

Comparação de técnicas de absorção passiva de ondas com avaliação da agitação incidente e refletida em canal

J. M. Paixão Conde (1, 2, 3), R. Capitão (2), M. G. Neves (2) e C. J. Fortes (2)

- (1) DEMI, FCT, UNL, Campus de Caparica, 2829 - 516 Caparica. jpc@fct.unl.pt.
 (2) NPE/DHA, LNEC, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa.
 (3) IDMEC, IST, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa.

Resumo: Neste artigo é aplicado o método de separação de ondas incidentes e refletidas de Mansard e Funke (1980), para fundo horizontal, considerando duas técnicas de absorção passiva das reflexões das ondas implementadas na extremidade do canal oposta ao bater. Assim, consideraram-se séries temporais de elevação da superfície livre provenientes de simulações físicas efetuadas no canal de ondas irregulares COI3 do LNEC e efetuaram-se ensaios para diversas condições de agitação regular com períodos de onda de 1.1, 1.5, 2.0 e 2.5 s e alturas de onda de 8 e 10 cm, considerando duas técnicas de absorção passiva, *i.e.*, utilizando tijolos ou tapetes porosos colocados no chão do canal nas imediações da parede oposta ao gerador de ondas. Os coeficientes de reflexão obtidos para estas soluções, usando o referido método, foram comparados com os obtidos considerando uma parede vertical na extremidade do canal.

Palavras chave: ondas incidentes, ondas refletidas, separação, absorção passiva, canal.

1. INTRODUÇÃO

O tema da separação da agitação total em agitação incidente e em agitação refletida em canais e tanques tem sido tratado em várias comunicações, como, por exemplo, em Sousa *et al.* (2011), em que são descritos e comparados os métodos de separação mais utilizados em canais de ondas irregulares de laboratórios de hidráulica marítima. Nesse trabalho, foram usados vários métodos de separação de ondas incidentes e refletidas, nomeadamente os de Mansard e Funke (1980), quer para fundo horizontal quer inclinado, considerando três sondas, e foi verificada a exatidão teórica desses métodos quando aplicados a um conjunto de simulações simples, numéricas e físicas, embora para condições invariáveis de absorção passiva de reflexão.

A separação da agitação total em agitação incidente e refletida é fundamental para o conhecimento dos coeficientes de reflexão de uma estrutura marítima ou de uma praia, assim como é relevante em ensaios de campo ou laboratoriais e mesmo em simulação numérica. Por exemplo, pode ser útil para avaliar: a) a resposta de determinada estrutura à ação de ondas incidentes com características predefinidas; b) a agitação incidente através da agitação medida em frente da obra, em ensaios de galgamentos e estabilidade; c) as características dissipativas dos enrocamentos utilizados em canais de ondas experimentais; d) as características dissipativas de técnicas de absorção numérica, correntemente utilizadas em simulação numérica computacional envolvendo propagação de ondas, etc..

No presente estudo, aplica-se o método de separação de Mansard e Funke para fundo horizontal, considerando a utilização de três sondas. Para a

implementação deste método foi usado um programa em MATLAB (Sousa *et al.*, 2011). Este foi aplicado a três casos de modelação física, correspondentes a características refletivas (ou dissipativas) diferentes de um canal de ondas: parede refletiva, parede porosa e tapetes porosos.

2. MÉTODOS DE SEPARAÇÃO DE AGITAÇÃO INCIDENTE E REFLETIDA

Sousa *et al.* (2011) descrevem alguns dos métodos de separação de ondas existentes, bem como aplicações dos mesmos. A título de exemplo, podem-se citar os métodos de Goda e Suzuki (1976), Mansard e Funke (1980) e Baquerizo (1995), aplicados no domínio da frequência, e os de Frigaard e Brorsen (1995) e de Baldock e Simmonds (1999), aplicados no domínio do tempo. Mansard e Funke (1980) propõem a utilização de três sondas e um método de mínimos quadrados para separar a agitação incidente e a refletida. Esta técnica permite ultrapassar algumas das limitações dos métodos que recorrem apenas a duas sondas, como é o caso do método de Goda e Suzuki (1976). Baquerizo (1995) modificou o método de Mansard e Funke de forma a considerar fundos com profundidade variável.

