

Formas rítmicas en la costa: ondas de arena y problemas en las playas

Rhythmic Formations on Coasts: Edge Waves and Beach-Related Issues

José Manuel de la Peña Olivas^{1*}

Resumen

En ocasiones aparecen a lo largo de las playas una serie de formaciones rítmicas cuyo origen se señala en este artículo. Pueden tener un doble origen diferente: formadas por inestabilidades debidas a la oblicuidad de oleaje; y producidas debido a que la playa ha entrado en resonancia y se han formado ondas de orilla o “edge waves”.

Palabras clave: formas rítmicas, inestabilidades, oblicuidad de oleaje, resonancia en playas, ondas de arena.

Abstract

Sometimes, a series of rhythmic formations appear along beaches whose origin is indicated in this article. They may have a different dual origin: Formed by instabilities due to wave obliquity, and produced because the beach has come into resonance, resulting in the formation of edge waves and beach cusps.

Keywords: Rhythmic formations, instabilities, wave obliquity, beach resonances, beach cusps.

1. INTRODUCCIÓN

Algunos de los problemas que nos podemos encontrar en las playas vienen asociados a formaciones rítmicas, entrantes y salientes a espacios regulares, que se suceden al largo de ellas, que se producen en su topografía y acaban apreciándose en la línea de orilla en forma de ondulaciones (CEM, 1998). Estas sinuosidades o formas rítmicas se caracterizan y clasifican por su longitud de onda. No todas ellas tienen la misma naturaleza y, por lo general su estudio es básicamente teórico. No suele tenerse en cuenta a la hora de abordar problemas costeros, a veces por desconocimiento y a veces porque se considera este fenómeno como “peculiar” y “curioso”; pero, lo cierto es que puede producir o agravar problemas en la costa que hay que conocer y tener en cuenta a la hora de abordar estudios de playas.

Al conocimiento de ellas se ha dedicado durante mucho tiempo el doctor ingeniero de caminos Antonio Lechuga Álvaro, durante muchos años mi jefe y siempre mi amigo. De él aprendí lo que significan estas ondas de orilla o formas rítmicas, de las que es un experto y dedico a ellas su tesis doctoral en 1984: a él mi recuerdo y homenaje.

No sé por qué casualidad de la vida, en muchos de los congresos en los que he participado normalmente antes de mí presentaba sus trabajos Albert Falqués, y, a fuerza de la costumbre, nos hicimos amigos. Él también se dedica a las formas rítmicas y, esperando a presentar mis ponencias, aprendí de él cómo se formaban esas lenguas sucesivas en la costa. He recurrido a Albert en alguna ocasión que mi

trabajo lo ha requerido y al tratar de las formas rítmicas no podía faltar la contribución que aprendí de él.

De manera práctica, estas ondas de orilla pueden aparecer en dos casos casi extremos: Cuando el oleaje es muy oblicuo respecto de la costa (Falqués *et al.*, 2005, 2011, 2013 y 2017) o cuando el oleaje es normal o con un ángulo de oblicuidad no muy elevado, produciéndose el fenómeno conocido como resonancia de una playa (Lechuga, 1983, 1984, 1985, 1991 y 1997).

Este artículo lo he enfocado desde una perspectiva práctica de ingeniero de costas. Primeramente, abordaré el concepto y diversidad de las formas rítmicas; a continuación, se dan unas pinceladas teóricas del concepto, características y tipos; y finalmente, se ponen algunos ejemplos prácticos con los que me he topado en alguno de los informes realizados.

2. TIPOS DE LAS FORMAS RÍTMICAS POR SU ORIGEN

Las formas rítmicas que se producen en las playas son la resultante de la acción del oleaje sobre la costa, que en determinadas condiciones provocan estas ondulaciones, también conocidas como ondas de arena, que vienen gobernadas por el ángulo de incidencia del oleaje en la costa, entre otras variables

Estas condiciones del oleaje pueden diferenciarse, por tanto, según el ángulo de incidencia sobre la costa, como se ha mencionado anteriormente. Cuando el ángulo de incidencia es grande y está más próximo a la línea de orilla que a su normal, o cuando éste no es muy grande y está próximo a la normal a la línea de orilla. Podríamos remontarnos, para comprenderlo mejor a los estudios del ingeniero portugués Castanho (1966) sobre el transporte sólido litoral (figura 1), en la que aparece la curva de variación del transporte sólido litoral (q_s) respecto al ángulo de incidencia del oleaje (α_0). La curva muestra que existe un ángulo

* Email: Jose.M.Pena@cedex.es

¹ Dr. Ingeniero de caminos, canales y puertos. Consejero técnico de Estudios Ambientales del Área de Costas del Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), del CEDEX.

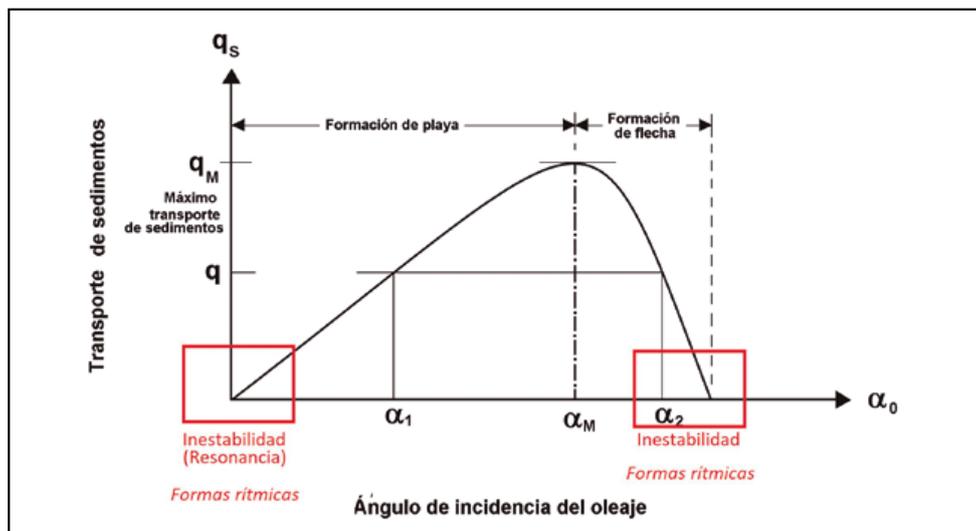


Figura 1. Variación del transporte sólido litoral en función del ángulo de incidencia, donde se aprecia que para un ángulo determinado en la costa se forman flechas o formas rítmicas (según Castanho, 1966).

