

# SEPARAÇÃO DE AGITAÇÃO INCIDENTE E REFLECTIDA: TESTES COMPARATIVOS.

Gil A.C.F. SOUSA

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443420, [gsousa@lnec.pt](mailto:gsousa@lnec.pt)*

Maria da Graça NEVES

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443426, [gneves@lnec.pt](mailto:gneves@lnec.pt)*

Rui CAPITÃO

*Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, +351.218443688, [rcapitao@lnec.pt](mailto:rcapitao@lnec.pt)*

## RESUMO

Neste artigo descrevem-se alguns dos métodos de separação de ondas incidentes e reflectidas mais utilizados em canais de ondas irregulares de laboratórios de hidráulica marítima. Os métodos de Mansard e Funke (situações de fundo horizontal e de fundo variável) e de Frigaard e Brorsen (com cálculo da separação em tempo diferido), são apresentados e implementados mediante programação em *MATLAB*. Estes métodos foram aplicados a séries temporais da elevação da superfície livre provenientes de simulações numéricas e de simulações físicas, em tanque, como forma de verificação da sua exactidão teórica e da sua adequada implementação computacional. Estas verificações permitiram constatar a exactidão dos métodos, para os sinais simulados numericamente, e a sua boa adequabilidade aos modelos físicos, para os sinais obtidos em tanque.

**Palavras-chave** – agitação marítima, ondas incidentes, ondas reflectidas, separação, canal, tanque.

## 1 INTRODUÇÃO

Em casos práticos de Engenharia Costeira e Portuária, a separação da agitação marítima em ondas incidentes e reflectidas, é muitas vezes necessária para o conhecimento dos coeficientes de reflexão de uma estrutura marítima ou de uma praia. Em ensaios em laboratório, esta questão é relevante em muitos casos. A avaliação da resposta de determinada estrutura à acção de ondas incidentes com características predefinidas ou a determinação da agitação incidente através da agitação medida em frente da obra, em ensaios de galgamentos e estabilidade, são exemplos onde a utilização de métodos de separação de agitação em incidente e reflectida se tornam necessários. O conhecimento da agitação incidente é também importante nos ensaios de agitação, podendo assim ser corrigidos eventuais problemas de reflexão em estruturas ou nos contornos do modelo (Capitão, 2002).

Existem vários métodos de separação de ondas, a maioria deles baseados na manipulação da transformada de *Fourier*. Goda e Suzuki (1976) propuseram um método de separação de ondas a partir do espectro de frequências de ondas irregulares, utilizando informação proveniente de duas sondas co-lineares. Mansard e Funke (1980) melhoraram este método, ao utilizar 3 sondas e ao aplicar a técnica dos mínimos quadrados, reduzindo assim o ruído dos sinais incidente e reflectido obtidos. Contrariamente aos dois métodos anteriores, realizados no domínio da frequência, Frigaard e Brorsen (1995) propuseram um outro método baseado no domínio temporal, onde usam uma função especial de transferência para separar a série temporal em tempo real. Baldock e Simmonds (1999) modificaram o método de Frigaard e

Brorsen (1995) por forma a considerar fundos com batimetria bidimensional arbitrária na propagação das ondas em canal. Todos estes métodos foram desenvolvidos para a propagação de ondas unidireccionais. Contudo, somente o último e o método de Mansard e Funke alterado por Baquerizo (1995) consideram fundos de profundidade variável. As sondas intervenientes nestes métodos devem ser dispostas na direcção da propagação das ondas, e em posições específicas, com distâncias entre elas criteriosamente escolhidas para evitar problemas de instabilidades numéricas.

Neste estudo apresentam-se os métodos de separação de ondas incidentes e reflectidas de Mansard e Funke (para fundos horizontal e inclinado) e de Frigaard e Brorsen (em tempo diferido), implementados através de programação em *MATLAB* e aplicados a diferentes casos de estudo.

## 2 MÉTODOS DE SEPARAÇÃO

### 2.1 MANSARD E FUNKE 1980

Mansard e Funke (1980) propõem a decomposição do espectro de variância, obtido a partir de dados de elevações da superfície livre da água recolhidos em três sondas, em espectros incidente e reflectido. As três sondas devem estar colocadas a uma distância relativamente pequena, como será referido mais à frente, e dispostas num plano perpendicular à direcção principal de propagação da agitação.

Este método permite separar os espectros incidente e reflectido, assim como as respectivas séries, assumindo as seguintes simplificações:

- A agitação irregular é descrita pela sobreposição linear de um número infinito de componentes espectrais harmónicas discretas, com fase, amplitude e frequências próprias;
- Estas componentes propagam-se com velocidades de fase individuais, descritas pela relação de dispersão, obtida da teoria linear da onda.