De acordo com Mansard e Funke (1980), o seu método apresenta algumas limitações no que diz respeito ao espaçamento das sondas (Fig. 1): a distância x_{12} não pode ser igual a $L/2$ (sendo L o comprimento de onda da onda incidente) ou a múltiplos de $L/2$; e x_{13} não pode ser um múltiplo de x_{12} . Estes autores recomendam: $x_{12}=L/10$; $L/6 < x_{13} < L/3$; $x_{13} \neq L/5$; $x_{13} \neq 3L/10$; e que a distância à estrutura refletiva seja superior a L . Outra limitação deste método (e de todos os outros aqui mencionados) é o pressuposto de que a energia das

ondas re-refletidas pelo gerador de ondas é pequena quando comparada com a energia das ondas incidentes.

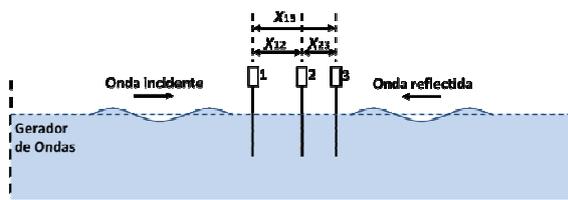


Fig. 1. Esquema do posicionamento das sondas.

Sousa *et al.* (2011) aplicaram o método de Mansard e Funke (1980) para fundo horizontal a ondas regulares geradas numericamente a partir da teoria linear das ondas e constataram que, para estas condições, as distâncias de posicionamento das sondas podem ser superiores ou inferiores às sugeridas por Mansard e Funke ($0.05L < x_{12} < 0.58L$ e entre $0.14L < x_{13} < 0.66L$) podendo x_{12} ser igual, maior ou menor que x_{23} . No entanto, estas distâncias não deverão ser superiores a L .

3. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

Os testes experimentais efetuados para este trabalho foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) no canal de ondas COI3, equipado com um gerador de ondas irregular (Fig. 2). O comprimento útil do canal é de 32.57 m pois o bateror encontra-se a 5.9 m da sua extremidade.



Fig. 2. Vistas do canal de ondas utilizado nos ensaios experimentais.

O canal tem geometria peculiar. O perfil longitudinal do fundo é mostrado de forma simplificada na Fig. 3, para uma profundidade de água $d=0.3$ m na origem do sistema de coordenadas (sendo y a coordenada vertical e x a coordenada horizontal). Este perfil consiste em duas zonas de inclinação constante (1:1 e 1:22), até $x=0$, depois uma zona de profundidade constante, a seguir uma rampa de inclinação constante (1:20) e, por fim, uma zona com um perfil de enrocamento com declive 1:2.

O canal é convergente em planta (Fig. 4) desde $x=-12.5$ m até $x=-1.75$ m, tendo o restante canal largura constante.

Tal como referido, foram efetuados ensaios para diversas condições de agitação regular, com períodos de onda de 1.1, 1.5, 2.0 e 2.5 s e alturas de onda de 8 e 10 cm.

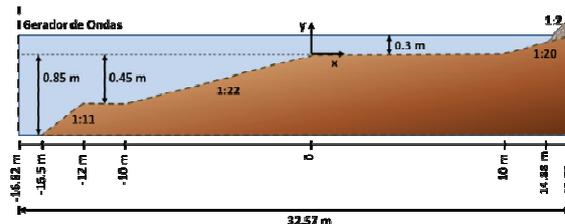


Fig. 3. Perfil do fundo do canal dos ensaios.

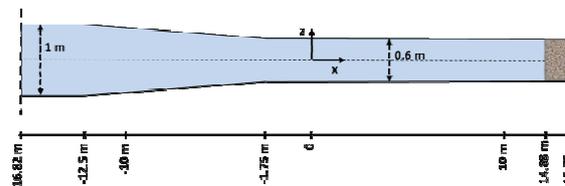


Fig. 4. Planta do canal dos ensaios.

Foi colocada uma sonda resistiva a 6 m do bateror para a caracterização das condições de agitação em todos os ensaios, Fig. 5a. A função desta sonda é a de verificar que as características principais das ondas geradas pelo bateror são as pretendidas em cada ensaio.

