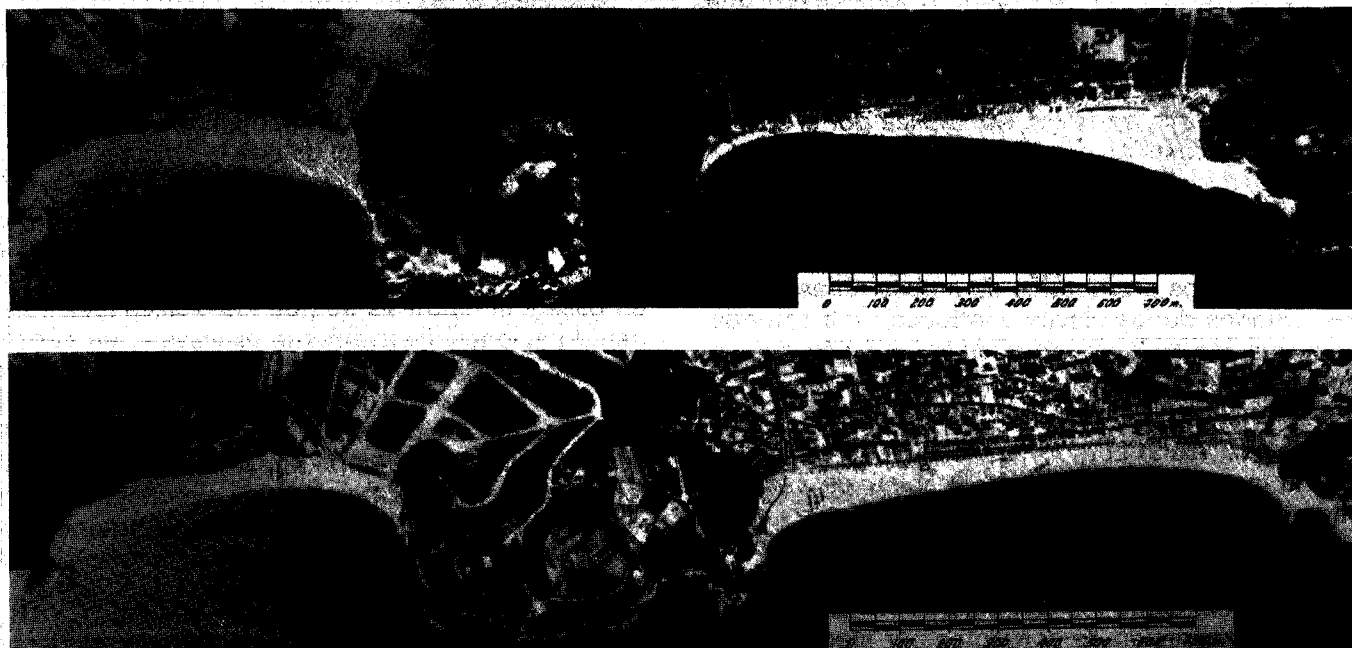


Fig. 2.A. Fotografías de las playas de Fanals y Lloret, en Lloret de Mar (Gerona). (E 1 : 17.000). Ejemplo de inestabilidad formal. Arriba, año 1962. Abajo, año 1973.



Fig. 2.B. Fotografías de la playa de San Pol, en San Feliu de Guixols (Gerona). (E 1 : 15.000). Ejemplo de estabilidad formal. Izquierda, año 1962. Derecha, año 1973.

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

b) *Estabilidad volumétrica.* Diremos que una bahía es volumétricamente estable, cuando el volumen de materiales sueltos que constituye la playa se mantiene constante a lo largo del tiempo, aunque sus formas sufran variaciones más o menos notables bajo la acción de oleajes de diferentes características y direcciones.

c) *Estabilidad formal.* Diremos que una bahía es formalmente estable, cuando las formas de equilibrio ante temporales de situaciones incluso extremas y de direcciones opuestas, son muy similares y, en consecuencia, la forma de la orilla es prácticamente invariante.

Conviene precisar que cabe la posibilidad de que dichas situaciones extremas se presenten sin que la playa alcance las máximas formas teóricas de equilibrio. Es decir, que entre en juego el factor tiempo limitando la duración de los oleajes extremos, en relación al tiempo necesario para remodelar la bahía, circunstancia que tenderá a presentarse cuanto mayor sea la dimensión de la playa. De esta manera el comportamiento reológico de los materiales sueltos puede contribuir a la estabilidad formal y, con mayor razón a la estabilidad volumétrica de una bahía.

Como ejemplo ilustrativo de playas volumétricamente estables, pero formalmente inestables, en la Fig. 2.A. se incluyen dos fotografías aéreas de las playas de Lloret y Fanals, en Lloret de Mar, tomadas en épocas distintas. Los datos históricos disponibles sobre los cambios de la playa de Lloret, prueban: a) que las situaciones de los años 1962 y 1973 no son extremas (ha habido deformaciones muy superiores en ambos sentidos); b) que a pesar de ello la playa puede considerarse volumétricamente estable.

Como ejemplo ilustrativo de playa formalmente estable, en la Fig. 2.B. se incluyen dos fotografías aéreas de la playa de San Pol, en término municipal de San Feliu de Guixols. Para comprender la expresividad que da la comparación de la movilidad de la playa de Lloret con la estabilidad formal de la playa de San Pol, debe tenerse en cuenta que se trata de fotos aéreas de los mismos vuelos de 1962 y 1973, lo que significa que, estando ambas playas situadas a una distancia aproximada de 15 Km. (en línea recta), experimentan diferente respuesta ante la acción de los mismos temporales.

Ambos ejemplos corresponde a bahías cuyos fondos están constituidos por materiales sueltos, prácticamente en su totalidad.

Se comprende fácilmente que la estabilidad

formal de la playa de San Pol se debe a unas mejores condiciones de abrigo. También se comprende que en ambos casos los salientes que limitan la bahía desempeñan funciones diferentes según sea la dirección del temporal, de manera que ante temporales de levante el saliente de levante produce la difracción de oleaje y el consiguiente abrigo en un cierto entorno, mientras el saliente de poniente se limita a frenar el transporte longitudinal. Bajo la acción de temporales de poniente, ambos salientes invierten sus funciones, actuando de "polo" el macizo de poniente y de "apoyo" el macizo de levante.

Vamos a tratar de dar una visión sintética de todas las causas que contribuyen a la estabilización de una playa, haciendo primero una clasificación de los elementos naturales o artificiales, según su función. Seguidamente se procede a un breve examen de los diferentes análisis mediante los cuales se estudia cada tipo de condicionante.

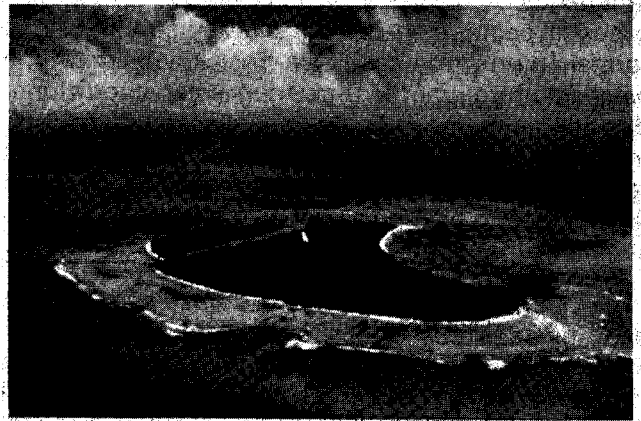


Figura 2.C. Isla Denis, en las Seychelles. Situada en medio del Océano Índico, la forma estable de las playas de arena blanca que la rodean sólo puede atribuirse a condicionantes de "fondos frontales indeformables", cuya existencia acusa claramente la fotografía.

3.2. Condicionantes de la estabilidad

Dentro de la gran diversidad de factores que motivan la estabilidad formal o volumétrica de una playa, podemos establecer los siguientes tipos de condicionantes:

a) *Condicionantes de contorno.* Son los salientes naturales o artificiales inmediatos o próximos a la playa. Su acción se manifiesta en planta, ya sea por la difracción de determinados oleajes antes de que incidan sobre la playa (función de Polo) o bien

por la limitación o impedimento del transporte longitudinal (función de Apoyo Lateral) (Ver ejemplo en Figs. 2.B, 7 y 8).

b) *Condicionantes de fondos frontales indeformables.* La existencia de fondos indeformables en profundidades reducidas, delante de la playa, implica una doble función estabilizadora. Por efecto de la refracción limitan o disminuyen la componente oblicua de los oleajes (función polar de los fondos). Asimismo su existencia física impide o disminuye el transporte de sedimentos, especialmente en sentido transversal hacia altamar (función de apoyo frontal ó sustentante) (Ver ejemplo en Fig. 2.C.). Los fondos rocosos pueden ser suficientemente someros como para producir la rotura de la ola (función de defensa).

c) *Condicionantes de fetch.* Las formas continentales que limitan el mar u océano en el que está ubicada la playa y los factores meteorológicos que afectan a dicho mar u océano determinan los regímenes de oleajes y de temporales. En algunos casos la orientación de una playa y su estabilidad formal (o en otros casos las posiciones límite y la estabilidad volumétrica) pueden estar condicionadas por las direcciones de máxima frecuencia o de máxima energía de los temporales, ya sea por la relativa importancia del fetch geográfico en estas direcciones, o bien por la relativa importancia de la acción de los vientos.

d) *Condicionantes de caudales sólidos.* En determinados casos la estabilidad formal o volumétrica de una playa se mantiene debido a la existencia de un caudal de transporte longitudinal de materiales sueltos importante (aunque el caudal que entra es idéntico al que sale de la unidad o tramo de playa considerado, por definición del concepto de estabilidad expuesto anteriormente). La cuantía del caudal neto influye en la orientación que adopta el tramo de playa considerado, respecto a la resultante de los temporales que producen dicho transporte.

Los condicionantes anteriores operan sobre cualquier tipo de sedimentos capaces de constituir una playa. No obstante su eficiencia, especialmente de las funciones de apoyo, tanto frontal como lateral, dependerá de las características de los materiales. La naturaleza, durabilidad, densidad, forma, tamaño y distribución granulométrica jugarán un papel fundamental en la forma del perfil y también en la determinación de los límites del transporte significativo. Dado que la durabilidad, densidad y forma son muy similares para los materiales que constituyen generalmente las pla-

yas, la característica más importante es el tamaño del sedimento y su distribución.

