



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

PARAMETRIZAÇÃO DE ASSIMETRIAS DA VELOCIDADE E DA ACELERAÇÃO DE ONDAS EM PRAIAS COM BARRA

Tiago A. ABREU

Assistente 1^o triénio, DEC-ESTV - Instituto Politécnico de Viseu, Campus de Repeses,
3504-510 Viseu, +351232480586, tabreu@dcivil.estv.ipv.pt;

Francisco E. SANCHO

Inv. Auxiliar, LNEC-DHA, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351218443664,
fsancho@lnec.pt;

Paulo M. SILVA

Prof. Auxiliar, Dep.Física - Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193
Aveiro, +351234370822, psilva@fis.ua.pt

RESUMO

À medida que uma onda se propaga para a costa e a profundidade diminui, a mesma torna-se progressivamente mais não linear, deformando-se a superfície livre no sentido de as cristas se tornarem mais pontiagudas e as cavas mais achatadas. Resulta ainda num aumento da assimetria das ondas, sendo que estas se tornam mais íngremes na face das cristas que irão rebentar. Esta alteração da forma das ondas, que se traduz numa alteração das componentes harmónicas relativamente àquelas que apresentavam inicialmente, conduz, no limite, à rebentação das mesmas (Flick *et al.*, 1981). O transporte de sedimentos associado a estas ondas não lineares é, muitas vezes, parametrizado através de fórmulas envolvendo os momentos estatísticos das velocidades e acelerações orbitais junto ao fundo. Neste trabalho, estes parâmetros são analisados para um conjunto de dados, obtidos num trabalho de campo realizado em Duck, ao largo da Carolina do Norte, tendo como base um conjunto de registos da velocidade e aceleração instantâneas em pontos localizados ao longo do perfil de praia. Estabelecem-se comparações com parametrizações existentes e propõem-se novas metodologias.

Palavras Chave: Transporte de sedimentos, parametrizações, assimetria da velocidade, assimetria da aceleração



1 - INTRODUÇÃO

A necessidade de conhecer, prever e modelar os sistemas costeiros torna imperativa tanto a aplicação e desenvolvimento de modelos de transporte de sedimentos, como outros aspectos igualmente proeminentes da engenharia costeira. As variações da topografia de fundo na zona costeira do oceano estão associadas à dinâmica sedimentar, pelo que o seu conhecimento requer um melhor entendimento do transporte de sedimentos.

Na zona costeira do oceano junto a uma praia o transporte de sedimentos está intimamente relacionado com a forma da superfície livre das ondas, nomeadamente com as assimetrias da velocidade orbital durante um ciclo da onda, e com as correntes por elas induzidas. Neste âmbito, têm sido desenvolvidas fórmulas que contemplam os momentos estatísticos das velocidades e acelerações orbitais junto ao fundo para incorporar os efeitos não lineares das ondas. Estas aplicam-se a um conjunto variado de situações e têm-se revelado bons instrumentos para análise do trânsito sedimentar, permitindo auferir de uma maior acuidade no que concerne a uma avaliação da taxa de transporte. Em particular, a assimetria da velocidade da série temporal do campo de velocidades (Bowen, 1980; Bailard, 1981; Silva *et al.*, 2006) e a assimetria da aceleração (Drake e Calantoni, 2001) têm sido incorporadas em modelos de transporte de sedimentos em zonas costeiras.

Mais recentemente, Abreu (2006) propôs várias expressões que permitem parametrizar o desvio padrão, a assimetria e a curtose dos campos de velocidade e da aceleração do escoamento simulado em modelo físico, em condições de agitação regular e irregular, propagando-se numa praia com barra (as condições físicas do ensaio encontram-se descritas em Sancho *et al.*, 2001).

Pretende-se, neste trabalho, estender a análise efectuada por Abreu (2006) para um novo conjunto de dados, obtidos num trabalho de campo realizado em Duck, ao largo da Carolina do Norte. A análise será efectuada com base em registos da velocidade e aceleração instantâneas, em pontos localizados ao longo do perfil de praia, antes e após a rebentação das ondas. Recorrem-se a algumas teorias de onda não lineares para este estudo e propõem-se novas metodologias para estimação de alguns momentos estatísticos do campo de velocidades e de acelerações, necessários para o cálculo do transporte sedimentar devido às ondas. Nessa análise estabelecem-se comparações entre as metodologias propostas e parametrizações existentes.

2 - DADOS EXPERIMENTAIS

A análise efectuada baseia-se num conjunto de dados de campo obtidos aquando da elaboração de um trabalho experimental designado por DUCK94 (Elgar *et al.*, 1997). Duck é uma ilha barreira com perfil de praia natural do tipo barra-fossa e localiza-se ao largo da Carolina do Norte (E.U.A.). Com esta experiência pretende-se obter, para perfis naturais de praia, uma informação mais detalhada sobre o transporte sedimentar e consequentes evoluções morfodinâmicas resultantes das condições hidrodinâmicas locais. A experiência foi conduzida durante um período de cerca de 3 meses (de Agosto a Outubro de 1994), tendo-se registado uma panóplia grande de resultados, através de um conjunto diversificado de instrumentos dispostos *in situ*.

Para a presente análise, focam-se unicamente os dados provenientes dos velocímetros electromagnéticos (electromagnetic current meters) e dos resultados induzidos para a superfície livre a partir dos dados de instrumentos de medição de pressão (pressure gauges). Uma vez que interessam valores do campo de velocidades junto ao fundo, usaram-se apenas os resultados dos medidores que se localizavam a uma distância inferior a 60 cm do fundo. Os valores induzidos para a superfície livre utilizados neste trabalho são os do medidor de pressão posicionado mais ao largo ($x \approx 884 \text{ m}$). Os dados foram recolhidos com uma frequência de 2 Hz e as posições dos velocímetros em cada coluna de água assinalam-se na Figura 1.