Para possibilitar a medição da elevação da superfície livre ao longo do canal de ondas, dispôs-se de oito sondas resistivas, separadas de 20 cm entre si, Fig. 5b, agrupadas e solidárias a uma estrutura móvel. Esta estrutura pode ser colocada em diferentes posições de modo a registar valores em vários pontos ao longo do canal. A frequência de aquisição para todas as sondas foi de 25 Hz.



Fig. 5. a) Sonda junto ao bateror; b) Conjunto de 8 sondas.

Foram efetuados ensaios em três situações distintas: 1) utilizando uma parede vertical, totalmente refletiva, colocada com a sua face frontal em $x=10$ m (Fig. 6a); 2) utilizando uma parede porosa construída com tijolos furados, de dimensões $30 \times 20 \times 11$ cm, colocada com a sua face frontal em $x=12.36$ m e com o alinhamento dos furos colinear com a propagação das ondas (Fig. 6b); 3) utilizando 2 tapetes porosos colocados na praia de dissipação do canal, no fundo, desde $x=12.3$ m até ao início do talude de enrocamento (Fig. 6c).

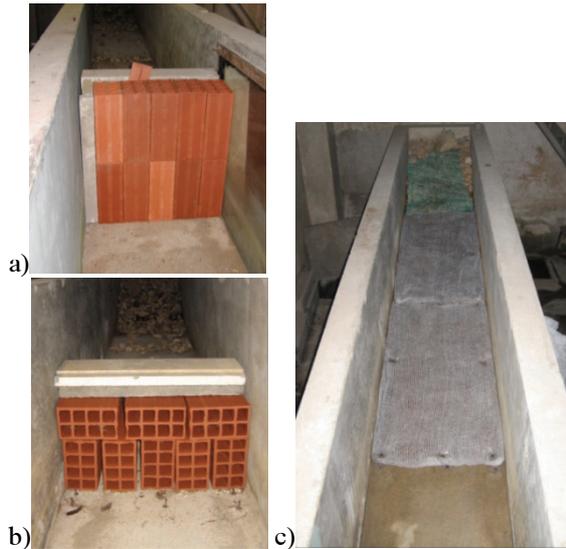


Fig. 6. a) Parede vertical totalmente refletiva; b) Parede vertical porosa; c) Praia atapetada porosa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela I apresenta as características das ondas regulares testadas para fundo horizontal e os valores-limite das distâncias entre sondas preconizados por Mansard e Funke (1980). A tabela II apresenta o posicionamento das 8 sondas de nível, do tipo resistivo, utilizadas na zona do canal com fundo horizontal. Respeitando os impedimentos e limites sugeridos por Mansard e Funke e o espaçamento das sondas existente, considerou-se para distância x_{ij} entre as sondas “i” e “j”: $x_{12}=0.4$ m para todos os ensaios; $x_{13}=0.6$ m para os ensaios com ondas de períodos 1.1, 1.5 e 2.0 s; e $x_{13}=1.0$ m para ensaios com ondas de período 2.5 s.

Atendendo a que o gerador de ondas do canal COI3 ainda não tem disponível um sistema de absorção dinâmica funcional, e para evitar o efeito indesejável das re-reflexões do batedor nos registos das elevações da superfície livre, optou-se por considerar registos com duração máxima de 100 s.

Tabela I. Características dos ensaios com ondas regulares e frações dos comprimentos de onda associados.

T (s)	H (m)	d (m)	L (m)	d/L	L/10	L/6	L/3	L/2	L/5	0.3L
1.1	0.08	0.3	1.57	0.191	0.157	0.262	0.523	0.785	0.314	0.471
1.1	0.10	0.3	1.57	0.191	0.157	0.262	0.523	0.785	0.314	0.471
1.5	0.08	0.3	2.34	0.128	0.234	0.390	0.780	1.170	0.468	0.702
1.5	0.10	0.3	2.34	0.128	0.234	0.390	0.780	1.170	0.468	0.702
2.0	0.08	0.3	3.26	0.092	0.326	0.543	1.087	1.630	0.652	0.978
2.0	0.10	0.3	3.26	0.092	0.326	0.543	1.087	1.630	0.652	0.978
2.5	0.08	0.3	4.15	0.072	0.415	0.692	1.383	2.075	0.830	1.245
2.5	0.10	0.3	4.15	0.072	0.415	0.692	1.383	2.075	0.830	1.245

