



Revista de Gestão Costeira Integrada -  
Journal of Integrated Coastal Zone  
Management

E-ISSN: 1646-8872

rgci.editor@gmail.com

Associação Portuguesa dos Recursos  
Hídricos

Abreu, Tiago; Sancho, Francisco; Silva, Paulo A.  
Ondas assimétricas em praias com barra  
Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management,  
vol. 11, núm. 3, 2011, pp. 297-306  
Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos  
Lisboa, Portugal

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340134004>

- Como citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Ondas assimétricas em praias com barra <sup>\*,\*\*</sup>

### *Asymmetrical waves in barred beaches*

Tiago Abreu <sup>@,1</sup>, Francisco Sancho <sup>2</sup>, Paulo A. Silva <sup>3</sup>

#### RESUMO

Muitas vezes as praias naturais apresentam uma barra que afecta significativamente alguns fenómenos como, por exemplo, a transformação e reflexão das ondas, a dissipação de energia na rebentação e a reformação de ondas após o atravessamento da barra. Estas transformações estão também associadas à não linearidade das ondas. Neste trabalho faz-se uma caracterização do escoamento oscilatório junto ao fundo em praias com um perfil do tipo barra-fossa. Para o efeito, recorreu-se a dados provenientes de um trabalho experimental efectuado no canal de ondas da Universidade Politécnica da Catalunha e de uma campanha de campo, denominada por DUCK94, efectuada numa ilha barreira localizada na Carolina do Norte (EUA). São analisados registos temporais de velocidades provenientes de correntómetros electromagnéticos colocados junto ao fundo e em posições diferentes da coluna de água. A análise compreende a identificação de assimetrias das velocidades e acelerações, associadas à capacidade de mobilização de sedimentos junto ao fundo. Essas características são identificadas, permitindo efectuar uma análise da evolução espacial desses parâmetros aquando da propagação das ondas para a costa.

Os resultados das duas experiências são concordantes, mostrando um aumento de características não lineares próximas na zona da barra. Aí, verifica-se que as assimetrias associadas com a velocidade e a aceleração coexistem. Essas evidências resultam do estudo de momentos matemáticos estatísticos ou de parâmetros mais simples que requerem o conhecimento de alguns pontos singulares da série temporal de velocidades.

As características encontradas são importantes no que concerne à mobilização de sedimentos nas zonas costeiras, contribuindo para um melhor entendimento dos efeitos que levam à migração de barras litorais e, consequentemente, a alterações morfológicas.

**Palavras-chave:** Ondas assimétricas, ondas não lineares, velocidade orbital, aceleração das partículas, momentos estatísticos, praias com barra.

#### ABSTRACT

*Natural beaches often present a breaker bar that significantly affect physical phenomena like, for example, wave transformation, wave reflexion, energy dissipation due to breaking and wave reforming into the trough region. These transformations are associated to nonlinear wave modifications. In this work the oscillatory flow near the bottom of barred beaches is characterised. To achieve that purpose, the data obtained during two experiments were examined and processed: the data from a large-scale laboratory experiment carried out at the wave flume of the Polytechnic University of Catalonia (Barcelona, Spain) and the data from a nearshore field experiment, denoted by DUCK94, performed in*

@ - Autor correspondente: [tabreu@estu.ipv.pt](mailto:tabreu@estu.ipv.pt)

1 - Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu – ESTGV, Campus de Repeses, 3504-510, Viseu, Portugal. e-mail: [tabreu@estu.ipv.pt](mailto:tabreu@estu.ipv.pt)

2 - Laboratório Nacional de Engenharia Civil – DHA, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. e-mail: [fsancho@lnec.pt](mailto:fsancho@lnec.pt)

3 - CESAM / Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal. e-mail: [psilva@ua.pt](mailto:psilva@ua.pt)

\* Submissão: 16 Março 2011; Avaliação: 6 Abril 2011; Recepção da versão revista: 20 Julho 2011; Aceitação: 5 Ago 2011; Disponibilização on-line: 12 Agosto 2011

\*\* Artigo decorrente da comunicação efectuada no MEC 2011 - Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira, 3 a 4 de Fevereiro de 2011, Lisboa, Portugal

a barrier island located in Duck (North Carolina, USA). In the present analysis, we focus on the records provided by electromagnetic current meters placed near the bottom and at different cross-shore locations. The study undergoes through the identification of velocity and acceleration-skewnesses, which are recognised as forcing mechanisms capable to entrain and drive sediment transport. These characteristics are identified, and the cross-shore evolution of these parameters associated to wave propagation is assessed.

The results obtained for the two experiments are consonant, showing that nonlinear characteristics increase over the bar. In that region, one observes that velocity and acceleration-skewness coexist. This is evidenced through the study of the cross-shore evolution of some statistical moments and other simple parameters determined from the analysis of notable points in the velocity time series. The characteristics found in this work are important for sediment transport purposes, providing more insight about the effects that can cause sandbar migration and, thus, bed morphologic changes.

**Keywords:** asymmetrical waves, nonlinear waves, orbital velocity, particle acceleration, statistical moments, barred beaches.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, amiúde, verificam-se, mesmo a uma escala mundial, problemas relacionados com a erosão costeira e o transporte de sedimentos, para o qual a engenharia não tem soluções globais, o que resulta da complexidade dos processos que lhes são inerentes. Assim, a necessidade de perceber, prever e modelar os sistemas físicos costeiros torna-se imperativa para a engenharia costeira. Desta forma, a comunidade científica tem-se empenhado na análise dos processos complexos envolvidos na região próxima do leito, que são fundamentais para o entendimento e previsão do transporte de sedimentos.

O início do transporte sedimentar surge como resposta ao escoamento e consequentes tensões de atrito geradas junto dos fundos. As ondas marítimas e as correntes a elas associadas são os principais agentes responsáveis pelo trânsito sedimentar, em particular, nas praias e na plataforma costeira interna. A componente do transporte associada à onda é importante para descrever os processos de modificação da topografia de fundo na direcção transversal à costa, que intervêm, por exemplo, na formação de barras litorais. Este transporte resulta, em parte, da forma da onda: uma onda monocromática e sinusoidal, tal como descrita pela Teoria Linear de ondas, provoca um transporte nulo, já que o transporte (negativo) na fase da cava é simétrico ao transporte (positivo) na fase da crista. No entanto, as ondas observadas em mar alto não correspondem a esta descrição, ocorrendo ainda modificações mais significativas quando se aproximam da costa. A superfície livre muda de forma durante a sua propagação até próximo da costa, na qual se inclui o processo de rebentação. Aquando da diminuição da profundidade, a superfície livre evolui tornando-se pontiaguda sobre a crista da onda, mais larga na cava e relativamente íngreme na face da crista que irá rebentar (Cornish, 1898). Da mesma forma, a velocidade e aceleração orbitais, em profundidade, experienciam essas modificações progressivamente não lineares.