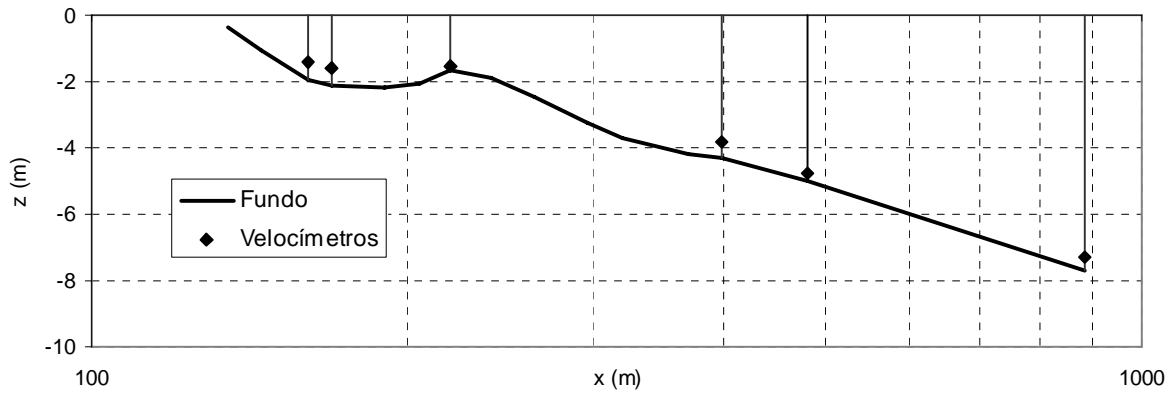


Figura 1: Perfil da praia no dia 01/10/1994 (—) e posição dos velocímetros (◆).

Na Figura 2 evidenciam-se algumas características das ondas incidentes para o período de tempo estudado (de 10/08/1994 a 31/10/1994) para $x \approx 884 \text{ m}$. Conclui-se que 95% dos valores da altura de onda significativa (H_s) encontram-se entre 0,25 e 2,07 m e o período médio de ondas (T) entre 4,6 e 9,4 s.

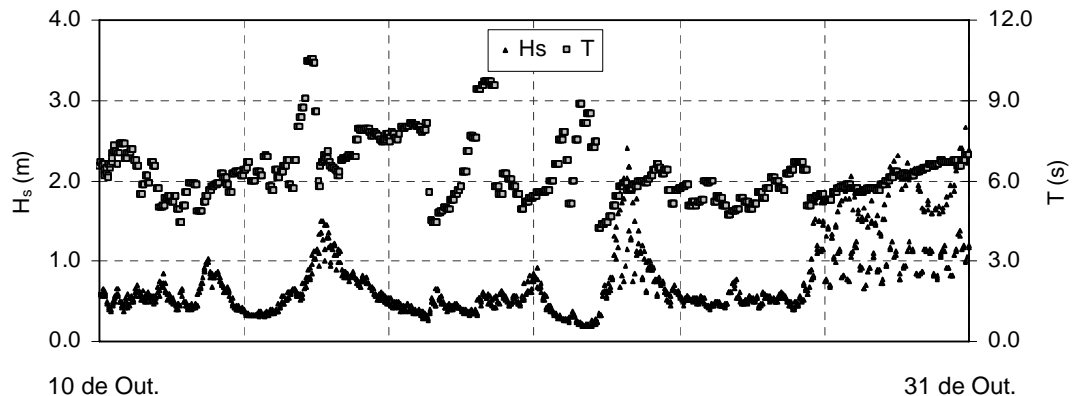


Figura 2: Altura de onda significativa e período de onda médio obtidos para $x \approx 884 \text{ m}$.

Com o intuito de se identificar o domínio experimental abrangido por DUCK, calcularam-se alguns parâmetros adimensionais característicos das ondas comumente utilizados. Deste modo, na Figura 3 apresentam-se as curvas de frequências acumuladas para o declividade da onda (H_s/λ), altura relativa da onda (H_s/h), profundidade relativa (h/λ) e número de Iribarren (ξ). λ representa o comprimento de onda e, para o seu cálculo, recorreu-se à Teoria Linear de Ondas (Teoria de Airy), resolvendo iterativamente a relação de dispersão para cada posição com profundidade h . O número de Iribarren obteve-se pela expressão $\xi = \tan \beta / (H_s/\lambda_0)^{1/2}$, onde β representa inclinação local do fundo do leito e λ_0 o comprimento de onda a grandes profundidades.