Tabela II. Posicionamento ao longo do canal das 8 sondas de nível utilizadas.

sonda	1	2	3	4	5	6	7	8
x (m)	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4

As tabelas III, IV e V apresentam os resultados da aplicação do método aos dados obtidos nos ensaios com parede vertical totalmente refletiva, parede

vertical porosa e praia com tapetes porosos, respetivamente. Nestas tabelas apresentam-se: o coeficiente de reflexão global ($r0$), dado pela raiz quadrada do cociente entre momentos de ordem zero dos espectros refletido e incidente, o coeficiente de reflexão de pico (rp), cociente entre as ordenadas máximas dos espectros refletido e incidente, os períodos de pico das ondas incidente e refletida (Tpi e Tpr) e também as alturas significativas das ondas incidente e refletida (Hip e Hrp).

Uma vez que as oito sondas de nível permitem cinco posicionamentos distintos para as ondas com T igual a 1.1, 1.5 e 2.0 s e três posicionamentos para a $T=2.5$ s, nas tabelas III, IV e V apresentam-se os valores médio e desvio padrão para cada um dos ensaios de nome genérico “TxyHwz”, em que “Txy” significa período de onda de “xy” segundos e “Hwz” significa altura de onda de “wz” centímetros.

Tabela III. Parede vertical totalmente refletiva.

Onda	r0	rp	Tpi	Tpr	Hi	Hr	Hip	Hrp	
T11H08	0.872	0.872	1.099	1.099	0.061	0.054	0.061	0.053	Média
	0.009	0.009	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	D. P.
T11H10	0.912	0.911	1.099	1.099	0.045	0.041	0.045	0.041	Média
	0.007	0.007	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	D. P.
T15H08	0.855	0.851	1.493	1.493	0.081	0.069	0.077	0.066	Média
	0.007	0.017	0.000	0.000	0.003	0.002	0.002	0.002	D. P.
T20H08	0.868	0.898	2.000	2.000	0.075	0.065	0.068	0.061	Média
	0.013	0.017	0.000	0.000	0.004	0.003	0.004	0.003	D. P.

Tabela IV. Parede vertical porosa.

Onda	r0	rp	Tpi	Tpr	Hi	Hr	Hip	Hrp	
T11H08	0.304	0.303	1.099	1.099	0.117	0.036	0.117	0.035	Média
	0.036	0.036	0.000	0.000	0.004	0.004	0.004	0.004	D. P.
T11H10	0.295	0.291	1.099	1.099	0.128	0.038	0.127	0.037	Média
	0.022	0.022	0.000	0.000	0.003	0.002	0.003	0.002	D. P.
T15H08	0.271	0.217	1.493	1.493	0.113	0.031	0.107	0.023	Média
	0.056	0.022	0.000	0.000	0.002	0.007	0.002	0.003	D. P.
T15H10	0.256	0.215	1.493	1.493	0.132	0.034	0.124	0.027	Média
	0.028	0.028	0.000	0.000	0.002	0.004	0.004	0.003	D. P.
T20H08	0.274	0.178	2.000	0.867	0.127	0.035	0.106	0.019	Média
	0.047	0.028	0.000	0.183	0.004	0.005	0.007	0.002	D. P.
T20H10	0.268	0.130	2.000	0.667	0.127	0.034	0.102	0.013	Média
	0.044	0.019	0.000	0.000	0.004	0.004	0.006	0.002	D. P.
T25H08	0.331	0.395	2.500	2.500	0.108	0.036	0.076	0.030	Média
	0.011	0.012	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	D. P.
T25H10	0.363	0.092	1.250	2.500	0.126	0.046	0.083	0.008	Média
	0.013	0.012	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	D. P.

Da análise das tabelas anteriores, verifica-se que para as ondas mais curtas, a praia porosa revela grande eficiência face à parede porosa (e.g., ensaio T11H08, tabelas IV e V).

Claramente, a situação de parede vertical totalmente refletiva produz (como esperado) maiores valores de reflexão; porém, estes estão aquém do valor teórico unitário. Esta diferença poderá dever-se à não existência de absorção dinâmica do batedor, o qual, como se referiu, produz, para além das ondas incidentes, também ondas re-refletidas, indesejáveis. Verifica-se também que o efeito da rebentação, que ocorre no troço horizontal do canal para as ondas T20H10 e T25H10, poderá influenciar

negativamente os resultados do método, que não é válido nessas condições.