α_M de incidencia del oleaje, Castanho en el LNEC, obtuvo que el valor del ángulo de transición playa-flecha dependía de la pendiente de la playa; así, para una pendiente del 2 % el valor de α_M tenía un valor entre 50° y 60° que era el que se obtiene un transporte sólido litoral máximo. Para ángulos mayores se tiende a formaciones tipo flechas y para ángulos menores las formaciones son tipo playas. Así pues, un mismo caudal sólido q puede generarse por dos ángulos distintos de incidencia del oleaje, pudiendo producir el mayor de ellos formaciones tipo flecha cuando las condiciones morfológicas de la costa, saliente, etc., lo permitan.

Cuando nos encontramos en la parte de la curva donde se tiende a formación de flecha, y los oleajes inciden sobre la costa con oblicuidad importante, mayor de 45° (más frecuentemente >70°), se produce la inestabilidad, apareciendo ondas de arena en la costa. Falqués estudió este efecto en diversas costas como Namibia y las costas del Maresme (Falqués *et al.*, 2013).

Este tipo de oleaje es el que estudió Falqués con otros autores ya mencionados, dando una explicación teórica y poniendo ejemplos de ello a lo largo de las costas, como por ejemplo de Namibia (figura 2).

En el otro lado de la gráfica (figura 1), con oleajes con ángulo de incidencia pequeño o normal a la costa también pueden producirse inestabilidades, aunque el mecanismo sea diferente. Esta otra forma de producir esas



Figura 2. Formaciones rítmicas con ángulos de incidencia grandes en las costas de Namibia (Fuente: Google Earth).

ondulaciones en la costa con el ángulo de incidencia pequeño se da cuando, en determinadas condiciones, se produce lo que se llama resonancia en playas. Estas formas rítmicas u ondas de orilla son las que estudió Antonio Lechuga y dan lugar igualmente a ondulaciones o en el término anglosajón “beach cusps”, u ondas de arena, en las playas.

Aun siendo tan sencillo el concepto apuntado, en ocasiones uno y otro se confunden por lo que tratamiento conjunto en este artículo ha parecido lo más correcto. A uno y otro nos vamos a ocupar en los apartados siguientes, finalizando con ejemplos que se producen en la costa que han dado lugar a problemas con los que me he encontrado en diversos informes.



Figura 3. Ondas de arena en la playa del Saler en Valencia.

3. FORMAS RÍTMICAS POR OLEAJE MUY OBLICUO

En los ensayos que realizó en el LNEC, Castanho obtuvo que el valor del ángulo de transición playa-flecha dependía de la pendiente de la playa; así, para una pendiente del 2 % el valor de α_M tenía un valor entre 50° y 60°. Por tanto, la formación de flecha por oleajes muy oblicuos depende tanto de la oblicuidad de oleaje como de la pendiente de la playa. Falqués, que en ningún caso menciona a Castanho, supone que la inestabilidad de la playa por este concepto se produce con máxima intensidad cuando el ángulo

de incidencia está entorno a 70° (Falqués *et al.*, 2017). Un ejemplo espectacular de este tipo de formaciones debido al oleaje muy oblicuo lo hallamos en la isla Djerba en Túnez donde estas formas rítmicas se han desarrollado hasta formar dos enormes flechas en los extremos de la isla de cerca de 8 km cada una (figura 4).



Figura 4. Flechas al norte y sur de la isla de Djerba en Túnez (Fuente: Google Earth).

Según los trabajos de Falqués y su equipo (Falqués *et al.*, 2005, 2011, 2013 y 2017) estas formaciones son debidas a las diferencias en la propagación de la energía de las ondas refractivas entre los lados ascendentes y descendentes de la ondulación costera (figura 5).

Este efecto de formaciones rítmicas por oblicuidad es dominante sólo para oleajes con oblicuidad importante, mayor de 45° , que es cuando se produce la inestabilidad, apareciendo ondas de arena en la costa. Falqués estudió este efecto en diversas costas como Namibia (figura 2), y las costas del Maresme (Falqués *et al.*, 2013). Según Falqués *et al.* (2013), cuando el oleaje, en condiciones medias, alcanza la costa con ángulos inferiores a 40° , respecto a la línea de orilla, se producen “inestabilidades” que dan lugar a ondas de arena de longitudes de onda muy grandes, del orden del km y muestra cómo la costa del Maresme, entre la desembocadura del río Tordera y Arenys de Mar está afectada por ello.

Para su estudio Falqués *et al.* (2005 y 2013) han desarrollado un modelo de 1D asentado solamente en tener en cuenta el transporte longitudinal, basado en el flujo de energía, pero no explícitamente el transporte transversal, cuyo resumen se muestra en las figuras 6 y 7, facilitadas por el autor. Las conclusiones a las que llega este trabajo son que las ondas de arena por inestabilidad debido a la acción del oleaje se situarían entre 1 y 1,4 k de longitud de onda, en el caso del Maresme.

Este fenómeno puede ser el responsable de determinadas formas de acumulación de sedimento que se aprecian a lo largo de la costa del Maresme, como sucede en el espigón norte de Vilassar y que explicarían la diferencia de comportamiento entre éste y el espigón sur.

