

DINAMICA LITORAL Y MORFOLOGIA DE PLAYAS⁽¹⁾

ANTONIO LECHUGA ALVARO^(*)

RESUMEN. La morfología de las formas de acumulación se encuentra directamente relacionada con los agentes modeladores del sedimento en la zona litoral, particularmente con el más importante de entre ellos como es el oleaje y fenómenos asociados. Se podría decir sin pérdida de generalidad que el oleaje y en menor medida el viento condicionan junto con el medio físico la morfología litoral. Sólo en determinados puntos concretos, tales como estrechamientos y desembocaduras de cauces pueden aparecer otros agentes modeladores que se sumen a los antes citados. Por esta razón trataremos de pasar revista a los aspectos más significativos de la dinámica litoral y su morfología asociada separando algo artificialmente la dinámica longitudinal y transversal de una playa y estableciendo los criterios científicos actuales para su tratamiento. Una serie de ejemplos escogidos del litoral español nos ayudarán a dar contenido a las consideraciones técnicas que iremos haciendo.

ABSTRACT. *There is a direct relationship between the morphology of the accumulation forms and the modelling agents of the sediment in the coastal zone, especially as regards the most important of them which are wind waves and, associated phenomena. It can be said without overgeneralizing that wind waves and to a lesser extent the wind, together with the physical environment, determine coastal morphology.*

Only in specific points, such as narrowness and river mouths do other modelling agents appear, in addition to the above-mentioned. For this reason, we will try to go through the elements of coastal dynamics which are most important, together with their associated morphology, separating albeit somewhat artificially, the longitudinal and transversal beach dynamics, and establishing present-day scientific criteria for treatment. A series of examples selected from the Spanish coastline will help us to give substance to the techniques that we will be employing.

1. INTRODUCCION

La morfología de las formas de acumulación puede considerarse como la expresión resultante del equilibrio a largo término de los materiales sedimentarios de la zona litoral ante los agentes modeladores. La consideración y estudio de estos agentes sería lo que entendemos por dinámica litoral, mientras que la concreción sedimentaria y física de dicha dinámica, en particular alrededor de su posición de equilibrio, es lo que podría llamarse morfología litoral.

En la actualidad hay un acuerdo prácticamente general en considerar el oleaje y fenómenos inducidos y asociados a él, como el agente modelador más importante de la mayoría de las formas de acumulación, sobre todo en costa abierta. En determinados puntos, tales como desembocadura de cauces, estrechamientos, etc.,

pueden tener importancia otros agentes como las corrientes fluviales y de marea, aunque aún en estos casos en conjunción con el oleaje incidente al menos en los bordes marítimos de los recintos. El viento también puede ser importante como agente movilizador del sedimento pero para esto es preciso que exista una cierta progresividad en la acumulación. Como esta progresividad está a su vez relacionada con el oleaje en la mayoría de los casos, queda claro que de una u otra forma éste se encuentra comprometido en la configuración de la línea de costa.

Desde un punto de vista fenomenológico la morfología de una playa se encuentra ligada a estos tres factores mutuamente interrelacionados.

En primer lugar a factores fisiográficos relacionados con el medio físico del entorno. Podríamos llamar a estos factores estructurales, tales como altura y composición de los acantilados, topografía de la trasplaya, batimetría submarina del entorno, etc.

En segundo lugar las características morfoacópicas y granulométricas del sedimento.

En tercer lugar las características del clima marítimo que incide en la zona. En especial el régimen y distribución direccional del oleaje y de los parámetros más significativos, altura significativa, periodo representativo, regularidad o irregularidad, etc.

Teniendo en cuenta la premisa enunciada de que sólo

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe del Sector de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (IMOPU).

(1) Este trabajo pertenece a la conferencia pronunciada por el autor en el «Short Course» que con motivo de la XXI International Conference on Coastal Engineering tuvo lugar en Torremolinos en junio de 1988.

el oleaje es el responsable del transporte de sedimentos en el litoral, y por consiguiente del modelado y configuración de las formas costeras, vamos a contemplar tres aspectos significativos de la dinámica que metodológicamente separamos, pero que en la realidad se presenta formando una unidad. Estos aspectos pueden enunciarse como sigue:

1. Transporte sólido longitudinal a lo largo de la playa. Este transporte se produce esencialmente por la corriente «longshore» generada mediante la oblicuidad del oleaje. Su formulación matemática está sólidamente fundamentada y los resultados de la observación concuerdan bastante aceptablemente con el cálculo. Simplificando mucho diremos que a grandes rasgos la forma en planta de la línea de costa viene definida por esta componente de la dinámica.
2. Transporte sólido a lo largo del perfil de playa. Su tratamiento numérico es mucho más complicado que en el apartado anterior. En la actualidad como veremos, hay formulaciones que incluyen ambos tipos de transporte. El perfil de equilibrio en una playa y las variaciones alrededor de él son la expresión morfológica de este tipo de transporte.
3. Otros aspectos de la dinámica fundamentalmente transversales, están conectados con movimientos ondulatorios infragravitatorios, es decir de período más altos que los correspondientes a la onda de gravedad. Las ondas de orilla y su excitación por el oleaje incidente son, se piensa, las causas generadoras de algunas morfologías asociadas como los «beach cusps», «rip currents», «rescencic bars», etc. En la actualidad ha tomado una importancia creciente la consideración de estos fenómenos que permiten explicar modelados costeros inexplicables con un tratamiento convencional.