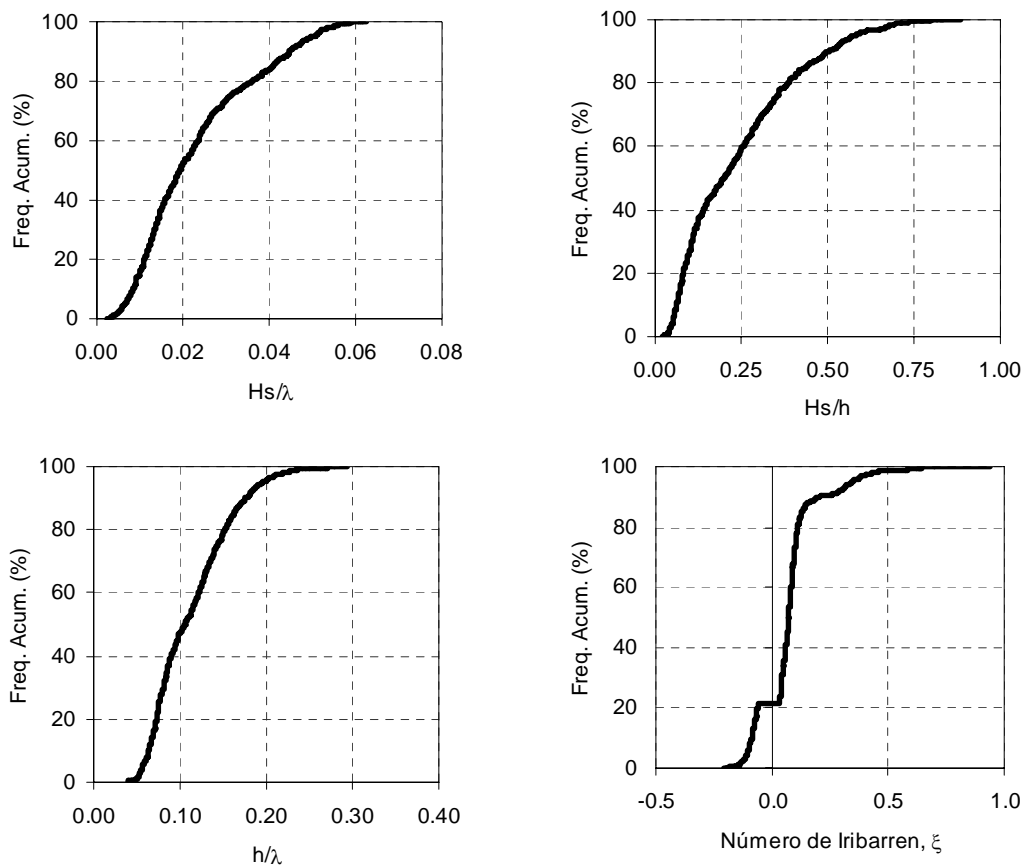


Figura 3: Domínio experimental para H_s/λ , H_s/h , h/λ e ξ .

3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os modelos de transporte de sedimentos sugerem a importância de vários momentos estatísticos do campo de velocidades e acelerações do escoamento oscilatório junto ao fundo. A introdução destes momentos contempla a não linearidade das ondas, levando à obtenção mais precisa de taxas de transporte.

Neste trabalho, estende-se a análise efectuada por Abreu (2006) para este novo conjunto de dados, obtidos num trabalho de campo realizado em Duck. Avaliam-se momentos estatísticos do campo de velocidades e de acelerações, e estabelecem-se comparações com parametrizações existentes e novas metodologias propostas. Esta análise é efectuada com base em registos da velocidade e aceleração instantâneas, em pontos localizados ao longo do perfil de praia, antes e após a rebentação das ondas.

Os momentos estatísticos do campo de velocidades determinados neste trabalho referem-se apenas à componente horizontal da velocidade orbital (u). Para obtenção e análise de séries temporais de acelerações (a), diferenciaram-se numericamente no tempo os valores filtrados das séries temporais de velocidades analisados pelos velocímetros. Utilizou-se um filtro “passa-baixos” com uma frequência de corte de $0,5 \text{ Hz}$. As acelerações obtidas por este processo são acelerações locais em cada ponto ($a = \partial u / \partial t$).

Os parâmetros estatísticos (momentos) da componente horizontal da velocidade e aceleração orbital obtiveram-se da seguinte forma:



$$\text{- Desvio Padrão} \quad \sigma_u = \sqrt{\frac{\sum (u - \bar{u})^2}{N}} \quad \sigma_a = \sqrt{\frac{\sum (\dot{u} - \bar{\dot{u}})^2}{N}} \quad (1)$$

$$\text{- Assimetria} \quad \mu_{3,u} = \frac{\sum (u - \bar{u})^3}{N \sigma_u^3} \quad \mu_{3,a} = \frac{\sum (\dot{u} - \bar{\dot{u}})^3}{N \sigma_a^3} \quad (2)$$

Nestas equações u representa o valor instantâneo medido para componente horizontal da velocidade e N o número total de registos da amostra. De realçar que o coeficiente de assimetria, μ_3 , é uma medida da 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. Nessa situação, resulta uma distribuição simétrica em torno da média. Um valor positivo é representativo de uma distribuição assimétrica com uma cauda que se estende para os valores positivos indicando um maior peso destes. O contrário acontece para valores negativos. A assimetria é um parâmetro adimensional. Valores elevados deste coeficiente indicam fortes não linearidades provenientes da transformação das ondas ao propagarem-se em águas pouco profundas.

4 - RESULTADOS

Na Figura 4 apresentam-se as variações espaciais do desvio padrão (σ) e da assimetria (μ_3) para a componente horizontal da velocidade e da aceleração próximas do fundo, ao longo do perfil barra-fossa. Para visualização dos resultados para diferentes classes de períodos de onda e alturas de onda significativa, realizou-se uma divisão mediante a quantidade de valores e domínio de dados abrangidos pela experiência. Resultaram seis condições de onda incidentes que se resumiam na tabela 1.

Tabela 1: Condições de onda incidentes

Divisão em Classes	Período de Onda	Altura de Onda Significativa
Condição 1	$T \leq 5.6s$	$H_s \leq 0.75m$
Condição 2	$T \leq 5.6s$	$H_s > 0.75m$
Condição 3	$5.6 < T \leq 6.6s$	$H_s \leq 0.75m$
Condição 4	$5.6 < T \leq 6.6s$	$H_s > 0.75m$
Condição 5	$T > 6.6s$	$H_s \leq 0.75m$
Condição 6	$T > 6.6s$	$H_s > 0.75m$