Apresenta-se aqui o método de Mansard e Funke modificado por Baquerizo (1995). Admite-se que as séries de elevação da superfície livre da água,  $\eta_m(t)$ , nas três sondas, de índices  $m = 1, 2$  ou  $3$ , podem ser escritas da seguinte forma:

$$\eta_m(t) = \sum_{j=1}^N B_j^m e^{-i\omega_j t} \quad m=1, 2, 3 \quad (1)$$

em que  $B_j^m$  representa o coeficiente complexo da série de *Fourier* da função  $\eta_m(t)$ , correspondente à frequência angular  $\omega_j$ , e  $N$  o número de coeficientes complexos. A elevação da superfície livre  $\eta_m$  pode então ser descrita como a sobreposição de um número finito de ondas lineares que incidem e são reflectidas pela estrutura, cada uma delas com a sua amplitude, fase e frequência próprias:

$$\eta_m(x_m, t) = \sum_{j=1}^N (z_I^j e^{ik_j x_m} + z_R^j e^{-ik_j x_m}) e^{-i\omega_j t} \quad (2)$$

Nesta expressão,  $k_j$  é o número de onda correspondente à frequência angular  $\omega_j$  e à profundidade  $h_m$ , e  $z_I^j$  e  $z_R^j$  representam as amplitudes complexas das ondas incidentes e reflectidas respectivamente. Há que verificar que, para cada frequência angular:

$$\varepsilon_j^m = z_I^j e^{ik_j x_m} + z_R^j e^{-ik_j x_m} - B_j^m = 0 \quad m = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Devido a várias causas, nomeadamente a efeitos não lineares na propagação da onda e aos erros inerentes às medições, as funções de erro  $\varepsilon_j^m$  não são, em geral, nulas. Mansard e Funke (1980) propõem minimizar estes erros, minimizando a seguinte função-soma:

$$E_j^* = \sum_{m=1}^3 [\varepsilon_j^m(z_I^j, z_R^j)]^2 \quad (4)$$

Esta função, de valores complexos, é definida como a soma dos quadrados dos erros em cada um dos três sensores.

## 2.2 FRIGAARD E BRORSEN 1995

O método de Frigaard e Brorsen (1995) pode ser usado em tempo real, isto é, a separação pode ser efectuada à medida que a aquisição das sondas é efectuada, e em tempo diferido, isto é, a análise é efectuada à *posteriori*. Neste trabalho descreve-se somente a aplicação do método em tempo diferido.

Em ambos os casos, o método usa apenas duas sondas para caracterizar a agitação local no canal (Sonda 1 e Sonda 2, ver Figura 1). Considera-se a elevação da superfície livre - equação (5), à distância  $x$  do gerador de ondas, descrita como a soma das ondas incidentes e reflectidas.

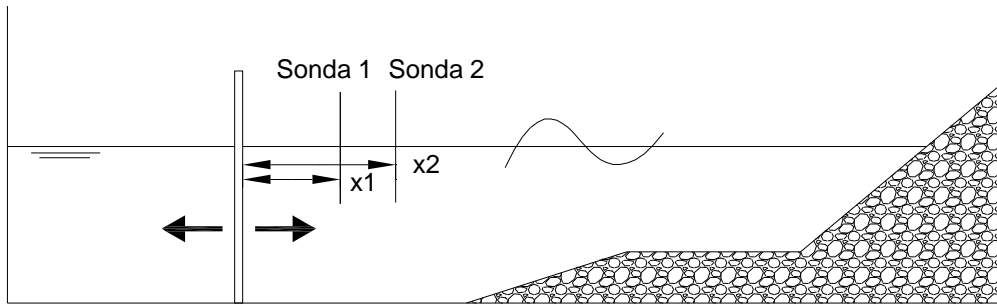


Figura 1: Esquema do posicionamento das sondas num canal para teste do método de Frigaard e Brorsen (1995).

$$\eta(x, t) = \eta_i(x, t) + \eta_r(x, t) = a_i \cos(2\pi f t - kx + \phi_i) + a_r \cos(2\pi f t + kx + \phi_r) \quad (5)$$

Nesta equação,  $f$  é a frequência,  $a = a(f)$  é a amplitude da onda,  $k = k(f)$  é o número de onda,  $\phi = \phi(f)$  é a fase e  $i$  e  $r$  são índices que correspondem às componentes incidente e reflectida, respectivamente, das ondas. Neste método fazem-se algumas manipulações ao sinal da elevação da superfície livre mudando a fase ao sinal recolhido em cada uma das posições, de maneira a que o sinal correspondente à parte incidente esteja na mesma fase nas duas sondas, enquanto o sinal correspondente à parte reflectida esteja mutuamente na fase oposta. Neste caso, a soma dos dois sinais manipulados é proporcional e está em fase com o sinal de onda incidente.