2. TRANSPORTE SOLIDO LONGITUDINAL EN PLAYAS

Hace mucho tiempo que se había observado que cuando el oleaje incide con una cierta oblicuidad en una playa se produce un transporte del sedimento a lo largo de la misma. Algo más recientemente, en 1943, GRANT sugirió que la corriente longitudinal o «longshore current» generada por el oleaje combinada con la agitación producida por la rotura proporcionan la fuerza motriz necesaria para el movimiento del sedimento a lo largo de la playa. Por los años 50 diversos investigadores del CERC indicaron que el transporte del sedimento es proporcional a la componente a lo largo de la costa del flujo de energía de las olas medida cerca del punto de rotura. Por lo tanto abrieron el camino para correlacionar el transporte de sedimento con los parámetros del oleaje que incide en la costa. En este sentido Cadwell llegó a dar una fórmula en donde el transporte sólido se estimaba proporcional a la energía del oleaje elevado a 0.8.

El transporte del sedimento a lo largo de la playa se puede efectuar mediante dos formas principalmente;

transporte del sedimento por suspensión y transporte del sedimento por arrastre en el fondo. Ambas formas envuelven una infinidad de parámetros a considerar, lo que ha hecho que en la actualidad el transporte de sedimento se considere globalmente sin especificar qué proporción corresponde a uno y otro modo. Básicamente dos métodos principales se han adoptado para los estudios de transporte sólido, aparte de los métodos puramente empíricos y éstos son los siguientes: 1) Métodos basados en el estudio de la tensión cortante en el fondo y su respuesta, es decir, el movimiento del material. 2) Métodos basados en el flujo de energía a través de la costa, suponiendo que el transporte sólo es proporcional a dicho flujo. Estos segundos son hoy muy apreciados ya que a ellos corresponde el cálculo del transporte según la fórmula del CERC.

Aunque el método del flujo de energía era en un principio esencialmente intuitivo, después de los estudios de Komar e Inman y de Bagnold e Inman, se les ha dado una justificación teórica, que en esencia coincide con la obtenida mediante la teoría del tensor de radiación por Longuet-Higgins, cuyo estudio está más relacionado con los métodos de la tensión cortante que señalamos en primer lugar.

Ya nos hemos referido a los dos principales mecanismos de generación del transporte sólido: Transporte por suspensión y transporte por arrastre, aunque casi todos los autores indican la preponderancia del segundo. Ahora vamos a tratar las distintas causas de generación del transporte longitudinal sólido, en playas no rectilíneas análogamente a lo señalado para la corriente longitudinal. En efecto, tras los estudios de Longuet-Higgins y Bowen y apoyándose en los razonamientos que éstos exponen, Leblond consigue explicar matemáticamente las tres componentes del transporte sólido que pasamos a definir. Para ello se basa en el estudio de la «longshore current» en playas no rectilíneas usando el tensor de radiación, pero expresando la «drift force» por medio de las dos componentes del citado tensor S_{yy} y S_{xy} como $\tau_y = (-\delta S_{xy}/\delta x + \delta S_{yy}/\delta y)$, en este caso, una vez calculadas las velocidades de dicha longshore en un perfil de playa, integra a lo largo de este perfil las velocidades y considera que el transporte sólido es proporcional a la integral así obtenida. Con ella quedan expresadas las tres componentes del transporte sólido o las tres maneras globales de generar dicha corriente estableciendo los siguientes resultados:

1. Mecanismo de generación del transporte sólido por oblicuidad del oleaje.

Su valor se establece como

$$Q = K(E\epsilon y)_0 \sin 2\theta_0 \quad (1)$$

o según las hipótesis habituales de aguas poco profundas y teoría lineal.

$$Q = A \cdot H_0^{5/2} \sin \theta_0 \cdot \cos \theta_0 \quad (2)$$

Siendo H_0 la altura del oleaje en rotura y θ_0 el ángulo de incidencia en rotura.

La estructura de esta fórmula es idéntica a la obtenida por Komar, o lo que es lo mismo a la del flujo de energía del CERC.

2. Mecanismo de generación del transporte sólido por sobre-elevación, cuya estructura sería según Leblond:

$$Q_{60} = B \cdot H_0^{3/2} (3/2 - \cos^2 \theta_0) \cdot \delta H_0 / \delta y \quad (3)$$

Como veremos este término del transporte tiene en cuenta la variación de la altura de rotura del oleaje a lo largo de la playa y corresponde al transporte sólido previsto por Iribarren, que se establecía desde las áreas expuestas a las abrigadas por efecto de la distinta altura del oleaje en una y otras.

Como generalmente el sentido de la sobre-elevación sería contraria a la oblicuidad, entre ambos mecanismos explicarían las formas de equilibrio dinámica que se produciría en planta en las playas a resguardo de obstáculos, tanto naturales como artificiales.

3. Mecanismo de generación por variación angular. En una playa curvilínea, el oleaje puede abordarla con distinto ángulo a lo largo de ella. En este caso existiría una tercera componente del transporte sólido por esta causa. Según Leblond valdría:

$$Q_9 = C \cdot H_0^{7/2} \sin \theta_0 \delta \theta_0 / \delta y \quad (4)$$

generalmente se acepta que su valor es pequeño comparado con las otras dos. Según esto, el transporte total Q_T sería la suma algebraica de los anteriores, es decir,

$$Q_T = Q_{60} + Q_{10} + Q_{10} \quad (5)$$

En cuanto a la distribución transversal de dicho transporte sólido a lo largo de un perfil de playa, tanto la teoría de Leblond, como la observación en playas reales señalan que el transporte sólido tiene un máximo cerca del punto de rotura y en el interior de la zona de rompientes disminuye su valor rápidamente fuera de la citada zona. De igual manera disminuye hacia la orilla en la que se anula. Komar en 1977 señala que la distribución del transporte sólido tiene un máximo más cercano del punto de rotura que el correspondiente a la velocidad de la «longshore current».

