

## Influência de ondas assimétricas no transporte de sedimentos: medição e modelação

T. Abreu (1), P.A. Silva (2) e F. Sancho (3)

(1) Dep. de Eng. Civil – ESTGV – Instituto Politécnico de Viseu, Campus de Repeses, 3504-510 Viseu. tabreu@dcivil.estv.ipv.pt.

(2) CESAM & Dep. Física – Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, 3810-193 Aveiro

(3) Laboratório Nacional de Engenharia Civil – DHA, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

**Resumo:** A mecânica do transporte sedimentar é um tema de interesse considerável, mas cuja dinâmica é difícil de prever. Actualmente, no contexto da erosão verificada em grande parte da orla costeira nacional o fenómeno assume particular relevância. As ondas marítimas são os principais agentes responsáveis pelo transporte de sedimentos nas zonas costeiras. Contudo, ainda subsistem grandes lacunas no que concerne ao conhecimento detalhado dos processos envolvidos. Este trabalho mostra que a não linearidade das ondas é um factor muito relevante para a mobilização dos sedimentos. Para o efeito, apresentam-se resultados experimentais obtidos num túnel de ondas, elucidando a influência da assimetria das ondas no transporte de sedimentos. Muitas vezes, essas características são incorporadas em modelos de transporte através de parametrizações de momentos estatísticos da velocidade e da aceleração orbital junto ao fundo. Estes resultados são confrontados com alguns modelos práticos de transporte que visam incluir essas características hidrodinâmicas.

**Palavras chave:** transporte sedimentar, ondas assimétricas, velocidade orbital, túnel de ondas, modelação

### 1. INTRODUÇÃO

Os estudos sobre transporte e balanço sedimentar costeiro assumem particular relevância no contexto da erosão verificada actualmente em grande parte da orla costeira nacional. As ondas marítimas e as correntes médias existentes são os principais agentes responsáveis pelo transporte de sedimentos na zona costeira, em particular, nas praias e na plataforma costeira interna. Contudo, ainda subsistem grandes lacunas no que concerne ao conhecimento detalhado dos processos envolvidos no transporte. Com este trabalho pretende-se mostrar que a não linearidade das ondas é um factor muito relevante para a mobilização e transporte dos sedimentos.

Considerando uma onda que se propaga em direcção à costa, há todo um conjunto de transformações da sua forma que advêm da diminuição da profundidade. Gradualmente, a superfície livre evolui tornando-se pontiaguda sobre a crista da onda, mais larga na cava e relativamente íngreme na face onde se vem a dar a rebentação (Fig. 1). Esta alteração da forma das ondas, que se traduz numa redistribuição da energia da onda por outras componentes harmónicas, relativamente àquelas que se apresentavam inicialmente, repercute-se no escoamento oscilatório junto ao fundo: os valores máximos da velocidade são observados durante a crista da onda e as acelerações do escoamento orbital para as fases da onda entre a cava e a crista. Estas características não lineares da onda e a existência de correntes junto ao fundo para o largo na zona de rebentação (*undertow*) desempenham um

papel muito importante no transporte sedimentar transversal à costa e nas modificações do perfil de fundo de praia, nomeadamente na formação/migração de barras litorais.

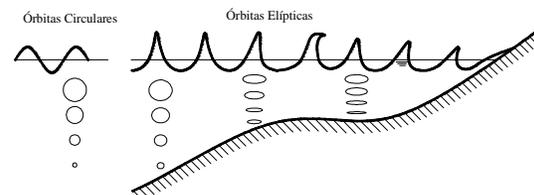


Fig. 1. Propagação da agitação em direcção à costa. Esboço do movimento orbital das partículas.

Para evidenciar a influência da não linearidade das ondas no transporte de sedimentos na direcção transversal à costa são apresentados neste trabalho resultados experimentais recentemente obtidos num túnel de ondas. Diferentes modelos práticos para o cálculo do transporte sedimentar que visam incluir essas características hidrodinâmicas através de parametrizações de momentos estatísticos da velocidade e da aceleração orbital junto ao fundo, são aplicados e os resultados comparados com o conjunto de resultados experimentais.

