

Morfodinámica de una playa mesomareal expuesta con terraza de bajamar (Faro, Sur de Portugal)

Morphodynamics of a mesotidal, exposed, low tide terrace beach (Faro, southern Portugal)

G. Anfuso*

N. Ruiz

Departamento de Geología
Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales
Polígono Río San Pedro s/n
11510 Puerto Real, Cádiz, España
*E-mail: giorgio.anfuso@uca.es

Recibido en octubre de 2003; aceptado en abril de 2004

Resumen

Se llevó a cabo un seguimiento microtopográfico y de profundidad de removilización en la playa de Faro, en la costa sur de Portugal. Esta playa posee un carácter mesomareal y presenta una terraza de bajamar muy ancha y plana ($\tan \beta = 0.02$) y un intermareal medio-alto con pendiente elevada ($\tan \beta = 0.11$). Se observó cómo los procesos erosivos asociados a mar de viento produjeron un basculamiento de la playa alrededor del nivel medio del mar y una variación en la profundidad de removilización en función de la morfología y sedimentología de la playa y de las características del oleaje, que determinaron el tipo de rompiente. Rupturas en voluta caracterizaron el intermareal medio-alto, determinando valores elevados de removilización (25% de la altura de ola), predominando rompientes en derrame en la terraza de bajamar con removilización pequeña (4% de la altura de ola). Finalmente se evidenciaron las diferencias entre los valores de removilización medidos con varillas y *cores*, o con arandelas, resultando más altos los medidos mediante arandelas en presencia de granulometría mayor.

Palabras clave: morfodinámica, terraza de bajamar, Faro.

Abstract

A field assessment of microtopographic changes and disturbance depth was carried out during a tidal cycle at Faro beach, southern Portugal. This mesotidal beach presents a well developed low tide terrace, wide and flat ($\tan \beta = 0.02$), and an important ($\tan \beta = 0.11$) foreshore slope. Erosive processes, related to sea waves, produced a beach profile rotation around mean sea level. Disturbance depth presented great variations according to beach morphology and sedimentology as well as wave characteristics, factors that controlled breaking wave type. Plunging breakers prevailed in the upper and middle foreshore, greatly affecting bottom sediments that recorded disturbance values of 25% of significant breaking wave height. Spilling breakers prevailed in the low tide terrace, with average disturbance values of about 4%. Lastly, values of disturbance depth obtained with two different methods, rods and plugs or rods with loose-fitting washers, were compared. The second method gave higher values of disturbance with coarser sediments.

Key words: morphodynamics, low tide terrace, Faro.

Introducción

En las últimas décadas, la necesidad de proteger los asentamientos humanos y el incremento en la demanda de uso de las playas con fines recreativos han fomentado estudios sobre los procesos morfodinámicos que actúan sobre aquellas, siendo su conocimiento fundamental para el diseño y dimensionamiento de cualquier obra de protección costera (Fucella y Dolan, 1996; Komar, 1998; Short, 1999).

Para determinar los cambios microtopográficos y el espesor de sedimento involucrado en el transporte litoral se han usado varillas y *cores* de arena marcada (King, 1951; Williams, 1971; Jackson y Nordstrom, 1993; Anfuso *et al.*, 2000) o varillas con una arandela que se mueve libremente (Greenwood y Hale,

Introduction

During the last decades, the necessity of protecting human structures from coastal erosion and the growing demand for recreational beach uses have increased interest in coastal morphodynamic processes, a knowledge of which is basic to properly design a coastal defence structure (Fucella and Dolan, 1996; Komar, 1998; Short, 1999).

Rods and plugs of coloured sand (King, 1951; Williams, 1971; Jackson and Nordstrom, 1993; Anfuso *et al.*, 2000) or rods with a loose-fitting washer (Greenwood and Hale, 1980; Anfuso *et al.*, 2003) were used to study microtopographic beach changes and the thickness of bottom sediments involved in littoral transport. Littoral transport was quantified with

1980; Anfuso *et al.*, 2003). Por otro lado, se han complementado estudios sobre transporte litoral con trazadores fluorescentes (Komar e Inman, 1970; Sunamura y Kraus, 1985) o radiactivos (Duane y James, 1980).

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio realizado en la playa de Faro, en la costa sur de Portugal (fig. 1). En concreto, se llevó a cabo una campaña durante el 13 de mayo de 2002 para analizar las variaciones microtopográficas y la profundidad de removilización a lo largo de un ciclo mareal. Dicha profundidad se considera como el espesor de la lámina de arena superficial afectada por los agentes energéticos (oleaje y corrientes) durante un ciclo mareal o un periodo más largo (por ejemplo un temporal) (King, 1951; Otvos, 1965; Williams, 1971). En este estudio, para su determinación, se han utilizado varillas con *cores* y arandelas, también con el fin de comparar entre sí dichas metodologías. El análisis de los datos obtenidos y de las características del oleaje del día, han permitido diferenciar los principales procesos morfodinámicos.

Área de estudio

La zona de estudio se localiza en la playa de Faro, en el Algarve, al sur de Portugal. Dicha playa se ubica en la flecha de Ancão, la más occidental de las islas barreras y flechas litorales que forman el sistema de la Ría Formosa (fig. 1). Este sistema presenta una superficie de 170 km² y, además de islas barreras y flechas, incluye una zona de marisma y una gran laguna costera que se comunica con el océano mediante seis canales de marea, encontrándose dos de éstos estabilizados por espigones.

La flecha de Ancão presenta orientación N 55°W, 10 km de longitud y de 50 a 250 m de anchura. Se trata de un ambiente muy frágil y dinámico que migra hacia el sureste, caracterizado por la presencia de un único cordón dunar destruido en la parte central de la flecha durante los años cincuenta y sesenta por la construcción de estructuras antrópicas y que sufre, en dicho tramo, periódicos desbordamientos que llevan a un retroceso medio de la línea de costa de 1 m año⁻¹ (Pilkey *et al.*, 1989; González *et al.*, 2002).