A pesar de los años transcurridos desde la formulación de modelo del flujo de energía para la evaluación del transporte sólido todavía en la actualidad es el generalmente empleado en la práctica con resultados francamente buenos, teniendo en cuenta las reales limitaciones de datos de observación. Más recientemente se ha producido una profundización en el estudio del transporte sólido por varios investigadores entre los que destacamos a J. A. Bailard. El contenido y alcance de sus trabajos entre 1981 y 1984 han conseguido un avance considerable en el conocimiento teórico de una formula-

ción del transporte longitudinal, el transporte transversal e incluso la pendiente de la playa para una determinada condición de equilibrio. En lo referente al transporte longitudinal, teniendo en cuenta el arraigo y la bondad del modelo del flujo de energía, J. A. Bailard ha expresado el valor de K en (1) en función de los resultados de su formulación teniendo en cuenta tanto el transporte por fondo como el transporte por suspensión.

La expresión vectorial del transporte de sedimentos instantáneo, $\langle \vec{i}_t \rangle$, sobre una playa de pendiente, $\tan \beta$, según el modelo de Bailard se escribe como:

$$\begin{aligned} \langle \vec{i}_t \rangle = & \rho c_f \varepsilon_B / \tan \theta [\langle |\vec{u}_t|^2 \vec{u}_t \rangle - \\ & - \tan \beta / \tan \theta \langle |\vec{u}_t|^3 \rangle \vec{i}] + \\ & + \rho c_f \varepsilon_s / W [\langle |\vec{u}_t|^3 \vec{u}_t \rangle - \\ & - \varepsilon_s / W \tan \beta \langle |\vec{u}_t|^3 \rangle \vec{i}] \end{aligned} \quad (6)$$

donde $\langle \rangle$ significa promediado a lo largo de un período, ε_B y ε_s la eficiencia del transporte de fondo y del transporte en suspensión respectivamente, W es la velocidad de caída, ρ la densidad del agua, c_f coeficiente de fricción del fondo $\tan \theta$, ángulo de rozamiento interno y $\vec{u}_t$, el vector de velocidad instantáneo. Suponiendo que $\vec{u}_t$ es la suma vectorial de la velocidad de oscilación inducida por la onda, $\vec{u}$ y de la corriente $\vec{u}_c$ que forman un ángulo de α y θ respecto de la perpendicular a la línea de orilla respectivamente se puede poner:

$$\vec{u}_t = (\vec{u} \cos \alpha + \vec{u}_c \cos \theta) \vec{i} + (\vec{u} \sin \alpha + \vec{u}_c \sin \theta) \vec{j} \quad (7)$$

donde $\vec{i}$ y $\vec{j}$ son los vectores unitarios en dirección x e y respectivamente. Además:

$$\begin{aligned} \vec{u} &= u_m \cos \sigma t + \omega_{m2} \cos 2 \sigma t \\ \vec{u}_c &= u_c \vec{i} + v_c \vec{j} \end{aligned} \quad (8)$$

Teniendo en cuenta la expresión (7) y considerando que $u/u_m \ll 1$ y que $\langle \vec{i}_t \rangle \ll \langle \vec{i}_s \rangle$, Bailard obtiene la siguiente expresión para el transporte sólido «longshore»:

$$\begin{aligned} \langle \vec{i}_s \rangle = & \rho c_f u_m^3 \varepsilon_B / \tan \theta [\vec{e}_c + \vec{e}_c^2 + \\ & + (\tan \beta / \tan \theta) u_c^* \tan \alpha] + \rho c_f u_m^3 \varepsilon_s / \\ & / W [\vec{e}_c u_c^* + u_m / (W \varepsilon_s \tan \beta) u_c^* \tan \alpha] \end{aligned} \quad (9)$$

en donde:

$$\begin{aligned} \vec{e}_c &= v / u_m, u_c^* = \langle |\vec{u}_t|^3 \rangle / u_m^3 \\ u_c^* &= \langle |\vec{u}_t|^3 \rangle / u_m^3 \end{aligned} \quad (10)$$

Seguendo el bien conocido modelo de distribución transversal de Longuet Higgins (1976) y una vez efectuada la integración espacial a través de la playa se llega a una expresión muy complicada que se puede poner en la forma sintética siguiente:

$$K = \varepsilon_0 k_1 + \varepsilon_1 k_2 + \varepsilon_2 k_3 \quad (11)$$

siendo K el coeficiente a aplicar en la fórmula número 1.

La expresión de k_1 , k_2 y k_3 son muy complicadas pero Baillard introduciendo simplificaciones valora como:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.385 + 20 \sin^2 2\alpha_0 + 0.074 \lg \beta \\ k_2 &= 0.228 v_{\text{rot}}/W \\ k_3 &= 0.123 \lg \beta (v_{\text{rot}}/W)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

siendo v_{rot} el valor de v_n en rotura.

El modelo por tanto queda completado en la misma forma que el antiguamente usado del flujo de energía.

Recientemente I. O. Leontiev (1988) ha usado la misma formulación de J. A. Baillard con la particularidad de la sustitución del oleaje monocromático por oleaje irregular empleando una distribución del tipo de Rayleigh para el oleaje.

La relación que obtiene para el transporte sólido en peso sumergido por unidad de tiempo es:

$$Q = (0.181 \varepsilon_0 / \lg \theta + 0.038 \varepsilon_1 \sqrt{g k_s} / W) (E_0)_0 \operatorname{sen} \theta_s \quad (13)$$

Siendo en este caso el subíndice cero el correspondiente a rotura.