### 2. EXPERIÊNCIA EM TÚNEL DE ONDAS

Devido à complexidade e à interacção dos diferentes processos que intervêm no transporte e da dificuldade em efectuar medições precisas do campo

de velocidades e da concentração de sedimentos junto ao fundo, nomeadamente em condições naturais, é usual recorrer-se a experiências laboratoriais para isolar e reproduzir com acuidade determinados fenómenos físicos. Com esse intuito e para avaliar a influência de ondas assimétricas no transporte de sedimentos sob condições controladas, Silva *et al.* (submetido) realizaram, no túnel de ondas de *Deliares* (Large Oscillating Water Tunnel), um projecto experimental designado de *TRANSKEW* (*sand TRANsport induced by SKEWed waves and currents*). As condições hidráulicas consistiram na repetição de um escoamento oscilatório regular e assimétrico sobre um fundo móvel cujo leito era composto por grãos de areia com um diâmetro mediano de 0.20mm. As experiências decorreram em regime de *sheet flow* (fundo plano) onde, sob a acção de fortes tensões de atrito, a maioria dos sedimentos é mobilizada e transportada numa camada junto ao fundo com cerca de 10mm de espessura.

O sinal introduzido no túnel de ondas, visou reproduzir, na secção de teste do mesmo, um escoamento com diferentes graus de assimetria da velocidade orbital,  $u$ , e da aceleração,  $a$ . Usualmente, utilizam-se os parâmetros  $R$  e  $\beta$  para essa quantificação:

$$R = \frac{u_{max}}{u_{max} - u_{min}},$$

$$\beta = \frac{a_{max}}{a_{max} - a_{min}}.$$

Um valor de  $R \neq 0.5$  e  $\beta = 0.5$  significa que há assimetria na velocidade, mas não na aceleração. Nesse caso, os valores máximos em módulo da aceleração durante o escoamento oscilatório são iguais ( $|a_{max}| = |a_{min}|$ ), mas os valores da velocidade correspondentes à crista e à cava são diferentes ( $|u_{max}| \neq |u_{min}|$ ). Estas características ocorrem quando as ondas iniciam o seu processo de transformação, aquando da diminuição da profundidade. A reprodução dessas formas pode ser obtida, p.e., recorrendo à teoria de ondas Cnoidal (1.ª ordem) ou de Stokes (2.ª ordem). Contrariamente, um valor de  $R = 0.5$  e  $\beta \neq 0.5$  significa que há simetria da velocidade, mas não da aceleração. Estes perfis podem ser encontrados para menores profundidades quando as ondas estão prestes a rebentar e nas zonas de *surf* e *swash*. Comummente, essas ondas denominam-se por ondas em dente de serra (*sawtooth waves*). Na Fig. 2 esquematizam-se os dois tipos de séries temporais de  $u$  e  $a$  descritos anteriormente.

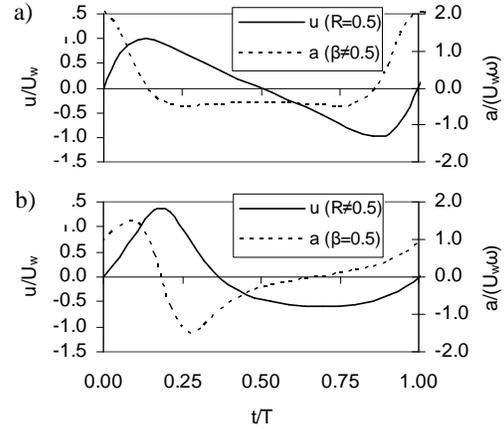


Fig. 2. Séries temporais da velocidade e aceleração orbital para ondas com: (a) assimetria de acelerações e (b) assimetria de velocidades.