El temporal de enero de 2017 que afectó a la costa de Maresme, vino con oleajes muy oblicuos e hicieron que

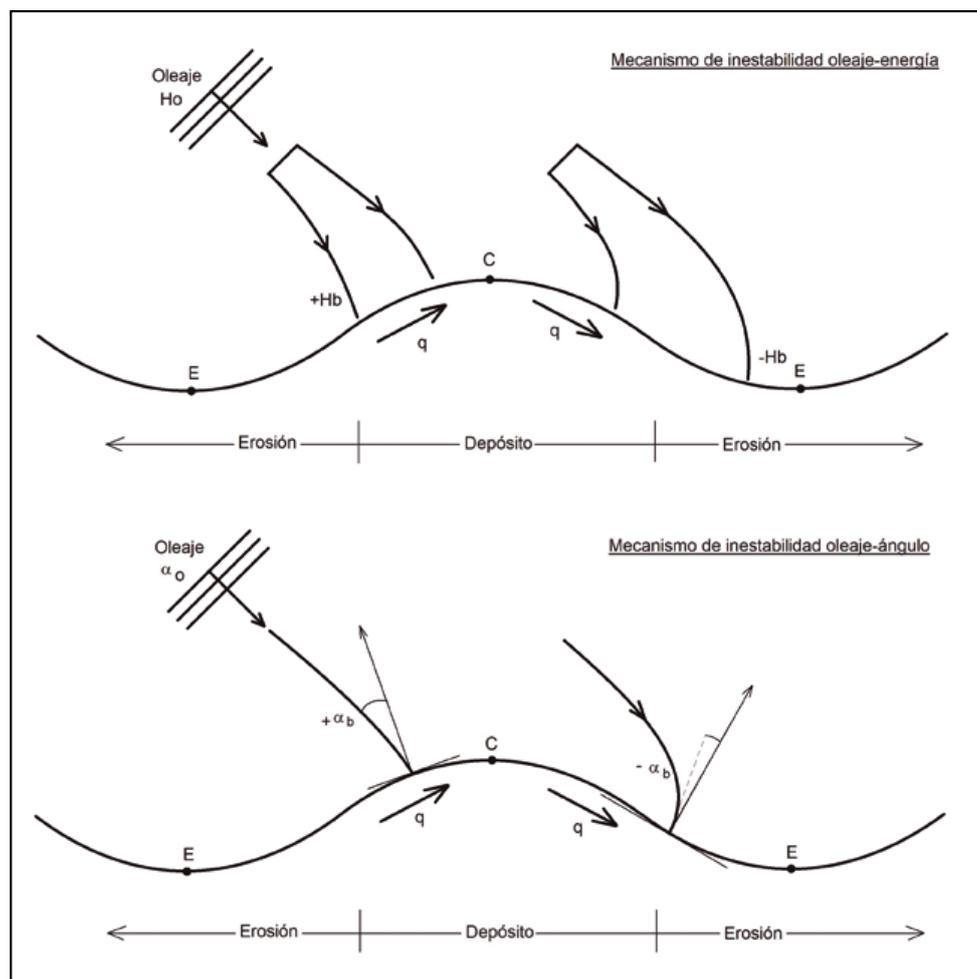


Figura 5. Esquema del mecanismo de inestabilidad del oleaje-energía y oleaje-ángulo, según Falqués *et al.* (2017).

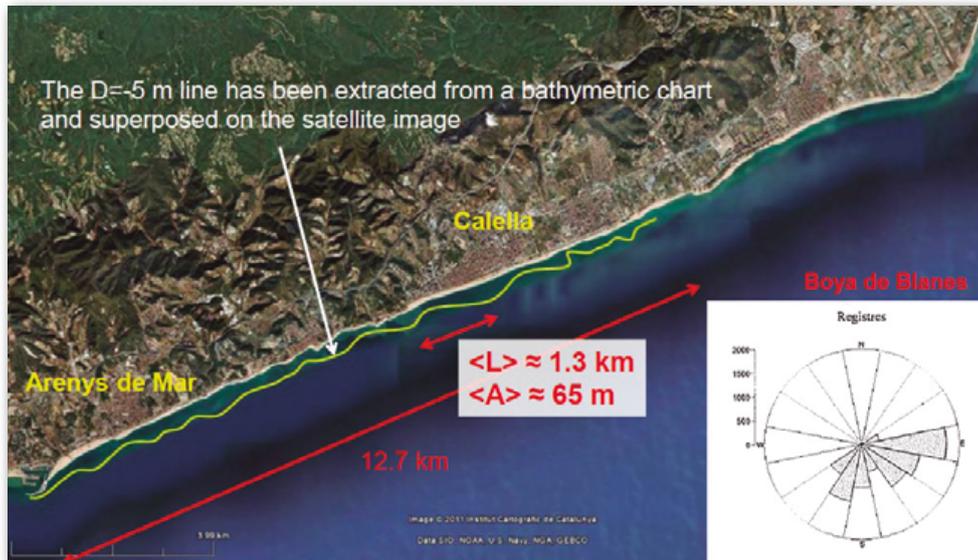


Figura 6. Zona de estudio y característica de las ondas de arena en la zona norte del Maresme (según Falqués *et al.*, 2013) (Foto cortesía de Albert Falqués).

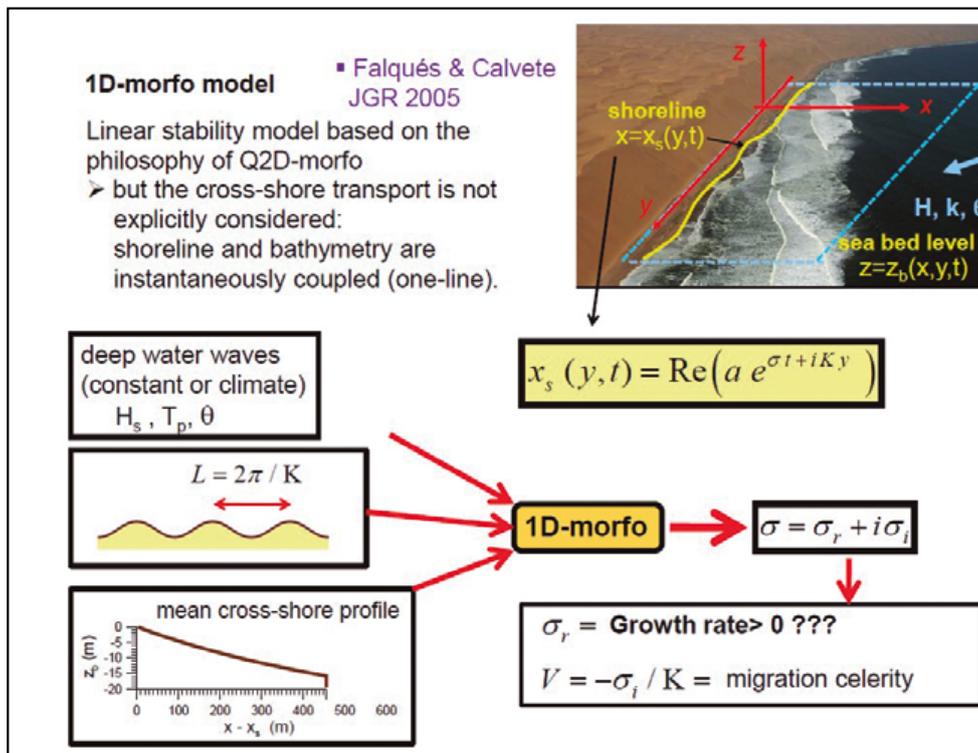


Figura 7. Esquema del modelo de una línea desarrollado por Falqués y Cavete (2005) para analizar los fenómenos de ondulación de la costa debido a la incidencia oblicua del oleaje (Falqués *et al.*, 2013) (Foto cortesía de Albert Falqués).