Uma amplificação, ou ganho,  $C$ , e uma mudança de fase teórica  $\phi^{theo}$  são introduzidas nas equações de elevação da superfície livre da água. Assim, na sonda localizada em  $x_i$  o sinal modificado ( $\eta^*$ ) será:

$$\eta^*(x_i, t) = C a_i \cos(2\pi f t - kx_i + \phi_i + \phi_i^{theo}) + C a_r \cos(2\pi f t + kx_i + \phi_r + \phi_i^{theo}) \quad (6)$$

A soma dos sinais modificados nas sondas 1 e 2 corresponde ao sinal de cálculo  $\eta^{calc}(t)$ . Sabe-se que  $\eta^{calc}(t)$  e  $\eta_i(x_i, t) = a_i \cos(2\pi ft - kx_i + \phi_i)$  têm sinais idênticos quando as seguintes condições são cumpridas:

$$2C \cos[0.5(-k\Delta x - \phi_1^{theo} + \phi_2^{theo})] = 1 \quad (7)$$

$$0.5(-k\Delta x + \phi_1^{theo} + \phi_2^{theo}) = n \cdot 2\pi \quad n \in (0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (8)$$

$$0.5(-k\Delta x + \phi_1^{theo} - \phi_2^{theo}) = \frac{\pi}{2} + m \cdot \pi \quad m \in (0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (9)$$

Resolvendo as equações de (7) a (9) em função a  $\phi_1^{theo}, \phi_2^{theo}$  e  $C$  chega-se às seguintes equações:

$$\phi_1^{theo} = k\Delta x + \frac{\pi}{2} + m\pi + n2\pi \quad (10)$$

$$\phi_2^{theo} = -\frac{\pi}{2} - m\pi + n2\pi \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \frac{\pi}{2} - m\pi)} \quad (12)$$

A Figura 2 apresenta um esquema do método onde são aplicados filtros ao sinal da Sonda 1 e Sonda 2, que posteriormente se somam dando origem ao sinal de onda incidente na Sonda 1.

O Filtro 1 corresponde à aplicação a  $\eta(x_1, t)$  de  $\phi_1^{theo}$  e  $C$  e o Filtro 2 à aplicação a  $\eta(x_2, t)$  de  $\phi_2^{theo}$  e  $C$ .

A solução do método em tempo diferido, até aqui apresentada, resolve o problema no domínio da frequência. Para a solução em tempo real (domínio do tempo) são utilizados filtros digitais cujas respostas a impulso são obtidas a partir das funções de resposta em frequência dos filtros 1 e 2.

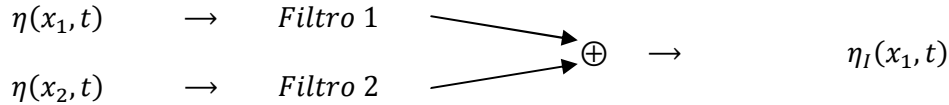


Figura 2: Manipulação de sinais do método de Frigaard e Brorsen (1995).

Substituindo os valores  $n = m = 0$  nas equações (10) a (12), resultam as funções de resposta em frequência  $H_1(f)$  e  $H_2(f)$ , para os filtros 1 e 2, respectivamente, apresentadas a seguir em notação complexa:

$$Re\{H_1(f)\} = \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \pi/2)} \cos(k\Delta x + \pi/2) \quad (13)$$

$$Im\{H_1(f)\} = \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \pi/2)} \text{sen}(k\Delta x + \pi/2)$$

$$Re\{H_2(f)\} = \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \pi/2)} \cos(-\pi/2) \quad (14)$$

$$Im\{H_2(f)\} = \frac{1}{2\cos(-k\Delta x - \pi/2)} \text{sen}(-\pi/2)$$

As respostas ao impulso dos filtros são encontradas através de transformadas inversas de *Fourier* das equações (13) e (14) e têm duração finita, pois envolvem  $N$  valores discretos da resposta em frequência complexa. Os coeficientes das respostas aos impulsos são calculados através de:

$$h^j = h(j\Delta t_{\text{filtro}}) = \sum_{r=0}^{N-1} H^r e^{i(2\pi r j/N)} \quad (15)$$

Nesta equação (15), os valores assumidos tanto por  $r$  como por  $j$  variam desde 0 até  $N - 1$  e  $H^r$  é a função de resposta em frequência dada pelas equações (13) e (14) onde  $f = r\Delta$ . O incremento de frequência  $\Delta f$  assume o valor dado por:

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t_{\text{filtro}}} \quad (16)$$

onde  $\Delta t_{\text{filtro}}$  é o incremento de tempo do filtro.