Con esta formulación reciente es posible estimar razonablemente bien el transporte sólido longitudinal sobre todo en playas de pendiente uniforme o casi uniforme.

3. MORFOLOGIA DE LAS PLAYAS ASOCIADA AL TRANSPORTE LONGITUDINAL

Cuando el transporte sólido longitudinal es dominante la morfología de la playa es característica según predomine una u otra componente del transporte que hemos analizado en el punto anterior. Así si la componente principal es la de oblicuidad y son prácticamente inexistentes las otras dos de sobre-elevación y variación angular la morfología no puede ser otra que la de la playa rectilínea abierta, supuesto que ésta no se encuentra limitada o playa apoyada, cuando existe un obstáculo que impide parcial o totalmente el transporte aguas abajo de la corriente. Este tipo de morfología es fácilmente modelizable tanto física como numéricamente debido fundamentalmente a que el oleaje en su propagación sólo se ve afectado en los fondos y, suponiendo estos suficientemente poco variados, es de aplicación las bien conocidas teorías de refracción. Si además de la componente

de oblicuidad son importantes las otras dos, de sobre-elevación y variación angular, quiere decir esto que el oleaje en su propagación se encuentra obstáculos a cuya sombra se producen áreas abrigadas. En este caso, los frentes presentan altura variable.

La forma de equilibrio en la playa que en este caso puede producirse denotará una igualdad o casi igualdad en las dos componentes principales, como son oblicuidad y sobre-elevación que en general tienen sentidos contrarios. La morfología de playa asociada a este caso es la de resguardo diferencial con una forma en planta curvilínea y cóncava hacia el mar, con curvatura decreciente según vamos de las áreas abrigadas a las expuestas. El tratamiento matemático del problema es más complicado en este caso debido fundamentalmente a la existencia conjunta de refracción y de difracción del oleaje.

Ejemplos muy significativos de la dinámica longitudinal y de su morfología asociada aparecen reflejados en las Figuras 1, 2, 3 y 4.

La Figura 1 nos ilustra sobre la interrupción del transporte longitudinal por una obra portuaria, que es el Puerto de Motril (Granada). La característica más significativa en este caso es que la playa de aguas arriba es fuertemente curvilínea debido al frente deltáico del Río Guadalquivir y la progresividad de la línea de orilla reproduce dicha forma en la evolución.

En las Figuras 2 y 3 aparece la costa catalana del Maresme barcelonés en la misma localización antes y después de la construcción del Puerto de Premià. En este caso la característica más acusada es que la incidencia del oleaje se produce con una oblicuidad superior a la óptima del transporte. Este hecho induce una inestabilidad potencial ya que las playas apoyadas en los obstáculos al cambiar de orientación aumentan la capacidad de transporte. Esta curiosa inestabilidad se encuentra reflejada en la Figura 4, en donde se observa la zona de San Juan de Vilassar, también en el Maresme barcelonés inmediatamente al Norte de la localización anterior.

4. MORFOLOGIA TRANSVERSAL DE LA PLAYA Y ONDAS DE ORILLA

Hasta aquí hemos considerado la morfología de las playas cuando predomina el transporte longitudinal. A partir de este momento vamos a analizar la morfología transversal de la playa que se manifiesta de una manera más clara cuando el oleaje incide frontalmente pero que tiene unas características más generales siendo aplicable lo que vamos a expresar incluso en el caso de oblicuidad del oleaje.

La disposición del sedimento en la playa depende lógicamente de la estructura del oleaje incidente. Desde hace mucho tiempo se conocen los cambios estacionales en los perfiles. Con los dos casos extremos del perfil de verano o bonanza y perfil de invierno o temporal, sin embargo modernamente se le ha dado una fundamen-



FIGURA 1. Fotografía aérea del Puerto de Motril (Granadola) y delta del Guadalete. La playa evoluciona casi paralelamente a la costa inicial.



FIGURA 2. Fotografía aérea de la zona de Premià de Mar en el Mar de les Balears antes de la construcción del Puerto de Premià.



FIGURA 3. Fotografía aérea de Premià de Mar en el Maresme (Barcelona) después de la construcción del Puerto de Premià.

tación científica a estos cambios que ha convertido esta simple variación en una clasificación de las playas con un contenido mucho más amplio y una mayor trascendencia.

Esencialmente la interacción playa-oleaje incidente nos lleva a dos tipos extremos de morfología que son (véanse Figuras 5 y 6):

1. Playa disipativa.
2. Playa reflectiva.

Estos dos tipos están ligados como su nombre sugiere a la manera en que se produce la disipación de la

energía del oleaje. Como esto depende de la pendiente de la playa, además del período y de la altura del mismo, se produce un auténtico sistema interrelacionado entre sus componentes que nos lleva a una u otra morfología.

El parámetro adimensional que regula todo el proceso es el llamado parámetro de no linealidad del oleaje que se relaciona con la forma de rotura y que con otro nombre es conocido desde hace tiempo, estando incluso relacionado con el parámetro de Iribarren. Este parámetro se expresa como:

$$\varepsilon = a_s \omega^2 / g \cdot \tan^2 \beta \quad (14)$$



FIGURA 4. Fotografía aérea de la zona de San Juan de Vilatorrada en el Maresme (Barcelona).