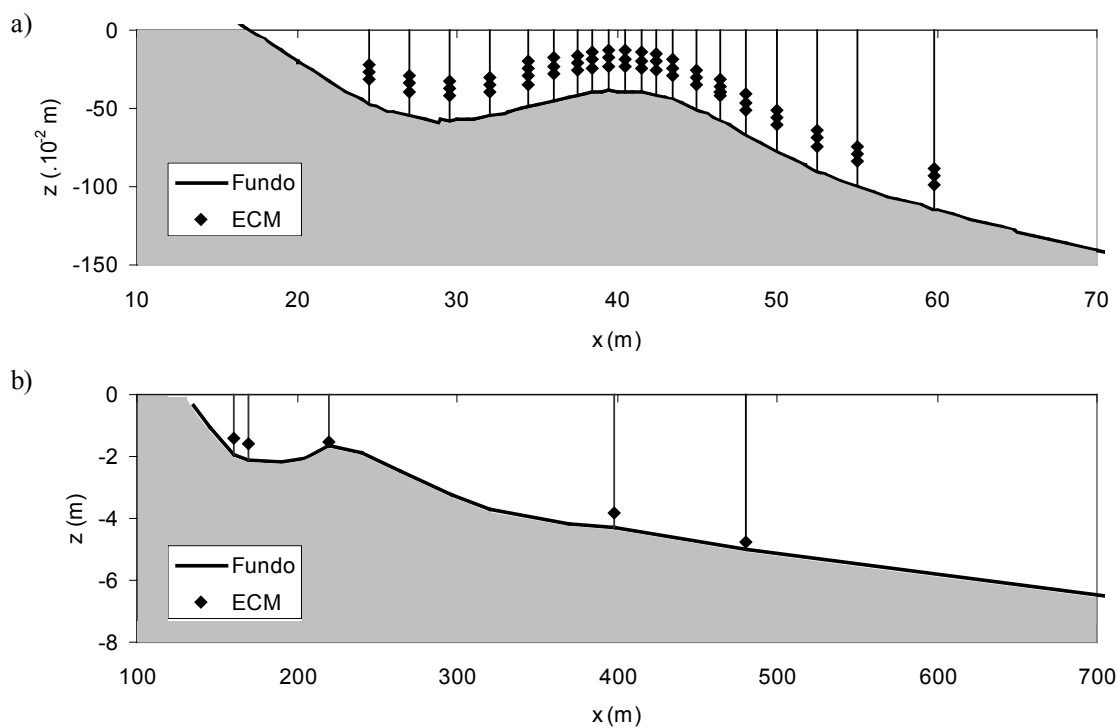
Estes processos desempenham, consequentemente, um papel muito importante no transporte sedimentar transversal à costa e nas modificações do perfil de fundo de praias, em resultado da mobilização e transporte de sedimentos pelas ondas. Os sedimentos poderão ser arrastados numa direcção preferencial, quer na de propagação da onda, quer na oposta,

dependendo fundamentalmente da forma das ondas e das correntes marítimas por elas induzidas (na ausência de vento). Importa, assim, saber prever a direcção e magnitude do transporte de sedimentos, que é responsável pela variação morfológica em zonas costeiras. Existe a convicção que o aprofundamento destes assuntos é de importância fulcral no que concerne à dinâmica sedimentar e, consequentemente, particularmente relevante para técnicos e gestores de zonas costeiras.

Recentemente, diversos investigadores têm realizado experiências em laboratório, analisando a influência da assimetria das ondas na quantificação do trânsito sedimentar (e.g., King, 1991; Ribberink & Al-Salem, 1994; O'Donoghue *et al.*, 2004; Watanabe & Sato, 2004; van der A. *et al.*, 2010; Silva *et al.*, no prelo). Neste trabalho pretende-se estudar as características não lineares de ondas assimétricas que podem ser encontradas em perfis de praia com barra. Para o efeito, apresentam-se e analisam-se evoluções temporais de velocidades e de acelerações orbitais medidas em dois conjuntos de dados, obtidos em praias do tipo barra-fossa (Birkemeier & Thornton, 1994; Sancho *et al.*, 2001). As assimetrias de velocidades e acelerações associadas ao transporte sedimentar perpendicular à linha de costa são identificadas, permitindo uma análise da variação espacial da evolução desses parâmetros aquando da propagação das ondas para a linha de costa.

## 2. DADOS EXPERIMENTAIS

Dois conjuntos de dados obtidos em praias do tipo barra-fossa são analisados neste trabalho. Um conjunto reporta um ensaio físico obtido por Sancho *et al.* (2001) no canal de ondas da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC). O outro, refere-se a uma campanha de campo efectuada pelo *Coastal and Hydraulics Laboratory of the U.S. Army Corps of Engineers*, denominada por DUCK94 (Birkemeier & Thornton, 1994), numa ilha barreira localizada na Carolina do Norte (EUA). Na Figura 1 apresentam-se os perfis de praia associados a cada uma das experiências, bem como a posição dos correntómetros electromagnéticos (ECM, *Electromagnetic Current Meters*) que foram utilizados na análise dos dados. Observa-se que o número de pontos de medições no caso da experiência laboratorial é bastante superior, possibilitando uma análise espacial mais detalhada.



**Figura 1.** Perfis de fundo (—) e posições dos velocímetros electromagnéticos (ECM) (◆): a) experiência UPC; b) Experiência DUCK94 (1 de Outubro).

**Figure 1.** Cross-shore bottom profiles (—) and positions of electromagnetic current meters (ECM) (◆): a) UPC experiment; b) DUCK94 experiment (October, 1st).

O canal de ondas da UPC tem 100m de comprimento, 3m de largura e 5m de profundidade. A análise realizada incide no conjunto de dados em modelo físico obtidos no âmbito do projecto “SPANWAVE-SPPORITA”, tendo como objectivo a medição das características da turbulência gerada pela rebentação de ondas, em praias de perfil com barra (Sancho *et al.*, 2001). A experiência efectuou-se sobre um fundo fixo que apresentava uma rugosidade semelhante à dos grãos de areia. Com o batedor de ondas posicionado em  $x = 86$  m geraram-se quatro tipos de agitação marítima: três ondas monocromáticas (Testes A, B, e C) e um estado irregular (Teste D). As características adoptadas fizeram com que as ondas rebentassem antes da barra  $x \geq 40$  m e se reformassem na zona da fossa. A Tabela 1 resume as características das ondas junto ao batedor consideradas nos quatro testes, onde  $H_s$  representa a altura significativa de onda em frente ao batedor de ondas,  $T$  simboliza o período médio da onda e  $x_b$  a posição onde ocorreu a rebentação das ondas. No caso de ondas irregulares, o período médio considerado foi obtido através da análise no tempo (onda a onda). Outras medições e características do ensaio poderão ser encontradas com mais detalhe em Sancho *et al.* (2001) e Sancho (2002). A frequência de aquisição de dados iguala 8 Hz em todos os testes. Para os dados do canal de ondas, os resultados doravante apresentados são as médias dos valores obtidos (pelos vários sensores) em cada posição, cujas profundidades de medição variam entre 14 e 99 cm.