Frigaard e Brorsen (1995) chamam a atenção para a inevitável ocorrência de uma redução no desempenho do filtro, que apresenta menor exactidão dos resultados à medida em que as frequências do sinal de entrada não coincidem com as frequências calculadas do filtro discreto, em consequência de serem manipuladas apenas um número finito  $N$  de frequências. Analisando a equação (12) verifica-se que com o aumento do valor de  $N$ , um número maior de frequências fica incluído no filtro discreto, mas existem limites práticos para este aumento.

### 3 VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS

#### 3.1 DADOS USADOS

Para validar os métodos de separação de ondas incidente e reflectida com fundo de profundidade constante, estes foram testados ao caso de ondas geradas numericamente a partir da teoria linear de ondas. Após esta validação, aplicaram-se ainda os métodos a registos de elevações de superfície livre provenientes de um ensaio tridimensional (3D) de um porto, considerando profundidades constantes e variáveis.

Assim, para o primeiro caso, recorrendo à teoria linear de ondas, construíram-se as seguintes séries temporais de ondas regulares com 600 s de duração (Figura 3):

- propagação no sentido positivo (onda incidente)

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (17)$$

- propagação no sentido negativo (onda reflectida)

$$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} + \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (18)$$

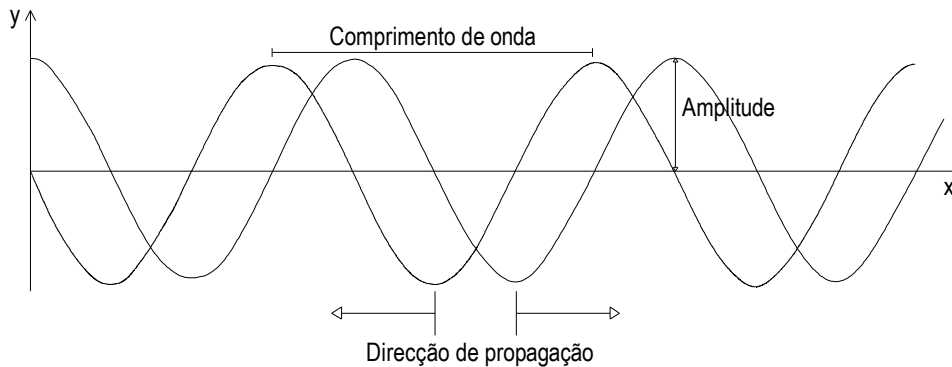


Figura 3: Representação esquemática da propagação de uma onda incidente e outra reflectida.

Recorrendo às equações (17) e (18), apenas foi necessário definir o período de onda ( $T$ ), a posição da sonda ( $x$ ) e a altura de onda ( $H$ ) para obter os respectivos sinais a separar. O comprimento de onda ( $L$ ) foi calculado através da equação (19), onde o número de onda ( $k = 2\pi/L$ ) foi calculado através de um processo iterativo.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (19)$$

A tabela 1 apresenta um resumo das características dos sinais considerados.

Tabela 1: Ondas regulares.

Onda	$H$ (m)	$T$ (s)	$L$ (m)	$f$ (Hz)
O1	0.30	2.00	4.62	0.50
O2	0.30	3.00	7.45	0.33
O3	0.40	3.00	7.45	0.33
O4	0.15	1.00	1.55	1.00

Foram geradas duas séries temporais para cada tipo de ondas, uma com o sentido da propagação, correspondente às ondas incidentes, e outra com o sentido contrário, correspondente às ondas reflectidas (Figura 3), designando-se por “O1i” a onda “O1” incidente e por “O1r” a correspondente onda reflectida. Posteriormente foram efectuadas combinações entre as diferentes séries de ondas de modo a testar os métodos de separação considerados neste trabalho.

Como se referiu atrás, foram também considerados registos da elevação da superfície livre provenientes de um ensaio tridimensional (3D) realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) para o porto de abrigo de Rabo de Peixe, nos Açores (ver Figura 4).



Figura 4: Modelo reduzido do Porto de Abrigo de Rabo de Peixe.