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

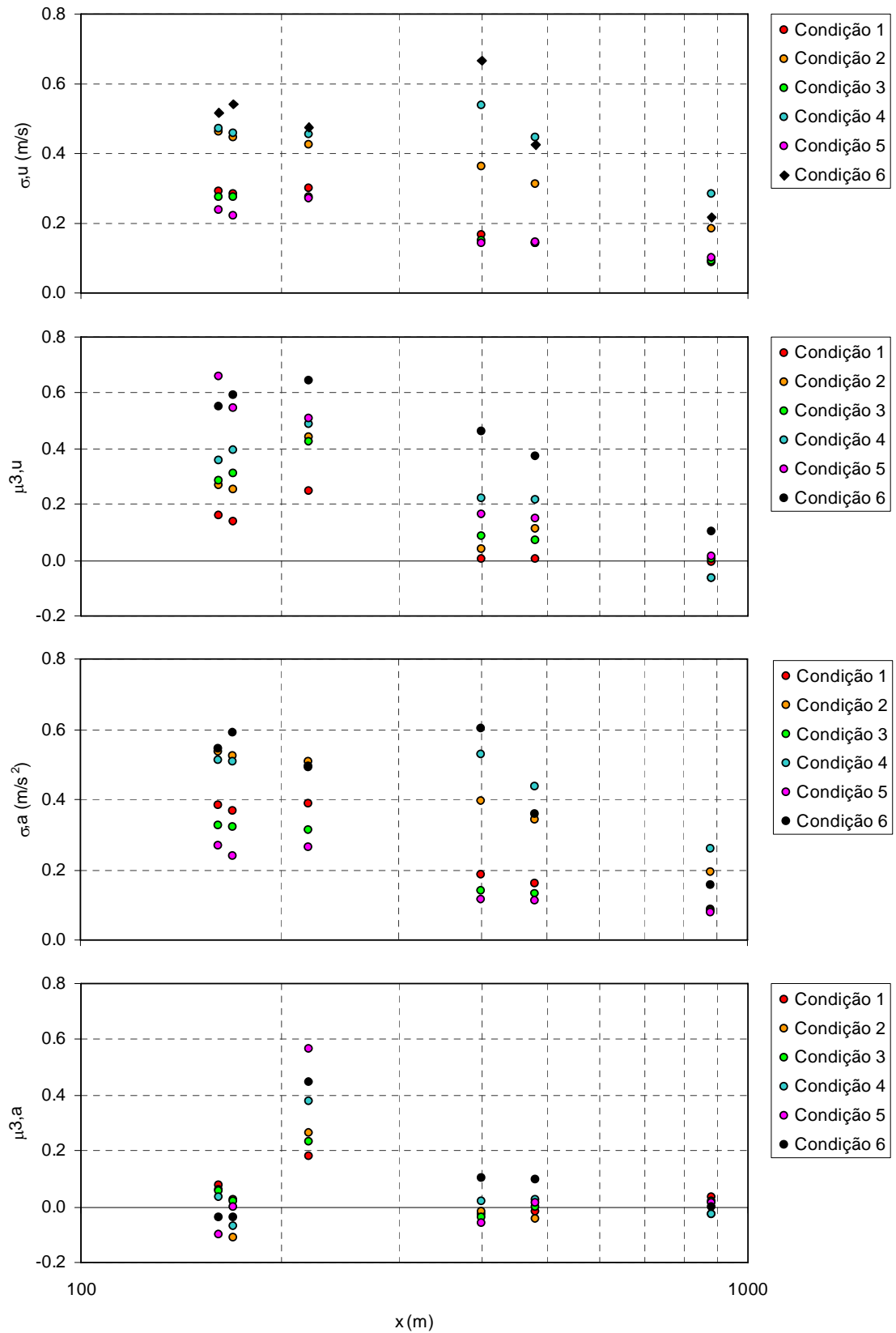


Figura 4: σ e μ_3 dos valores medidos para a componente horizontal da velocidade e da aceleração.



Observando a Figura 4, relativamente ao desvio padrão da velocidade e aceleração (σ_u e σ_a), depreendem-se comportamentos muito similares. Sendo o desvio padrão uma medida das flutuações relativamente ao valor médio, assiste-se a um aumento desse parâmetro até à posição onde as ondas rebentam. Segue-se um decaimento nesse local (zona da barra), voltando a aumentar ligeiramente quando as ondas se reformam. Este comportamento é comum a todas as condições de onda.

Em relação à assimetria da velocidade, os valores aumentam progressivamente com a propagação das ondas, atingindo os valores máximos sobre a crista da barra, decaindo ligeiramente após esta posição. Sendo uma medida que traduz não linearidades, evidencia-se que, para a generalidade das condições de onda apresentadas, é sobre a crista da barra que as assimetrias são mais significativas.

A assimetria da aceleração corrobora o facto de as maiores não linearidades se evidenciarem sobre a crista da barra, pois é onde se concentram os valores mais elevados. Para as outras posições da coluna de água este parâmetro aproxima-se de um processo linear gaussiano, pois, em média, encontramos resultados praticamente nulos.

5 - PARAMETRIZAÇÕES

Os momentos estatísticos de ordem par como a variância (e, inerentemente, o desvio padrão) podem ser estimados com certa acuidade utilizando a Teoria Linear de Ondas (ver, *v. g.*, Abreu *et. al.*, 2006). Contudo, a Teoria Linear não pode ser usada para estimar momentos estatísticos ímpares como a assimetria. Veja-se que neste caso a superfície do mar é representada como uma sobreposição linear de ondas de fases aleatórias que, por definição, resultam numa assimetria nula desse conjunto. Ora, nesta secção, pretendeu-se testar e apresentar algumas parametrizações para o cálculo da assimetria da velocidade e da aceleração. Com essa finalidade, recorreram-se a algumas aproximações analíticas representativas de teorias de onda não lineares como a Teoria de Stokes e a Cnoidal para a estimativa do momento estatístico de ordem ímpar μ_3 .

A velocidade orbital junto ao fundo para uma onda de Stokes de segunda ordem é dada a partir da expressão:

$$u(t) = u_1 \cos(\omega t) + u_2 \cos(2\omega t) \quad (3)$$

onde $\omega = 2\pi/T$ é a frequência angular com período de oscilação T e u_1 e u_2 são as amplitudes das componentes horizontais sinusoidais da velocidade. De acordo com essa definição, obtêm-se as amplitudes da velocidade associada à crista (U_{wc}) e à cava (U_{wt}) pelas seguintes expressões:

$$U_{wc} = u_1 + u_2 \text{ e } U_{wt} = u_1 - u_2. \quad (4)$$

Abreu (2006) baseou-se nesta representação analítica da Teoria de Onda de Stokes de 2ª ordem e verificou que o conhecimento das componentes da velocidade orbital associada à crista, U_{wc} , e à cava U_{wt} , pode fornecer boas estimativas para o cálculo da assimetria da velocidade $\mu_{3,u}$. Essa análise baseou-se num conjunto de dados em ensaio físico obtidos por Sancho *et al.* (2001) que verificou uma muito boa concordância com a expressão:

$$\mu_{3,u} = \frac{\overline{u^3}}{u_{rms}^3} = \frac{\frac{3}{4}u_1^2u_2}{\left(\frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2)\right)^{3/2}} \quad (5)$$

De forma a corroborar e estender essa expressão ao novo conjunto de dados de campo da experiência DUCK, refizeram-se novos cálculos logrando-se a Figura 5. Da análise deste gráfico, pode-se concluir que, a menos de um factor de escala igual a 1,34, os resultados são muito satisfatórios. O coeficiente de correlação elevado ($r = 0,94$) volta a vivificar a ideia de que a onda, no que diz respeito à assimetria da velocidade, pode ser adequadamente representada por uma onda de Stokes de 2^a ordem.