Os efeitos não lineares associados às assimetrias descritas podem ser reproduzidos através de modelos de resolução de fase de ondas (e.g., modelos de Boussinesq, modelos RANS) que simulam a propagação e a transformação das ondas à medida que se aproximam da costa. Contudo, estes modelos são computacionalmente exigentes e, por motivos práticos, é usual recorrer-se a uma representação da onda através de teorias analíticas simples (lineares ou não lineares).

Para o efeito, desenvolveu-se uma expressão analítica simples que contempla todos os graus de assimetria de velocidades e acelerações (Abreu *et al.*, 2010):

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

onde  $U_w$  representa a amplitude da velocidade orbital ( $U_w = (u_{max} - u_{min})/2$ ),  $\omega$  a velocidade angular associada a uma onda de período  $T$  ( $\omega = 2\pi/T$ ),  $r$  um índice que reflecte o grau da não linearidade ( $-1 < r < 1$ ),  $\phi$  um parâmetro de forma da onda ( $-\pi/2 \leq \phi \leq \pi/2$ ) e  $f$  um factor adimensional que assegura que a amplitude da velocidade orbital iguale  $U_w$  ( $f = \sqrt{1 - r^2}$ ).

O caso particular de  $r=0$  corresponde à forma sinusoidal. Para  $r \neq 0$ ,  $\phi=0$  reflecte a assimetria da aceleração (Fig. 2a),  $\phi=-\pi/2$  a assimetria da velocidade (Fig. 2b) e  $-\pi/2 < \phi < 0$  resulta em combinações simultâneas de assimetrias de velocidades e acelerações.

As experiências realizadas no túnel de ondas consideraram três categorias distintas associadas às diferentes condições hidrodinâmicas reproduzidas. A

Série A consistiu na reprodução de velocidades orbitais com diferentes graus de assimetria na aceleração; a Série B é análoga à Série A, mas com uma corrente colinear adicional,  $U_0$ , e contrária à da propagação das ondas; e a Série C onde se introduziram graus de assimetria de velocidades e acelerações simultaneamente. O valor médio quadrático da velocidade,  $U_{rms}$ , foi mantido constante para todas as condições ( $\approx 0.9$  m/s). A Tabela I sumaria as características hidrodinâmicas para os diversos testes reproduzidos no túnel de ondas.

Tabela I. Condições experimentais

	$U_w$ (m/s)	$U_0$ (m/s)	$T$ (s)	$r$ (-)	$\phi$ (rad)	$R$ (-)	$\beta$ (-)
A1	1.28	0	7	0.28	0.00	0.64	0.50
A2	1.25	0	10	0.27	0.15	0.63	0.49
A3	1.28	0	7	0.44	0.00	0.72	0.50
A4	1.25	0	10	0.45	0.08	0.72	0.49
B1	1.27	-0.22	7	0.28	0.00	0.64	0.50
B2	1.25	-0.44	7	0.28	0.00	0.64	0.50
B3	1.24	-0.22	7	0.42	0.00	0.71	0.50
B4	1.25	-0.44	7	0.43	-0.09	0.71	0.51
C1	1.25	0	7	0.43	-0.93	0.61	0.59
C2	1.36	0	10	0.42	-0.97	0.60	0.59
C3	1.25	0	7	0.36	-1.37	0.53	0.59

Durante as experiências foram efectuadas medições detalhadas da velocidade do escoamento e da concentração de sedimentos na zona de suspensão e junto ao fundo recorrendo a diferente instrumentação (Silva et al., submetido) e estimadas as taxas de transporte médias no ciclo do escoamento oscilatório,  $q_s$ .

### 3. MODELOS DE TRANSPORTE

Nesta secção, apresentam-se três modelos para cálculo das taxas de transporte sedimentar que visam integrar as características hidrodinâmicas descritas associadas à assimetria da onda. Estes baseiam-se em arquétipos conceptuais distintos, contemplando os efeitos da aceleração de diferentes formas. Seguidamente, os modelos são descritos sucintamente. Uma descrição mais pormenorizada poderá ser encontrada nos artigos originais ou em Silva et al. (submetido).