3.3. Análisis de los distintos tipos de condicionantes

En general la estabilidad de una playa se deriva de la combinación de varios factores. Si analizáramos los casos de Lloret y de San Pol, veríamos que esta última playa debe su estabilidad formal casi exclusivamente a condicionantes de contorno, mientras que en la playa de Lloret intervienen además condicionantes de fetch, y entre ambos no consiguen más que una estabilidad volumétrica.

En el caso de las playas de un delta es frecuente que la mayor o menor estabilidad de los diferentes tramos se base en condicionantes de fetch y de caudales sólidos.

Dado que el estudio de los distintos tipos de condicionantes se basa en métodos muy diferentes, la clasificación anteriormente descrita nos permite efectuar una visión sintética de los diversos estudios sobre los fenómenos y mecanismos que intervienen en los procesos litorales.

a) El análisis de los *condicionantes de fetch* nos conduce en definitiva a determinar las acciones de los oleajes que pueden abordar el entorno de la playa que queremos estudiar. Destaquemos simplemente que para ello disponemos de los diferentes métodos de predicción del oleaje ya sea para definir los regímenes de oleajes y de temporales o bien para estudiar determinadas acciones cuyos efectos son conocidos (hind-casting). Podremos así mismo detectar acciones predominantes que puedan justificar la orientación de la playa en algunos casos (Lewis, 1931-1938; Schou, 1945).

b) Los *condicionantes de caudales sólidos* se conocen mediante el estudio de las corrientes longitudinales (movimientos del agua) y del transporte longitudinal de sedimentos. Señalemos que el método conocido como "Balance de Sedimentos" (Jonson, 1959; Bower e Inman, 1966; Caldwell, 1966; Pierce, 1969; Vallianos, 1970) constituye un análisis metódico de los caudales de transporte junto con efectos de depósito o de erosión, que puede ayudar a detectar la importancia e incluso la cuantía de los caudales sólidos.

c) Determinados los regímenes de oleajes y de temporales, y por tanto las acciones a tener en cuenta, el análisis de las *características de los sedimentos* nos permitirá definir: 1.º La profundidad en que puede aceptarse la indeformabilidad de

los fondos (Dietz, 1963; Pilkey, 1964; Swart, 1974). 2.º La posible eficiencia de los apoyos frontales o laterales; 3.º Una estimación del perfil medio de la playa.

d) La *función polar de los fondos* se analiza mediante los diagramas de refracción, ya sea por el método de las ortogonales por aplicación de la Ley de Snell, (O'Brien, 1942; Chien, 1954; Ralls, 1956; Wiegel y Arnold, 1957; Chao, 1970) o bien por el trazado de los planos de oleaje, (Expansión Frontal, Iribarren, 1936-1941), determinándose así sus efectos sobre los oleajes, y su repercusión sobre las formas en planta de la playa (Davies, 1959, 1960; C. Garau, 1973).

e) La *función polar* de los salientes se conoce mediante los diagramas de difracción (Wiegel, 1962; Larras, 1972) o bien mediante el estudio de la Expansión Lateral (Iribarren, 1936-1941). También se puede analizar los efectos del abrigo diferencial (Iribarren, 1947; M.R. Gourlay, 1974). Finalmente se pueden estudiar los "límites de vaciado y de llenado" (C. Garau, 1973).

4. ANALISIS DE LOS EFECTOS DE LA FUNCION POLAR DE LOS SALIENTES

4.1. Planteamiento

Acabamos de señalar que el estudio de la difracción (o expansión lateral) describe la función polar de los salientes. Aunque el fenómeno ha sido pródigamente estudiado, los efectos que produce sobre las playas está todavía hoy en discusión.

Detengámonos por un momento en el tema de la generación de corrientes por un gradiente de sobre-elevación. Veamos estas palabras de M.R. Gourlay (7).

"La generación de corrientes por las olas en las proximidades de la orilla es uno de los mecanismos fundamentales en la conformación de las costas sedimentarias, tal como se reconoce hoy. Desde hace muchos años se ha estudiado ampliamente la acción de las olas que rompen formando un cierto ángulo con la orilla, produciendo así una corriente paralela a la orilla con el consiguiente transporte longitudinal de arena. Más recientemente también se ha reconocido como significativa en los procesos litorales, la influencia de las corrientes de transporte de masa inducidas por oleajes que no rompen. Menos conocido es el mecanismo por el que los oleajes, rompiendo con cresta paralela a la orilla, pueden engendrar corrientes longitudinales".

"Hace veinticinco años, Iribarren (1) describió una situación en la que los oleajes de fondo, cuyas crestas eran paralelas a la orilla, engendraban una corriente longitudinal... Aunque Iribarren fué capaz de resaltar la importancia de esta "corriente de expansión lateral", como él la llamaba, en el extremo abrigado de una playa, no parece que se haya prestado mucha atención a este mecanismo de generación de corrientes...".

En dicho artículo, Gourlay expone sus experiencias en el tema, tanto en la naturaleza como en los ensayos de laboratorio, terminando con la siguiente conclusión:

"En el laboratorio se ha producido la generación de corrientes de expansión lateral tras un rompedor, debidas a un gradiente de altura de ola rompiente a lo largo de la orilla, cuando las crestas de las olas se mantienen paralelas a la orilla. El mecanismo básico que produce la corriente es, tal como se comprueba, la formación de un gradiente de sobre-elevación inducida por la ola en la zona de posrotura. La corriente resultante adopta recorridos en forma de espiral logarítmica y hay evidencia de que se produce una importante interacción entre la corriente y las condiciones hidráulicas que la originan.

Utilizando una combinación de métodos teóricos y empíricos se ha calculado la posición del punto de rotura para la geometría particular del ensayo y también se ha estimado la sobre-elevación inducida en función de la altura de ola rompiente, en el caso bidimensional con rotura en cascada. Parece ser que de esta forma podría calcularse la corriente longitudinal para las condiciones del ensayo, pero para confirmar esta conclusión es necesario aguardar el análisis completo de los datos de los ensayos.

Es evidente que un sistema de corrientes de este tipo puede ser de importancia capital para la determinación de la forma de la orilla en la proximidad de un dique, espigón, o cabo. Se ha comprobado también que los efectos de la rotura del oleaje formando ángulo con la orilla están sujetos a importantes modificaciones por la presencia de un gradiente de altura de ola a lo largo de la orilla, produciéndose interacción entre la corriente y el mecanismo que origina el gradiente de sobre-elevación".

Dejando para más adelante la relación de estas conclusiones con el tema que nos ocupa, quisiera analizar aquí la causa de que no se haya prestado la suficiente atención al mecanismo descrito por Iribarren. En mi opinión se debe al concepto de sobre-elevación, que Iribarren deducía de la propiedad

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

geométrica de la trocoide, lo cual encierra dos dificultades.

De un lado, no representa una sobreelevación real del nivel local (sino sólo de la cota media entre cresta y seno, tanto en altamar como en aguas someras). De ahí que no cabe esperar la cesión lateral de masa de agua que se requiere para generar una corriente.

Por otro lado, la onda trocoidal presenta el inconveniente de tener un rotacional de sentido contrario al que debería producir la acción del viento que genera la ola. Por ello, aunque la teoría de Gerstner-Iribarren se aproxima y representa bien algunos fenómenos, como es la forma de la ola, ha quedado desprestigiada en favor de otras teorías que ofrecen mayor rigor científico (Stokes, Cnoidal, onda solitaria, etc.) especialmente en profundidades reducidas.

Por el contrario, la sobreelevación inducida por la ola al avanzar en aguas someras (Wave setup) no se refiere a la "diferencia entre la cota media de cresta y seno y el nivel medio del líquido", sino a un aumento del nivel local (nivel medio suprimiendo teóricamente la ondulación local) debido a la pre-

sencia del oleaje y al consiguiente incremento de masa de agua producido por la rotura de las olas en su avance por la pendiente de la playa. (Figura 3-A).

En la figura 3-B se reproduce la ilustración que presentaba Iribarren para aclarar el concepto de sobreelevación que utilizaba (Se trata de la figura 36, incluida en el epígrafe 43 correspondiente a profundidades indefinidas, Obras Marítimas. Oleajes y Diques, pag. 68). Lo que él llamaba "nivel medio en reposo" debería ser "nivel medio en movimiento" y lo que llamaba "nivel medio en movimiento" debería ser "cota media entre cresta y seno".

Digamos en descargo de nuestro admirado maestro, que las observaciones sobre esta sobreelevación del nivel del líquido se iniciaron a partir de los años 57 (Savage), lo cual explica que su intuición sobre el fenómeno de la inducción de corrientes por efecto de un gradiente de altura de ola a lo largo de la orilla, no llegase a ser correctamente descrita y, en consecuencia, quedase incomprendida por la mayoría de los investigadores.

Dejemos esta digresión y volvamos al análisis de los efectos de la función polar de los salientes, y concretamente a la conformación de la playa en planta. En la página 653 de la Revista de Obras Públicas, julio 1973, al estudiar el tómbolo afirmaba:

"Con respecto a la relación entre longitud del obstáculo paralelamente a la costa y su alejamiento es preciso indicar que el valor numérico hallado representa una condición para que el tómbolo se mantenga, pero no para que se forme".

Esta afirmación se basaba en que la "curva límite de vaciado" (espirales con centros en los salientes del obstáculo y tangentes a la orilla rectilínea anterior a la construcción de la obra) no puede retroceder, a no ser que previamente retroceda la orilla primitiva. Pero en muchos casos el mecanismo de "llenado lateral" y de "vaciado lateral" no justificaría la formación del tómbolo. (*)

Las formaciones de sendos tómbolos en los puertos recientemente construídos en Comarruga y en Segur de Calafell (Tarragona) ponen en evidencia que además de dicho mecanismo de "llenado" y de "vaciado", también juega un papel importante el mecanismo descrito en su día por Iribarren (1) y más recientemente por M.R. Gourlay (7). Aunque los ensayos de éste se referían a lecho fijo y no a

(*) Especialmente cuando la alternancia (variación de la componente oblicua) de los oleajes está muy limitada, ya sea por condicionantes de fondos frontales o de fetch.