Transparencia

Transparente

...en el departamento de topografía significa: calcular datos correctos, transformarlos eficientemente en visualización gráfica y, en todas las fases de su trabajo, organizar transparentemente la inter-dependencia entre datos y mapas. Los módulos de aplicación TOPOGRAFICA de **CADDy** cuidan que haya un flujo de datos exacto y bi-direccional desde la toma de datos en el campo hasta la formación de mapas definidos, un concepto CAD totalmente transparente. Con las cómodas funciones de **CADDy Vd.** transforma sus datos de campo en un archivo de coordenadas. A partir de aquí **CADDy** convierte automáticamente dichos puntos en su mapa de acuerdo con los standards. Generación de curvas de nivel y interpolación de las alturas longitudinales y



OFICINAS DE
DELEGACIONES

DELEGACIONES:
La Coruña (881) 28 36 00

DELEGACIONES:
La Coruña (831) 28-36 00
28-23 51

La Coruña	(83)	29	30	54
Barcelona	(92)	302	32	52

Barcelona (93) 302 32 00
München (49) 416 24 00

Bildoc: (94) 416 24 90
Sebastián: (963) 21 7

Madrid: (91) 435 09 45

Madrid: (91) 435 49 70
Giron: (985) 34 74 00

Giới: (885) 34 74 66
Email: (854) 21 71 99

Seville: (954) 21 71 95
Las Palmas: (928) 26 0

Volume: [96] 353 45 25

Valencia: (96) 333 45 25
Castellón: (964) 20 77 94

Castellón	(964)	20	77	99
Castellón	(976)	33	44	47

Zaragoza: (976) 33 44 47
Fax: (976) 33 44 75

Constructora de
Equipos Eléctricos, S.A.

A. General Eléctrica Española

Expertos en CAD



25 años de presencia en España.

25 mil instalaciones de bombeo, en perfecto funcionamiento.



* Esta es la primera bomba sumergible del mundo, inventada y fabricada por Flygt en la década de los 40 (y llamada familiarmente "la jaula del loro").

RESIDUALES - OBRAS PUBLICAS - MINERIA - AGRICULTURA - ACHIQUE - FANGOS

**TECNICAS DE FILTRACION
Y BOMBEO, S.A.**

TFB

MADRID. Tel. (91) 233 35 08* — **BARCELONA.** Tel. (93) 232 47 61 — **BILBAO.** Tel. (94) 453 01 94
VALENCIA. Tel. (96) 154 63 15 — **SEVILLA.** Tel. (954) 67 30 00

CIUDAD REAL (926) 22 25 23 — **LA CORUÑA** (981) 23 78 49 — **HUESCA** (974) 22 59 15 — **LEON** (987) 25 23 75
MÁLAGA (952) 29 76 98 — **MURCIA** (968) 23 70 50 — **OVIEDO** (985) 24 39 43 — **P. DE MALLORCA** (971) 25 27 81 — **LAS PALMAS DE**
GRAN CANARIA (928) 31 36 17 — **SALAMANCA** (923) 21 58 54 — **SAN SEBASTIAN** (943) 37 07 86 **SANTANDER** (942) 34 76 49 —
VALLADOLID (983) 29 48 38 — **VIGO** (986) 27 15 07 — **ZARAGOZA** (976) 27 33 32

VENTA • ALQUILER • SERVICIO

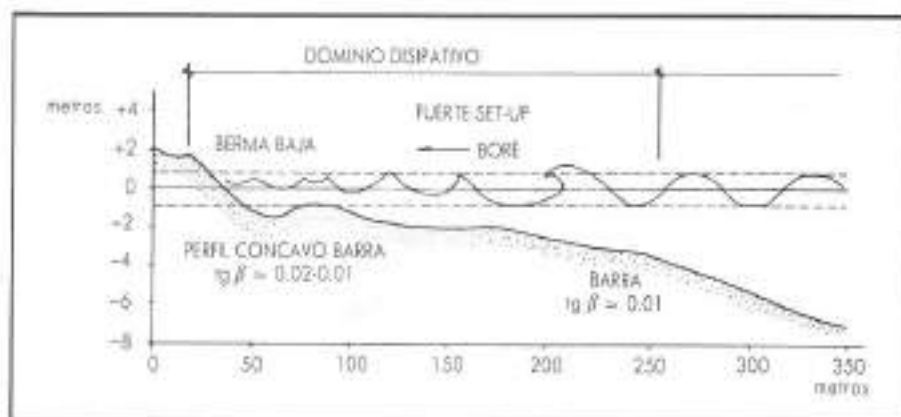


FIGURA 5. Playa disipativa típica.

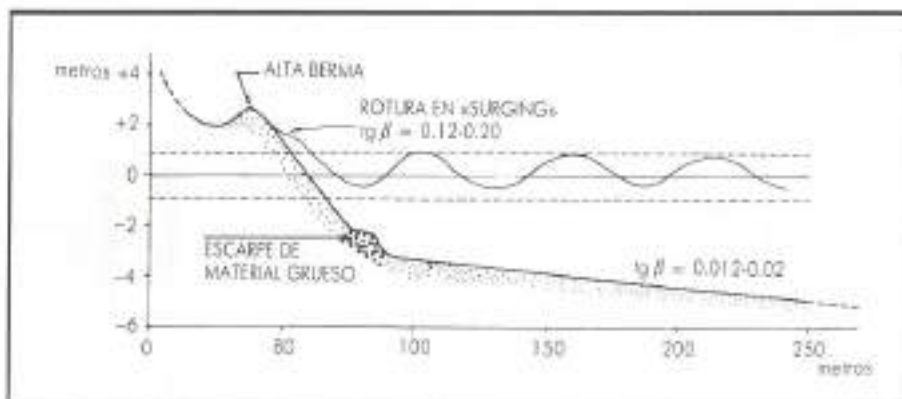


FIGURA 6. Playa reflectiva típica.

siendo a , y ω , la amplitud y frecuencia del oleaje incidente y $\tan \beta$ la pendiente de la playa en el punto considerado.