Tabela V. Praia de tapetes porosos e fundo horizontal.

Onda	r_0	r_p	T_{pi}	T_{pr}	H_i	H_r	H_{ip}	H_{rp}	
T11H08	0.065	0.059	1.099	1.099	0.095	0.006	0.094	0.006	Média
	0.010	0.013	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	D. P.
T11H10	0.052	0.044	1.099	1.099	0.118	0.006	0.118	0.005	Média
	0.014	0.018	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	D. P.
T15H08	0.148	0.060	1.493	0.752	0.104	0.015	0.098	0.006	Média
	0.026	0.031	0.000	0.000	0.002	0.003	0.003	0.003	D. P.
T15H10	0.156	0.043	1.493	0.752	0.131	0.020	0.126	0.005	Média
	0.022	0.014	0.000	0.000	0.001	0.003	0.001	0.002	D. P.
T20H08	0.162	0.062	2.000	0.667	0.113	0.018	0.096	0.006	Média
	0.021	0.006	0.000	0.000	0.001	0.002	0.003	0.001	D. P.
T20H10	0.220	0.068	2.000	0.667	0.129	0.028	0.100	0.007	Média
	0.017	0.014	0.000	0.000	0.001	0.002	0.004	0.002	D. P.
T25H08	0.304	0.145	2.500	1.250	0.117	0.036	0.084	0.012	Média
	0.004	0.085	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.007	D. P.
T25H10	0.302	0.082	2.500	1.042	0.111	0.034	0.080	0.007	Média
	0.009	0.042	0.000	0.361	0.001	0.001	0.001	0.003	D. P.

Em alguns casos os períodos da onda refletida são frações dos períodos de onda incidente correspondentes, o que se pode dever a uma transferência de energia entre componentes, fazendo com que o período da onda incidente não seja o de maior energia do espectro.

Face aos resultados obtidos neste trabalho, julga-se interessante proceder à comparação dos resultados aqui mostrados com outros provenientes de métodos alternativos (e.g., método de Frigaard e Brorsen, 2005) e/ou outras implementações do mesmo método de Mansard e Funke (1980), quer em fundo horizontal quer em fundo inclinado (Baquerizo, 1995), assim como à utilização de mais do que 3 sondas na aplicação do método de Mansard e Funke (1980), Capitão (2002).

Finalmente, chama-se a atenção para o facto de na reconstituição dos espectros incidente e refletido, os métodos de separação produzirem, fora da zona de frequências de interesse do espectro pretendido, alguns picos daqueles espectros sem qualquer significado físico. Tais picos surgem como consequência de divisões de valores muito pequenos, pelo que, quando se analisam os resultados da reconstrução dos espectros incidente e refletido, deve tomar-se sempre em conta, quer a zona de interesse das frequências presentes no espectro pretendido, quer a ordem de grandeza do seu pico.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no LNEC no âmbito da licença sabática de J. M. Paixão Conde. Os autores agradecem o financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através dos projetos HIDRALERTA e DESTAQ e do centro de investigação IDMEC. Agradecem ainda o apoio de Diogo Neves, António Reis e André Martins nalguns dos ensaios experimentais.

REFERÊNCIAS

- Baldock, T.E., Simmonds, D.J. (1999). Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry. *Coast. Eng.*, 38, 167–176.
- Baquerizo, A. (1995). *Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y de predicción*. Tese de doutoramento. Universidade de Cantábria. 180 pp.
- Capitão, R. (2002). *Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima*. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa. 434 pp.
- Frigaard, P., Brorsen, M. (1995). A time-domain method for separating incident and reflected irregular waves. *Coast. Eng.*, 24, 205–215.
- Goda, Y., Suzuki, Y. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proc. 15th Coastal Eng. Conf. ASCE*, Honolulu, 828–845.
- Mansard, E. P. D., Funke, E. R. (1980). The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Proc. 17th Coastal Eng. Conf. ASCE*, Sidney, 154–172.
- Sousa, G., Neves, M.G., Capitão, R. (2011). Separação de agitação incidente e reflectida: Testes comparativos. *Proc. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PLANAC*, 14 pp.