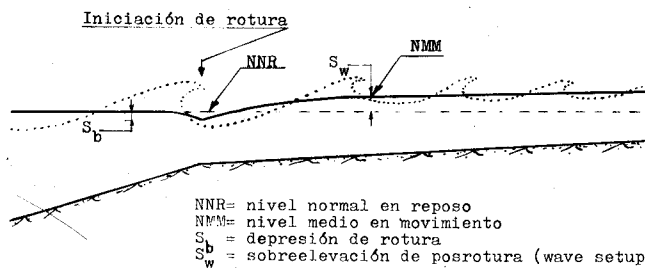


Figura 3.A. Variación de nivel inducida por la rotura del oleaje.

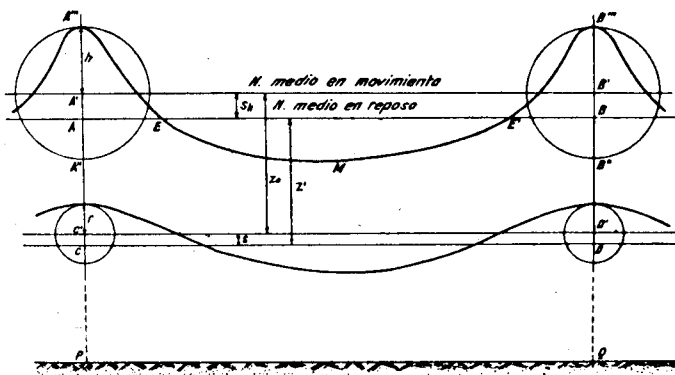


Figura 3.B. Concepto de sobreelevación utilizado por Iribarren.

materiales sueltos, mi propia experiencia obtenida en unos ensayos realizados en los años 74 y 75 en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (6), me indujeron a considerar que las corrientes de abrigo diferencial pueden implicar un transporte de llenado (con recorrido hacia el polo) que produzca el avance de la línea de la orilla por delante de la circunferencia que he denominado "límite de llenado", aproximando la forma hacia la espiral. Parece, no obstante, que este fenómeno sólo adquiere importancia cuando la orilla se aproxima mucho al polo, de manera que se va dificultando el paso de la corriente longitudinal por detrás del obstáculo, en el caso del tómbolo.

Por otra parte el comportamiento del movimiento de arenas a consecuencia de la construcción de los puertos de Comarruga y de Calafell constituyen sendas confirmaciones de mi teoría de que el "compás de playas" ($\rho = e \theta \operatorname{tg} \varphi$; $\varphi = 30^\circ$) proporciona realmente un límite de vaciado" y por lo tanto permite una perfecta previsión de los movimientos irreversibles que se derivarán de la construcción de una obra, en sus inmediaciones, con una facilidad y rapidez asombrosas.

Por ello expondré un breve resumen de mis teorías sobre los procesos de llenado y de vaciado lateral y, a continuación, algunos nuevos ejemplos de aclaración o de comprobación.

En todas las figuras que seguirán, cuando se precise el dibujo de formas en límite de vaciado por onda circular, se utiliza el "compás de playas" que se reproduce en la Figura 4. El centro de la espiral se señala con una cruz; el contorno exterior es la espiral de $\varphi = 30^\circ$ y el interior de la espiral de $\varphi = 60^\circ$ (esta última se ha adoptado por proporcionar una forma adecuada al elemento de plástico duro y transparente y además porque puede ser útil a la hora de trazar la normal a la orilla en cualquier punto).

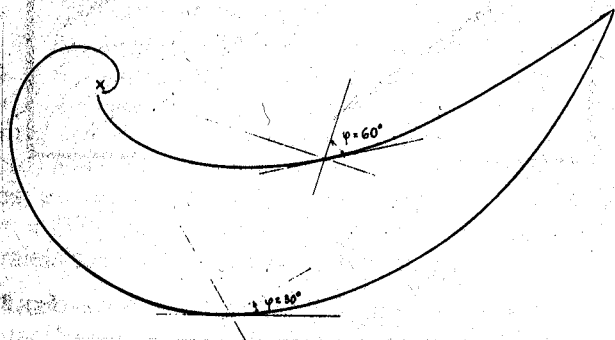


Figura 4. Modelo de "Compás de Playas".

RESUMEN DE LA TEORIA SOBRE LA FORMA DE LA ORILLA EN LOS PROCESOS DE ACCESION LATERAL Y DE EROSION LATERAL

Régimen de llenado lateral (Accesión)

Bajo este concepto entenderemos el proceso y accesión que se produce cuando el oleaje incidente ataca sensiblemente paralelo a la playa y, además, la cantidad de material depositado lateralmente en cada punto del perfil supera al material erosionado por la misma causa (transporte decreciente a lo largo de la playa). La evolución del perfil en una sección de la playa sujeta a este régimen será la que se refleja esquemáticamente en la Figura 5-A.

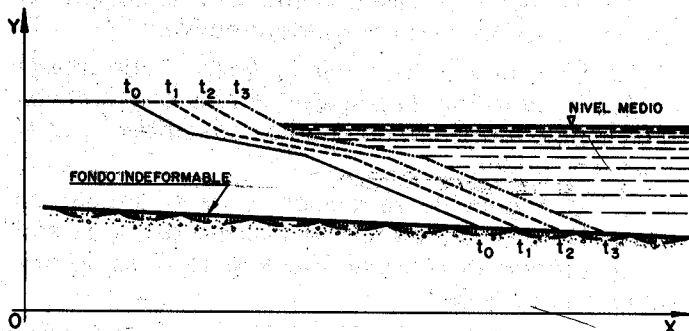


Fig. 5.A. Evolución esquemática del perfil en régimen de llenado lateral.

Régimen de vaciado lateral (Erosión)

Bajo este concepto entenderemos el proceso de erosión y regresión que se produce cuando el oleaje incidente ataca oblicuamente a la playa y, además, la cantidad de material erosionado lateralmente en cada punto del perfil supera al material depositado (transporte creciente a lo largo de la playa).

La evolución del perfil en una sección transversal de la playa sujeta a este régimen será la que se refleja esquemáticamente en la figura 5-B.

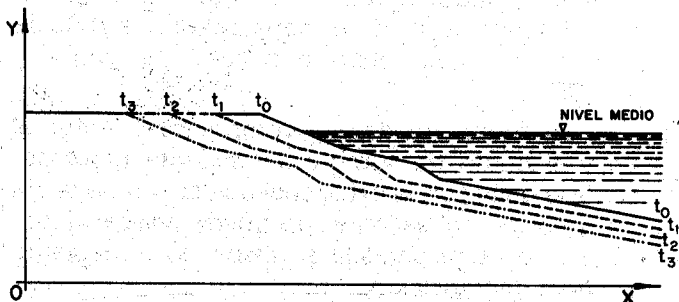


Fig. 5.B. Evolución esquemática del perfil en régimen de vaciado lateral.

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

Estos regímenes se presentan particularmente en la naturaleza cuando el temporal cambia de dirección (rola) manteniendo su capacidad para conformar la playa, y se diferencian de la acesión o regresión frontal (perfil en berma o en barra, respectivamente) que se produce cuando el oleaje mantiene su dirección y varían las demás características.

POSTULADOS:

1.º En régimen de llenado lateral todo el oleaje tiende a conformar la playa en curvas concéntricas con el polo y paralelas al oleaje incidente.

(Podríamos decir: formando con el oleaje de origen el ángulo correspondiente a la refracción experimentada sobre fondos indeformables).

2.º En régimen de vaciado lateral todo oleaje tiende a conformar la playa en curvas concéntricas con el polo formando un ángulo constante φ con el oleaje de origen.

3.º El ángulo de refracción φ y el ángulo de rozamiento de las arenas en el seno del agua son interdependientes. El valor del ángulo φ es aproximadamente de 30° .

Estos postulados relacionan los fenómenos de refracción con los fenómenos de depósito-erosión a través de la influencia o no influencia del rozamiento. En régimen de vaciado lateral el movimiento de las arenas recorre la orilla en el sentido de alejamiento del polo.

REGLAS:

Para analizar la forma de una playa o para definir sus formas de equilibrio ante un determinado oleaje, deben tenerse en cuenta las siguientes reglas:

1) Entre una zona en equilibrio con refracción (límite de vaciado) y otra zona en equilibrio sin refracción (límite de llenado), debe existir una zona de transición curvada, cuyo giro total es igual a φ ($\varphi = 30^\circ$).

1.a. La forma en espiral comprendida entre el polo y el punto de sombra del saliente (intersección de la orilla con la ortogonal a la cresta de la ola en el extremo del saliente) no puede enlazar directamente con una paralela al oleaje, sino mediante una curva de transición.

1.b. La forma más estable de esta curva de transición es la prolongación de la misma espiral

logarítmica (Ver: Fig. 6.A, posición t_3 ; Fig. 6.B, posición t_4 ; y Fig. 7).

1.c. No obstante, la espiral puede enlazar en el punto de sombra con una recta que presente el ángulo φ ($\varphi = 30^\circ$) respecto al oleaje. La curva de transición vendrá después de este tramo recto (Ver: Fig. 6.A, posiciones t_1 y t_2 ; Fig. 6.B, posiciones t_0 y t_1), para pasar de "límite de vaciado por onda recta" a "límite de llenado", que podrá ser recta o circunferencia.

Estas reglas se refieren a procesos en que no intervienen los efectos de refracción sobre fondos indeformables y, en consecuencia, los oleajes solo pueden ser de onda recta o de onda circular procedente de la difracción en algún saliente. El concepto de "límite de vaciado" corresponde a la forma de la orilla que presenta el ángulo φ ($\varphi = 30^\circ$), y será recta o espiral logarítmica según los

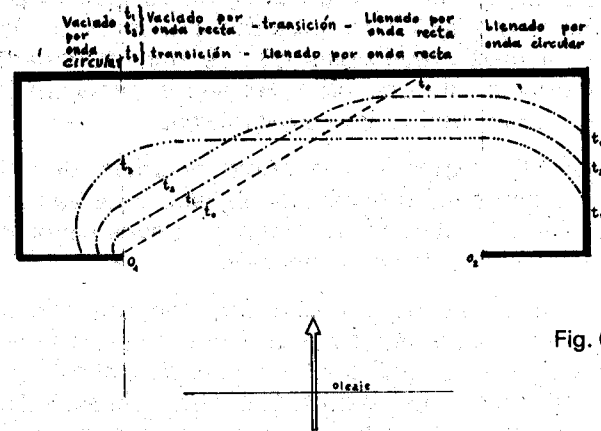


Fig. 6.A.