#### 3.1. Hoefel and Elgar (2003) – HE03

Drake e Calantoni (2001) sugeriram uma modificação das formulações clássicas de modelos de transporte sedimentar do tipo energético (Bailard, 1981) para incorporar os efeitos da aceleração no transporte por arrastamento. Esse melhoramento deveu-se à introdução de um descritor da aceleração que pode ser calculado em termos de momentos estatísticos da aceleração junto ao fundo  $a_{spike} = \langle a^3 \rangle / \langle a^2 \rangle$ . Nesta equação, os parênteses  $\langle \rangle$

denotam uma média temporal na fase da onda. Hoefel e Elgar (2003) estenderam o trabalho de Drake e Calantoni (2001) para ondas não regulares.

#### 3.2. Nielsen (2006) – N06

Nielsen (2006) apresenta uma fórmula melhorada para o cálculo de  $q_s$  do género de Meyer-Peter and Müller's (1948). A determinação do transporte sedimentar por arrastamento baseia-se no parâmetro de Shields,  $\theta$ . A introdução dos efeitos da aceleração é introduzida em  $\theta$ , através do cálculo da tensão de atrito instantânea junto ao fundo,  $\tau$ . Nielsen propõe uma parametrização de  $\tau$  que incorpora as séries temporais da velocidade e da aceleração, bem como o desfazamento entre as velocidades e as tensões de atrito.

#### 3.3. Silva et al. (2006) – S06

Silva et al. (2006), basearam-se no trabalho de Dibajnia e Watanabe (1992), desenvolvendo um modelo prático de transporte semi não estacionário que calcula taxas de transporte sedimentar para escoamentos oscilatórios puros ou para combinações de ondas e correntes. Os efeitos não estacionários são descritos mediante a interacção do fluxo de sedimentos entre os dois meios ciclos da oscilação sucessivos. As assimetrias do escoamento são incluídas no modelo usando factores de fricção diferentes sob a crista e a cava da onda.

## 4. RESULTADOS

Nesta secção, as taxas de transporte estimadas pelos três modelos práticos de transporte são confrontadas com os resultados experimentais correspondentes às diferentes condições hidrodinâmicas das Series A, B e C, descritos na Secção 2. Na Fig. 3 observa-se que, apesar da diferente génese dos modelos, os resultados experimentais são previstos sensivelmente dentro de um factor de 2, i.e., entre 50 e 200% do transporte medido (linhas a tracejado). Para as ondas sem correntes (Séries A e C) o modelo N06 é o que se ajusta melhor aos resultados experimentais. Segue-se o modelo S06 e, finalmente, o HE06 que sobrestima mais os valores de  $q_s$  correspondentes à Série A. As diferenças maiores entre os resultados dos modelos ocorrem para os casos da Série B onde há adição de correntes. Neste caso o modelo N06 subestima os resultados experimentais e os outros dois modelos sobrestimam-nos. O modelo de HE03 é, neste caso, o que ostenta melhor acordo com os dados medidos. Tal facto poderá dever-se ao facto das constantes de calibração terem sido obtidas para condições de campo que contemplavam correntes de fundo.