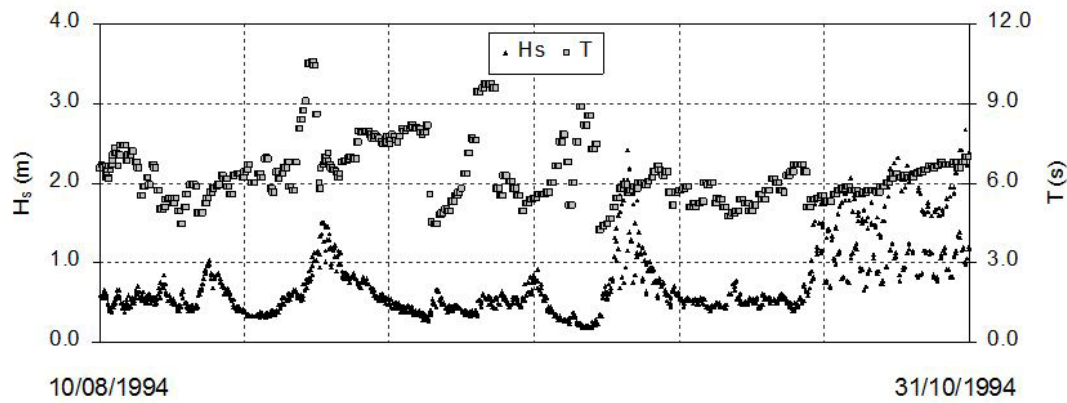
A campanha de campo DUCK94, realizada numa ilha barreira localizada na Carolina do Norte (EUA) entre os

**Tabela 1.** Sumário das condições de onda no canal de ondas da UPC (Sancho, 2002).

**Table 1.** Summary of the wave conditions carried out at the UPC wave flume (Sancho, 2002).

Condição da onda	$H_s$ (m)	$T$ (s)	$x_b$ (m)
A (regular)	0.22	2.48	40.5
B (regular)	0.22	3.48	42
C (regular)	0.42	3.48	46.5
D (irregular)	0.28	2.17	45

meses de Agosto e Outubro de 1994, reporta-se a fundos móveis com características de perfil de praia barra-fossa (Birkemeier & Thornton, 1994). A taxa de aquisição dos dados foi de 2 Hz e os dados dos correntómetros analisados correspondem a medições efectuadas a menos de 60 cm do fundo (<http://dksrv.usace.army.mil/jg/dk94dir>). Na Figura 2 apresenta-se a variação temporal de  $T$  e  $H_s$  ao longo dos três meses da campanha, obtida para um ponto localizado a 7.3 m de profundidade (em relação ao nível médio da superfície livre da água). Observa-se que 95% dos valores de  $H_s$  encontram-se entre 0.25 e 2.07 m e os de  $T$  entre 4.6 e 9.4 s.



**Figura 2.** Altura significativa de ondas e período médio de onda medidos a 7.3 m de profundidade na experiência DUCK94.

**Figure 2.** Significant wave heights and mean wave periods measured at 7.3 m depth for DUCK94 experiment.

Visto que o propósito deste trabalho visa a caracterização de assimetrias associadas ao movimento orbital, removeram-se as oscilações associadas a ondas de longo período dos dados das velocidades horizontais ( $u$ ) de ambas as experiências. Para o efeito, utilizou-se um filtro “passa-altos” com uma frequência de corte igual a cerca de metade da frequência de pico, tendo-se adoptado valores iguais a 0.25 e 0.05 Hz para as experiências de UPC e DUCK94, respectivamente. Adicionalmente, para a experiência de UPC, empregou-se um filtro “passa-baixos” com uma frequência de corte de 2 Hz, com o intuito de serem removidas oscilações de pequenos períodos associadas à turbulência gerada na zona de rebentação e espalho (*surf*).

Para obtenção e análise das séries temporais de acelerações,  $a$ , diferenciaram-se numericamente no tempo os valores filtrados das séries temporais de velocidades,  $u$ . As acelerações assim obtidas são acelerações locais em cada ponto ( $a = \partial u / \partial t$ ).

### 3. CARACTERIZAÇÃO DAS ASSIMETRIAS

Reconhece-se que as assimetrias de velocidades e acelerações estão associadas à mobilização do transporte sedimentar e, consequentemente, à variação morfológica das praias e em particular, à movimentação de barras (*e.g.*, Elgar *et al.*, 2001; Hoefel & Elgar, 2003; Houser & Greenwood, 2007). Neste trabalho, pretende-se mostrar que estas características não lineares podem ser encontradas em perfis de praia com barra. A sua caracterização pode ser feita de duas formas distintas: através do cálculo de momentos estatísticos das séries temporais ou da obtenção de parâmetros simples que relacionam alguns pontos singulares de cada onda dessas séries (p. ex., as magnitudes na crista e na cava).

Os momentos matemáticos estatísticos de  $u$  e  $a$  utilizados neste estudo são o desvio padrão,  $\sigma$ , e a assimetria,  $\mu$ . Atendendo a um registo discreto de uma série temporal de uma variável genérica  $x$ , com  $N$  valores, as suas definições obedecem a:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2}{N}} \quad (1)$$

$$\mu_{3,x} = \frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^3}{N \sigma_x^3} \quad (2)$$

Enquanto o desvio padrão tem a mesma dimensão das grandezas às quais se refere, a assimetria é um parâmetro adimensional. Trata-se de uma medida que quantifica a forma da função de distribuição de ocorrências que está relacionada com a assimetria da onda relativamente a um eixo horizontal e assume um valor nulo quando os dados se assemelham a uma distribuição gaussiana. Essa situação corresponde a uma distribuição simétrica em torno da média, como o caso de uma onda sinusoidal. Um valor positivo é representativo de uma distribuição assimétrica com uma cauda que se estende para os valores positivos, indicando um maior peso destes, como o caso de uma onda de Stokes de segunda ordem. O contrário acontece para valores negativos.

Outros parâmetros habitualmente empregues para classificação das assimetrias são o coeficiente de assimetria de velocidades,  $R$ , e de acelerações,  $\beta$ . O seu cálculo pressupõe, somente, o conhecimento dos valores máximos e mínimos das séries temporais:

$$R = \frac{u_{máx}}{u_{máx} - u_{mín}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{a_{máx}}{a_{máx} - a_{mín}} \quad (4)$$

Como o parâmetro  $\beta$  depende da série de acelerações  $a$ , sensível ao tipo de filtro escolhido aquando da remoção das altas frequências, pode ser substituído por um parâmetro equivalente,  $\alpha$  (Suntoyo *et al.*, 2008):

$$\alpha = 2T_{pc}/T \quad (5)$$

onde  $T_{pc}$  representa o intervalo de tempo medido entre o zero ascendente e a ocorrência de  $u_{máx}$ .