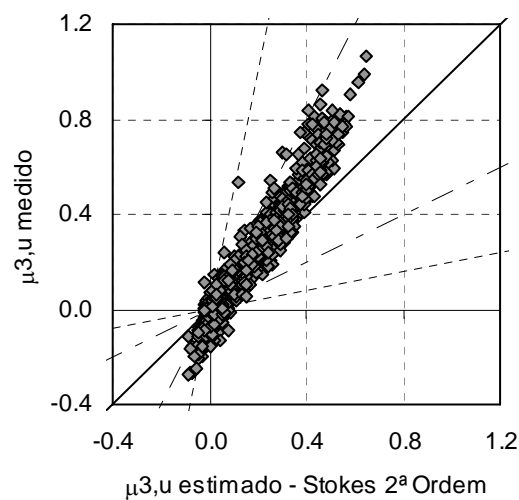


Figura 5: Valores experimentais e estimados para $\mu_{3,u}$, tendo como base a teoria de Stokes de 2^a ordem (Equação 5). Coeficiente de correlação igual a 0,94.

Uma análise semelhante fora efectuada por Abreu (2006) onde se estabeleceu um paralelismo com a assimetria da velocidade $\mu_{3,u}$. Assim, colocou-se a hipótese de que a série temporal da aceleração pode ser, igualmente, descrita por uma equação análoga à Equação (3) considerando agora as amplitudes das componentes da aceleração a_1 e a_2 . De acordo com esta hipótese, a assimetria da aceleração $\mu_{3,a}$ é obtida a partir das componentes da aceleração orbital associada à crista (a_{wc}) e à cava (a_{wt}), escrevendo-se:

$$\mu_{3,a} = \frac{\frac{3}{4}a_1^2a_2}{\left(\frac{1}{2}(a_1^2 + a_2^2)\right)^{3/2}} \quad (6)$$

onde $a_1 = (a_{wc} + a_{wt})/2$ e $a_2 = (a_{wc} - a_{wt})/2$. (7)

Aplicando esta expressão ao novo conjunto de dados, obteve-se a Figura 6. Novamente, a menos de um factor de escala igual a 2,65, alcançou-se um coeficiente de correlação óptimo ($r = 0,98$), reforçando, neste caso, que o conhecimento de ambas as componentes da aceleração orbital poderão fornecer com bastante acuidade o valor de $\mu_{3,a}$.

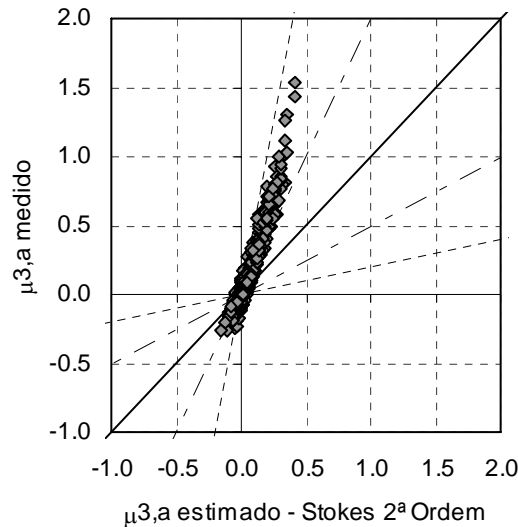


Figura 6: Valores experimentais e estimados para $\mu_{3,a}$, tendo como base a Equação (6).
Coeficiente de correlação igual a 0,98.

Mais recentemente, uma nova expressão analítica para um perfil de velocidades de uma onda com forma em “dente de serra” foi apresentada por Silva *et al.* (2007). A base da nova expressão teve em consideração que a aceleração tem a forma de uma onda cnoidal:

$$\dot{u}(t) = \frac{U_w \omega [\cos(\omega t) - r]}{[1 - r \cos(\omega t)]^2} \quad (8)$$

onde U_w representa a amplitude da velocidade orbital da onda junto ao fundo e r é um coeficiente da assimetria da aceleração ($-1 < r < 1$).

Em consonância com esta representação e de acordo com a definição do coeficiente de assimetria, resulta uma expressão para $\mu_{3,a}$ dependente unicamente do parâmetro r .

$$\mu_{3a} = \frac{\overline{\dot{u}^3}}{\overline{\dot{u}^2}^{3/2}} = \frac{6r}{2^{3/2} [1 - r^2]^{1/4}} \quad (9)$$

A partir das Equações (8) e (9) é possível quantificar o parâmetro r a partir do conhecimento das componentes da aceleração orbital associada à crista (a_{wc}) e à cava (a_{wt}):

$$r = 2 \frac{a_{wc}}{a_{wc} - a_{wt}} - 1. \quad (10)$$

Aplicando este resultado ao conjunto de dados de DUCK, obteve-se a Figura 7. O coeficiente de correlação obtido é excelente ($r = 0,99$), onde um factor de proporção igual a 2,60 corrige os dados subestimados para os valores experimentais.