Las playas están formadas por sedimentos arenosos de granulometría media (media = 0.38 mm), compuestos esencialmente por granos de cuarzo con bajos porcentajes de carbonatos. La zona estudiada se ubica en la parte oriental de la flecha, cerca del canal de marea que la separa de la Isla de Barretta, en un tramo libre de construcciones humanas, con un cordón dunar fijado por vegetación. El día de la campaña la playa presentó una berma bien desarrollada con una gran pendiente intermareal y una terraza de bajamar (fig. 2), siendo parecida al tipo “playa de terraza de bajamar” (*low tide terrace beach*) de la clasificación de Masselink y Short (1993).

La marea tiene periodicidad semidiurna y presenta rango mesomareal, variando su amplitud de 0.5 m, en mareas muertas, hasta un máximo de 3.5 m, en mareas vivas. Los vientos dominantes soplan del suroeste con velocidades que eventualmente superan los 60 km hora⁻¹ y, secundariamente,

fluorescent (Komar and Inman, 1970; Sunamura and Kraus, 1985) or radioactive tracers (Duane and James, 1980).

This paper presents the results of a field assessment carried out at Faro beach, southern Portugal (fig. 1), on 13 May, 2002, to quantify microtopographic changes and disturbance depth during a single tidal cycle. Disturbance is defined as the thickness of bottom sediments affected by hydrodynamic processes (waves and currents) during a single tidal cycle or a larger time span (e.g., a storm) (King, 1951; Otvos, 1965; Williams, 1971). In this study, disturbance depth was measured with rods and plugs and washers, in order to compare results obtained with the two different methodologies. Analysis of the data obtained and of wave characteristics allowed the principal morphodynamic processes to be identified.

Study area

The study zone is located in Faro, Algarve, southern Portugal (fig. 1). The beach is situated in the Ancão littoral spit, the westernmost one of the spits and barrier islands that form the Ría Formosa system (fig. 1). This system is about 170 km² and includes sandy spits, barrier islands, salt marshes and a wide lagoon with six tidal inlets, two of them stabilized by jetties.

Ancão spit is oriented N 55°W, 10 km long and 50–250 m wide. It is composed of a single dune ridge and constitutes a weak and dynamic environment that migrates southeastwards. In the central part of the spit, the dune ridge was destroyed by the construction of human structures during the 1950s and 1960s, and nowadays suffers periodic wash-over processes, with a mean shoreline retreat of 1 m yr⁻¹ (Pilkey *et al.*, 1989; González *et al.*, 2002).

The beaches are composed of medium sands (mean = 0.38 mm), rich in quartz with low percent of carbonates. The experiment was carried out in the eastern part of the spit, close to the inlet between Ancão and Barretta islands, in a coastal sector with a vegetated dune ridge free of human constructions. The day of the field assessment the beach presented a well developed berm with an important foreshore slope and a low tide terrace (fig. 2), visually similar to the “low tide terrace beach” of Masselink and Short’s (1993) model.

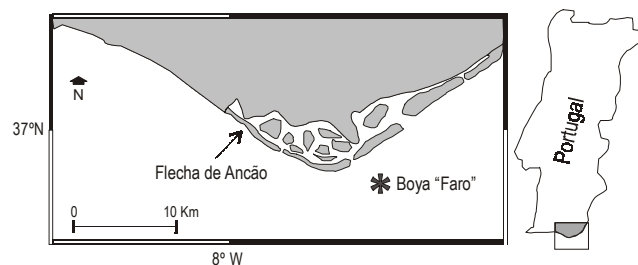


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio. Modificado de Ciavola *et al.* (1997).

Figure 1. Location map of the study area. Modified from Ciavola *et al.* (1997).



Figura 2. Foto de la playa de Faro en bajamar el día de la experiencia de campo (13 de mayo de 2002). Destaca la terraza de bajamar muy plana y el intermareal de gran pendiente.

Figure 2. Faro beach on the day of the field assessment (13 May, 2002) photographed during low tide conditions. The low tide terrace is very smooth and the foreshore presents an important slope.

del noroeste y del sureste (Ciavola *et al.*, 1997). El oleaje se aproxima a la costa del O (51.5% de frecuencia), SO (16.3%), S (2.1%), SE (25%) y del E (4.2%). La altura media significativa de las olas es de 0.9 m y su periodo de 5 seg., con olas de 2–3 m durante temporales del tercer cuadrante y olas de 1 m en condiciones de oleaje del segundo cuadrante (Pessanha y Pires, 1981; Pires y Pessanha, 1986). El transporte litoral predominante en la zona es de oeste hacia este aunque, a veces, debido al gran ángulo de ataque del oleaje del segundo cuadrante, se observan importantes corrientes litorales hacia el oeste (Balouin, 2001).

Metodología

Características oceanográficas

La curva teórica de marea para el día del experimento se calculó mediante el programa WxTide que tiene un punto de validación en Faro. Los datos de altura y periodo de ola, máximo y significativo, se obtuvieron a partir de los registros de la boya oceanográfica Faro perteneciente a la red de medida portuguesa, y ubicada en las proximidades de la zona de estudio (fig. 1). Además, para valorar dichos datos, durante la realización de la campaña, se llevó a cabo un seguimiento del oleaje y de las corrientes litorales. La altura de la ola en rompiente se midió repetidamente mediante un jalón, mientras que el periodo se determinó contando el número de olas que pasaban por un punto fijo en un tiempo de dos minutos (Davis, 1977). Las corrientes litorales se midieron hacia tierra de la línea de rompiente mediante un flotador que no se vio afectado por el viento.

Características morfosedimentarias

La morfología de la playa se obtuvo mediante un levantamiento 3D de la zona de estudio realizado con una estación total. Estos datos sirvieron para calcular la pendiente de la zona

The tide is semidiurnal with a mesotidal range varying from 0.5 m, during neap tides, to a maximum value of 3.5 m, during spring tides. Dominant winds blow from the southwest, with mean values lower than 60 km hr⁻¹ and, secondly, from the northwest and southeast (Ciavola *et al.*, 1997). Waves approach the coast from the west (51.5% of frequency), southwest (16.3%), south (2.1%), southeast (25%) and east (4.2%). Mean significant wave height is 0.9 m with a 5-s associated period. Values of wave height during storms are about 2–3 m when approaching from the third quadrant, and 1 m when approaching from the second quadrant (Pessanha and Pires, 1981; Pires and Pessanha, 1986). Dominant littoral drift in the study zone blows eastward, but an opposite one, related to the great attack angle of waves from the east, is also sometimes observed (Balouin, 2001).