en la playa de Pineda se produjera una posible resonancia de la playa con ondas de unos 260 m de longitud media, lo que llevó a formar alternativamente avances y retrocesos,

con un valor máximo de la concavidad entre 20 y 30 m (figura 8) que unido a la erosión media de las playas produjo daños en el paseo marítimo (Peña-CEDEX, 2017).

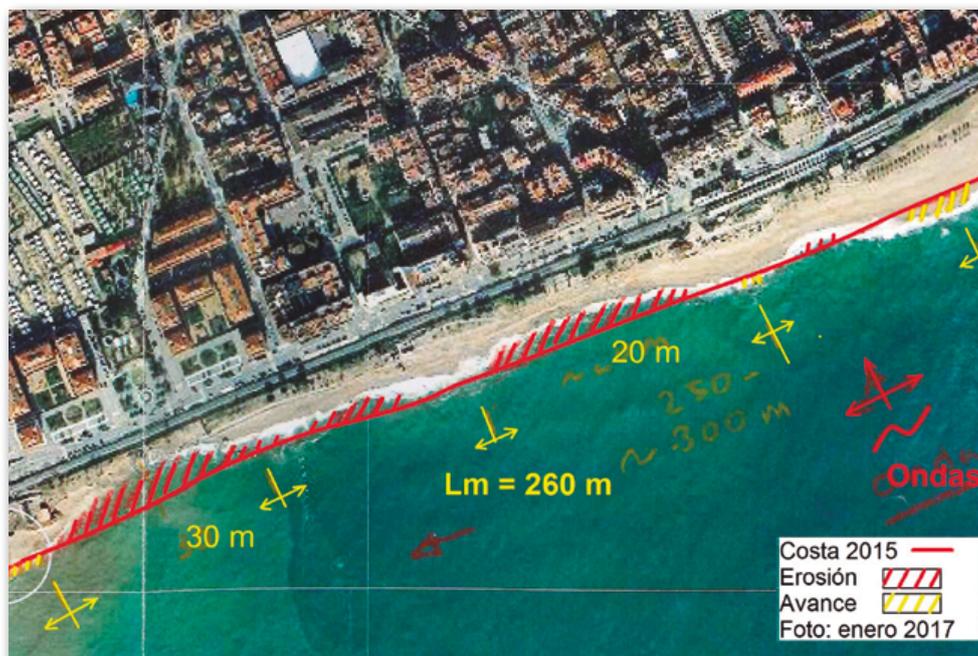


Figura 8. Evolución entre 2015 y enero de 2017 en Pineda de Mar (Fuente: Institut Cartografic de Catalunya).

4. FORMAS RÍTMICAS POR OLEAJE CON ÁNGULOS MENORES: RESONANCIA EN PLAYAS

Estas formas suelen ser las más corrientes. Alguna vez cuando hemos ido a la playa nos encontramos con que no es recta; se han formado una serie de entrantes y salientes, como ondas, en la orilla (figura 9). Estas formas, llamadas formas rítmicas u ondas de arena, “beach cusp” en la acepción anglosajona, se han producido debido a que la playa ha entrado en resonancia y se han formado ondas de orilla o “edge waves” (Lechuga, 1983), y a ellas nos vamos a dedicar en las próximas líneas y párrafos, para así dar unas pinceladas a su conocimiento.



Figura 9. Formas rítmicas en la playa de Nules.

4.1. Concepto de ondas de orilla y ondas de arena

En determinadas condiciones de incidencia del oleaje, éste provoca ondas de orilla estacionarias que Antonio Lechuga (1983) como “... movimientos ondulatorios periódicos del agua a lo largo de la costa ...”, pudiendo tener carácter progresivo o estacionario. Son más fáciles que se den en playas con rotura tipo oscilante (*surging*) o de colapso (*collapsing*), reflejantes, que con roturas en voluta (*plunging*) o derrame (*spilling*), disipativas.

La acción de las ondas de orilla sobre las playas produce ondas de arena, o más genéricamente formas rítmicas o “beach cusps”; definidas por Lechuga (1983) como “... formaciones topográficas rítmicas de una longitud de onda casi regular a lo largo de una playa ...”. Vienen caracterizadas por la longitud de la onda, la profundidad de la cresta y la pendiente de la playa (figura 10). Lo picudo de la cresta depende del tipo de material que forma la playa; así playas de grava (figura 9), son más picudas, mientras que las playas de arena (figura 3), son más romas.

Por tanto, el origen de estas formas rítmicas es debido a las llamadas ondas de orilla estacionarias, conocidas a veces por su acepción inglesa de “edge waves” y su formación es sencilla: Cuando un oleaje de frecuencia ω_i incide normalmente, o casi normalmente, sobre una playa y es fuertemente reflejado en ella, provoca una onda a lo largo de la playa, perpendicular a la onda incidente, que decrece exponencialmente desde la orilla hacia el mar. Estas ondas de orilla son progresivas y no tienen una incidencia sobre la batimetría de la playa; pero si las ondas, en su progresión a lo largo de la playa se encuentra con un obstáculo de suficiente entidad, la onda se refleja interaccionando ambas ondas, incidente y reflejada, pudiendo entrar en resonancia

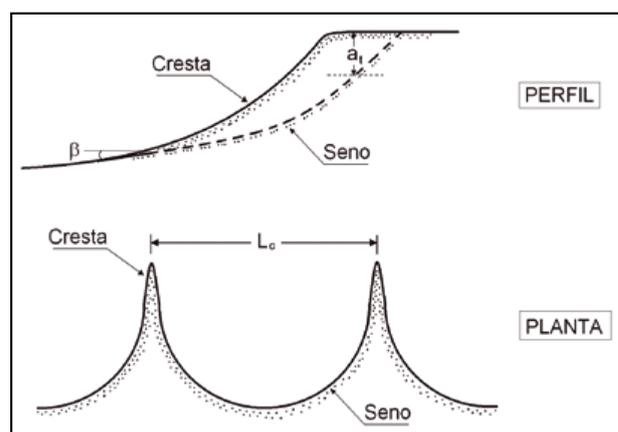


Figura 10. Planta y perfil de una forma rítmica (según Lechuga, 1983).