Para estes ensaios, foram instaladas 6 sondas de nível, do tipo resistivo (*Resistance Wave Gauges*) no modelo, 3 numa zona de profundidade constante (S1, S2 e S3), logo após o batedor, e as restantes 3 (S4, S5 e S6) numa zona de fundo com um declive aproximado de 3% (Figura 5), todas elas alinhadas com a direcção principal de propagação. Foram efectuados ensaios com agitação irregular, considerando diferentes períodos de pico e de alturas de onda significativas, para dois níveis de maré (Baixa-Mar e Preia-Mar). Os resultados destes ensaios, adquiridos considerando uma frequência de aquisição de 25 Hz, foram usados para testar o método de Mansard e Funke (1980), quer para fundo horizontal quer para fundo inclinado.

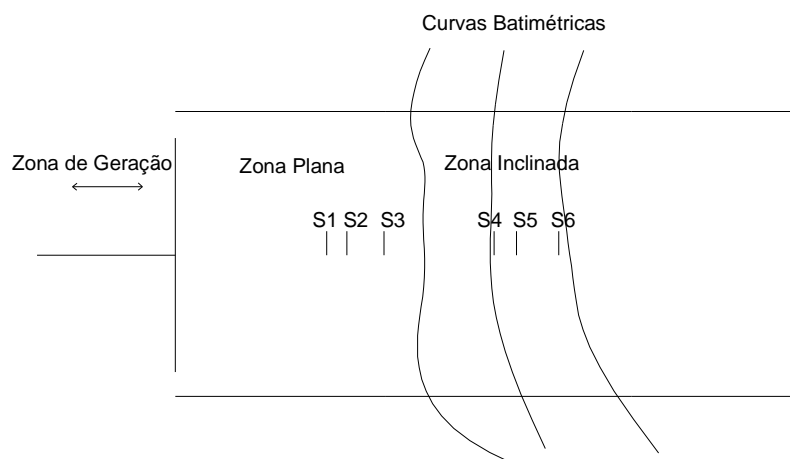


Figura 5: Esquema da zona de captação de alturas de superfície livre da água pelas sondas S1, S2, S3, S4, S5 e S6.

## 3.2 MANSARD E FUNKE 1980

### 3.2.1 Fundo horizontal

Para validar o método de Mansard e Funke (1980) em fundo horizontal, foram usadas as séries temporais de variação da superfície livre resultantes das simulações numéricas, obtidas com recurso à teoria linear. O método foi ainda aplicado aos dados dos ensaios 3D de Rabo de Peixe, recolhidos numa zona de profundidade constante (Figura 5).

As séries obtidas a partir da teoria linear resultam da soma das elevações da superfície livre de uma série de ondas incidentes, com período e altura de onda conhecidos, com uma série de ondas reflectidas, com período e altura de onda também conhecidos. A tabela 2 apresenta os resultados da aplicação do programa MF (implementado de acordo com o método de Mansard e Funke), em código MATLAB, aos referidos dados. Nesta pode ser observado o coeficiente de reflexão global ( $r0$ ), dado pela razão da altura de onda significativa reflectida,  $Hr$ , e da altura de onda significativa incidente,  $Hi$ , o coeficiente de reflexão de pico ( $rp$ ), os períodos de pico das ondas incidente e reflectida ( $Tpi$  e  $Tpr$ ) e também as alturas significativas das ondas incidente e reflectida ( $Hi$  e  $Hr$ ). Após a sua análise, pode-se afirmar que o método tem um excelente comportamento quando aplicado à sobreposição de duas ondas monocromáticas com a mesma direcção e sentidos opostos, obtendo-se exactamente os valores de altura e período incidentes e reflectidos testados.

Tabela 2: Testes de separação de ondulação pelo método de Mansard e Funke (1980).

Teste	Dados de Entrada					Posição das Sondas (m)			Resultados do programa MF					
	$h$ (m)	$Hi$ (m)	$Ti$ (s)	$Hr$ (m)	$Tr$ (s)	$x1$	$x2$	$x3$	$r0$	$rp$	$Hi$ (m)	$Tpi$ (s)	$Hr$ (m)	$Tpr$ (s)
O1 i+r	0.70	0.30	2.00	0.30	2.00	-0.75	-1.22	-2.01	1.00	1.00	0.30	2.00	0.30	2.00
O2 i+r	0.70	0.30	3.00	0.30	3.00	-1.20	-1.96	-3.24	1.00	1.00	0.30	3.00	0.30	3.00
O1i+O2r	0.70	0.30	2.00	0.30	3.00	-0.75	-1.22	-2.01	1.00	0.00	0.30	2.00	0.30	3.00
O2i+O1r	0.70	0.30	3.00	0.30	2.00	-1.20	-1.96	-3.24	1.00	0.00	0.30	3.00	0.30	2.00
O3i+O2r	0.70	0.40	3.00	0.30	3.00	-1.20	-1.96	-3.24	0.75	0.75	0.40	3.00	0.30	3.00
O1i+O4r	0.70	0.30	2.00	0.15	1.00	-0.75	-1.22	-2.01	0.50	0.00	0.30	2.00	0.15	1.00
O4i+O3r	0.70	0.15	1.00	0.40	3.00	-0.25	-0.41	-0.67	2.67	0.00	0.15	1.00	0.40	3.00