Methods

Oceanographic characteristics

The theoretical tidal curve for the day of the experiment was calculated with the WxTide program that has a validation point at Faro. Data of maximum and significant wave heights and periods were obtained by the oceanographic buoy Faro, which belongs to the Portuguese recording network and is located close to the study zone (fig. 1). Moreover, to confirm such data, wave height and period and currents were surveyed several times during the field assessment. Breaking wave height was surveyed with a pole and period was obtained counting the number of waves that passed a fixed point during 2 min (Davis, 1977). Longshore currents were recorded landward of the breaking line with a floater that was not affected by wind-related processes.

Morphosedimentary characteristics

Beach morphology was recorded through a 3D survey carried out with a total station and the data obtained were used to calculate the slope of the low tide terrace and the foreshore zone. Beach morphodynamic behaviour was predicted using two classical parameters. Surf Similarity (Battjes, 1974) predicts the type of breaking wave:

$$\xi = \tan \beta / (H_b / L_0)^{0.5} \quad (1)$$

where $\tan \beta$ is the beach slope, H_b is the breaking wave height and L_0 is the wave length in deep-water conditions. Breaking type ranges from collapse and surging ($\xi > 2$) to plunging ($0.4 < \xi < 2$) and spilling ($\xi < 0.4$) (Fredsoe and Deigaard, 1992). Surf Scaling was also employed (Guza and Inman, 1975):

$$\varepsilon = \sigma^2 H_b / 2 g \tan^2 \beta \quad (2)$$

where σ is the radian frequency of waves ($2\pi/T$) and g the acceleration of gravity. This parameter differentiates between

intermareal y de la terraza de bajamar. Para la caracterización morfodinámica de la playa se utilizaron dos parámetros clásicos. El índice de similaridad de *surf* (Battjes, 1974) predice el tipo de rompiente:

$$\xi = \tan\beta / (H_b/L_0)^{0.5} \quad (1)$$

donde $\tan\beta$ es la pendiente de la playa, H_b es la altura de la ola en rompiente y L_0 la longitud de onda del oleaje en aguas profundas. El tipo de rompiente varía desde ondulado y colapso ($\xi > 2$), a voluta ($0.4 < \xi < 2$) y derrame ($\xi < 0.4$) (Fredsoe y Deigaard, 1992). Se utilizó también el parámetro de escala de rompiente (*surf scaling*; Guza e Inman, 1975):

$$\varepsilon = \sigma^2 H_b / 2 g \tan^2 \beta \quad (2)$$

donde σ es la frecuencia del oleaje en radianes ($2\pi/T$) y g la aceleración de gravedad. El parámetro permite diferenciar entre condiciones reflectivas ($\varepsilon < 2.5$), intermedias ($2.5 < \varepsilon < 30$) y disipativas ($\varepsilon > 30$) (Guza e Inman, 1975).

La profundidad de removilización se midió mediante varillas y arandelas y testigos de arena marcada que se había tomado previamente en la misma playa, lavado y coloreado con un tinte rojo (Greenwood y Hale, 1980; Jackson y Nordstrom, 1993; Ciavola *et al.*, 1997; Anfuso *et al.*, 2000, 2003). Se insertaron catorce varillas en la superficie de la playa intermareal durante la bajamar de la mañana, a lo largo de dos perfiles paralelos entre sí (fig. 3). Los cambios microtopográficos se midieron repetidamente mediante una regla sobre cada varilla, y la profundidad de removilización se obtuvo a partir del espesor de arena depositado tras el ciclo mareal sobre los

reflective ($\varepsilon < 2.5$), intermediate ($2.5 < \varepsilon < 30$) and dissipative surf zone conditions ($\varepsilon > 30$) (Guza and Inman, 1975).

Disturbance depth was surveyed with rods and washers and plugs of marked sand previously gathered at the beach, washed and coloured with a red dye (Greenwood and Hale, 1980; Jackson and Nordstrom, 1993; Ciavola *et al.*, 1997; Anfuso *et al.*, 2000, 2003). Fourteen rods were inserted into the intertidal beach surface during the morning low tide, along two parallel profiles (fig. 3). Microtopographic changes were periodically surveyed at the rods with a metric rule and disturbance depth was obtained measuring the thickness of new sand deposited at the end of the tidal cycle upon the eroded plugs or the washers. Both methodologies were used to identify differences in the disturbance values recorded. Lastly, samples of beach sediments were gathered and sieved in the laboratory to calculate statistical parameters (Folk and Ward, 1957).

Results

Wave climate

Figure 4(a–c) shows the theoretical tidal curve, the maximum and significant wave heights and associated periods recorded by the offshore buoy. These data were similar to the ones measured during the field study, reflecting the changes in wave climate during the day.

During slack water level conditions, i.e. from the morning low tide at 09:50 until 12:30 h (fig. 4a), wave height was small ($H_s = 25$ cm, fig. 4b) and period relatively high (5–6 s, fig. 4c), such values being related to swell waves approaching with a very small angle, which generated weak longshore currents (< 20 cm s⁻¹). Breaking processes took place in the low tide terrace under weak energetic conditions (fig. 2).

A sea breeze started to blow at 12:30 h from the west. It is quite common in the area (Balouin, 2001) and is probably linked to tidal variations, in this case the fast tidal rise (fig. 4a). Sea waves, related to the aforementioned breeze, changed considerably, increasing until 16:00 h, remaining constant during high tide conditions and finally increasing once again until the night low tide, i.e. the end of the field survey (fig. 4a, b). According to this, mean values of wave height of 50 cm and an associated period of 4 s (fig. 4b, c), typical of erosive sea waves, were considered representative for the whole day. Finally, waves were characterized by plunging breakers in the upper and low foreshore, and by approaching fronts forming an angle with the shoreline of 2–3°, which gave rise to associated strong longshore currents (40 cm s⁻¹).