Guza y Bowen en 1975 encontraron que los valores de ϵ menores que 2.0 a 2.5 son índices de fuerte reflexión. Valores ϵ superiores a los expresados denotan fuerte disipación turbulenta con cambio del tipo de rotura que pasaría del «surging» a «plunging».

En una primera aproximación se podría considerar el valor de ϵ de 2.0 a 2.5 como límite entre las playas disipativas y las playas reflectivas ante el oleaje incidente, sin embargo la existencia de la barra más o menos paralela a la costa hace que se establezca un recinto cercano al estrán, al que se llama dominio resonante, cuya profundidad y anchura hace variar la morfología de la playa apareciendo seis tipos principales entre la playa totalmente disipativa y la playa totalmente reflectiva (Wright *et al.* 1979).

Con las mismas hipótesis de partida empleadas para el cálculo del transporte sólido «longshore» J. A. Bailard obtiene una expresión equivalente para el transporte

transversal a la playa, es decir, «onshore-offshore» que se escribe como sigue:

$$\begin{aligned} \langle i_z \rangle = & \rho c_f u_a^3 \langle \epsilon_B / \tan \theta \rangle \langle \bar{u}^3 \rangle / u_m^3 \cos \alpha + \delta_a^3 + \\ & + \delta u (1/2 + \cos^2 \alpha + \delta_a^2) + \delta_s \sin \alpha \cos \alpha - \\ & - (\tan \beta / \tan \theta) (u^3)^* + u_m / W c_s [|\bar{u}|^3 \bar{u} / u_m^4 \\ & \cos \alpha + \delta u (u^3)^* - u_m^3 / (W^2 c_s^2) \tan \beta (u^3)^*] \end{aligned} \quad (15)$$

Los símbolos son los mismos empleados en las fórmulas (9) y (10). Precisamente para el cálculo del transporte longitudinal según (9) se ha supuesto que i_z es muy pequeño en comparación a i_y . La fórmula de cálculo de i_y lleva implícito un método para calcular la pendiente de una playa asegurando el equilibrio en el transporte onshore-offshore. Supuesta la incidencia normal del oleaje, con prácticamente despreciables corrientes longshore y con débil corriente transversal (i_z), se obtiene una pendiente de equilibrio que se expresa como:

$$\tan \beta = \frac{\epsilon_B / \tan \theta \langle \bar{u}^3 \rangle / u_m^3 + 3/2 \delta u + u_m / W c_s [|\bar{u}|^3 \bar{u} / u_m^4 + 4/3 \pi \delta u]}{4/3 \pi \epsilon_B / \tan^2 \theta + 16/15 \pi u_m^2 / W^2 c_s^2} \quad (16)$$

La expresión es muy complicada pero admite simplificaciones muy sugestivas suponiendo, por ejemplo, que no se produce transporte por suspensión y $\partial u / \partial x \approx 0$ con lo cual se obtiene que:

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \theta \cdot \langle u^2 \rangle / 4/3 \pi u_m^2 \quad (17)$$

Con el interesante resultado de que la pendiente de la playa depende fuertemente de la asimetría del oleaje medida como $\langle u^2 \rangle$.

En la actualidad hay muchos modelos para estimar el perfil de una playa ante el clima marítimo, pero en la mayoría de los casos son empíricos con la dificultad de generalización que esto conlleva.

La aparición de la barra en el perfil de playa introduce una dificultad casi insuperable para el tratamiento racional del problema de la pendiente de equilibrio, máxime cuando en la dinámica transversal cobran importancia los movimientos ondulatorios infragravitatorios y en particular las ondas de orilla y su excitación por el oleaje incidente. De ellos y de la morfología asociada nos ocuparemos a continuación.

Las ondas de orilla, al menos su solución teórica para playas de pendiente uniforme y «modo cero», fueron descritas por primera vez por E. G. Stokes en 1846. En contraposición a las ondas normalmente incidentes, las crestas de las ondas de orilla eran perpendiculares a la línea de orilla y su amplitud decrecía exponencialmente en dirección a las aguas profundas. Otra diferencia fundamental respecto a las ondas incidentes era que su espectro frecuencial era discreto. En los años 50 dos autores Eckart y Ursell encuentran la solución general en aguas poco profundas y en forma completa respectivamente para playa de pendiente uniforme y teoría lineal. A comienzos de los años 70 A. J. Bowen y D. L. Inman establecieron la vinculación entre las ondas de orilla y distintas perturbaciones rítmicas en las playas tales como

«beach cusps», «rip currents», «scurf bars», e incluso más recientemente con otros fenómenos infragravitatorios como «surf beats», etc. (A. J. Bowen y R. T. Guza, 1978). A mediados de los años 70 se producen los trabajos más significativos sobre la excitación de las ondas de orilla por el oleaje normalmente incidente a una playa (R. T. Guza y R. E. Davis, 1974 y R. T. Guza y A. J. Bowen, 1976) con lo cual se dan las bases científicas para el tratamiento de una serie de fenómenos como los apuntados anteriormente, obteniéndose de este modo una explicación racional de los mismos. Las sucesivas mejoras introducidas tanto teórica como experimentalmente con el paso de los años no hacen sino corroborar e incluso amplificar la importancia de las ondas de orilla en la morfología costera (D. L. Inman y R. T. Guza, 1982; R. A. Holman y A. J. Bowen, 1982; A. Lechuga, 1986 y muchos otros).