Os parâmetros  $R$  e  $\alpha$  podem ainda ser convertidos noutros dois parâmetros  $r$  e  $\theta$  que exprimem também as assimetrias do movimento orbital. O parâmetro  $r$  designa-se por índice assimétrico ou de não linearidade e  $\theta$  é um parâmetro de forma (Elgar & Guza, 1985). Em Abreu *et al.* (2010) fornecem-se parametrizações que permitem a obtenção de  $r$  e  $\theta$  em função de  $R$  e  $\alpha$ :

$$R \approx \frac{a_1 + b_1 \cdot r + r^3}{c_1 - d_1 \cdot r + e_1 \cdot r^2 + r^3} \quad (6)$$

$$\alpha \approx \frac{a_3 + b_3 \cdot r + r^3}{c_3 - d_3 \cdot r + e_3 \cdot r^2 + r^3} \quad (7)$$

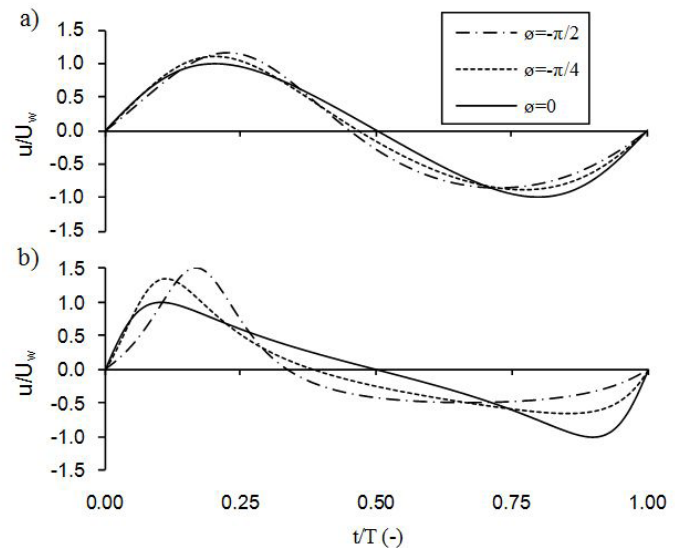
onde  $a_i, b_i, c_i, d_i$  e  $e_i$  são coeficientes de ajuste para determinados valores específicos de  $\theta$  ( $i=1, 3$ ). No apêndice B de Abreu *et al.* (2010) é apresentado um exemplo numérico de conversão de  $(R, \alpha)$  em  $(r, \theta)$ .

Adicionalmente, Abreu *et al.* (2010) apresentaram uma expressão analítica eficaz na reprodução de ondas não lineares através da inclusão de  $r$  e  $\theta$ . Nomeadamente, a velocidade orbital obedece a:

$$u(t) = U_w \sqrt{1-r^2} \frac{\left[ \frac{\sin(\omega t) + \frac{r \sin \phi}{1 + \sqrt{1-r^2}}}{[1 - r \cos(\omega t + \phi)]} \right]} \quad (8)$$

sendo  $\omega$  a frequência angular ( $\omega = 2\pi/T$ ) da onda e  $U_w$  a amplitude da velocidade orbital ( $U_w = (u_{\max} - u_{\min})/2$ ).

Na Figura 3 apresentam-se as variações temporais da velocidade para alguns casos particulares de  $r$  e  $\theta$ , resultantes da aplicação da Equação (8), facilitando a percepção do significado destes parâmetros. No painel superior fixou-se  $r$  em 0.3 e no inferior em 0.8. Em ambos os casos variou-se  $\theta$  entre  $-\pi/2$ ,  $-\pi/4$  e 0. No caso de  $\theta = -\pi/2$ , as ondas contêm apenas assimetria nas velocidades ( $|u_{\max}| \neq |u_{\min}|$ , mas  $|a_{\max}| = |a_{\min}|$ ). Constituem exemplo dessas ondas as obtidas pela Teoria de Ondas Cnoidal (primeira ordem), cuja velocidade associada à crista possui maior magnitude, mas de menor duração que a velocidade associada à cava. O caso de  $\theta = 0$  é representativo de ondas “em dente de serra”, características da zona de *surf*, reflectindo assimetria apenas nas acelerações ( $|u_{\max}| = |u_{\min}|$ , mas  $|a_{\max}| \neq |a_{\min}|$ ). O caso de  $\theta = -\pi/4$  representa um valor intermédio dos anteriores, resultando em ondas com assimetrias em  $u$  e  $a$ , simultaneamente. A observação dos dois painéis evidencia que uma redução (em módulo) do valor de  $r$  faz diminuir as não linearidades. No caso particular de  $r = 0$  a onda converte-se numa onda sinusoidal como na Teoria Linear de ondas. Contudo, note-se que esta forma é pouco representativa de ondas em águas pouco profundas onde, geralmente coexistem assimetrias de velocidades e acelerações (e.g., Ruessink *et al.*, 2009).