Beach morphology and sedimentology

Beach morphology and distribution of rods are presented in figures 2 and 4. The dry beach and upper foreshore were characterized by a well developed berm, with a great longshore continuity. Neither cusps nor cross-shore channels, quite common in the study beach (Balouin *et al.*, 2001), were observed. Foreshore slope was a reflective one (Wright and Short, 1984),

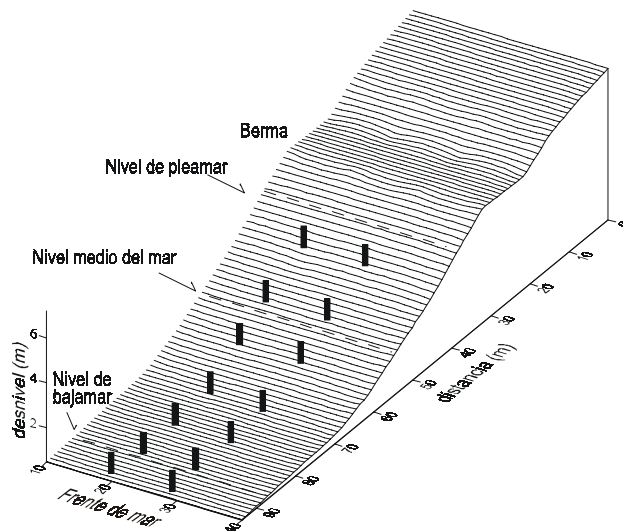


Figura 3. Morfología de la playa con la ubicación de las varillas y los niveles del mar.

Figure 3. Beach morphology with the location of the rods and sea levels.

testigos parcialmente erosionados y las arandelas. Se utilizaron ambas metodologías para evidenciar posibles diferencias entre sí.

Finalmente, se tomaron muestras de sedimentos en las diferentes partes de la playa que fueron analizadas en el laboratorio mediante tamizado en seco para la obtención de los parámetros estadísticos (Folk y Ward, 1957).

Resultados

Clima marítimo

En la figura 4a, b, c se presentan, respectivamente, la curva de marea y los datos de altura de ola máxima y significativa y de periodo asociado, registrados el día del experimento en el campo. Dichos datos resultaron muy parecidos a los medidos en la playa durante la evaluación y reflejaron los cambios observados en el clima marítimo a lo largo del día.

Durante la bajamar de la mañana, registrada a las 9:50 horas, y hasta aproximadamente las 12:30 horas, intervalo de tiempo en el que el nivel del mar sufrió leves variaciones (fig. 4a), se registraron olas de pequeña altura ($H_s = 25$ cm, fig. 4b) y periodo relativamente alto (5–6 seg., fig. 4c) que correspondían a un oleaje de mar de fondo que llegaba a la playa perpendicularmente, con corrientes litorales asociadas inferiores a los 20 cm/seg. Las rompientes del oleaje tenían lugar en derrame en la terraza de bajamar, en condiciones poco energéticas (fig. 2).

A partir de las 12:30 h se levantó una brisa de poniente, muy típica de esta zona (Balouin, 2001), que podría estar relacionada con los cambios de marea, en este caso con el inicio de su fase de subida más rápida. Dicha brisa generó un oleaje que fue aumentando hasta aproximadamente las 16:00 horas, se mantuvo casi constante durante la pleamar de la tarde, y fue aumentando otra vez hasta la bajamar de la noche, es decir el final del experimento de campo. Valores medios de altura de ola significativa de 50 cm y periodo de 4 seg. (fig. 3b, c), típico del mar de viento, se consideraron representativos del oleaje del día. Finalmente, los frentes de ola presentaban un ángulo de ataque de 2–3° y daban lugar a condiciones erosivas, con rompientes en voluta en la zona intermedia y alta del intermareal, y fuertes corrientes litorales (unos 40 cm seg⁻¹).

Morfología y sedimentología de la playa

La morfología de la playa y la distribución de las varillas se presentan en las figuras 2 y 3. La playa seca y el intermareal se caracterizaron por una berma bien desarrollada, de gran continuidad lateral, sin que se registraran morfologías típicas de esta playa como canales de desagüe o cúspides (Balouin *et al.*, 2001). La pendiente de la zona intermareal, claramente reflectiva (Wright y Short, 1984), se caracterizó por valores ($\tan \beta = 0.11$) muy parecidos a los observados en una costa cercana por Ciavola *et al.* (1997) y Balouin *et al.* (2001).

La zona más baja del intermareal (fig. 3), constituida por una terraza de bajamar, se caracterizaba por una pendiente muy

with values ($\tan \beta = 0.11$) close to the ones measured at a nearby beach by Ciavola *et al.* (1997) and Balouin *et al.* (2001).

The lower part of the foreshore (fig. 3), composed of a low tide terrace, showed a very smooth slope ($\tan \beta = 0.02$), common of dissipative beach conditions (Wright and Short, 1984).

Grain size distribution reflected beach morphology, confirming the direct relation between beach slope and grain size (Bascom, 1951; Shih and Komar, 1994). Medium (mean, $M = 0.47$ mm), well sorted sands were observed in the upper foreshore, while very coarse sands ($M = 1.24$ mm) and gravels

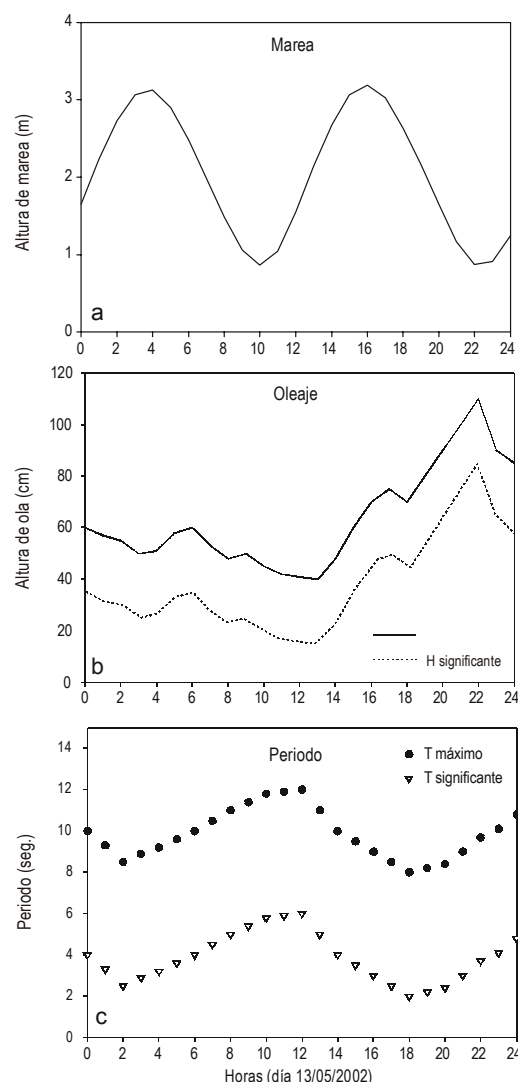


Figura 4. Variaciones de marea referidas al cero hidrográfico (a), altura máxima significativa (b) y periodo asociado (c) del oleaje registrado por la boyea oceanográfica Faro el día de la prueba de campo.