La solución general del potencial de las ondas de orilla estacionarias en la aproximación de aguas poco profundas para playa de pendiente uniforme, $h = \operatorname{tg} \beta \cdot x$ se escribe como:

$$\Phi = a_n g / W e^{-kx} \operatorname{Ln}(2kx) \cos ky \cos Wt \quad (18)$$

en donde a_n , W y k son la amplitud, frecuencia y número de onda de las ondas de orilla respectivamente y $\operatorname{Ln}(2kx)$ son los polinomios de Laguerre de orden n , cuyos primeros valores son:

$$\begin{aligned} L_0(2kx) &= 1 \\ L_1(2kx) &= 1 - 2kx \\ L_2(2kx) &= 1 - 4kx + 2k^2 x^2 \\ L_3(2kx) &= 1 - 6kx + 6(kx)^2 - 4/3(kx)^3 \end{aligned} \quad (19)$$

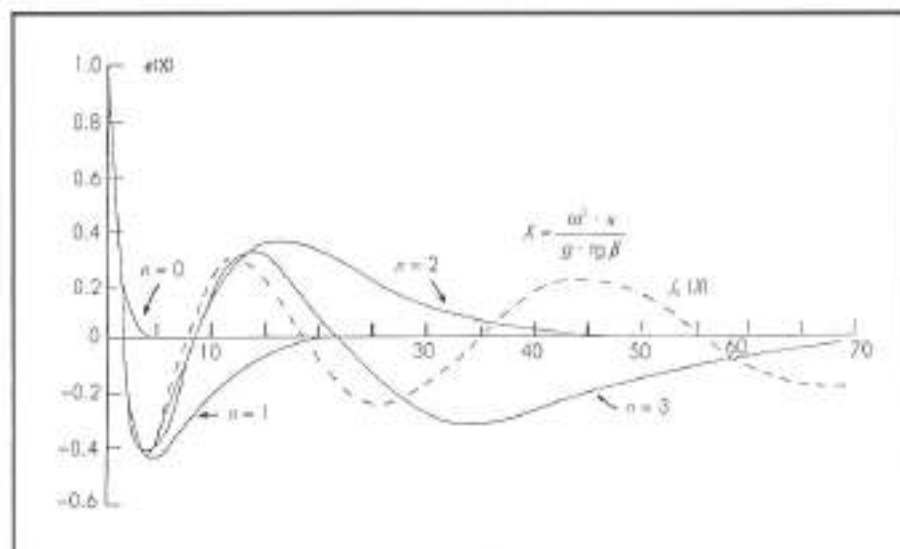


FIGURA 7. Cuatro primeros modos de las ondas de orilla y función de Bessel de orden cero.



FIGURA 8. Acumulación rítmica de cantos en la playa de Santa María del Mar (casco urbano de Cádiz) antes de la regeneración.

La frecuencia correspondiente a cada modo se expresa con la relación de dispersión siguiente:

$$W^2 = (2n + 1) g k \tan \beta \quad (20)$$

En todos los casos el número de ondas k se entiende en sentido longitudinal de la playa. En la figura número 7 aparecen dibujados los cuatro primeros modelos de la onda de orilla así como la solución que correspondería a la onda incidente, representada como la función de Bessel de orden cero.

La incuestionable relación entre las formas rítmicas en las playas «beach cusps», «crescentic bars», etc., con las ondas de orilla es prácticamente aceptada por todos los investigadores. Algunos ejemplos de estas formaciones en la costa española se presentan en las Figuras 8 a 12. En la Figura 8 aparecen acumulaciones más o menos rítmicas de cantos en la playa de Santa María del Mar antes de su regeneración. En este caso los trozos de muralla alineados en la zona de rompientes producen una suerte de «tuning» topográfico que amplifican las ondas de orilla. La Figura 9 muestra «beach cusp» de un



FIGURA 9. Beach cusp en la playa de Yás en Lugo. Estas formaciones son rotalmente cretadas.



FIGURA 10. Mecanismo de generación de «beach cusps» en la playa de Campello (Alcantal).

solo material en la playa de Yas en la costa Norte de Lugo. Las Figuras 10 y 11 muestran dos aspectos de las curiosas formaciones rítmicas en la playa de Campello. En la primera de ellas se observa claramente el mecanismo de formación. Por último en la Figura 12 correspondiente a la playa de Guadamansa en la costa malagueña se observa «beach cusps» con crestas de árido grueso en contraposición a los senos de material arenoso.

5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

En esta conferencia hemos intentado hacer un repaso general, sin duda muy resumido, de los aspectos más

significativos de la dinámica litoral y de la morfología asociada en las playas. Convencionalmente hemos separado la dinámica longitudinal y la dinámica transversal aunque en la naturaleza ambas se presentan unidas. En el momento actual se pueden establecer valoraciones muy eficientes del transporte sólido, por lo que en la mayoría de los casos la dinámica longitudinal se puede considerar bien establecida y con un prometedor campo en cuanto a su modelización. Algo más complicado, a nuestro juicio, se presenta el caso para la dinámica transversal fundamentalmente por dos razones principales. La primera de ellas es por la excesiva simplificación con la que hay que abordar el tratamiento de la di-



FIGURA 11. «Beach cusps» en la playa de Campello (Alcantal).



FIGURA 12. Crestos de cortos y senos de arena en beach cusps en la playa de Guadalupe (México).

námica «onshore-offshore» y el equilibrio resultante en el perfil. La segunda razón es la aparición en escena de los fenómenos infragravitorios en las zonas más cercanas a la línea de costa. La complejidad de la interacción entre el oleaje incidente y las ondas de orilla hacen verdaderamente difícil el tratamiento matemático aunque recientemente se han producido importantes avances en este sentido. Probablemente, la posición y principales características de la «tradicional» barra arenosa que se forma en la mayoría de nuestras playas viene condicionada por las interacciones citadas, incluso entre modos de onda de orilla como señalan R. A. Holman y A. J. Bowen (1982).