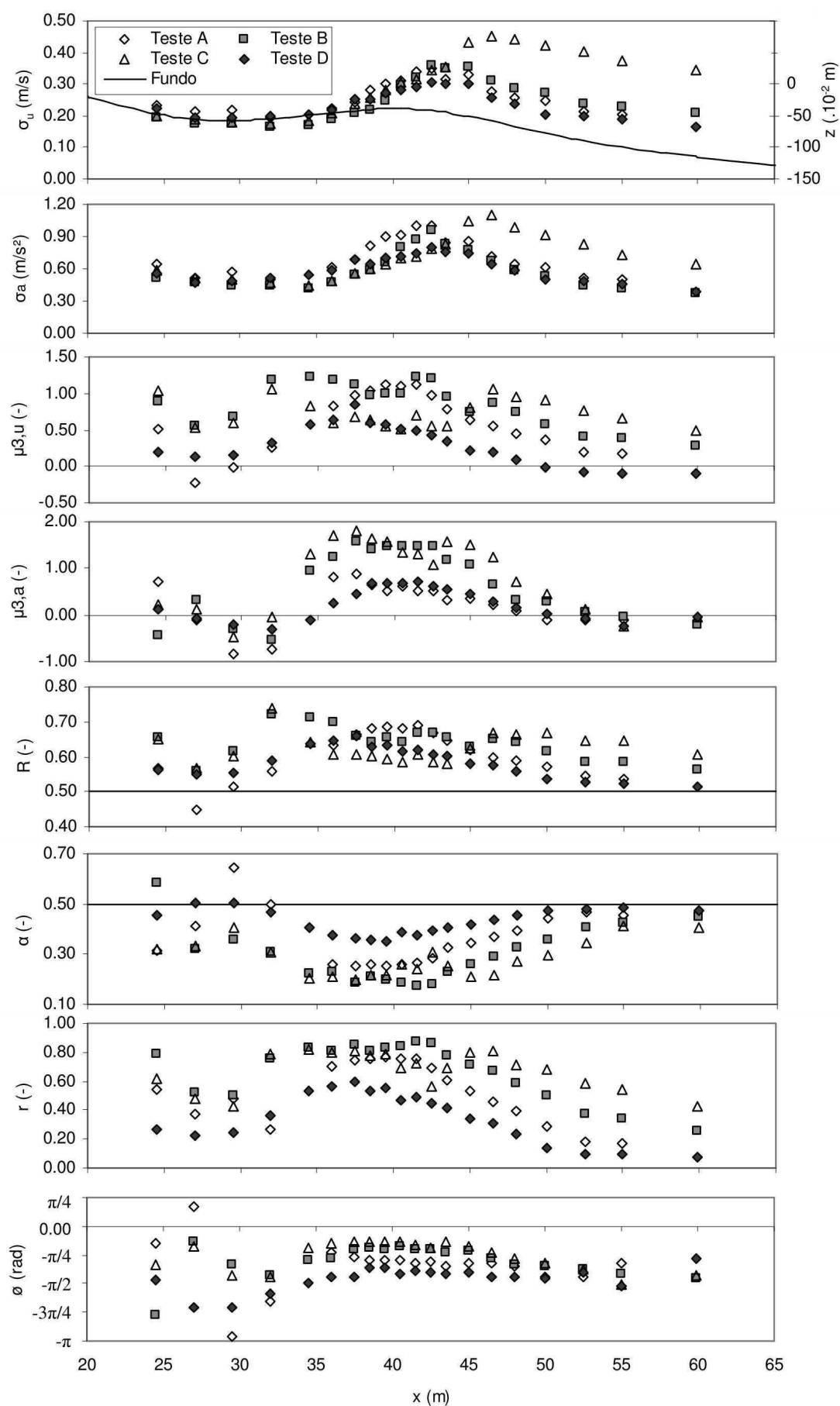
**Figura 3.** Velocidade orbital instantânea de acordo com a Equação (8) para  $\theta = -\pi/2, -\pi/4$  e 0: (a) com  $r = 0.3$ ; (b) com  $r = 0.8$ .

**Figure 3.** Instantaneous orbital velocity through Equation (8) for  $\theta = -\pi/2, -\pi/4$  and 0: (a) with  $r = 0.3$ ; (b) with  $r = 0.8$ .

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta a variação espacial dos valores médios de  $\sigma_u, \sigma_a, \mu_{3,u}, \mu_{3,a}, R, \alpha, r$  e  $\theta$  para os quatro testes realizados no canal de ondas de UPC. Observa-se que  $\sigma_u$  e  $\sigma_a$  apresentam um comportamento muito sincrónico. À medida que a profundidade diminui (com o decrescimento de  $x$ ), os valores crescem continuamente até à zona onde ocorre a primeira rebentação das ondas (conferir com  $x_b$  na Tabela 1). Sendo o desvio padrão uma medida que calcula as flutuações relativamente ao valor médio, a sua variação está directamente associada à energia e à altura de onda. Dessa forma, esse aumento deve-se ao empolamento da onda causado pela diminuição da profundidade. Posteriormente à rebentação, os valores de  $\sigma_u$  e  $\sigma_a$  diminuem até  $x \approx 32$  m, devida à dissipação da energia da onda, voltando a crescer novamente até onde foram efectuados os registos das velocidades. O novo aumento do desvio padrão deve-se à reformação das ondas durante o atravessamento da cava, originando, posteriormente, uma segunda rebentação mais perto da linha de costa (Sancho, 2002).

Relativamente à assimetria  $\mu_{3,u}$ , verifica-se que os testes A, B, e C ostentam valores superiores a zero para as maiores profundidades, denotando algumas não linearidades presentes na velocidade orbital. Exceptua-se o teste D que apresenta valores próximos de zero nos pontos mais ao largo. Porém, à medida que nos aproximamos da barra, os valores vão sofrendo um aumento, ocorrendo os máximos nas mesmas posições de  $x_b$ , sensivelmente. No teste D, em que a rebentação ocorre não apenas no mesmo ponto, mas de forma mais dispersa, verifica-se que  $\mu_{3,u}$  continua a crescer até  $x=37.5$  m. No entanto, contrariamente ao sucedido com



**Figura 4.** Variação espacial dos valores médios de  $\sigma_u$ ,  $\sigma_a$ ,  $\mu_{3,u}$ ,  $\mu_{3,a}$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\theta$  para os quatro testes da experiência UPC.  
**Figure 4.** Cross-shore variations of the average values of  $\sigma_u$ ,  $\sigma_a$ ,  $\mu_{3,u}$ ,  $\mu_{3,a}$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  and  $\theta$  for the four UPC test experiments.

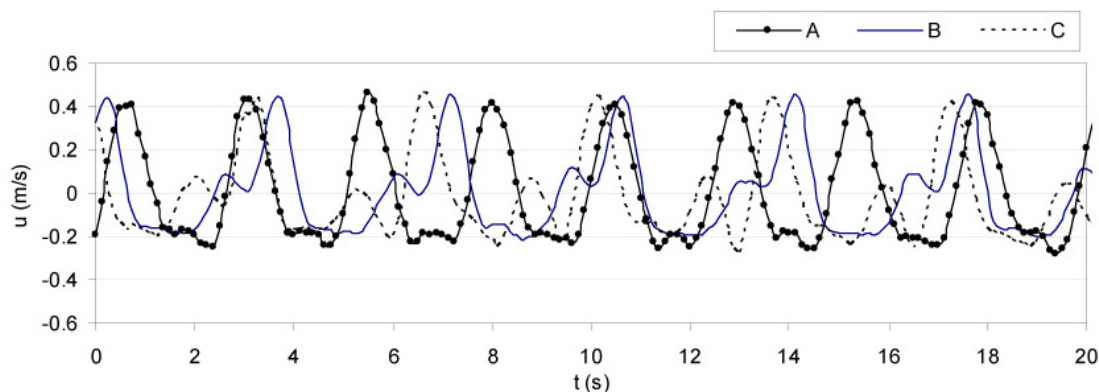
o desvio padrão onde os valores decresciam imediatamente após  $x_b$ , observa-se que os valores de  $\mu_{3,u}$  mantêm-se elevados em toda a região da barra. No teste A verifica-se um aumento progressivo de  $\mu_{3,u}$  até, sensivelmente, à crista da barra onde se dá a rebentação das ondas. De seguida, assiste-se a uma diminuição gradual de  $\mu_{3,u}$  para a zona da fossa, atingindo, inclusive, valores negativos a  $x = 27$  m. No caso dos testes de maior período (testes B e C), o aumento e persistência de valores elevados de  $\mu_{3,u}$  verificam-se até  $x = 32$  m, associados também à transferência de energia da onda principal para harmónicas de maior frequência (Sancho, 2002), indicando que toda a região da barra está sujeita a fortes assimetrias. Posteriormente, os valores de  $\mu_{3,u}$  diminuem no final da fossa, aproximando-se a onda da onda linear, voltando a aumentar mais próximo da linha de costa onde as ondas sofrerão nova rebentação.