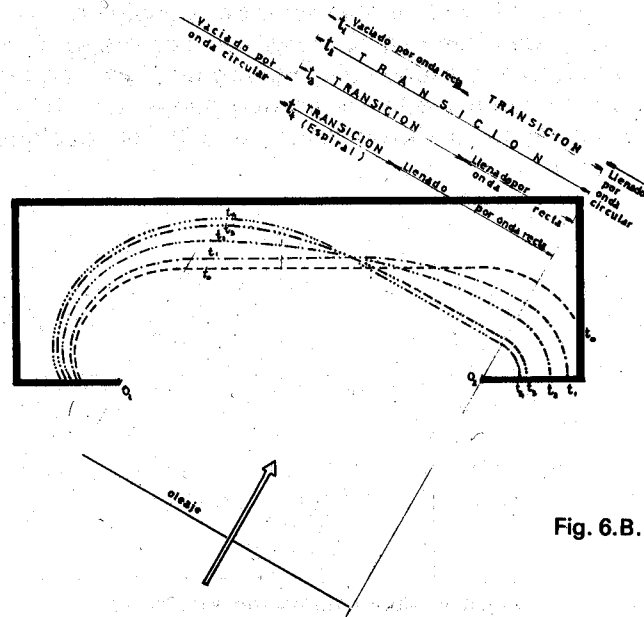


Fig. 6.B.

casos) con el oleaje incidente, en cualquier instante durante el proceso, incluso en la posición final, en cuyo caso la forma en "límite de vaciado" pasa a ser "forma de equilibrio" ante el oleaje. El concepto de "límite de llenado" corresponde a la forma de la orilla que se dispone paralela a la cresta del oleaje, pudiendo ser por tanto recta o circunferencia y mantenerse en la posición final, en cuyo caso la forma en "límite de llenado" pasa a ser también "forma de equilibrio". (Ver C. Garau (3) y (4) y tener en cuenta la conclusión 2.ª del presente artículo).

4.2. Ejemplos

4.2.1. *Ejemplo teórico de playa volumétricamente estable por condicionantes de contorno pero formalmente variable.*

Admitiendo las anteriores reglas, y postulados para seguir una simulación de los cambios de forma de las playas, veremos a continuación algunos ejemplos en que se obtienen resultados interesantes.

Para simplificar estos análisis, admitiremos también que, por lo menos en primera aproximación, la estabilidad volumétrica equivale a conservación del área de la playa emergida.

En la Fig. 6 se indican las sucesivas posiciones de la orilla, en base a los postulados y reglas anteriores. En la Fig. 6-A, se supone un oleaje de crestas paralelas a la alineación de los dos polos O_1 y O_2 , y una posición inicial de la orilla definida por la línea de trazos t_0 . Las posiciones t_1 , t_2 y t_3 mantienen constante el área comprendida entre cada línea y el contorno de trazo grueso que simboliza el "continente" de la playa. (El fondo se supone horizontal, de profundidad adecuada para que el pié del perfil no se salga del recinto).

En la Fig. 6-B, se supone un oleaje oblicuo ($\alpha = 30^\circ$) que ataca a partir de la posición inicial t_0 , de trazos, que es idéntica a la posición final de la Fig. 6-A. La posición t_4 ya no puede ser modificada por este oleaje, pues el retroceso de la espiral de centro en O_1 requeriría un retroceso del frente recto, inadmisibles en el proceso que contemplamos, puesto que la línea t_4 corresponde a la espiral ($\varphi = 30^\circ$) de centro en O_1 y tangente a la recta paralela a las crestas del oleaje incidente.

La posición t_3 de la Fig. 6-A se encuentra en una situación similar y tampoco puede ser modificada si el oleaje incidente mantiene su orientación. Ambas

líneas corresponden a "formas de equilibrio ante un temporal".

Es evidente que si la duración del temporal es inferior a la necesaria para remodelar la playa hasta su forma límite, la orilla quedará en la posición correspondiente a dicha duración hasta que se presenten nuevos oleajes capaces de remodelar la playa. Conviene resaltar que a medida que avanza el proceso, los tiempos necesarios, para un determinado cambio aumentan considerablemente, mientras los caudales de transporte disminuyen rápidamente al aproximarse las formas de equilibrio.

En el estudio de las formas de equilibrio ante un temporal hemos prescindido de la altura y el período de las olas, fijándonos exclusivamente en la dirección. Es evidente que estas características de las olas, que determinan su energía, influirán en la velocidad de remodelación de la playa, pero en esencia no alteran más que la escala de tiempos del fenómeno que analizamos.

4.2.2. *Ejemplo teórico de playa formalmente estable por condicionantes de contorno.*

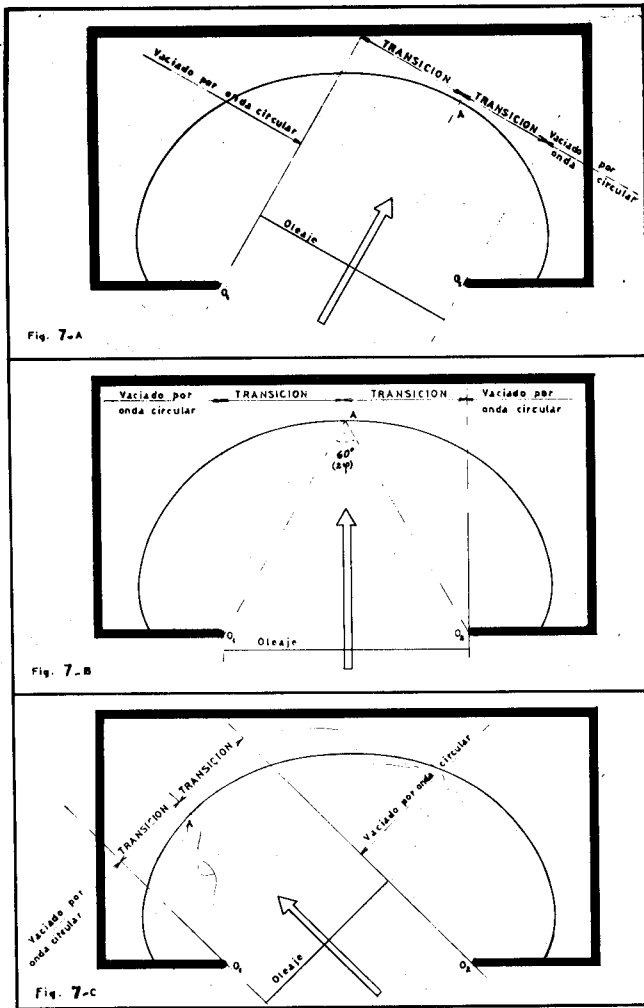
En la Fig. 7 se representa una playa cuya orilla tiene la forma de dos espirales, de polos O_1 y O_2 , tangentes entre sí.

En cada caso, A, B, C, se supone un ángulo de ataque distinto, indicándose en que situación límite quedan los distintos tramos de playa definidos por la prolongación de las ortogonales que pasan por los polos O_1 y O_2 , y por el punto A en que la tangente a la orilla es paralela al oleaje incidente.

Conviene señalar que la estabilidad formal de la orilla no presupone que no haya movimientos de arena al variar la dirección de ataque de los oleajes. Las isóbatas deberán modificarse adaptándose a las posibilidades de respuesta del perfil, frente a cada oleaje.

Nótese que esta forma teórica "óptima" presupone un determinado volumen de arena. Si en la playa de la Figura 7 se añadiese arena, la orilla debería adelantarse, adquiriendo cierta movilidad de acuerdo con las posibilidades reales de oblicuidad de los oleajes. Si se quitase arena, la orilla debería retroceder, sin perder su carácter de estabilidad; es decir, que la orilla situada más atrás que esta forma teórica implica la estabilidad formal por condicionantes de contorno, y su forma podrá incluso tener cierto grado de indiferencia (hiperestabilidad formal).

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

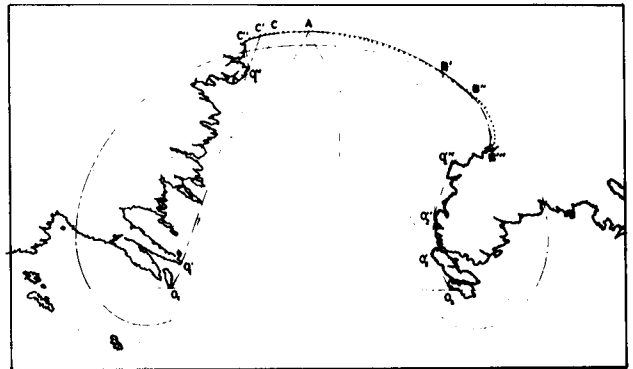


un caso excepcional de playa real formalmente estable por condicionantes de contorno, puesto que todos los fondos de la bahía son de arena, y además la movilidad de la relativamente próxima playa de Lloret es prueba palpable de que los condicionantes de fetch no proporcionan por sí solos la estabilidad formal. (Dicha "forma óptima" es la de punto - raya).

b) También se representa la posición de la orilla, línea de puntos, y la curva trazada con el "compás de playas" desde el punto A. Los tramos AC, CC', C'C'', tienen centros en O₁, O₁', O₁'', respectivamente.

Los tramos A B', B'B'', B''B''', tiene sus centros en O₂, O₂', respectivamente.

Como puede apreciarse la coincidencia de la línea de trazo fino continuo C'' C' C A B' B'', es perfecta. Tan solo hay una ligerísima desviación en el tramo B'' B'''. Dicha desviación desaparece al comparar esta curva con la posición de la orilla en la fotografía tomada en 1962, que revela una coincidencia perfecta en su totalidad.