Figure 4. Tidal variations referred to datum (a), significant wave heights (b) and associated periods (c) recorded by the offshore buoy Faro during the field assessment.

suave ($\tan \beta = 0.02$), típica de playas disipativas (Wright y Short, 1984).

La distribución de los sedimentos reflejaba la morfología de la playa, confirmando la relación directa entre pendiente y granulometría, observada por varios autores (Bascom, 1951; Shih y Komar, 1994). En particular, la parte alta del intermareal se caracterizó por arenas medias (media, $M = 0.47$ mm), bien clasificadas, y la parte media y baja del intermareal se caracterizó por arenas muy gruesas ($M = 1.24$ mm) y gravas ($M = 2.61$ mm), ambas muy mal clasificadas y con cola de gruesos constituida por gravas y pequeños cantos, respectivamente. La terraza de bajamar estuvo constituida por arenas medias casi finas ($M = 0.29$ mm), muy bien clasificadas.

Caracterización morfodinámica

Los parámetros morfodinámicos empleados reflejaron una buena aproximación a las observaciones directas realizadas durante la campaña. En condiciones de bajamar, el índice de similitud de *surf* evidenció rompientes en derrame ($\xi = 0.01$) y el de escala de rompiente un estado claramente disipativo ($\epsilon = 36.48$). Estos valores se deben a las características del oleaje y a la baja pendiente de la terraza de bajamar que dio lugar a claras condiciones disipativas, con una zona de rompiente muy ancha. Para el intermareal, durante condiciones de pleamar, la similitud de *surf* evidenció rompientes en voluta ($\xi = 0.55$) y el de escala de rompiente un estado intermedio ($\epsilon = 9.08$) próximo a reflectivo, condicionado por la elevada pendiente de la playa que favorece una rompiente en voluta.

Variaciones microtopográficas

En la figura 5 se presentan los cambios microtopográficos y la profundidad de removilización observados durante la campaña. A pesar de la escasa altura de ola se registraron importantes cambios topográficos relacionados con el carácter erosivo del mar de viento y con la rompiente en voluta. Los valores máximos de erosión se registraron en la parte alta del intermareal (fig. 5b), debido a la mayor acción erosiva que ejerce el oleaje durante la pleamar, relacionada con el choque entre las olas incidentes y el refluo (Williams, 1971) que tiene lugar durante mucho tiempo en la misma zona, en cuanto el nivel del mar queda en una posición estable. Los sedimentos erosionados se depositaron en la parte baja del intermareal evidenciando un transporte hacia el mar y un basculamiento del perfil alrededor del nivel medio del mar, típico de playas reflectivas (Nordstrom y Jackson, 1992). Finalmente, las varillas más bajas registraron cambios topográficos muy pequeños, típicos de playas disipativas, con rompientes en derrame.

Profundidad de removilización

En cuanto a la profundidad de removilización, ésta registró valores bajos (2 cm) en la terraza de bajamar (fig. 5c), típicos de playas disipativas. Por otro lado, se observaron valores de unos 5–6 cm en la parte alta del intermareal y valores elevados

($M = 2.61$ mm), very poorly sorted and characterized by a tail of pebble sediments, were observed, respectively, in the medium and low foreshore zones. Finally, the low tide terrace was composed of very well sorted medium sands ($M = 0.29$ mm), very close to fine sands.

Morphodynamic behaviour

Calculated morphodynamic parameters reflected very well the processes observed. During low tide conditions, surf similarity showed spilling breakers ($\xi = 0.01$) and Surf Scaling a very dissipative state ($\epsilon = 36.48$). These values are linked to wave characteristics and the smooth slope of the low tide terrace, factors that gave clear dissipative conditions, with a very wide surf zone.

During high tide, Surf Similarity, calculated for the foreshore zone, predicted plunging waves ($\xi = 0.55$) and Surf Scaling estimated an intermediate beach state ($\epsilon = 9.08$), very close to a reflective one, and linked to the high beach slope that favoured plunging breakers.

Microtopographic variations

Figure 5 shows microtopographic changes and disturbance depth values recorded at the end of the field assessment. Despite the low wave height values, important topographic changes were recorded and related to the erosive character of sea waves and plunging breakers. Maximum changes were observed in the upper foreshore (fig. 5b) due to severe wave action during high tide conditions, linked to the interaction between backwash and incident waves (Williams, 1971) that acts for a long time in the same foreshore zone during slack water level conditions. Eroded sediments were deposited in the low foreshore, reflecting an offshore transport and a beach profile pivoting process around mean sea level, common in reflective beach states (Nordstrom and Jackson, 1992). On the other hand, lower rods, located in the low tide terrace, recorded small topographical changes (fig. 5a, b) related to spilling breakers.

Disturbance depth

Smaller values (≈ 2 cm) were recorded at the low tide terrace, important values (5–6 cm) were observed in the upper foreshore and the highest values (≈ 12 cm) occurred in the low foreshore (fig. 5c), the last ones due to the action of high waves during falling tide conditions (fig. 4a, b).

Regarding the differences recorded in the upper and low foreshore zones, it is important to indicate that if the topographic changes and disturbance values observed in the upper foreshore are added (fig. 5b, c; both referred to the initial beach surface), values of about 12 cm are obtained, similar to those recorded in the low foreshore. These results confirm that plunging breakers homogeneously affected the whole foreshore,

(~12 cm) en la parte baja del mismo (fig. 5c), debido a la acción de olas altas durante el refluo de la marea (fig. 4b). En realidad, si se suman los cambios topográficos y los valores de removilización obtenidos en el intermareal alto (fig. 5b, c), ambos referidos a la superficie inicial de la playa, se obtienen valores de unos 12 cm, parecidos a los del intermareal bajo. Esto permite afirmar que la rompiente en voluta del oleaje afectó de la misma manera a todo el intermareal, produciendo valores de removilización parecidos, disimulados por los cambios topográficos. Hay que destacar también que la máxima removilización en la zona alta y media del intermareal se observó al traspasar la línea de rompiente caracterizada por rompientes en voluta.