No que concerne à assimetria  $\mu_{3,a}$ , para as maiores profundidades, encontram-se valores praticamente nulos como no processo linear gaussiano. Contudo, à medida que nos aproximamos da barra os valores aumentam, conforme em  $\mu_{3,u}$ . Esta variação é consonante em todos os testes e corrobora as observações efectuadas por Elgar *et al.* (2001) onde os valores máximos da assimetria da aceleração ocorrem perto da crista da barra. Assinala-se também que após a rebentação das ondas o valor de  $\mu_{3,a}$  cai bruscamente para valores negativos, antes de voltar a aumentar perto da linha de costa. É de notar ainda que os máximos dos desvios padrões estão claramente desfasados no espaço dos máximos das assimetrias, significando que as não linearidades crescem com o empolamento da onda e mantêm-se elevadas durante o seu processo de rebentação e propagação sobre a barra, ao contrário da altura de onda (e desvios padrão) que sofre uma redução imediata e contínua durante este processo.

Os outros parâmetros  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\theta$  corroboram os resultados dos momentos estatísticos e ajudam a compreender a evolução da forma das ondas. Um valor de  $R$  igual a 0.5 indica que oscilação é simétrica em termos da velocidade orbital ( $|u_{máx}| = |u_{mín}|$ ). A quase totalidade dos testes da Figura 4 apresenta valores de  $R$  superiores a 0.5 indicando que a velocidade da crista é superior à da cava ( $|u_{máx}| > |u_{mín}|$ ). A evolução

espacial deste parâmetro é muito similar a  $\mu_{3,u}$ , evidenciando as assimetrias de  $u$ . O parâmetro  $\alpha$  mostra que à medida que nos aproximamos da barra o valor desce abaixo de 0.5, representativo do caso de uma onda sinusoidal. Significa que a forma da onda se inclina gradualmente para a frente (com a face frontal da crista mais inclinada), passando a assimetria da aceleração a ter um papel igualmente preponderante. Neste caso, observa-se que o comportamento de  $\alpha$  é sincrónico com o de  $\mu_{3,u}$ , registando-se os maiores resultados na zona da barra. Estas combinações de assimetrias de  $u$  e  $a$  são bastante frequentes em águas pouco profundas como evidenciam os dados de campo de Elfrink *et al.* (2006) e Ruessink *et al.* (2009).

Os valores de  $r$  e  $\theta$  consolidam as observações anteriores. O aumento de  $r$  na zona da barra e, posteriormente, próximo da linha de costa, confirma o agravamento das não linearidades nesses locais. Nota-se que os maiores valores de  $r$  ocorrem para os testes de ondas regulares (Testes A, B e C), atingindo 0.87 no caso do teste B. No caso de ondas irregulares (Teste D), os valores encontrados são inferiores, atingindo 0.60 em  $x = 37.5$  m. Relativamente ao parâmetro de forma  $\theta$ , observa-se que a maioria dos valores situa-se entre  $-\pi/2$  e 0 para  $x > 32$  m, ou seja, dentro da gama de valores apresentada na Figura 3. Para as maiores profundidades aproximamo-nos de  $\theta \sim -\pi/2$ , correspondente a ondas apenas com assimetria nas velocidades, mas gradualmente os valores reduzem-se até quase  $\theta \sim -\pi/8$  na zona da barra. Significa que o movimento orbital transita entre ondas com preponderância para cristas acentuadas, mas de curta duração, para formas de ondas próximas das de em dente de serra. O facto de não se atingir  $\theta = 0$  significa que as assimetrias de velocidades não desaparecem, passando a associar-se às da aceleração. Mais próximo da linha de costa, as formas não se enquadram no intervalo  $-\pi/2 < \theta < 0$ . Aí formas menos usuais têm lugar, pois representam valores de assimetrias onde  $|u_{mín}| > |u_{máx}|$  ou  $|a_{mín}| > |a_{máx}|$ . Tal como acima referido, estes valores atípicos resultam do surgimento das harmónicas de ordem superior que, localmente, em particular para as ondas monocromáticas, conduzem a formas de ondas que apresentam mais do que uma crista ou cava (Figura 5).



**Figura 5.** Séries temporais das velocidades horizontais registadas a 15 cm do fundo, nos testes A, B e C dos ensaios na UPC, em  $x=24.5$  m.

**Figure 5.** Time series of the horizontal velocities at 15 cm above the bottom in tests A, B, C of UPC experiments, at  $x=24.5$  m.



Na Figura 6 apresenta-se a evolução dos valores médios dos mesmos parâmetros para os dados de DUCK94. Como os dados reportam a três meses onde as condições de agitação variaram ao longo do tempo, acrescentaram-se barras de dispersão, assinalando o desvio padrão de cada parâmetro analisado. Nota-se que o número de pontos com medições neste caso é muito mais reduzido e que, no período em estudo, se observou uma migração da barra. Por exemplo, a posição da crista da barra variou de, aproximadamente,  $x = 210$  m no dia 03-08-1994 para  $x = 315$  m no dia 26-10-1994. Logo, o perfil de fundo indicado na Figura 6, referente a um levantamento efectuado a 01-10-1994, é meramente indicativo da posição da zona da barra durante o período estudado. Não obstante, os resultados médios e a reduzida dispersão dos valores indicam tendências análogas às apontadas para a experiência laboratorial UPC.