4.2.3. Ejemplo real de playa formalmente estable por condicionantes de contorno.

En la Fig. 8 se reproduce la playa de San Pol, situada en el término municipal de San Felú de Guixols (Gerona), un kilómetro a levante del núcleo urbano. La estabilidad formal de esta playa ya se ha puesto de manifiesto en la Figura 2-B.

La parte inferior de la Fig. 8 es reproducción de la foto aérea de 1954. La parte superior es un calco esquemático de dicha fotografía, en la que se representa:

a) La forma "óptima" descrita en el epígrafe anterior, para los polos O₁ y O₂. Cabe observar que la orilla, en las inmediaciones del punto A de tangente paralela a la alineación O₁ O₂, queda situada muy próxima a dicha "forma óptima", y ligeramente más atrás. El comportamiento real de la playa (como ya se ha descrito en 3.1.) confirma las hipótesis del epígrafe anterior, ya que estamos en



Figura 8. Playa de San Pol (T.M. de San Felú de Guixols. Gerona)

Para recalcar más esta perfecta concordancia, debemos recordar que el comportamiento teórico de los postulados difícilmente puede presentarse a la perfección en la realidad. El contorno real puede implicar, por ejemplo, fenómenos de reflexión que hacen que en algún momento la playa se sitúe en el tramo B'' B por detrás del "límite de vaciado" (Probablemente por una reflexión en el acantilado del contorno O₂' B''').

4.2.4. Ejemplos reales de "curva límite de llenado por onda circular"

En la Fig. 4a. en (3) se pone de manifiesto que el tramo C'' A corresponde a "curva límite de llenado por onda circular" procedente del polo O₃.

Realmente es difícil encontrar en la naturaleza, procesos que reproduzcan este fenómeno sin que en algún momento no pueda intervenir un oleaje con onda recta. En el caso de la playa de San Feliu de Guixols se cumple esta condición debido a la existencia del saliente rocoso simbolizado por el polo O₂ de la playa mencionada. (Pág. 655, 657, 788 de la Revista de Obras Públicas del año 1973).

4.2.4.1. Puerto de Palamós (Gerona)

Esta singularidad se da también en el caso de Palamós (Gerona) que se reproduce en la Fig. 9.

Para comprender el significado del dibujo y la razón de que el tramo A A' A'' se ajuste a las circunferencias de centros O₂ y O₂', conviene tener presentes los siguientes hechos:

a) Antes de la construcción del dique de abrigo del puerto de Palamós, la playa de la bahía debía su estabilidad a condicionantes de tres tipos: de fetch, de fondos indeformables y de contorno. (Esta circunstancia se pone en evidencia nada más comprobar que la playa queda muy por delante de la espiral de trazos con centro en O₁, siendo este punto el polo de levante anterior a la construcción del dique).

b) La construcción del dique significó la introducción de un nuevo e importante condicionante de contorno. Su efecto se tradujo en la irreversibilidad de todos los movimientos de arenas provocados por los temporales de poniente. (Mientras no se sobrepase la línea de trazo y punto, espiral con centro en O₂ y tangente a la playa).

c) En consecuencia el tramo A, A', A'' de la playa está en proceso de llenado. La construcción del espigón B O₃ limitó (por lo menos parcialmente,

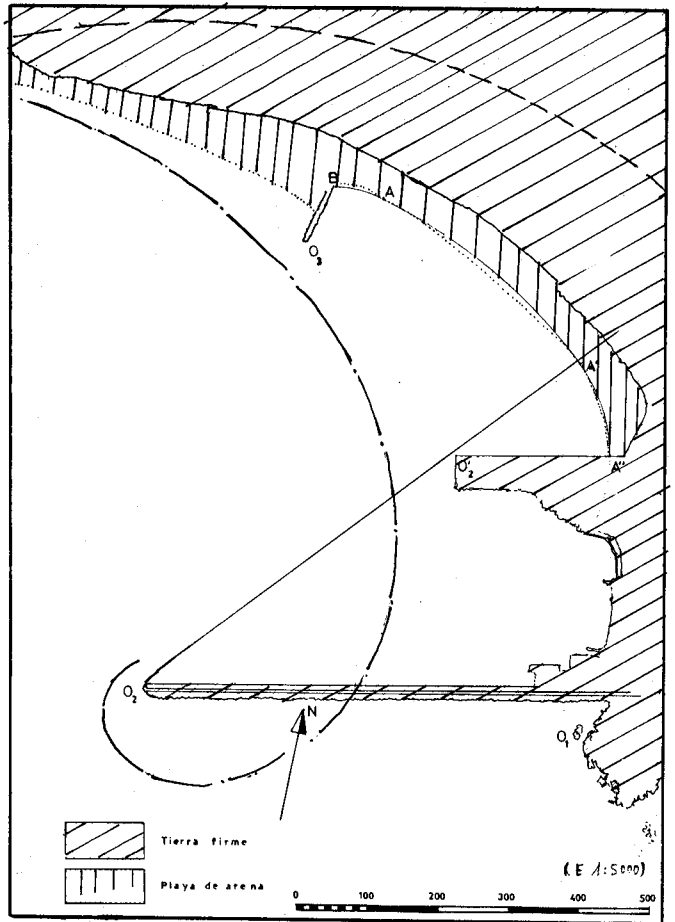


Fig. 9. Proceso de llenado en el puerto de Palamós.

aunque no llegue a representar una imposibilidad total) el llenado del tramo B, A, A', A'', por oleajes de onda recta. Esta limitación es absoluta en el tramo A' A'', debido a la situación del saliente rocoso que cierra a poniente la bahía de Palamós.

d) Aclarado el proceso esquemáticamente en los puertos anteriores, obsérvese la coincidencia perfecta del tramo A' A'' con la circunferencia de centro en O₂'. Obsérvese así mismo la buena coincidencia del tramo A A' con la circunferencia de centro en O₂. La pequeña desviación, puesto que la línea de puntos de la orilla se adelanta ligeramente en el centro del tramo A A', se justifica por la posibilidad de que los temporales de Garbí (S.O.) ataquen a este tramo con onda recta.

4.2.4.2. Puerto de Blanes (Gerona)

En la Figura 10 se reproduce el Puerto de Blanes, el tómbolo natural de "La Palomera y el extremo de levante de la playa del Savanell.

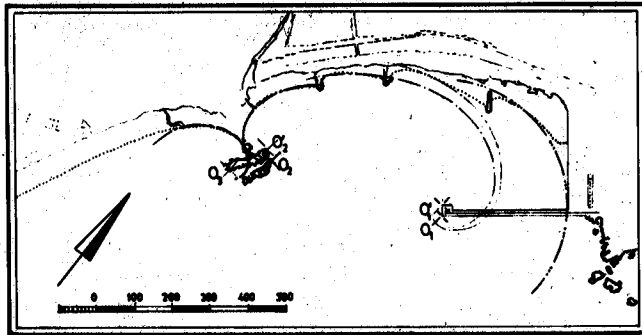
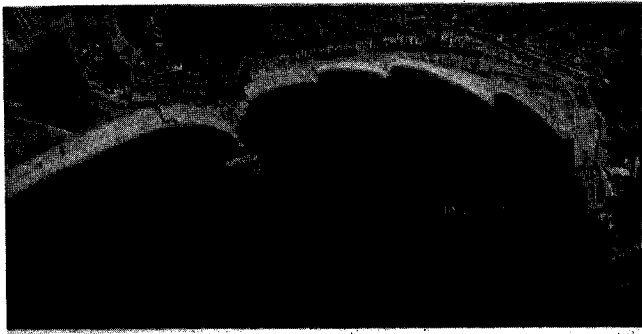


Figura 10. Puerta de Blanes y Punta Palomera.
Arriba: Fotografía aérea (1964)
Abajo: Esquema realizado sobre la misma fotografía.
Obsérvese cómo la playa más interior, batida únicamente por oleaje circular de centro en O_1 , se aproxima a la circunferencia, pero sin llegar a ponerse paralela al oleaje. No ocurre así en los demás tramos de playa. Véase asimismo la buena coincidencia del tómbolo de La Palomera con las espirales de centros (O_2, O_2), y (O_3).

El efecto derivado de la construcción del dique de abrigo es similar a los experimentados en San Feliu de Guixols y en la bahía de Palamós. Los temporales de componente Sur fueron transportando la arena y deformando la playa, a pesar de la construcción de tres pequeños espigones.

Puede observarse que la playa más interior, comprendida entre el 1.º espigón de retención de arenas y el muelle de costa, tiende a orientarse según la circunferencia de centro en O_1 , sin llegar a alcanzar esta forma límite.

Conviene aclarar que la forma redondeada que presenta la playa junto al muelle de ribera se debe a la realización de dragados de mantenimiento de calados, efectuados con medios terrestres desde el mismo muelle. Dichos dragados pueden justificar también la pequeña discrepancia de la orilla respecto de la circunferencia pero, dada la escasa frecuencia con que se han realizado tales operaciones de dragado, debe admitirse que se trata de una situación muy próxima al límite, es decir, a la forma de equilibrio ante los oleajes circulares.

El tramo de playa a que nos estamos refiriendo, está sujeto únicamente a la acción de oleajes procedentes de la difracción en O_1 . Dicha condición es extensiva al tramo inmediato, pero no a medida que nos alejamos de la protección del dique. Se observa que la orilla del tercer sector se ajusta perfectamente a la espiral, trazada con los centros O_1 y O_1' situados exactamente en los salientes del morro.

Por otra parte, también puede observarse en la Figura 10 como el tómbolo de "La Palomera" ajusta sus formas a las espirales ($\varphi = 30^\circ$) de centros (O_2, O_2') y (O_3).

4.2.4.3. Puerto de Cambrils (Tarragona)

También se dieron históricamente las circunstancias singulares que conducen a la formación de playa circular como "límite de llenado por onda circular", en el interior del Puerto de Cambrils.