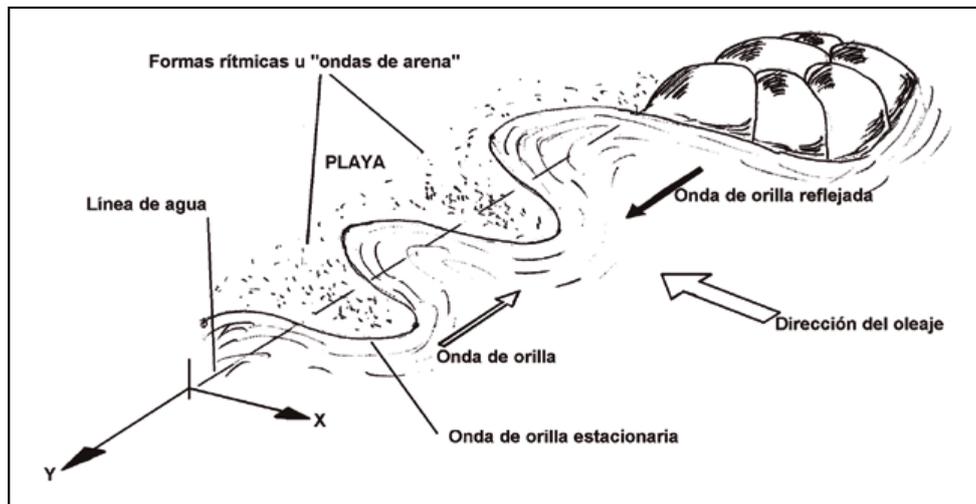


Figura 11. Esquema de formación de las ondas de orilla estacionarias y las formas rítmicas u "ondas de arena" que generan.

y formarse una onda estacionaria, onda de orilla estacionaria, que sí puede alterar los fondos de la playa.

Si ambas, ondas incidentes y ondas transversales reflejadas entran en resonancia se produce una onda de orilla estacionaria, que es la responsable que se produzcan unas modulaciones u ondas de material sedimentario de la playa, "ondas de arena", denominadas formas rítmicas, que se caracterizan por unos montículos de material en sus crestas y el agua entrando sobre sus senos, al interactuar con el fondo de la playa.

4.2. Características de las ondas de orilla

La solución lineal de las ondas de orilla se conoce desde Stokes (1847); pero la solución para aguas poco profundas, tanto para ondas de orilla estacionarias como progresivas, se debe a Eckart (1951) y a Ursell (1952), que obtuvo una solución general para ondas de orilla de pequeña amplitud. La solución general para aguas poco profundas (Eckart, 1951) del potencial de velocidades de una onda de orilla es para ondas estacionarias (Lechuga, 1983 y 1985):

$$\phi_e = \frac{a_n g}{\omega} e^{-kx} L_n(2kx) \cos ky \cos \omega t \quad [1]$$

Y para ondas progresivas:

$$\phi = \frac{a_n g}{\omega} e^{-kx} L_n(2kx) \cos(ky - \omega t) \quad [2]$$

Dónde: a_n es la amplitud en $x=0$, x es la coordenada normal a la costa, y la coordenada a lo largo de la costa, k el número de onda en la dirección de la costa, n el modo, y $L_n(2kx)$ los polinomios de Laguerre de orden n ; teniendo un valor para $n=0, 1, 2$, de:

$$\begin{aligned} L_0(2kx) &= 1 \\ L_1(2kx) &= 1 - 2kx \\ L_2(2kx) &= 1 - 4kx + 2(kx)^2 \end{aligned}$$

Y la relación de dispersión para ambas ondas de orilla, estacionaria y progresiva, es:

$$\omega^2 = k g (2n + 1) \tan \beta \quad [3]$$

Donde $\tan \beta$ es la pendiente de la playa.

Los perfiles de superficie del agua, para la onda estacionaria, valen:

$$\eta_e = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = a_n L_n(2kx) e^{-kx} \cos ky \sin \omega t \quad [4]$$

Cuya representación de un perfil normal a la costa, $x = \text{cte.}$, en un instante t determinado se muestra en la figura 12 (Lechuga, 1983) para los modos $n = 0, 1, 2$ y 3 , apareciendo en abscisas la variable adimensional:

$$\chi = \frac{\omega_e^2 x}{g \tan \beta} \quad [5]$$

Y en ordenadas el perfil de la superficie del agua, que viene dado por:

$$\eta = a_n L_n(2kx) \cdot e^{-kx} \cos ky \cdot \sin \omega_e t \quad [6]$$

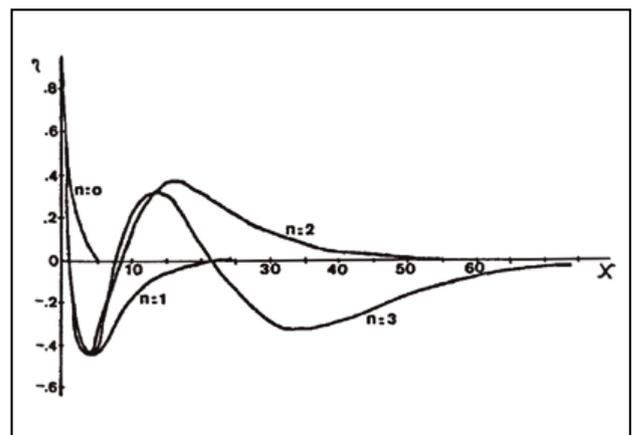


Figura 12. Perfil de onda de orilla estacionaria normal a la playa (Cortesía de A. Lechuga, 1983).