Os desvios padrão  $\sigma_u$  e  $\sigma_a$  da Figura 6 crescem à medida que nos aproximamos da zona da barra como reflexo do empolamento das ondas. Evolução semelhante é observada para  $\mu_{3,u}$  cujo máximo é apresentado sobre a crista da barra. Nota-se que ao largo ( $x \approx 884$  m)  $\mu_{3,u} \approx 0$ , sugerindo que as assimetrias da velocidade são praticamente inexistentes. Relativamente ao momento estatístico  $\mu_{3,a}$  verificam-se valores próximos de zero em quase todas as posições de  $x$ . Exceptua-se o registo sobre a barra ( $x \approx 220$  m) onde as assimetrias da aceleração nitidamente são mais pronunciadas como notado por Elgar *et al.* (2001). Os valores de  $R > 0.5$  e de  $\alpha < 0.5$  sugerem que as formas orbitais possuem combinações de assimetrias em velocidades e acelerações. Isso é confirmado pelo parâmetro de forma  $\theta$  cujos valores se encontram sempre no intervalo  $-\pi/2 < \theta < 0$ . Contudo, ao invés de um aumento de  $\theta$  à medida que nos aproximamos da linha de costa como observado em UPC, os valores sugerem o oposto. Denota-se com isso que, face à assimetria da aceleração, em DUCK94 a assimetria da velocidade parece assumir um papel de relevo aquando da propagação das ondas para a costa. A observação é coerente com a evolução espacial de  $\mu_{3,u}$  e  $\mu_{3,a}$  onde a generalidade de valores positivos ocorria apenas para  $\mu_{3,u}$ . Adicionalmente o parâmetro  $r$  denota que é sobre a região da barra que as não linearidades são maiores, atingindo-se o valor médio de  $r \approx 0.52$  na posição  $x \approx 220$  m.

As não linearidades do escoamento observadas nas duas experiências estão inextricavelmente ligadas ao transporte sedimentar (*e.g.*, Silva *et al.*, *no prelo*) e também à formação/migração de barras litorais (*e.g.*, Hoefel & Elgar, 2003). Frisa-se, no entanto, que a utilização destes parâmetros em análises morfológicas requer que se efectue uma caracterização mais pormenorizada dos mesmos, analisando a sua evolução temporal, atendendo às alterações batimétricas. Mormente, será interessante investigar se a análise onda a onda efectuada, difere ou corrobora a que resulta da análise espectral.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo faz-se uma descrição detalhada da hidrodinâmica do escoamento associado à propagação das ondas para um perfil de praia do tipo barra-fossa. Os resultados basearam-se em dados provenientes de um trabalho experimental efectuado no canal de ondas da Universidade Politécnica da Catalunha e de uma campanha

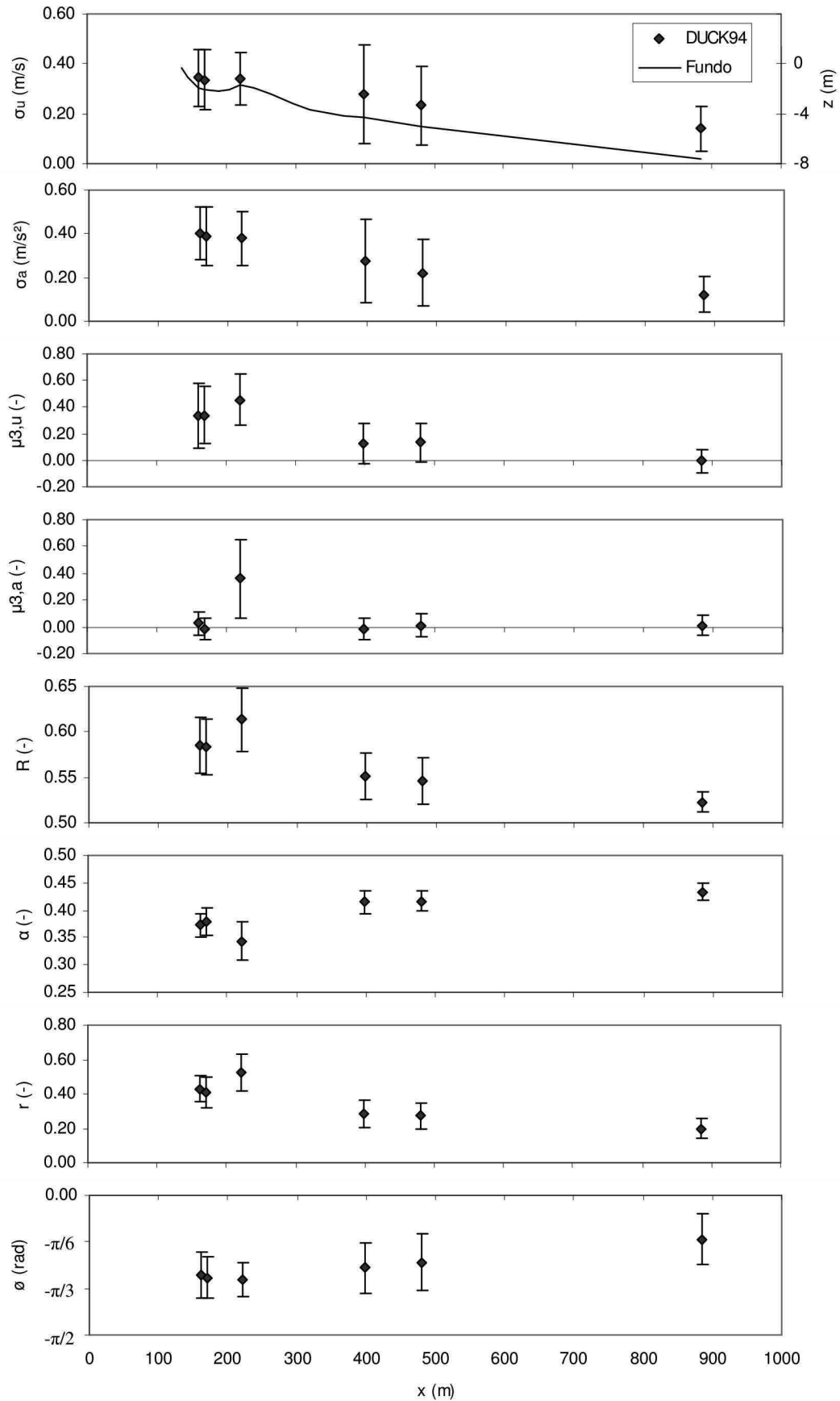
de campo efectuada numa ilha barreira localizada na Carolina do Norte (EUA), denominada por DUCK94. Para o efeito, processaram-se os dados de correntómetros electromagnéticos próximos do fundo. A análise baseia-se em registos de velocidade e aceleração instantâneas, os segundos obtidos por diferenciação temporal dos primeiros, em pontos localizados ao longo do perfil de praia. Estudou-se a evolução espacial de diversos parâmetros representativos da magnitude e assimetria das velocidades e acelerações, como  $\sigma_u$ ,  $\sigma_a$ ,  $\mu_{3,u}$ ,  $\mu_{3,a}$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\theta$ , que reflectem as características não lineares do movimento orbital.

Os resultados das duas experiências são bastante concordantes, comprovando-se o aumento de não linearidades à medida que as ondas se aproximam da barra. Nessa zona verifica-se que as assimetrias de velocidade e de aceleração coexistem simultaneamente. Nota-se que apesar do cálculo de  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\theta$  se basear em pontos conspícuos de cada onda da série temporal de velocidades, estes parâmetros revelam-se muito úteis no que concerne à caracterização das assimetrias do escoamento. Observa-se ainda que as não linearidades mantêm-se elevadas durante o seu processo de rebentação e propagação sobre a barra, ao contrário da altura de onda (e desvios padrão) que sofrem uma redução imediata e contínua durante este processo.