Desafortunadamente en las zonas más cercanas a la línea de orilla (véase Figura 7) los primeros modos de la onda de orilla y de la onda incidente reflejada en la playa

tienen unas características en perfil muy similares, tanto en los dos primeros ceros como en el primer mínimo y el primer máximo, por lo que los posibles efectos en la topografía de la playa no permiten discernir claramente el modo o tipo de onda que la produce. Este es por lo tanto un tema abierto y sujeto a discusión en el día de hoy.

BIBLIOGRAFIA

- BAILLARD, J. A., e INMAN, D. L. (1981). «An energetics bed-load Model for a Plane Sloping Beach: Local transports». *J. Geophysical Res.* Vol. 86, e 3, pp. 2035-2043.
- BAILLARD, J. A. (1981). «An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach». *J. Geophysical Res.*, vol. 86, no. e 11, pp. 10938-10954.
- BAILLARD, J. A. (1984). «A simplified model for longshore sediment transport». 19th Cong. on Coastal Engineering ASCE, pp. 1454-1470.
- BOWEN, A. J. (1969). «The generation of longshore current on a plane beach». *J. Mar. Res.* 27, pp. 206-215.
- GUZA, R. T. y DAVIS, R. (1974). «Excitation of edge waves incident on a beach». *J. Geophysical Res.*, 79, pp. 1285-1291.
- GUZA, R. T. e INMAN, D. L. (1975). «Edge waves and beach cusps». *J. Geophysical Res.* 80, pp. 2997-3012.
- HOLMAN, R. A. y BOWEN, A. J. (1982). «Bars, bumps and holes: Models for the generation of complex beach topography». *J. Geophysical Res.* 87, pp. 457-468.
- INMAN, D. L. y GUZA (1982). «The origin of swash cusps on beaches». *Marine Geology*, 49, pp. 139-148.
- KOMAR, P. D. e INMAN, D. L. (1970). «Longshore and transport on beaches». *Journal of Geophysical Research*, vol. 75, pp. 5914-5927.
- KOMAR, P. D. (1971). «The mechanics of sand transport on beaches». *J. Geophysical Research*, vol. 76, pp. 1713-1721.
- KOMAR, P. D. (1977). «Beach and transport: Distribution and total drift». *ASCE Watersways, Harbors and Coastal Eng.*, WW4, pp. 225-239.
- LEBLOND, P. L. (1972). «On the formation of spiral beaches». *Cong. on Coastal Engineering ASCE*, pp. 1331-1345.
- LECHUGA ALVARO, A. (1985). «Resonancia en playas». *Revista de Obras Públicas*, Febrero, pp. 97-106.
- LECHUGA ALVARO, A. (1986). «Formas rítmicas en playas, su relación con la evolución costera». C-17 CEDEX. Madrid.
- LEONTIEV, I. O. (1988). «Randomly Breaking Waves and surf-Zone Dynamics». *Coastal Engineering*, 12, pp. 83-103.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. (1970). «Longshore currents generated by obliquely incident sea waves». *J. Geophysical Res.*, vol. 75, pp. 6790-6800.
- MINZONI, A. A., y WHITTHAM, G. B. (1977). «On the excitation of edge waves on beaches». *J. Fluid Mech.* 79, pp. 273-287.
- WRIGHT, L. O.; CHAPPELL, J.; THOM, B. G.; BRADSHAW, M. P. y COWELL, P. (1979). «Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia». *Marine Geology*, 32, pp. 105-140.

WATERSTOP RX®

Bentonita de Sodio Natural

INSTITUTO
EDUARDO
DO
TOR
BOIA

D. I. T.

N.º 179

VOLCLAY

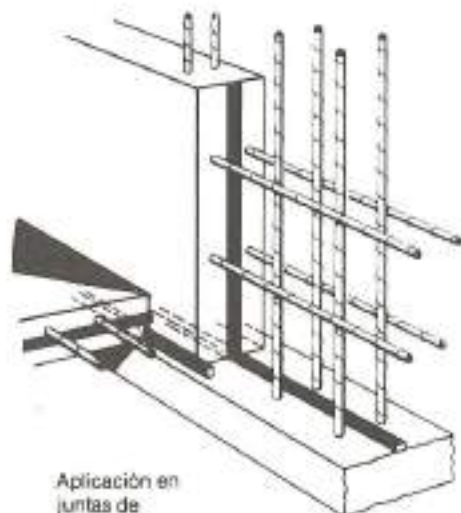
JUNTA SELLANTE QUE SE EXPANDE EN CONTACTO CON EL AGUA

Autosella las figuras o grietas que se produzcan por retracción o asentamiento.

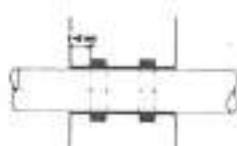
Se coloca simplemente clavando o encolando la junta sobre el hormigón viejo.

Colocación en una sola fase de la puesta del hormigón fresco.

No requiere soldar los extremos.



Aplicación en juntas de construcción.



Aplicación en tuberías pasantes.



La única junta realmente autosellante.

DUKA MADRID, S.A.

Saturnino Calleja, 20. 28002 MADRID
Telf: (91) 250 18 31-250 57 67-259 58 59
Telex: 2286. Fax: (91) 457 67 13

persa

Santa Ana, 103. t. 692.99.11. Cerdanyola (Barcelona).
DELEGACION LEVANTE : 96-2800503

PERFORACIONES ESPECIALES S.A.

Hinca de tuberías y colectores.



**INGENIERIA DE CIMENTACIONES.
PILOTES. SONDEOS. ANCLAJES.
MICROPILOTES. POZOS RADIALES.
PERFORACIONES HORIZONTALES.**