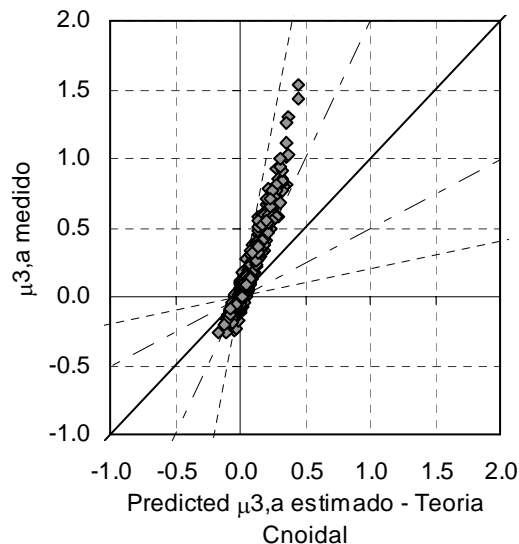


Figura 7: Valores experimentais e estimados para $\mu_{3,a}$ tendo como base a Equação (9).
Coeficiente de correlação igual a 0,99.

Mediante os resultados anteriores, conclui-se que se poderá auferir de uma boa parametrização para $\mu_{3,u}$ e $\mu_{3,a}$ se se conseguir fazê-lo para U_{wc} e U_{wt} ou a_{wc} e a_{wt} .

Na literatura, podem-se encontrar diversas formas distintas para o cálculo de U_{wc} e U_{wt} . A título de exemplo, referem-se os métodos de Isobe e Horikawa (1982), Grasmeijer e Van Rijn (1998) e Elfrink *et al.* (2006). Uma peculiaridade destes três métodos é o facto de permitirem, através do conhecimento de resultados medidos na superfície livre, obter resultados e relações para ambas as componentes da velocidade orbital junto ao fundo. Os factores de correcção indicados anteriormente aquando do cálculo das assimetrias foram contemplados nos resultados alcançados.

O método Isobe e Horikawa (1982) resulta de uma parametrização da Teoria de Onda de Stokes de 5^a ordem com a Teoria de Onda Cnoidal de 3^a ordem, podendo ser utilizado numa vasta gama de condições de ondas. Neste trabalho utilizaram-se as expressões para o cálculo das componentes da velocidade orbital U_{wc} e U_{wt} desta metodologia propostas em Soulsby (1997).

O método Isobe e Horikawa (1982) foi originalmente formulado para condições de onda ao largo, tendo sido mais tarde modificado por Grasmeijer e Van Rijn (1998) para condições locais. Estes autores ajustaram o modelo para o cálculo das componentes horizontais da velocidade (U_{wc} e U_{wt}) para ondas irregulares e propuseram alterações relativamente ao efeito da inclinação do fundo (β).



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Mais recentemente, em Elfrink *et al.* (2006) disponibilizam-se novas parametrizações para as componentes da velocidade U_{wc} e U_{wt} derivadas a partir de algoritmos evolutivos desenvolvidos por Keijzer e Babovic (1999). O princípio fundamental desta técnica assenta na geração aleatória de uma população inicial de fórmulas a partir dos dados disponíveis.

Outras duas parametrizações (Doering e Bowen, 1995; Doering *et al.*, 2000) foram igualmente testadas e incluídas nos resultados finais. Mormente, achou-se importante esse confronto, pois possibilita uma maior análise a nível comportamental e magnitude de valores alcançados. Analogamente, estas duas novas formulações utilizam os dados medidos para a superfície livre. Diferem em relação às anteriores pelo facto da obtenção de $\mu_{3,u}$ ser conseguido de forma directa através dos parâmetros de entrada. Assim, utilizou-se a expressão desenvolvida por Doering e Bowen (1995) que, através de um conjunto de técnicas bi-espectral, prediz a assimetria horizontal da velocidade com uma expressão algébrica simples cujo único parâmetro de entrada é o número de Ursell. Atente-se ao facto deste parâmetro ser calculado por:

$$Ursell_{DB95} = \frac{3}{4 \times 8 \times \pi^2} \times \frac{H/\lambda}{(h/\lambda)^3} \quad (11)$$

A outra parametrização testada resulta do seguimento do trabalho desenvolvido por Doering e Bowen (1995) onde, mais tarde em Doering *et al.* (2000), se propõe uma expressão gerada através de um algoritmo genético para águas pouco profundas e ondas com rebentação. A nova expressão analítica é função da altura relativa de ondas (H/h), do parâmetro (λ/h) e do número de Iribarren (ξ).

Para obtenção das componentes da aceleração orbital a_{wc} e a_{wt} afectaram-se as frequências angulares às respectivas parametrizações de U_{wc} e U_{wt} das metodologias anteriores, ou seja,

$$a_{wc} = U_{wc} \cdot \frac{2\pi}{T} \quad (12)$$
$$a_{wt} = U_{wt} \cdot \frac{2\pi}{T}$$

Nas Figuras 8 e 9 sintetizam-se os resultados finais para $\mu_{3,u}$ e $\mu_{3,a}$ para a condição de onda 6. Utilizaram-se algumas abreviaturas que se descrevem de seguida e passam a ser doravante utilizadas:

IH82-Stokes – Método de Isobe and Horikawa (1982) para o cálculo de U_{wc} e U_{wt} necessários para as Eq. (5) e (6) para $\mu_{3,u}$ e $\mu_{3,a}$, respectivamente;



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

IH82-Cnoidal – Método de Isebe and Horikawa (1982) para o cálculo de U_{wc} e U_{wt} necessários para a Eq. (9) para $\mu_{3,a}$;

GR98-Stokes – Método de Grasmeijer e Van Rijn (1998) para o cálculo de U_{wc} e U_{wt} necessários para as Eq. (5) e (6) para $\mu_{3,u}$ e $\mu_{3,a}$, respectivamente;

GR98-Cnoidal – Método de Grasmeijer e Van Rijn (1998) para o cálculo de U_{wc} e U_{wt} necessários para a Eq. (9) para $\mu_{3,a}$;

BE06-Stokes – Método de Elfrink, Hanes e Ruessink (2006) para o cálculo de U_{wc} e U_{wt} necessários para as Eq. (5) e (6) para $\mu_{3,u}$ e $\mu_{3,a}$, respectivamente;