Por otro lado, en otras evaluaciones de campo llevadas a cabo en la misma playa se ha visto cómo la removilización, bajo condiciones de ausencia total de oleaje, está relacionada con la migración del *plunge steep* y/o de ondulaciones de grandes dimensiones, de unos 8–10 cm de altura.

Finalmente, en cuanto a la comparación entre valores de profundidad de removilización obtenidos utilizando varillas y *cores* y arandelas, se observaron diferentes tendencias. Por un lado se registraron valores iguales donde prevalecía arena media, en el intermareal alto, mientras que las arandelas dieron valores mayores de removilización en el intermareal medio y bajo, constituido por arenas gruesas y gravas, siendo, sin embargo, las diferencias constantes y del orden de 2–3 cm, a pesar del aumento de la granulometría de la playa (fig. 6).

Discusión

Las observaciones de campo y los valores de removilización medidos durante la campaña permitieron reconstruir los cambios microtopográficos y el estado morfodinámico de la playa que varió a lo largo del día dependiendo de las características del oleaje y de la morfología de la playa (Ferreira *et al.*, 1998, 2000; Anfuso *et al.*, 2000).

En bajamar, durante condiciones de estabilidad del nivel del mar, olas de pequeña altura asociadas a mar de fondo formaron una amplia zona de rompiente en la terraza de bajamar, caracterizada por rompientes en derrame que no afectan mucho los sedimentos de fondo (Van Rijn, 1989 y Beach y Stenberg, 1996).

Al comienzo de la fase de subida rápida de la marea, una brisa de poniente generó un mar de viento energético, que actuó hasta el final del experimento. La gran pendiente del intermareal y las características de las olas dieron lugar a rompientes en voluta, muy erosivas, que afectaron considerablemente los sedimentos de fondo, coincidiendo los valores de máxima removilización con el paso de la línea de rompiente.

La zonación del sedimento reflejó los procesos energéticos: se registraron tamaños más finos en la terraza de bajamar, arena media en la parte alta del intermareal donde el flujo y el refluo actúan durante la pleamar, y se observaron arena gruesa y grava a los niveles medio y bajo del intermareal, es decir, en

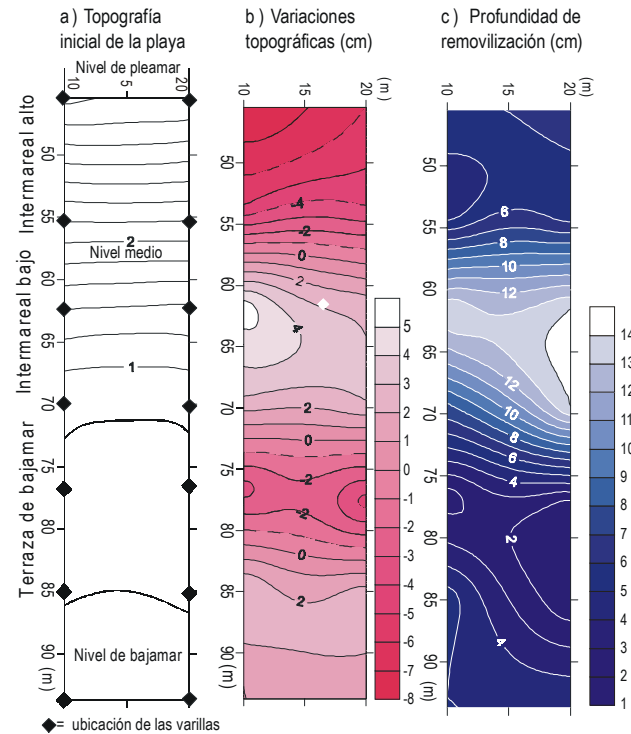


Figura 5. Ubicación de las varillas (a), cambios microtopográficos - con las zonas que sufren erosión delimitadas por líneas discontinuas (b) y profundidad de removilización (c) registrados al final del ciclo mareal.

Figure 5. Location of the rods (a), microtopographic changes with eroded areas bordered by dashed lines (b) and disturbance depth (c) recorded at the end of the tidal cycle.

giving similar disturbance depth values dissimulated by microtopographic changes. Maximum disturbance depth in the foreshore zone was always related to the breaking wave line (characterized by plunging breakers) position and migration during flood and ebb tide.

According to observations carried out in other field assessments at the same beach during particularly weak energetic conditions, it is possible to state that, in such conditions, maximum disturbance depth is related to plunge step or large ripple (8–10 cm in height) migration across the foreshore.

Lastly, different results were obtained in the comparison of the disturbance depth values recorded with plugs and washers. On the one hand, identical values were observed in the upper foreshore characterized by medium sands. On the other hand, higher values were recorded for washers than plugs in the mean and low foreshore zones because these parts are composed of coarse sand and gravel, respectively, the differences being of about 2–3 cm, values that remained constant despite grain size increasing along the foreshore (fig. 6).

Discussion

The field observations and disturbance values measured during the assessment allowed the reconstruction of the

las porciones del intermareal donde tiene lugar la migración de la línea de rompiente y del *plunge step*.

Por otro lado, para predecir el comportamiento morfodinámico de una playa y su respuesta frente a la acción del oleaje resulta especialmente interesante establecer una relación entre pendiente y profundidad de removilización, expresada como porcentaje de altura de la ola en rompiente. En la figura 7 se presentan los valores obtenidos por varios autores en playas disipativas (King, 1951; Anfuso *et al.*, 2000), intermedias y reflectivas (Otvos, 1965; Jackson y Nordstrom, 1993; Anfuso *et al.*, 2000) y los datos registrados en la experiencia que no se vieron afectados por cambios topográficos importantes, siendo estos representativos de la profundidad de removilización (Williams, 1971). Dichos datos se ajustan a una tendencia común: los valores bajos de removilización ($R = 4\% H_s$) observados en la terraza de bajamar se asocian a playas de baja pendiente (estados disipativos) y los valores altos ($R = 25\% H_s$), registrados en el intermareal bajo, a playas de mayor pendiente (estados intermedios o reflectivos).