O conhecimento dessas não linearidades está intrinsecamente relacionado com o trânsito sedimentar (*e.g.*, Silva *et al.*, *no prelo*) e, desta forma, este trabalho contribui para um maior entendimento da dinâmica sedimentar induzida pelas ondas em praias com barra. Mormente, estas características estão associadas à migração de barras litorais (Houser & Greenwood, 2007), sendo relevantes para a calibração de modelos morfológicos de zonas costeiras.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor tem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através de uma bolsa de doutoramento (SFRH/BD/41827/2007). O trabalho foi realizado no âmbito do projecto de I&D “BRISA – BReaking waves Interaction with SAnd transport” (PTDC/ECM/67411/2006), financiado pela FCT. Os dados da UPC foram obtidos no projecto SPANWAVE parcialmente financiado pela “European Commission, Training and Mobility of Researchers Programme – Access to Large-scale Facilities”, sob o contrato ERBFMGECT9500073. Os dados de DUCK94 foram obtidos por “Field Research Facility, Field Data Collections and Analysis Branch, US Army Corps of Engineers, Duck, North Carolina”.



**Figura 6.** Variação espacial dos valores médios de  $\sigma_u$ ,  $\sigma_a$ ,  $\mu_{3,u}$ ,  $\mu_{3,a}$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  e  $\phi$  para a experiência DUCK94 entre Agosto e Outubro de 1994. As barras de erro assinalam o desvio padrão de cada parâmetro.

**Figure 6.** Cross-shore variations of the average values of  $\sigma_u$ ,  $\sigma_a$ ,  $\mu_{3,u}$ ,  $\mu_{3,a}$ ,  $R$ ,  $\alpha$ ,  $r$  and  $\phi$  for DUCK94 experiment between August and October of 1994. The error bars signalize the standard deviation obtained of each parameter.

## BIBLIOGRAFIA

- Abreu, T.; Silva, P.A.; Sancho, F.; Temperville, A. (2010) – Analytical approximate wave form for asymmetric waves. *Coastal Engineering*, 57:656-667. DOI:10.1016/j.coastaleng.2010.02.005.
- Cornish, V. (1898) – On sea beaches and sand banks. *Geology*, 2: 628-674.
- Birkemeier, W.A.; Thornton, E.B. (1994) – The DUCK94 nearshore field experiment. In: S.-Arcilla, A., Marcel, Steve J.F. & Kraus, Nicholas C. (eds.), *Coastal Sediments '94, Proceedings of an International Conference on the Role of the Large Scale Experiments in Coastal Research*, 815-821, ASCE (American Society of Civil Engineers), Reston, VA, U.S.A. ISBN: 9780784400432.
- Elfrink, B.; Hanes, D.M.; Ruessink, B.G. (2006) – Parameterization and simulation of near bed orbital velocities under irregular waves in shallow water. *Coastal Engineering*, 53(11):915-927. DOI:10.1016/j.coastaleng.2006.06.002.
- Elgar, S.; Guza, R.T. (1985) – Observations of bispectra of shoaling surface gravity waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 161:425-448. DOI:10.1017/S0022112085003007.
- Elgar, S.; Gallagher, E.L.; Guza, R.T. (2001) – Nearshore sandbar migration. *Journal of Geophysical Research*, 106(C6):11623-11627. DOI:10.1029/2000jc000389.
- Hoefel, F.; Elgar, S. (2003) – Wave-Induced Sediment Transport and Sandbar Migration. *Science*, 299(5614):1885-1887. DOI:10.1126/science.1081448.
- Houser, C.; Greenwood, B. (2007) – Onshore migration of a swash bar during a storm. *Journal of Coastal Research*, 23 (1):1-14. DOI:10.2112/03-0135.1.
- King, D. B. (1991) – Studies in oscillatory flow bedload sediment transport. 183p., Dissertação de Doutorado, University of California, CA, U.S.A.
- O'Donoghue, T.; Li, M.; Malarkey, J.; Pan, S.; Davies, A.G.; O'Connor, B.A. (2004) – Numerical and experimental study of wave generated sheet flow. Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, 1690-1702, World Scientific, Londres, U.K.. ISBN: 9812562982
- Ribberink, J.S.; Al-Salem, A.A. (1994) – Sediment transport in oscillatory boundary layers in cases of rippled beds and sheet flow – *Journal of Geophysical Research*, 99 (C6): 12707-12727. DOI:10.1029/94jc00380.
- Ruessink, B.G.; van den Berg, T.J.J.; van Rijn, L.C. (2009) – Modeling sediment transport beneath skewed-asymmetric waves above a plane bed. *Journal of Geophysical Research*, 114(C11021):1-14. DOI:10.1029/2009JC005416.
- Silva, P.A.; Abreu, T.; Van der A, D.A.; Sancho, F.; Ruessink, B.G.; Van der Werf, J.J.; Ribberink, J.S. (no prelo) – Sediment transport in non-linear skewed oscillatory flows: the Transkew experiments. *Journal of Hydraulic Research*, em impressão.
- Sancho, F.; Mendes, P.A.; Carmo, J.A.; Neves, M.G.; Tomasicchio, G.R.; Archetti, R.; Damiani, L.; Mossa, M.; Rinaldi, A.; Gironella, X.; Arcilla, A.S. (2001) – Wave hydrodynamics over a barred beach. In: Edge, B.L. & Hemsley, J.M. (eds.), *Ocean Wave Measurement and Analysis (2001) - Proceedings of the Fourth International Symposium Waves 2001*, 1170-1179, ASCE (American Society of Civil Engineers), Reston, VA, U.S.A. ISBN: 9780784406045.
- Sancho, F.E. (2002) – Surface wave statistics past a barred beach. 6th CONGRESS of SIMAI (Società Italiana di Matematica Applicata e Industriale), Chia Laguna, Roma, Itália.
- Suntoyo; Tanaka, H.; Sana, A. (2008) – Characteristics of turbulent boundary layers over a rough bed under saw-tooth waves and its application to sediment transport. *Coastal Engineering*, 55:1102-1112. DOI:10.1016/j.coastaleng.2008.04.007.
- Van der A, D.A.; O'Donoghue, T.; Ribberink, J.S. (2010) – Measurements of sheet flow transport in acceleration-skewed oscillatory flow and comparison with practical formulations. *Coastal Engineering*, 57:331-342. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.11.006.
- Watanabe, A.; Sato, S. (2004) – A sheet-flow transport rate formula for asymmetric forward-leaning waves and currents. Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, 1703-1714, World Scientific, Londres, U.K.. ISBN: 9812562982.