BE06-Cnoidal – Método de Elfrink, Hanes e Ruessink (2006) para o cálculo de U_{wc} e U_{wt} necessários para a Eq. (9) para $\mu_{3,a}$;

DB95 – Método de Doering e Bowen, 1995

JD00 – Método de Doering, Elfrink, Hanes e Ruessink, 2000

Na Figura 8 evidencia-se que a globalidade das metodologias sobrestima ligeiramente os valores medidos de $\mu_{3,u}$. Os métodos de DB95 e JD00 são os únicos que subestimam os valores experimentais das assimetrias máximas verificadas sobre a crista da barra ($x \approx 220m$). Contudo, a nível da magnitude de valores, a metodologia sugerida por DB95 é a que apresenta resultados mais próximos dos experimentais. A nível da variação espacial de $\mu_{3,u}$, embora se verifiquem valores ligeiramente sobrestimados face aos medidos, é a metodologia de GR98 que exhibe a melhor descrição comportamental em relação às demais. Destaca-se que é a única metodologia que consegue prever o máximo valor sobre a crista da barra ($x \approx 220m$). As metodologias BE06 e IH82, além de serem as que mais sobrestimam os resultados, indiciam falhas na previsão do local onde ocorrem as maiores assimetrias da velocidade, antecipando demasiadamente essa ocasião.

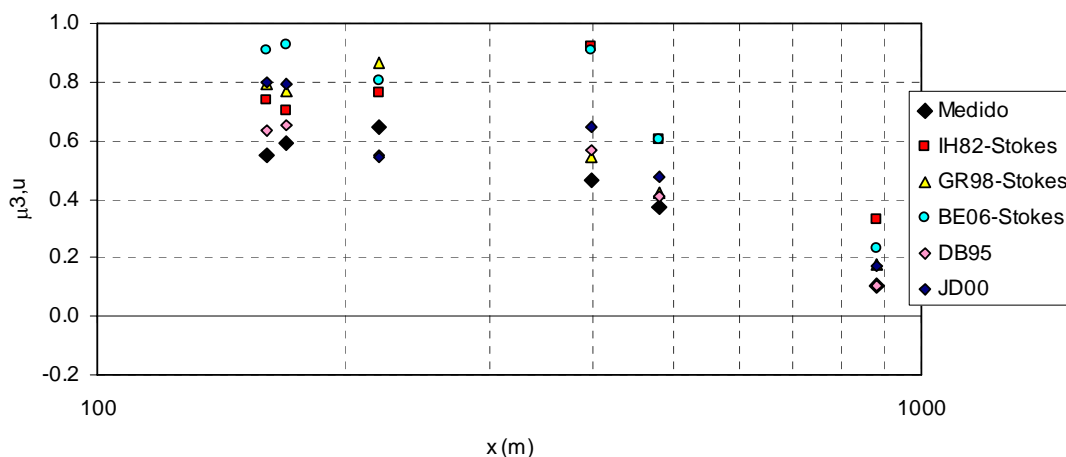


Figura 8: Valores experimentais e estimados de $\mu_{3,u}$ para a condição de onda 6.

Por observação da Figura 9, verificam-se valores estimados de $\mu_{3,a}$ assaz superiores aos medidos para a generalidade de metodologias. Exceptuam-se os resultados obtidos pela metodologia de IH82 que apresentam uma concordância bastante razoável até à zona da barra. Para este método assinalam-se apenas a falha nos valores sobrestimados próximos da linha de costa. Comparando as representações analíticas baseadas nas duas teorias de onda desta análise (Stokes 2^a ordem e Cnoidal), verifica-se que, para a mesma metodologia das três apresentadas para o cálculo das componentes da aceleração orbital a_{wc} e a_{wt} , os resultados são muito semelhantes. Inclusive, no caso da metodologia de IH82 não se conseguem discernir diferenças entre os valores estimados para as duas formulações, pois aparecem sobrepostos no gráfico. Os resultados com base na metodologia de BE06 são aqueles que mais sobrestimam os valores medidos e que não predizem correctamente o local com maiores assimetrias assinaladas. De todos os métodos, a metodologia de GR98, embora apresentando falhas a nível da quantificação da grandeza dos valores, exhibe uma descrição da variação espacial de $\mu_{3,a}$ bastante satisfatória. De destacar que é a única metodologia que consegue prever que o máximo valor ocorre sobre a crista da barra ($x \approx 220m$).

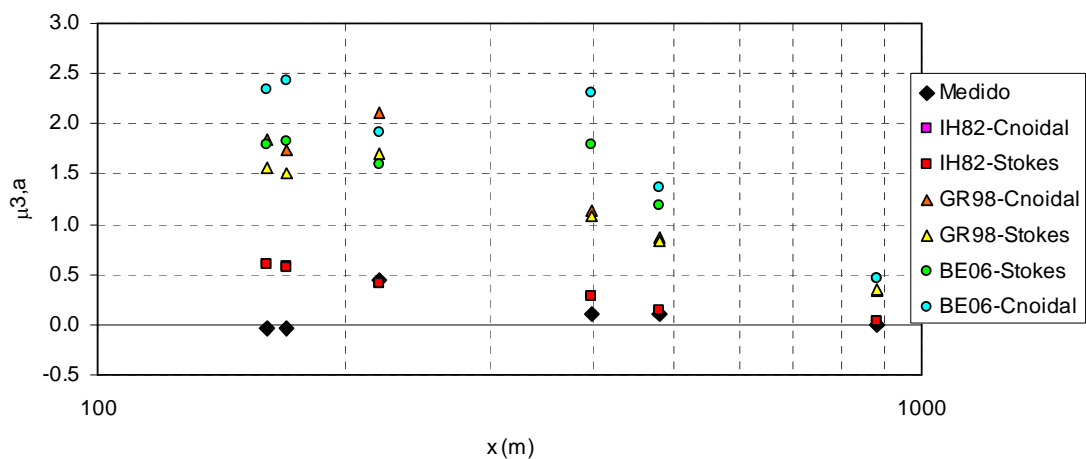


Figura 9: Valores experimentais e estimados de $\mu_{3,a}$ para a condição de onda 6.