A tabela 3 apresenta os resultados dos testes efectuados com os dados provenientes dos ensaios em modelo 3D do porto de Rabo de Peixe, para as situações de Baixa-Mar. No que diz respeito ao período da onda incidente, os resultados são bastante satisfatórios com valores muito próximos do esperado. Para a situação de Baixa-Mar a reflexão global é da ordem dos 20 %, e os resultados obtidos de alturas de onda significativas incidente e reflectida apresentam alguma coerência entre si. Na coluna "Sonda 1" da tabela, apresenta-se o resultado do tratamento dos dados de elevação de superfície medidos nesta sonda através do módulo de análise espectral do pacote de software SAM (Capitão, 2002), de onde foram retiradas as alturas de onda significativa e os períodos de pico dos sinais medidos nesta sonda (incidente + reflectida). Os resultados obtidos na situação de Preia-Mar são bastante similares a estes. Observa-se que, em geral, e tal como esperado, a reflexão total apresenta uma tendência de crescimento com o aumento da altura de onda. Com o período, esta relação não é tão clara.



Tabela 3: Resultados dos testes em fundo plano para Baixa-Mar.

Teste	T (s)	Posição das Sondas (m)				Dados de Saída						Sonda 1	
		x1	x2	x3	h	r0	rp	Hi (cm)	Hr (cm)	Tpi (s)	Tpr (s)	Hs (cm)	Tpi (s)
BM_8s_10g	1.09	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.20	0.07	2.73	0.53	1.07	0.61	4.40	1.03
BM_8s_15g	1.09	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.18	0.06	3.73	0.68	1.03	0.59	5.90	1.03
BM_8s_20g	1.09	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.17	0.03	4.61	0.81	1.11	0.61	7.20	1.03
BM_8s_25g	1.09	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.17	0.02	5.39	0.92	1.11	0.60	8.30	1.03
BM_8s_30g	1.09	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.17	0.03	6.03	1.05	1.11	0.60	9.20	1.03
BM_11s_10g	1.50	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.18	0.07	2.12	0.37	1.52	0.62	3.30	1.51
BM_11s_15g	1.50	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.17	0.03	2.99	0.51	1.45	0.59	4.60	1.44
BM_11s_20g	1.50	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.17	0.04	3.75	0.65	1.43	0.59	5.70	1.45
BM_11s_25g	1.50	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.18	0.03	4.45	0.79	1.45	0.59	6.70	1.45
BM_11s_30g	1.50	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.18	0.05	5.11	0.89	1.43	0.59	7.70	1.45
BM_11s_35g	1.50	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.19	0.05	5.77	1.08	1.43	0.60	8.60	1.45
BM_14s_15g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.13	0.05	2.05	0.27	2.04	0.59	3.00	2.01
BM_14s_20g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.16	0.05	2.37	0.38	2.01	0.60	3.70	2.03
BM_14s_25g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.17	0.07	2.78	0.48	2.01	0.59	4.30	2.02
BM_14s_30g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.18	0.08	3.19	0.57	2.01	0.59	5.00	2.02
BM_14s_35g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.19	0.08	3.63	0.67	1.70	0.60	5.70	2.02
BM_14s_40g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.20	0.10	4.08	0.82	2.01	0.60	6.40	2.02
BM_14s_45g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.20	0.11	4.53	0.92	2.05	0.59	7.00	2.02
BM_14s_50g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.21	0.11	4.97	1.06	2.01	0.60	7.70	2.02
BM_14s_55g	1.91	0.00	-0.26	-0.58	0.37	0.22	0.08	5.36	1.18	1.96	0.60	8.30	2.02

### 3.2.2 Fundo inclinado

Apesar de o método de Mansard e Funke (1980) originalmente ter sido desenvolvido para aplicações com sondas colocadas em posições de profundidade constante, Baquerizo (1995) adaptou o método a casos de profundidade variável. Esta adaptação consistiu em utilizar as diferentes profundidades da posição das sondas com consequente cálculo, diferenciado, dos números de onda em cada posição.

Apresenta-se aqui um exemplo de aplicação desta adaptação do método aos registos provenientes dos ensaios 3D de Rabo de Peixe, com fundo inclinado. As sondas de aquisição da elevação da superfície livre estão situadas numa zona do tanque onde existe uma pequena inclinação, aproximadamente de 3%, possibilitando assim testar a adaptação do método de Mansard e Funke (1980).