Estas ondas de orilla estacionarias poseen una frecuencia propia, ω_e , teniendo una relación con la frecuencia de la onda incidente que se puede aproximar a (Guza y Davis 1974; Guza y Bowen, 1976):

$$\omega_e = \frac{\omega_i}{2} \quad [7]$$

Por tanto, se establece una resonancia subarmónica. La amplitud de las ondas de orilla estacionarias comienza a crecer hasta un límite. La forma de la playa y sus fondos se irá adoptando a una estructura rítmica. Experimentalmente se comprueba que las ondas de orilla más susceptibles de aparecer son aquellas con frecuencia la mitad de la frecuencia del oleaje incidente, $\omega_e = 1/2 \omega_i$, de modo $n = 0$ (Lechuga, 1983).

La relación de dispersión para una onda de orilla estacionaria viene dada por (Lechuga, 1983 y 1985; Peña, 2007):

$$\omega_e^2 = k g(2n + 1) \tan \beta \quad [8]$$

Donde ω_e es la frecuencia de la onda de orilla estacionaria, $\tan \beta$ es la pendiente de la playa, k el número de onda en la dirección de la costa, n el modo, y g la aceleración de la gravedad; pero:

$$k = \frac{2\pi}{L_e} \quad [9]$$

Siendo L_e la longitud de la onda estacionaria, que es el doble que la longitud de onda de la forma rítmica L_c , y la frecuencia de la onda de orilla es la mitad de la onda incidente (Guza y Davis, 1974; Guza y Bowen, 1976), operando:

$$\omega_e = \frac{\omega_i}{2} = \frac{2\pi}{2T_i} = \frac{\pi}{T_i} \quad [10]$$

$$\omega_e^2 = \left(\frac{\pi}{T_i}\right)^2 = \frac{2\pi g}{L_e} (2n + 1) \tan \beta \quad [11]$$

$$L_e = \frac{2T_i^2 g}{\pi} (2n + 1) \tan \beta \quad [12]$$

$$L_c = \frac{L_e}{2} = \frac{T_i^2 g}{\pi} (2n + 1) \tan \beta \quad [13]$$

Cuando el oleaje incidente lo hace con una cierta oblicuidad la resonancia se produce entre el oleaje incidente y dos sistemas progresivos de ondas de orilla de sentido contrario (Guza y Bowen, 1975; Lechuga, 1983). En la figura 13 se muestra la solución gráfica de la onda de orilla del modo 1 con oleaje oblicuo (Lechuga, 1997).

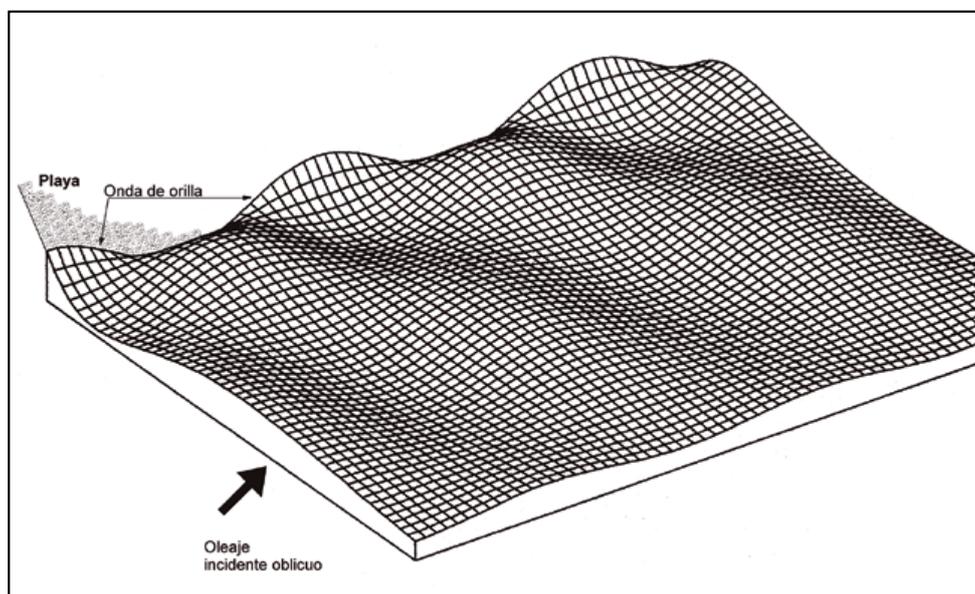


Figura 13. Onda de orilla del modo 1 con oleaje oblicuo (Cortesía de A. Lechuga, 1997).

4.3. Características de las ondas de arena como formas rítmicas

Las formas rítmicas que producen las ondas de orilla estacionarias se caracterizan por su longitud de onda, L_c , y por la altura del escalón, a_e , que se produce entre cresta y seno. La longitud de onda de la onda de orilla estacionaria, L_e , es el doble de la longitud de onda de la forma rítmica, L_c , que genera. El abanico de dimensiones que aparecen en la naturaleza es muy grande: variando L_c entre algunos metros o varios miles de metros. Entre una de sus clasificaciones por tamaños, se pueden dividir en (Lechuga, 1983):

1. Típicas: entre 8 y 25 m
2. De temporal: entre 70 y 120 m
3. Gigantes: entre 700 y 1.500 m

Las ondas de orilla, como sabemos, provocan las ondas de arena, como formas rítmicas, cuya concavidad se interna en la playa seca provocando una diferencia de cotas

entre el seno y la cresta de la forma rítmica generada en la playa (a_e) (figura 12). Si se hace una evaluación teórica del valor de esa amplitud máxima que puede provocar la onda de orilla, se tendría, al menos de forma aproximada, el valor de S_{ir} , (figura 12) que podría acercarse a la amplitud de la onda estacionaria, u onda de orilla, a_e . La relación fundamental que liga la longitud de la onda de orilla L_e , la amplitud de la onda de estacionaria a_e y el parámetro de no linealidad del oleaje incidente ε_i es (Guza y Bowen, 1976; Lechuga 1983, 1985):

$$a_e = \frac{0,77 \tan \beta}{K_e} \varepsilon_i^{\frac{1}{2}} \quad [14]$$

Donde:

$$\varepsilon_i = \frac{a_i (2\omega)^2}{g \tan^2 \beta} \quad [15]$$

Pudiendo tomar un valor aproximado de 1, en condiciones óptimas de resonancia y de 2 en estados límites, según Guza y Bowen, 1976, y Lechuga, 1983, 1985.