La arena atrapada entre los diques de levante y de poniente, originalmente distribuida más o menos uniformemente a lo largo de la línea de ribera, quedó sometida a la acción de los oleajes procedentes de la difracción en los morros de los diques,

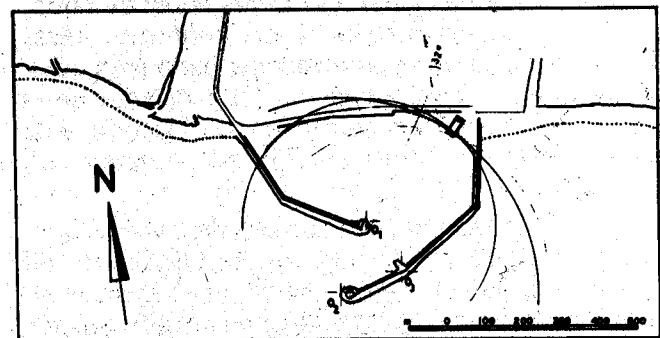


Figura 11. Puerto de Cambrils (Tarragona).
Arriba: Fotografía aérea (1964)
Abajo: Esquema realizado sobre la misma fotografía.
Obsérvese como las dos playas interiores, indicadas en línea de puntos y separadas por el muelle de ribera, adoptan claramente las formas circulares de centros O_1 y O_2 , respectivamente.

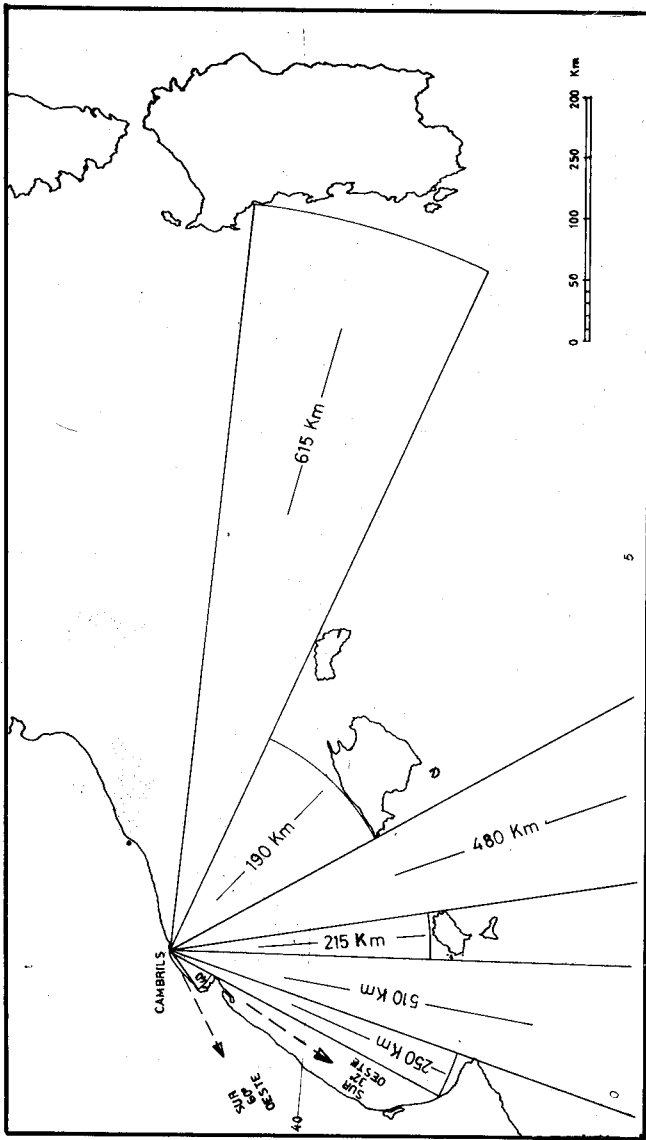


Figura 12. Cuñas de temporales (Fetch) para el Puerto de Cambrils.

y por tanto con centros O₁ y O₃ entre los años 1936 a 1950 y con centros O₁ y O₂ a partir del año 1955 en adelante, según se indica en el esquema de la parte inferior de la Figura 11.

En la parte superior de dicha Figura 11 se reproduce una fotografía aérea del año 1964, y en ella se aprecia que gran parte de la línea de ribera ha sido remodelada por la construcción de un atraque, el cual corta en cierta medida la unidad de la playa. No obstante se aprecia claramente como la playa de poniente se ajusta a la circunferencia de centro en el extremo del dique de poniente, O₁; y que la playa de levante se ajusta a la circunferencia de centro en el morro del dique de levante, O₂.

En ambas playas la arena tuvo que fluir hacia la zona más abrigada, es decir, hacia el polo, según lo que se ha descrito como proceso de llenado. La de poniente no podía sufrir otra acción que la de oleajes difractados en O₁. La playa de levante, si bien podía sufrir la acción de oleajes difractados en O₁, procedentes de direcciones de mayor componente de poniente que el Sur - 60° Oeste, para todos los oleajes procedentes de direcciones de mayor componente de levante en el Sur-32° Oeste, la dirección se produce en O₂. En la Figura 12 se indican las cuñas de temporales, apreciándose que la acción de los oleajes que no implican la onda circular de centro en O₂ para la playa de levante, es prácticamente despreciable.

Estos ejemplos de playas circulares, con centro de la circunferencia localizado en el polo de difracción, constituyen una confirmación del primer postulado. Su singularidad no es exclusivamente de disposición y clima marítimo, si no también histórica, puesto que tan sólo se conocen tales circunstancias gracias a oportunos documentos gráficos (fotografías aéreas). Para poner de relieve esta singularidad basta decir que hoy en día ya no existe la playa de poniente del interior de Cambrils, y la playa de levante desaparecerá en un plazo no muy lejano; la playa de San Feliu de Guixols ha sufrido una total remodelación artificial; la playa circular del Puerto de Palamós no tardará mucho tiempo en seguir un camino similar, como consecuencia de obras de reordenación del Puerto. Hay que recalcar que la disponibilidad de fotografías aéreas sólo corresponde a un período de tiempo muy reciente, mientras otros tipos de documentos gráficos están sujetos a errores de precisión o de fiabilidad.

Se trata por lo tanto de verdaderos modelos a escala del proceso de "llenado por onda circular" de los que nos han quedado algunos testimonios gráficos.

4.2.5. *Comprobación de los efectos derivados de la construcción del puerto de Comarruga (Tómbolo)*

El puerto deportivo construido recientemente en la playa de Comarruga (Tarragona) constituye un ejemplo de obra proyectada con un firme deseo de no producir grandes alteraciones en los procesos litorales del entorno, mientras el resultado ha sido la formación de un gran tómbolo que representa una total disfuncionalidad del pantalón y un notable perjuicio a las playas próximas.

Bajo el sugestivo nombre de "Puerto Isla" se

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

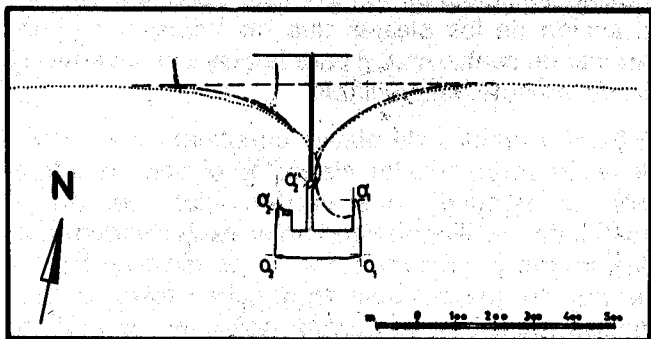
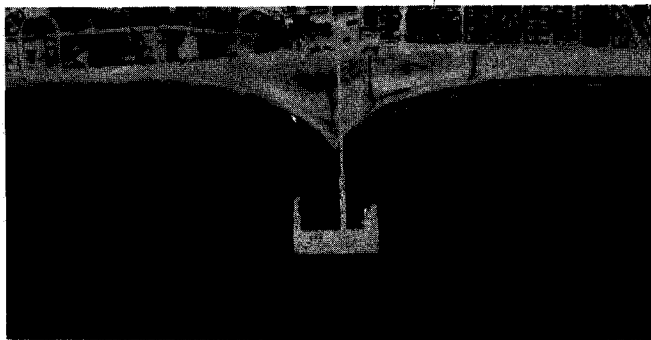


Figura 13. Puerto de Comarruga (Tarragona).
Arriba: Fotografía aérea (1978).
Abajo: Esquema realizado sobre la misma fotografía.
Obsérvese como el tómbolo formado a raíz de la construcción del puerto se ajusta a las espirales ($\varphi = 30^\circ$) de centros O_1 , O_1 (lado este) y O_2 , O_2 , O_2' (lado oeste).

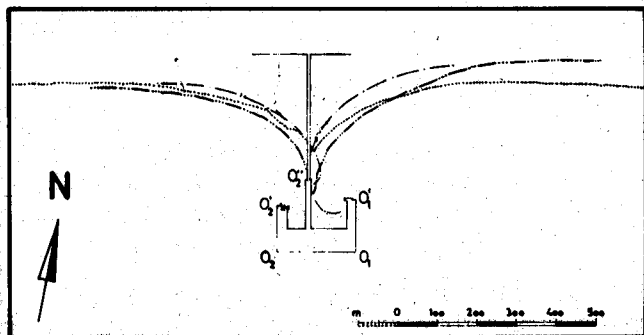
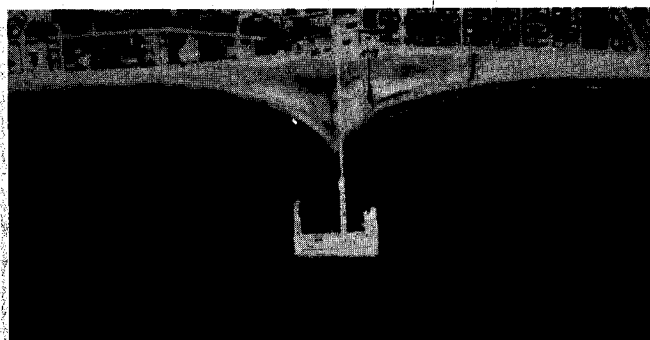


Figura 14. Puerto de Comarruga (Tarragona).
Arriba: Fotografía aérea (1978).
Abajo: Esquema realizado sobre la misma fotografía, reduciendo a escala la planta del "Proyecto de Obras Complementarias".
— · — · — Situación de la orilla según plano del proyecto.
..... Situación de la orilla según fotografía.
- - - - - Espirales ($\varphi = 30^\circ$) trazadas en base a los datos del plano del proyecto.

proyectó la obra a base de un dique de abrigo paralelo a la orilla, unido a tierra por medio de un pantalán sobre pilares muy separados. El objetivo del diseño era limitar los efectos de la obra sobre los procesos litorales, de manera que la parte exenta del pantalán permitiera la continuidad de las corrientes litorales, de forma que las alteraciones irreversibles se limitasen a la aparición de un pequeño lóbulo en la zona de relativo abrigo situada tras el dique.