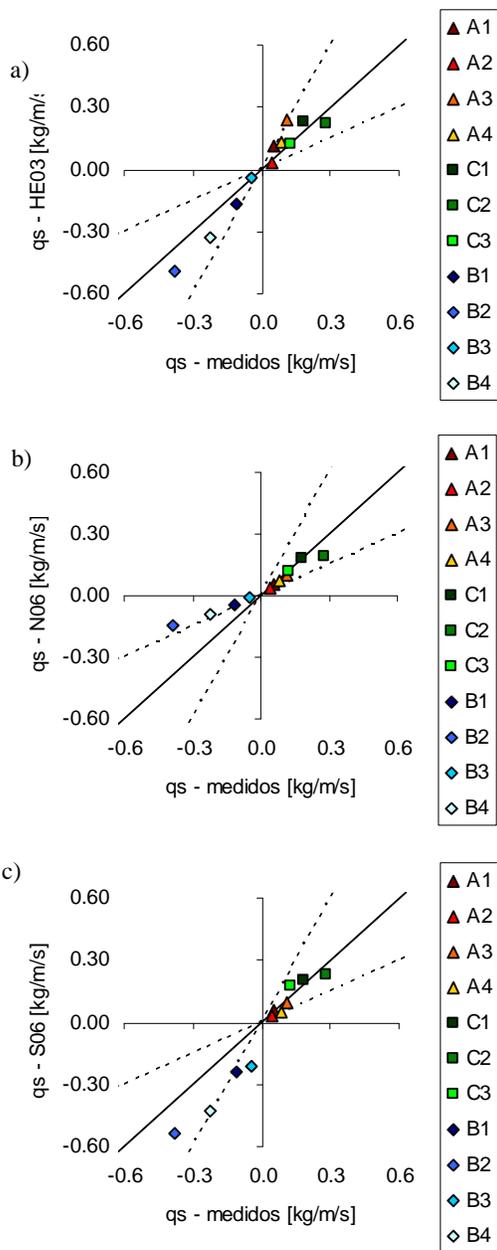


Fig. 3. Comparação dos transportes previstos com os medidos: (a) HE03, (b) N06 e (c) S06.

## 5. CONCLUSÕES

Com este trabalho pretendeu-se mostrar a importância da forma das ondas no que diz respeito à mobilização e transporte de sedimentos. Para o efeito, apresentaram-se dados de taxas transporte obtidos no túnel de ondas de Deltares para o regime de *sheet flow* (fundo plano). Diversos graus de assimetria da velocidade e da aceleração do escoamento orbital junto ao fundo foram considerados e os resultados obtidos mostram a importância da não-linearidade da onda no que diz respeito ao estudo do trânsito sedimentar.

A fiabilidade de três modelos práticos de transporte é confrontada quanto à acuidade da previsão das taxas de transporte sedimentar. Apesar de se observarem ligeiras discrepâncias nos resultados, os modelos mostram-se relativamente eficazes em prever o transporte para estes tipos de assimetrias.

## 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 resultados experimentais apresentados foram obtidos através do projecto de I&D TRANSKEW (“sand TRANsport induced by SKEWed waves and currents”) apoiado pela European Community's Sixth Framework Programme através da Integrated Infrastructure Initiative HYDRALAB III, contrato n.º 022441(RII3).

## REFERÊNCIAS

- Abreu, T., Silva, P.A., Sancho, F. e Temperville, A. (2010). Analytical approximate wave form for asymmetric waves. *Coastal Eng.*, 57, 656-667.
- Bailard, J.A. (1981). An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach, *J. Geo. Research*, 86, C11, 10938-54.
- Dibajnia, M., Watanabe, A. (1992). Sheet flow under non-linear waves and currents. *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, 2015-2028.
- Drake, T.G. e Calantoni, J. (2001). Discrete particle model for sheet flow sediment transport in the nearshore. *J. Geo. Research*, 106, C9, 19859-19868.
- Hoefel, F., Elgar, S. (2003). Wave induced sediment transport and sand bar migration. *Science*, 299, 1855-1887.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. *Proc. 2nd Congress of the Int. Ass. Hydraulic Structures Research*, Stockholm.
- Nielsen, P. (2006). Sheet flow sediment transport under waves with acceleration Skewness and boundary layer streaming, *Coastal Engineering*, 53, 749-758.
- Silva, P.A., Temperville, A., Seabra Santos, F. (2006). Sand transport under combined current and wave conditions: a semi-unsteady, practical model, *Coastal Engineering*, 53, 897-913.
- Silva, P.A., Abreu, T., Van der A, D.A., Sancho, F., Ruessink, B.G., Van der Werf, J.J. e Ribberink, J.S. (2010). Sediment transport in non-linear skewed oscillatory flows: the Transkew experiments, *J. Hydraulic Research*, submetido.