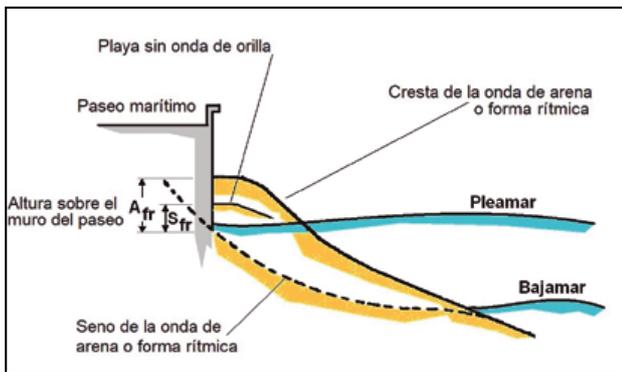


Figura 14. Esquema del comportamiento de las ondas de orilla cuando se interrumpen por un paseo marítimo.

5. EJEMPLOS DE PROBLEMAS EN PLAYAS GENERADOS POR LAS FORMAS RÍTMICAS

En algunas ocasiones esta curiosidad que alguna vez cuando hemos ido a la playa nos encontramos con que no es recta y se han formado una serie de entrantes y salientes, como ondas, en la orilla, pasa a ser un problema, o en sí mismo o como complementario a otros problemas erosivos, etc. que puede tener la playa. No suelen ser frecuentes; pero por ello, suelen pasar desapercibidos a los técnicos. A continuación se exponen algunos ejemplos con los que me he encontrado en la actividad profesional en el Centro de Estudios de Puertos y Costas.

5.1. Playa de Salinas

El primero de ellos se encuentra en el norte de España, concretamente en la emblemática playa de Salinas en Castillón, cerca de Avilés, en Asturias donde se realizó un informe técnico para la Dirección general de Sostenibilidad de la Costa y del Mar en 2010. Entre los elementos detectados que condicionaban, y condicionan, el comportamiento de la playa aparecían las ondas de orilla que ya fueron vistas en un informe previo del CEDEX de 1992 (Medina, 1992), realizado a raíz de sufrir daños importantes el paseo marítimo, en sus conclusiones indicaba la existencia de estas ondas de orilla en la playa corroborado por las fotografías que entonces se realizaron (figura 15). Estas mismas ondas de orilla se siguieron seguido produciendo.

Estas formas rítmicas también se observaron en las fotografías aéreas de 2001 y de 2007, pudiéndose medir su longitud de onda que es aproximadamente de 400 m (figura 16), detectándose también en la playa al este de la

desembocadura, de Xagó las mismas formaciones de ondas de orilla con la misma longitud de onda.

Aplicando al caso de Salinas, tomando valores: $L_c = 406$ m y $\tan \beta = 0,0114$, operando se obtiene:

$$T_i = \frac{106,8}{\sqrt{2n + 1}}$$

Que, dando valores para $n = 0, 1, 2,$ y $3,$ se obtienen unos periodos de onda incidente de: 106,8 s, 61,7 s, 47,8 s, y 40,4 s, respectivamente. Siendo éstos los más frecuentes de aparición, por lo que las ondas que provocan las ondas de orillas deben ser las llamadas ondas de acompañamiento u ondas largas asociadas a un tren de oleaje en temporal. Introduciéndose el seno de la onda de orilla en la playa seca hasta que el paseo marítimo lo interfiere, formando esas ondulaciones en el paseo que se observan en las fotografías horizontales, dejando al descubierto el paramento del paseo marítimo que facilita las reflexiones del oleaje sobre él. Si se hace una evaluación teórica del valor de la amplitud máxima que puede provocar la onda de orilla, se tendría, al menos de forma aproximada, el valor de S_{fr} , que, como se ha indicado anteriormente, se asemeja a la amplitud de la onda estacionaria, u onda de orilla, a_e .

La relación fundamental que liga la longitud de la onda de orilla L_e , la amplitud de la onda de estacionaria a_e y el parámetro de no linealidad del oleaje incidente ε_i es (Guza, 1976; Lechuga, 1983 y 1985) se rige por la ecuación [1]. Y aplicado a la playa de Salinas: siendo: $\tan \beta = m = 0,0114$; $L_e = 2 L_c = 800$ m y $K_e = 2\pi/L_e$. Y sustituyendo queda:

$$a_e = \frac{0,77 \cdot 0,0114}{2\pi} 800 \varepsilon_i^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$$\varepsilon_i = \frac{a_i (2 \omega)^2}{g \tan^2 \beta}$$

Pudiendo tomar un valor aproximado de 1, en condiciones óptimas y de 2 en estados límites. Tomando el primero de los valores se obtiene:

$$a_e = 1'118 \text{ m}$$

Pudiendo alcanzar en un estado límite:

$$a_e = 1,118 \cdot 2^{1/2} = 1,58 \text{ m}$$

Por tanto, el valor del “socavón” que produce la onda de orilla en el muro del paseo marítimo de Salinas se



Figura 15. Ondas de orilla en la playa de Salinas en 1991 (Medina-CEDEX, 1992).



Figura 16. Ondas de orilla en 2001 en la playa de Salinas de 400 m aproximadamente de longitud de onda (Peña-CEDEX, 2010).

encontraría comprendido entre 1,118 y 1,58 m, siendo más probable que esté más próximo al primero de los valores.

5.2. Playas del Maresme

La formación de ondas en las playas del Maresme se ha comentado al tratar de estas formaciones rítmicas debidos a la gran oblicuidad del oleaje. Fueron estudiadas por Falqués *et al.* (2013) y por el CEDEX en 2013-14 (Peña-CEDEX, 2017). También entonces se detectaron formas costeras en la zona de Vilassar de Mar (figura 17) que condicionarían cualquier actuación.