En la fotografía aérea de la parte superior de la Figura 13 se observa la formación del tómbolo. En la parte inferior se indica esquemáticamente el tómbolo que cabe prever utilizando el "compás de playas" ($\varphi = 30^\circ$), pudiéndose observar el buen ajuste entre la realidad y la predicción.

Para poner de relieve la dificultad de conocer la fiabilidad de los datos, en la Figura 14 se reproducen los mismos contornos tomados de la fotografía aérea y, además, (en líneas de trazo y trazo-tres puntos) las formas de las obras y de la playa según

el plano que aparece en el proyecto de obras complementarias recientemente aprobadas, considerando coincidente el eje del pantalán y el borde exterior del paseo marítimo. También se indican con línea de trazo y punto, las espirales dibujadas en base a la planta de las obras y a la posición de la orilla según el mencionado plano. (Estas espirales se inician con un sector tangente a la alineación de la playa en la hipótesis de que no existiese el tómbolo, alineación que debe coincidir sensiblemente con la posición de la orilla antes de realizar las obras, puesto que a la escala del dibujo el pequeño retroceso derivado de la compensación de áreas — y de volúmenes — es despreciable dada la longitud de la playa que constituye la unidad fisiográfica. Por otra parte conviene llamar la atención sobre la importancia que puede tener la curvatura de la playa dado que en el caso que nos ocupa la base del tómbolo abarca una longitud — de orilla primitiva — de unos 900 metros).

La figura 14 pone de relieve que en el plano topográfico del mencionado proyecto se introdujo un

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

error importante(*) (la orilla, a levante de la obra, se sitúa unos 60 metros más atrás que la posición real, referida como hemos dicho, al eje del pantalán).

El examen de la Figura 13 pone también de manifiesto las distorsiones que pueden producir los desagües de simples rieras, sobre los procesos de transporte longitudinal. Ellos solos pueden explicar el pequeño adelantamiento de la orilla respecto al "límite de vaciado".

4.2.6. Comprobación de los efectos derivados de la construcción del puerto de Calafell (Tarragona) (Tómbolo)

Una situación similar a la descrita anteriormente, es la que ofrece el puerto de Calafell, ubicado unos 7 Km. más a levante del puerto de Comarruga. Ambas playas pertenecen a la misma unidad fisiográfica. Aunque en este caso el pantalán está situado a levante de la obra en lugar de en el centro y sigue cumpliendo su papel de no alterar los procesos litorales, el tómbolo formado tras el abrigo del puerto representa una disfunción de la obra proyectada, tan grave como el caso de Comarruga.

En la figura 15 se reproduce la fotografía aérea (arriba) y debajo un esquema resaltando las líneas más singulares, que se aprecian en dicha fotografía.

- La orilla
- La línea de máximo ascenso de la ola
- .-.-. Una línea rompiente, la más próxima a la orilla que probablemente corresponde a una barra submarina.

(*) Debo recalcar que estando muy interesado en seguir los procesos de los puertos de Comarruga y de Calafell, conocí el plano del proyecto mencionado (que teóricamente debía recoger la realidad exacta) a mediados de 1978. La discrepancia observada entre dicho plano y las predicciones según el "compás de playas" significaba una desviación importante en mis teorías. No obstante en otras ocasiones ya había detectado errores en planos por análogos circunstancias por lo que consideré que cabía tal posibilidad y por tanto que antes de sacar conclusiones contrarias a mi teoría, debía contrastar con una fotografía aérea. Esta llegó a mis manos a finales de febrero de 1979, comprobando una vez más la eficacia del "compás de playas".

Téngase en cuenta que no me refiero simplemente a la discrepancia que revela la separación de las líneas (.....) y (-.-.-.), si no al ángulo con que es cortada la línea (.....) cuando se va girando el "compás de playas" centrado en el correspondiente polo (Sobre la Figura 14).

Hay que añadir que en este caso, al quedar la posición de la orilla del plano por delante de la espiral (-.-.-.), también cabía la posibilidad de que se estuviese en situación de llenado, pero en base a mis teorías esto sólo podía darse en uno de los lados, aquél situado a "barlovento" del temporal oblicuo que hubiese remodelado la playa antes de la toma de datos del plano mencionado.

-.-.-. Otra línea de rompiente, que probablemente corresponde a una segunda barra submarina, lado mar.

También se indica (-.-.-.-.-) las dos espirales ($\varphi = 30^\circ$), trazadas de forma similar a las de la Figura 13, con polos en los distintos salientes de la obra de abrigo.

Puede observarse como la punta del tómbolo se ajusta perfectamente al trazado de las espirales, lo cual resalta de nuevo la utilidad del "compás de playas" para predecir los movimientos irreversibles de la arena. Se observa, no obstante, una desviación importante en las zonas de tangencia de las espirales con la línea de posición inicial de la orilla. En mi opinión esta desviación se debe a la existencia de los desagües. En todo caso, vemos que la orilla se sitúa siempre por delante de la línea "límite de vaciado".

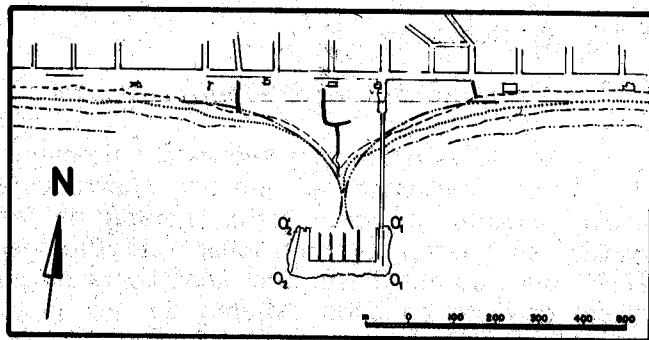
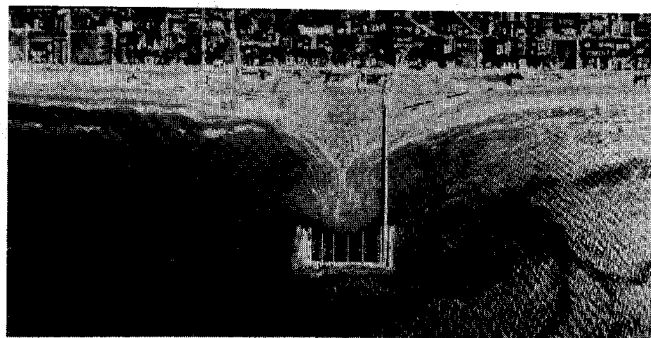


Figura 15. Puerto de Calafell (Tarragona).

Arriba: Fotografía aérea (1978)

Abajo: Esquema sobre la misma fotografía.

- línea de la orilla
- línea de máximo flujo
- .-.-.- línea de rompiente (sobre probable barra submarina, 1.ª respecto a la orilla)
- .-.-.-.- línea de rompiente (sobre probable barra submarina, 2.ª respecto a la orilla)
- .-.-.-.- espirales ($\varphi = 30^\circ$)
- posición inicial de la orilla

4.2.7. *Comprobación del tómbolo de C'an Pastilla (Palma de Mallorca)*

Otro ejemplo de formación de tómbolo detrás de un obstáculo artificial, aparece en la figura 16. Corresponde a la playa de C'an Pastilla, en Palma de Mallorca, donde se construyó un dique paralelo a la orilla, con la finalidad de proteger un tramo de costa y regenerar la playa. En este caso la obra cumplió el objetivo deseado y una vez más podemos comprobar como la forma de la orilla se ajusta perfectamente a las espirales ($\phi = 30^\circ$) con centros en ambos extremos del dique.

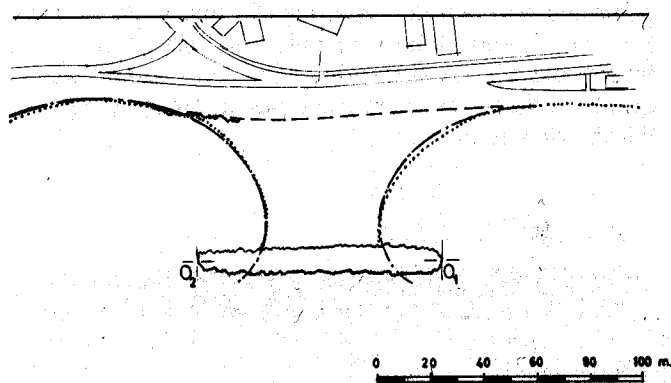


Figura 16. Playa de C'an Pastilla (Palma de Mallorca). Obsérvese el buen ajuste de la forma del tómbolo con las espirales de centros O₁ y O₂.

4.3. Conclusiones

4.3.1. *Otros estudios sobre la forma en espiral*

Además de las referencias hechas anteriormente de diversos investigadores que han analizado la espiral logarítmica como forma natural de las playas, es interesante mencionar que Bremner (1970) puso de manifiesto que dicha curva da un ajuste perfecto en cada extremo de una playa alojada entre dos salientes. Así mismo Paul H. Leblond (1972) afirma:

“Es muy sugestivo atribuir la forma característica de las playas espirales a los procesos de erosión inducidos por la ola. Para confirmar esta hipótesis, he intentado demostrar utilizando las teorías existentes sobre las corrientes longitudinales y la erosión de las playas, que la forma de espiral se puede producir por evolución de una playa rectilínea barrida por el oleaje” (tras una zona protegida).

Y en sus conclusiones termina:

“No he logrado sin embargo explicar por qué estas playas se ajustan tan perfectamente a segmentos de espiral logarítmica, aunque he presentado argumentos cualitativos que indican que tales formas satisfacen los requisitos de una forma de equilibrio en planta”.

Es evidente que estas conclusiones vienen a reforzar la verosimilitud del 2.º postulado de mi teoría sobre los procesos de “vaciado y llenado lateral”. Sin embargo, una vez más aparece la misma diferencia que señalaba entre mi análisis de las formas y los que realizan Yasso y Silvester. También Leblond considera la curva que se extiende más allá de la influencia de la difracción y, cuando habla de segmentos de espiral, se refiere exactamente a la misma idea de ángulo intrínseco y centro desconocidos.