Finalmente, la comparación de los resultados obtenidos con *cores* y arandelas permite afirmar que las dos metodologías no pueden ser utilizadas siempre de modo análogo puesto que los

microtographic changes and morphodynamic beach state, which changed during the tidal cycle, depending on wave characteristics and beach morphology (Ferreira *et al.*, 1998, 2000; Anfuso *et al.*, 2000).

During low tide, i.e. slack water level, low energetic conditions associated with swell waves formed a wide surf zone on the smooth low tide terrace, characterized by spilling breakers that did not significantly affect bottom sediments, according to observations of Van Rijn (1989) and Beach and Stenberg (1996).

At the beginning of the tidal deployment, a breeze formed energetic sea waves that continued until the end of the day. The important foreshore slope and wave characteristics gave rise to erosive plunging breakers that greatly affected bottom sediments, with maximum disturbance values recorded under the breaking line.

Grain size zonation reflected energetic processes: smaller grain size was observed in the low tide terrace; medium sand was observed in the upper part of the foreshore, where swash and backwash took place at high tide conditions; and coarse sand and gravel were observed in the mean and low foreshore parts, which are the foreshore portions affected by breaking line and plunge step migrations.

In addition, in order to predict beach morphodynamic behaviour, it is interesting to obtain a relation between wave

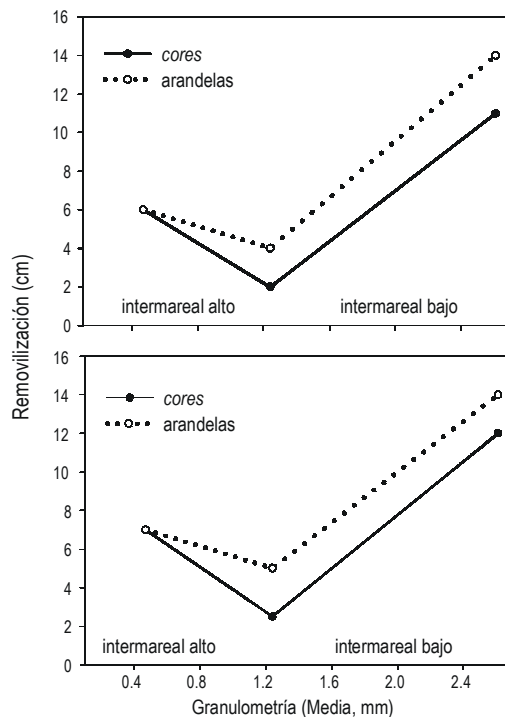


Figura 6. Relación entre granulometría, muestras recogidas en el intermareal alto y bajo en correspondencia con las tres varillas más altas de los dos perfiles estudiados, y valores de removilización registrados con *cores* y arandelas.

Figure 6. Relationships between grain size, samples gathered in the upper and low foreshore at the three upper rods belonging to the two profiles studied, and values of disturbance depth obtained with *cores* and washers.

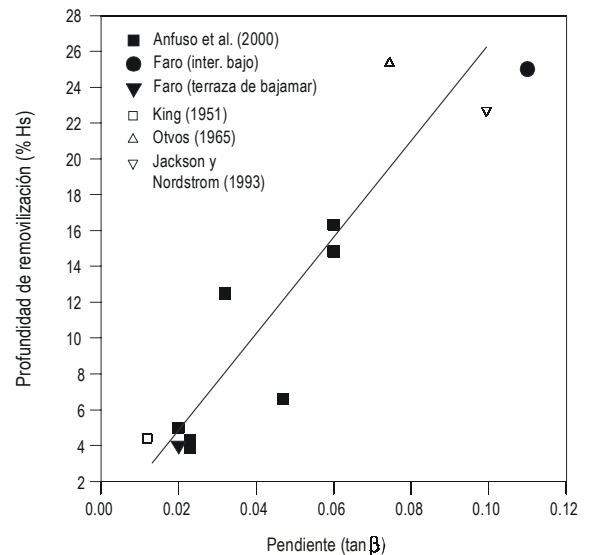


Figura 7. Relación entre profundidad de removilización, expresada como porcentaje de altura significativa de ola en rompiente, y pendiente de playa. Valores observados por varios autores en playas disipativas, intermedias y reflectivas, y media de los valores observados en el intermareal bajo y en la terraza de bajamar el día de la experiencia de campo.

Figure 7. Relationship between disturbance depth, expressed as percent of significant breaking wave height, and beach slope. Values recorded by different authors in dissipative, intermediate and reflective beaches and mean values recorded during the field assessment at the low foreshore and at the low tide terrace.

resultados obtenidos con un método u otro dependerán de la granulometría de la playa, dando las arandelas valores de removilización más elevados, pero constantes, a partir aproximadamente del límite arena gruesa-muy gruesa, debido a condiciones hidrodinámicas elevadas de interacción del flujo con la fracción más gruesa del sedimento y las arandelas.

Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda prestada en las labores de campo por los miembros del CIACOMAR de la Universidade do Algarbe (Faro) y M.C. Roper, y las sugerencias y comentarios realizados por dos revisores anónimos. Este trabajo es una contribución al Grupo PAI nº 328.