Numa breve análise aos resultados dos testes efectuados, pode-se dizer que os períodos de pico das ondas incidentes são bastante próximos do esperado em ambos os níveis de água considerados. A reflexão global ( $r0$ ) tem valores entre 12% e 19%, que parecem valores plausíveis.

Nos gráficos apresentados na Figura 6, apresenta-se a relação de  $r0$  com  $H_i$  e de  $r0$  com  $T_{pi}$ . Observa-se que a reflexão total apresenta uma tendência de crescimento com o aumento da altura de onda. É também notória uma maior reflexão total para ondas de maior período.

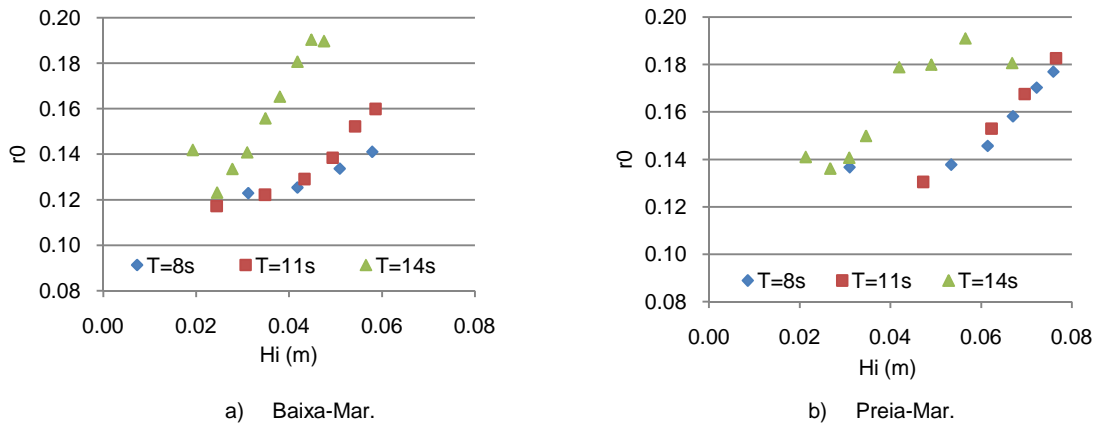


Figura 6: Relação entre  $r_0$  e  $H_i$  em fundo inclinado.

### 3.2.3 Posicionamento das sondas

Um dos pontos a ter em conta na aplicação dos métodos de separação, e deste método em especial, é a distância entre as sondas. Mansard e Funke (1980) sugerem que:

- $x_{12} \cong L/10$ ;
- $L/6 \leq x_{13} \leq L/3$
- $x_{12} \neq m \cdot x_{13}$ , sendo  $m$  um número inteiro;

onde  $L$  é o comprimento de onda e  $x_{ij}$  é a distância entre a sonda  $i$  e a sonda  $j$ .

Para estudar a influência destas distâncias nos resultados, foram efectuados testes com diferentes posicionamentos das sondas. Para este estudo, foi usada a série de ondas  $O1i+O4r$ . Na tabela 4 faz-se a descrição dos vários testes efectuados, com a posição das sondas descrita em função do comprimento de onda ( $L$ ) da onda incidente. São apresentados ainda os valores dos coeficientes de reflexão global ( $r_0$ ) e de pico ( $rp$ ), assim como as alturas de onda significativas incidentes ( $H_i$ ) e reflectidas ( $H_r$ ) obtidas para cada caso.

Na maioria dos testes os resultados revelam-se exactos. Contudo, são de salientar duas excepções nos testes 5 e 6, onde se verifica que  $r_0$  e  $H_r$  não apresentam o valor esperado.

Assim, pode-se concluir que, embora as sondas possam estar a distâncias superiores ou inferiores das sugeridas pelos autores, as sondas:

- não devem ser colocadas a uma distância superior ao comprimento de onda;
- não devem ser posicionadas a distâncias que sejam exactamente iguais a  $L/2$  ou a múltiplos desta.

Violar estas regras implica lidar com erros numéricos significativos. Considerando estas restrições, para este método (Mansard e Funke, 1980), as distâncias entre sondas escolhidas foram as seguintes:

- $x_{12}=L/10 = 0.1L$ ;
- $x_{13}=L/3.7 = 0.27L$

Tabela 4: Teste efectuados para diferentes distâncias entre sondas.