Nadie, que yo sepa, se ha referido a sectores de espiral $\phi = 30^\circ$ con centro variable en los puntos más destacados del contorno.

4.3.2. *Sobre la formación del tómbolo*

En el punto 5.6 (3) se contrastaba la primera de las condiciones que cita J. Larras para la formación del tómbolo, con la propiedad de la espiral logarítmica. A la vista del correcto ajuste con la curva $\phi = 30^\circ$, podemos afirmar que el valor mínimo de la relación entre el alejamiento del obstáculo su longitud, $\frac{a}{b} = 1,24$, representa un límite para que el tómbolo se mantenga.

La segunda condición que cita J. Larrás se refiere a que el alejamiento del obstáculo debe ser “del orden de algunas longitudes de onda, como máximo”. Esta podría ser la condición límite para que se forme el tómbolo, por un proceso distinto del de “llenado y vaciado lateral”. Para contrastar esta hipótesis se ha confeccionado la tabla de la Figura 17, la cual debería reflejar una diferencia clara entre las relaciones D/L_p correspondientes a situaciones de playa circular o de playa espiral (en ambos casos con centro en el polo), siendo D, la distancia de la orilla al polo y L_p la longitud de onda en los grandes temporales y correspondiente a la profundidad d_p del morro o polo de difracción. Sin embargo puede observarse que mientras Palamós y San Feliu de Guixols presentan playa circular y relaciones D/L_p comprendidas entre 2,15 y 3,61, Comarruga y Calafell presentan playa espiral y relaciones D/L_p comprendidas entre 3,83 y 4,20.

Descartada la anterior hipótesis, se ha analizado

CONDICIONANTES DE LA ESTABILIDAD DE LAS PLAYAS

FORMA TIPO	LUGAR	Fig.	POLO	D (m) Distancia de la ori- lla al polo	d _p (m) Profundidad en el polo	T _{máx} (seg) Periodo máximo considerado.	(L _p) _{máx} (m) Longitud de onda máx. en d _p	D/L _p	Situación morro res- pecto zona rotura.
CIRCUNFERENCIA	PALAMOS	9	O ₂	550	20	12	152,36	3,61	Fuera
			O ₁	220	8	12	102,33	2,15	Fuera
	SAN FELIU GUIXL.	4a, b en (3)	O ₃	380	10	12	113,30	3,35	Fuera
	BLANES	10	O ₁	330	8	12	102,33	3,22	Fuera
CIRCUNFERENCIA	CAMERILS	11	O ₁	340	5	12	82,08	4,14	Fuera
			O ₂	525	6,7	12	94,24	5,67	Fuera
ESPIRAL LOGARITMICA	COMARRUGA	13	D ₁	265 *	3,5	12	69,18	3,83	Dentro
			O ₂	295 *	3,6	12	70,15	4,20	Dentro
	CÁLAFELL	15	O ₁	285 *	3,6	12	70,15	4,06	Dentro
			O ₂	295 *	3,6	12	70,15	4,20	dentro
	CAN PASTILLA	16	O ₁	60 *	1,5	12	45,70	1,31	Dentro
			O ₂	55 *	1,5	12	45,70	1,20	Dentro
LA PALOMERA (Blanes)	10	O ₂	160 *	6,0	12	89,49	1,79	Dentro	
		O ₃	150 *	6,0	12	89,49	1,68	Dentro	

Figura 17. Estudio de características que puedan tipificar la "efectividad del límite de llenado". Las distancias con asterisco se refieren a la orilla rectificada en la hipótesis de la inexistencia del obstáculo (o bien en la situación originaria).

en cada caso si el polo quedaba fuera o dentro de la zona de rotura de la ola en los grandes oleajes. Esta nueva hipótesis se basa en que, de acuerdo con los estudios de R. Gourlay y con mis propias observaciones en los ensayos efectuados en el Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S. de I.I. de Barcelona, si el remolino engendrado por la difracción se superpone a todos los fenómenos de movimientos y corrientes de la zona de rotura, cabe esperar como resultado la aparición de un nuevo e importante mecanismo de transporte de material hacia la zona abrigada. La tabla de la Figura 17 revela que la hipótesis es correcta. Es interesante señalar que incluso en el caso del polo O₂ de Palamós, Figura 9, que queda tan sólo a 220 metros de la orilla, presentando una relación D/L_p = 2,15, la circunferencia se revela como forma límite. Dada la profundidad y los efectos de abrigo del dique exterior, no rompe nunca la ola antes de alcanzar O₂ ni en sus inmediaciones. Podemos extraer esta interesante conclusión:

Si un polo de una obra nueva, situada en una

playa, queda ubicado en la zona de rotura de la ola en los grandes oleajes, cabe esperar el avance de la orilla tendiendo a la forma en espiral (φ = 30°), mediante un mecanismo (efecto de remolino) distinto del de llenado y vaciado lateral alternativo. Generalmente en este caso el proceso es mucho más rápido, ya que un sólo temporal de suficiente potencia y duración puede desencadenarlo hasta su límite.

Su aplicación al caso de la predicción sobre la formación del tómbolo se comprende fácilmente, puesto que el efecto de remolino hace inoperante el "límite de llenado lateral", sumándose a tal mecanismo de llenado lateral para el crecimiento de la formación detrás del obstáculo, siempre que éste presente los polos más próximos a la orilla ubicados dentro de la zona de rotura de los grandes oleajes. Lógicamente, cuanto mayor sea la relación entre la profundidad de iniciación de rotura y la profundidad en el polo, más rápido será el proceso, ya que será mayor la interacción entre el remolino (6), (7) y la corriente longitudinal de gradiente de sobre-elevación inducida por la rotura del oleaje (1), (7).

4.3.3. Resumen sobre la playa en planta

LA PLAYA EN PLANTA

Para conocer la naturaleza de la playa y la razón de ser de su permanencia o variabilidad, es preciso conocer la forma en planta de la orilla y sus variaciones en respuesta de los distintos procesos dinámicos que pueden presentarse.

ORIENTACION DE LA ORILLA

W.V. Lewis (1931, 1938): perpendicular a la dirección del oleaje dominante. (Cárdigan Bay \perp a la dirección del fetch máximo).

A. Schou (1945): fetch máximo + resultante de los vientos (R). Si coinciden ambos, o si el fetch es sensiblemente igual en todas direcciones $\rightarrow \perp$ a R. Si no coinciden \rightarrow orientación intermedia. (Dinamarca).

W. Bascona (1954): señala el efecto de la refracción.

J.L. Davies (1959, 1960): Las crestas de los oleajes de largo período anticipan la forma de la orilla antes de alcanzarla, ajustándose a las curvas de nivel de los fondos. Los oleajes moldean la forma de la playa. Los oleajes de fondo (swell) son constructivos de la playa.

C. Garau (1972): Importancia de la acción polar de los salientes. Distinción de los procesos de erosión y accesión lateral.

FORMAS GEOMETRICAS DE LA ORILLA

Arco de circunferencia

R. McClean (1967): análisis de 86 playas

$$R = \frac{C^2 + 4p^2}{8 \cdot P} \begin{cases} C = \text{cuerda} \\ R = \text{radio} \end{cases}$$

P = distancia entre orilla y punto medio cuerda

C. Garau (1972): centro en polo difracción (lleno).

Arco de elipse

V. P. Zenkovich (1959) (Península Chukotsky)

F. Macau (Golfo de Rosas, Gerona).

Medio Corazón

R. Silvester (1960, 1962) \rightarrow bahías.

Espiral Logarítmica

W. E. Yasso (1964): Hose Cove, Sandy Hook

(New Jersey); Halfmoon Bay, Drakes, Limantour (California).

$\rho = e \cdot \theta \cdot \text{tg} \varphi$ y varía entre 0° y 30° , determinándose su valor mediante una regresión lineal, con ayuda de computador. $\rightarrow \varphi$ desconocido + centro único desconocido.

R. Silvester (1970): (id) + ensayos en modelo.

C. Garau (1972): $\varphi = 30^\circ$, centro variable ubicado en los distintos salientes del contorno. Proceso de vaciado lateral.

C. Garau (1979): efecto de remolino, especialmente si el polo queda ubicado en zona de rotura de la ola.

Referencias más directamente relacionadas con el tema.

- (1) R. Iribarren. Corrientes y transportes de arenas originados por el oleaje. (R. de O.P., mayo y junio de 1947, reedición en mayo de 1967).
- (2) P.H. Le Blond. Sobre la formación de playas en espiral. (Proceedings 13th Coastal Engineering. 1972, pág. 1331-1345).
- (3) C. Garau. Aplicación de los Principios del Método de los "planos de oleaje" al Estudio de los movimientos de arena. (R. de O.P. julio - 1973).
- (4) C. Garau. El rozamiento y la estabilidad de las Playas. (R. de O.P. agosto 1973).
- (5) C. Garau. Estabilidad volumétrica y Estabilidad formal. Playas lobuladas. (R. de O.P., diciembre 1974)
- (6) C. Garau. Ensayos sobre movimiento de arenas al abrigo de un saliente. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona, Laboratorio de Hidráulica (Años 1974 y 1975, no publicados).
- (7) R. Gourlay. Sobre elevación inducida por el oleaje. Corrientes generadas al abrigo de un saliente. (Proceedings 14th Coastal Engineering 1974, pág. 1976 a 1995).
- (8) R. Silvester. Desarrollo de Bahías de forma dentada hacia el equilibrio. (Journal of the Waterways and Harbors División, mayo 1970 pp. 275-287).
- (9) R. Silvester. Stabilization of sedimentary coastlines (Nature. Vol. 188, pp. 467-469).
- (10) R. Silvester. Headland Defense of Coasts. (Proceedings 15th Coastal Engineering, 1976).
- (11) N. Tanaka y S. Sato. Topographic change resulting from construction of a Harbor on a Sandy beach; Kashima Port. (Proceedings. 15th Coastal Engineering, 1976).
- (12) W. E. Yasso. Plan Geometry of Headland Bay Beaches. (Journal of Geology, Vol. 73, 1965 pp. 702-714).