Referencias

- Anfuso, G., Gracia, F.J., Andrés, J., Sánchez, F., Del Río, L. and López-Aguayo, F. (2000). Depth of disturbance in mesotidal beaches during a single tidal cycle. *J. Coast. Res.*, 16(2): 446–457.
- Anfuso, G., Martínez, J.A., Sánchez, F., Benavente, J., Andrés, J. and López-Aguayo, F. (2003). Morphodynamics of swash bars in mesotidal exposed beaches of SW Spain. *Cienc. Mar.*, 29(1): 35–49.
- Balouin, Y. (2001). Tidal inlets and adjacent coasts: Example of the Barra Nova, South Portugal. Ph.D. thesis, Université Bordeaux I, 299 pp.
- Balouin, Y., Howa, H. and Michel, D. (2001). Swash platform morphology in the ebb-tidal delta of the Barra Nova inlet, South Portugal. *J. Coast. Res.*, 17(4): 784–791.
- Bascom, W.N. (1951). The relationship between sand size and beach face slope. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 32: 866–874.
- Battjes, J.A. (1974). Surf Similarity. *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng. ASCE*, pp. 466–480.
- Beach, R. and Stenberg, R. (1996). Suspended sediment transport in the surf zone: Response to breaking waves. *Cont. Shelf Res.*, 15: 1989–2003.
- Ciavola, P., Taborda, R., Ferreira, O. and Dias, J.A. (1997). Field observations of sand-mixing depths on steep beaches. *Mar. Geol.*, 141: 147–156.
- Davis, R.A. Jr. (1977). *Principles of Oceanography*. Addison-Wesley, 505 pp.
- Duane, D.B. and James, W.R. (1980). Littoral transport in the surf zone elucidated by eulerian sediment tracer experiment. *J. Sediment. Petrol.*, 50(3): 929–942.
- Ferreira, O., Bairos, M., Pereira, H., Ciavola, P. and Dias, J.A. (1998). Mixing depth levels and distribution on steep foreshores. *J. Coast. Res.*, 26: 292–296.
- Ferreira, O., Ciavola, P., Taborda, R., Bairos, M. and Dias, J.A. (2000). Sediment mixing depth determination for steep and gentle foreshores. *J. Coast. Res.*, 16(3): 830–839.
- Folk, R.L. and Ward, W.C. (1957). Brazos River Bar. A study on the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.*, 27: 3–26.
- Fredsoe, J. and Deigaard, R. (1992). *Mechanics of coastal sediment transport*. Advanced Series on Ocean Engineering, 3. World Scientific, 366 pp.
- Fucella, J.E. and Dolan, R.E. (1996). Magnitude of subaerial beach disturbance during northeast storms. *J. Coast. Res.*, 12: 420–429.
- González, R., Alveirinho Dias, J. and Ferreira, O. (2002). Recent rapid evolution of the Guadiana Estuary mouth (southwestern Iberian Peninsula). *J. Coast. Res.*, SI 36: 516–527.

height and disturbance depth, expressed as a percentage of wave height. Figure 7 shows values recorded by different authors at dissipative (King, 1951; Anfuso *et al.*, 2000), intermediate and reflective beaches (Otvos, 1965; Jackson and Nordstrom, 1993; Anfuso *et al.*, 2000), and values obtained in this study that did not suffer important topographic changes, according to Williams (1971). A common trend can be observed (fig. 7): low disturbance values ($R = 4\% H_s$) recorded in the low tide terrace were characteristic of dissipative beach states, and high disturbance values ($R = 25\% H_s$) measured in the low foreshore were common in intermediate and reflective beach states.

Lastly, results for disturbance recorded with plugs and washers are not always comparable because they are linked to grain size characteristics. In fact, rods measured higher but constant disturbance values where coarser sediments were observed, the limit between coarse and very coarse sands representing the approximate threshold value. Such higher values are related to the interactions of strong hydrodynamic flow conditions with the coarser fraction of sediments and the washers.

Acknowledgements

The authors thank the members of the CIACOMAR group at the University of Algarve in Faro and M.C. Roper for their help in the field work, and are grateful to two anonymous referees for their comments and suggestions that improved the quality of the manuscript. This paper is a contribution to the PAI Group RNM-328.

English translation by the authors.

- Greenwood, B. and Hale, P.B. (1980). Depth of activity, sediment flux and morphological change in a barred beach environment. In: S.B. McCann (ed.), *The Coastline of Canada*. *Geol. Surv. Can.*, 80(10): 89–109.
- Guza, R.T. and Inman, D.L. (1975). Edge waves and beach cusps. *J. Geophys. Res.*, 80(21): 2997–3012.
- Jackson, N.L. and Nordstrom, K.F. (1993). Depth of activation of sediments by plunging breakers on a steep sand beach. *Mar. Geol.*, 115: 143–151.
- King, C.A.M. (1951). Depth of disturbance of sand on sea beaches by waves. *J. Sediment. Petrol.*, 21(3): 131–140.
- Komar, P.D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice-Hall, 544 pp.
- Komar, P.D. and Inman, D.L. (1970). Longshore sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.*, 75: 5514–5527.
- Masselink, G. and Short, A.D. (1993). The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *J. Coast. Res.*, 9: 785–800.
- Nordstrom, K.F. and Jackson, N.L. (1992). Two-dimensional change on sandy beaches in meso-tidal estuaries. *Z. Geomorph.*, 36(4): 465–478.
- Otvos, E.G. (1965). Sedimentation-erosion cycles of single tidal periods on Long Island Sound beaches. *J. Sediment. Petrol.*, 35(3): 604–609.

- Pessanha, L. and Pires, O. (1981). Elementos sobre o clima de agitacao mariítima na costa sul do Algarve. Monogr. Meteorol. Geofis., 67 pp.
- Pilkey, O.H. Jr., Neal, W.J., Monteiro, J.H. and Dias, J.M.A. (1989). Algarve barrier islands: A non coastal-plain system in Portugal. *J. Coast. Res.*, 5(2): 239–261.
- Pires, O. and Pessanha, L. (1986). Wave power, climate of Portugal. In: D. Evans and A., Falcão (eds.), *Hydrodynamic of Ocean Wave-energy Utilization*. IUTAM Symp., Lisbon, 1985, pp. 157–167.
- Shih, S. and Komar, P. (1994). Sediments, beach morphology and sea cliff erosion within an Oregon coast littoral cell. *J. Coast. Res.*, 10(1): 144–157.
- Short, A.D. (1999). *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Wiley, 379 pp.
- Sunamura, T. and Kraus, N.C. (1985). Prediction of average mixing depth of sediment in the surf zone. *Mar. Geol.*, 62: 1–12.
- Van Rijn, L. (1989). *Handbook of Sediment Transport by Currents and Waves*. Delft Hydraulics, Delft, Netherlands.
- Williams, A.T. (1971). An analysis of some factors involved in the depth of disturbance of beach sand by waves. *Mar. Geol.*, 11: 145–158.
- Wright, L.D. and Short, A.D. (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.*, 56: 93–118.