Em suma, assinala-se ainda alguma dispersão aquando da aplicação destas metodologias. Analisados os coeficientes de correlação apresentados anteriormente (ver figuras 5-7) seria expectável que as Figuras 8-9 indicassem melhores concordâncias. Na base da dispersão encontrada, poderá estar o facto de as assimetrias não dependerem apenas de condições locais como as metodologias empregues sugerem. A “história” da onda desempenha muitas vezes um papel importante e este pode ter sido um factor decisivo e contributivo para acentuar essas diferenças. Realça-se ainda o facto de as parametrizações utilizadas para o cálculo das componentes da velocidade U_{wc} e U_{wt} não terem sido obtidas visando um posterior cálculo de assimetrias. Por outro lado, adaptou-se os métodos de IH82, GR98 e BE06 para o cálculo de a_{wc} e a_{wt} .

6 - CONCLUSÕES

Neste artigo propõem-se expressões que permitem obter resultados e relações para a assimetria da velocidade e aceleração orbital junto ao fundo. Para o efeito, estendeu-se a



5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

análise efectuada por Abreu (2006) para um novo conjunto de dados, obtidos num trabalho de campo realizado em Duck, ao largo da Carolina do Norte para um perfil de praia do tipo barra-fossa.

Analisaram-se variações espaciais de momentos estatísticos do campo de velocidades e de acelerações em pontos localizados ao longo do perfil de praia necessários para o cálculo do transporte sedimentar devido às ondas.

Testaram-se algumas parametrizações baseadas em métodos distintos para o cálculo da assimetria da velocidade e da aceleração, confrontando-se diversas metodologias existentes.

Verificou-se que a Teoria de Stokes de 2^a ordem e a Teoria Cnoidal se revelaram úteis no fornecimento de determinadas relações. Os resultados obtidos indiciam que o conhecimento das componentes da velocidade U_{wc} e U_{wt} e da aceleração orbital a_{wc} e a_{wt} podem fornecer boas estimativas para o cálculo da assimetria da velocidade $\mu_{3,u}$ e da aceleração $\mu_{3,a}$.

De futuro julga-se conveniente verificar as expressões propostas a outros dados independentes obtidos para outras condições de campo, de forma a ver se corroboram outros domínios de aplicação.

Uma razão para que este género de pesquisa continue é a busca de diminuição de tempo computacional face a muitos modelos numéricos existentes, conseguindo alcançar uma solução igualmente precisa na obtenção de taxas de transporte sedimentar. Existe a convicção de que, pelo menos nas próximas décadas, se justifica um crescente empenho no aperfeiçoamento de parametrizações face à facilidade de suas utilizações.

BIBLIOGRAFIA

Abreu, T., 2006. Transporte de sedimentos em zonas costeiras: parametrização de momentos estatísticos de hidrodinâmica. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra.

Abreu, T., F. Sancho e P. Silva (2006) – “Parametrização de ondas não lineares para o transporte de sedimentos em zonas costeiras”, 8^o Congresso da Água, Figueira da Foz (Cd-rom)

Bailard, J. A. (1981) – “An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach”, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, No. C11, pp. 10938-10954

Bowen, A. J. (1980) – “Simple models for nearshore sedimentation: beach profiles and longshore bars”, *Coastline of Canada, Geol. Surv. Canada*, pp. 1–11.

Doering, J. C. e A.J. Bowen (1995) – “Parameterization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis”, *Coast. Eng.* 26, pp. 15–33

Doering, J. C., B. Elfrink, D. M. Hanes e B. G. Ruessink (2000) – “Parameterization of velocity skewness”, *Proceedings 27th Int. Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Sydney, Australia, pp. 1383–1396

Drake, T.G. e J. Calantoni (2001) – “Discrete particle model for sheet flow sediment transport in the nearshore”, *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, no. C9, pp. 19,859-19,868

Elfrink, B., D. M. Hanes e B.G. Ruessink (2006) – “Parameterization and simulation of near bed orbital velocities under irregular waves in shallow water”, *Coastal Engineering*, 53, pp. 915-927

Elgar, S.L., R. T. Guza, B. Raubenheimer, T.H.C. Herbers e E. Gallagher, 1997 – “Spectral evolution of shoaling and breaking waves on a barred beach”, *J. Geophys. Res.*, 102, 15797–15805.



**5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007**

Flick, R.E., R.T. Guza e D.L. Inman (1981) – “Elevation and velocity measurements of laboratory shoaling waves”, *Journal of geophysical research*, 86, pp. 4149-4160

Grasmeijer, B. T. e L. C. van Rijn (1998) – “Breaker bar formation and migration”, *Proceedings Coastal Engineering*, ASCE, Virginia, USA, pp. 2750-2758

Isobe, M. e K. Horikawa (1982) – “Study on water particle velocities of shoaling and breaking waves”, *Coastal Engineering in Japan*, 25, pp. 109-123

Keijzer, M. e V. Babovic (1999) – “Dimensionally aware genetic programming”, *Proc. of the Genetic and Evolutionary Algorithm Conf.*, Orlando, FL, pp. 1069–1076

Sancho F.E, P.A. Mendes, J.A Carmo, M.G. Neves, G.R. Tomasicchio, R. Archetti, L. Damiani, M. Mossa, A. Rinaldi, X. Gironella e A. Sanchez-Arcilla (2001) “Wave hydrodynamics over a barred beach”, *Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis - Waves 2001*, S. Francisco, ASCE, 1170-1179

Silva, P.A., A. Temperville, F. Seabra-Santos (2006) – “Sand transport under combined current and wave conditions: a semi-unsteady, practical model”, *Coastal Engineering*, 53, 897-913

Silva, P. A., Abreu, T., Sancho, F. & Temperville, A., 2007. A sensitivity study of sediment transport rates in accelerated skewed waves, 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2007)

Soulsby, R. (1997) – “Dynamics of marine sands”, *Thomas Telford Publications*, London