5.3. Playa de Babilonia en Guardamar del Segura

Recientemente el CEDEX (Peña, 2017) realizó un informe sobre las playas de Guardamar del Segura. El análisis de la situación y los problemas existentes sacaron a la luz la existencia de formaciones rítmicas, ondas de orilla y ondas de arena en las proximidades del dique de encauzamiento sur del río Segura, concretamente frente a las casas conocidas como de Babilonia en la playa del mismo nombre. En las fotografías aéreas se aprecian estas formaciones (figura 18). En ellas no siempre son nítidas y claras ya que están condicionadas al terreno. La longitud de onda que se observó se encontraba en torno a 60 m.



Figura 17. Posibles formas rítmicas por gran oblicuidad del oleaje en la costa de Vilassar de Mar (Barcelona) (Fuente: Falqués, *et al.*, 2013, y Google Earth).



Figura 18. Formas rítmicas, ondas de arena, en la playa de Babilonia de Guardamar del Segura (Fuente: Google Earth).



Figura 19. Ondas de orilla en la playa de Babilonia de Guardamar del Segura (Foto cortesía de Carlos Cañadillas).

El efecto sobre las casas de estas ondas de orilla se sumó al erosivo de la playa, afectando notablemente a las instalaciones como se aprecia en las fotografías horizontales tomadas para este trabajo.

6. CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se llega en este pequeño trabajo se pueden englobar en dos aspectos diferentes; pero importantes: El primero de ellos corresponde al origen de las formas rítmicas que pueden aparecer en una playa; pudiéndose diferenciar aquellas que tienen su origen en la fuerte oblicuidad del oleaje, que pueden derivar en flechas litorales, aunque a menudo solamente se quedan en ondulaciones ya que la configuración orográfica de la costa no lo suele permitir. Y aquellas conocidas como ondas de orilla, o en terminología anglosajona “beach cusps” que se forman cuando entra en resonancia la playa, esto es; cuando la oscilación natural de la orilla es múltiplo de la frecuencia del oleaje que la excita. El segundo de ellos es el efecto que producen en la costa, que como hemos visto puede que se sume a otros efectos como la erosión costera, provocando puntas con efectos erosivos mayores que en condiciones normales donde no se produzcan estas ondas.

Finalmente, debe recalcar que habitualmente no se tiene en cuenta la formación de estas formas rítmicas que pueden dar lugar a confusiones o no llegar a un diagnóstico del problema adecuado.

7. AGRADECIMIENTOS

No puedo finalizar este artículo sin manifestar mi agradecimiento al doctor Antonio Lechuga Álvaro, que me enseñó a conocer estas formaciones y me honró con su amistad.

8. REFERENCIAS

Castanho, José Pires (1966). *Rebentação das ondas e transporte litoral*. Laboratorio de Engenharia Civil de Lisboa (memoria nº 275).

Eckart, C. (1951). *Surface Waves on Water of Variable depth*. Scripps Institute Oceanographic, Universidad de California-San Diego-La Jolla (Wave report nº 100).

Falqués, A., y Calvete, D. (2005). Large-scale dynamics of Sandy coastlines: Diffusivity and instability. *Journal of Geophysical Research*, 110(3), C03007.

Falqués, A., Calvete, D., y Ribas, F. (2011). Shoreline instability due to very oblique wave incidence: some remarks on the physics. *Journal Coastal Research*, 27(2): pp. 291-295.

Falqués, A., Caballería, M., Ribas, F., y Van den Berg, N. (2013). Shoreline sand waves along the Catalan coast. *Coastal Dynamics* (pp. 575-584).

Falqués, A., Kakeh, N., y Calvete, D. (2017). A new shoreline instability mechanism related to high-angle waves. *Coastal Dynamics*, Paper nº 155, pp. 1863-1873.

Guza, R.T., y Davis, R.E. (1974). *Journal Geophysics Research*, 79(9): pp. 1285-1291.

Guza, R.T., y Bowen, A.J. (1976). Finite Amplitude Edge Waves. *Journal Marine Research*, 34(2): pp. 269-293.

Lechuga Álvaro, A. (1983). Formas rítmicas en playas. *Revista de Obras Públicas*, 130(3213): pp. 353-357.

Lechuga Álvaro, A. (1985). Resonancia en playas. *Revista de Obras Públicas*, 132(3233): pp. 97-106.

Lechuga Álvaro, A. (1991). Una nueva solución a las ecuaciones de las ondas de orilla en playas con pendiente no uniforme. *Ingeniería Civil*, nº 82, pp. 127-133.

Lechuga Álvaro, A. (1997). Corrientes de retorno (rip currents) y ondas de orilla en playas. *Ingeniería Civil*, nº 107, pp. 89-93.

Medina Villaverde, J.M. (1992). *Dinámica litoral de las playas de El Espartal y Salinas*. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (nº 22-491-9-113, para la Dirección General de Costas) (CEDEX, 1992).

Peña Olivas, J.M. de la (2007). *Guía técnica de estudios litorales. Manual de costas*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Colección Seinor, nº 39).

Peña Olivas, J.M. de la (2010). *Análisis de la playa de salinas (Castrillón-Asturias) y posibles mejoras de su comportamiento*. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (nº 22-410-5-001, para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar).

Peña Olivas, J.M. de la (2017a). 3.3 *estudios de dinámica litoral, defensa y propuestas de mejora en las playas con problemas erosivos, considerando los efectos del cambio climático: 3.3.2 Estudio de problemas específicos: Nota técnica: análisis de la evolución de la costa del Maresme entre Malgrat y el puerto de Arenys de mar tras el temporal de enero de 2017 y propuestas de actuación*. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (Informe técnico nº 22-414-5-006, para la D.G. de Sostenibilidad de la Costa y del Mar) (CEDEX, 2017).

Peña Olivas, J.M. de la (2017b). 3.1. *Estudios de Ingeniería. Análisis de alternativas de actuación de las playas de Guardamar del Segura (Alicante)*. Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (nº 22-417-5-001, para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar) (CEDEX, 2017).

Stokes, G.C. (1847). On the Theory of Oscillatory Waves. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 8, pp. 441-455.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (1998). Engineering and Design. *Coastal Engineering Manual*, Part III (Chapter 2). Circular nº EC 1110-2-292, Department of the Army, pp. 48-53.

Ursell, F. (1952). *Edge Waves on a Sloping Beach*. Proceeding of Royal Society of London (Serie A, Vol. 214, pp. 79-97. <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0152>