	Condição	Posição das sondas	Resultados do programa MF			
			$r0$	$rp$	$H_i$ (m)	$H_r$ (m)
Teste 0	Distâncias utilizadas em 3.2	$x_{12} \approx 0.10L$	0.50	0.00	0.30	0.15
		$x_{13} \approx 0.27L$				
Teste 1	Distâncias iguais a metade das utilizadas no teste 0	$x_{12} \approx 0.05L$	0.50	0.00	0.30	0.15
		$x_{13} \approx 0.14L$				
Teste 2	Distâncias iguais ao dobro das utilizadas no teste 0	$x_{12} \approx 0.20L$	0.50	0.00	0.30	0.15
		$x_{13} \approx 0.54L$				
Teste 3	Distância entre sondas igual	$x_{12} \approx 0.25L$	0.50	0.00	0.30	0.15
		$x_{13} \approx 0.50L$				
Teste 4	Duas sondas muito próximas e outra mais afastada	$x_{12} \approx 0.58L$	0.50	0.00	0.30	0.15
		$x_{13} \approx 0.66L$				
Teste 5	Distância entre as duas sondas mais afastadas maior que L	$x_{12} \approx 0.83L$	0.47	0.00	0.30	0.14
		$x_{13} \approx 1.33L$				
Teste 6	Posicionamento das sondas com distâncias exactamente iguais a $L/2$	$x_{12} \approx 0.50L$	0.45	0.00	0.30	0.14
		$x_{13} \approx L$				

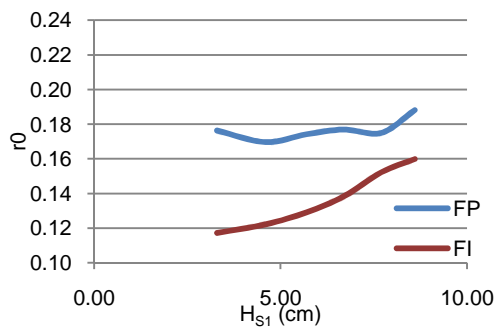
### 3.2.4 Comparação de resultados em fundo horizontal e em fundo inclinado

Após a análise dos resultados provenientes do método de Mansard e Funke (1980) aplicado ao caso dos ensaios 3D, quer para fundos horizontais quer para fundos inclinados, passa-se agora a uma breve comparação dos mesmos.

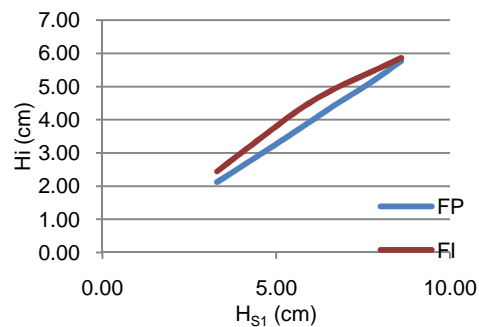
Os gráficos da Figura 7 mostram a reflexão total e a altura de onda incidente em função da altura de onda significativa na sonda 1 ( $H_{S1}$ ) em situação de Baixa-Mar, para períodos de 11 e 14 s em fundo plano (FP) e em fundo inclinado (FI). Constata-se que  $H_i$  tem valores bastantes próximos nos dois casos de separação usados. Por outro lado, verifica-se que existe um aumento de reflexão com o aumento da altura de onda, embora neste caso os valores sejam um pouco diferentes para as duas situações FP e FI.

Em geral, as alturas de onda significativas incidentes são muito idênticas nas duas zonas, apesar de as alturas reflectidas serem superiores na zona plana. Este resultado pode estar relacionado com o facto de, como foi anteriormente referido, o método de Mansard e Funke (1980), só ter em conta a direcção da agitação correspondente ao alinhamento das sondas. No caso da agitação incidente, esta é a direcção predominante. No entanto, no que se refere à agitação reflectida pela estrutura, especialmente num ensaio 3D como este, onde se representa o tronco e a cabeça do molhe, as ondas reflectidas têm forçosamente direcções diferentes desta, e não são contabilizadas por este método.

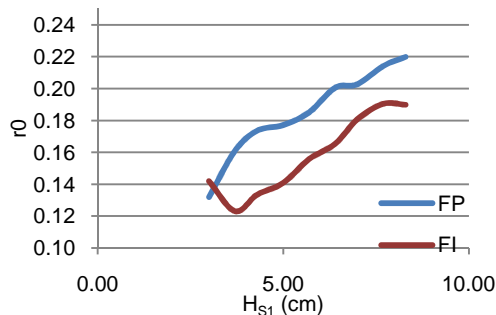
Analisando a Figura 8, correspondente a Preia-Mar, verifica-se que o comportamento é similar ao da Baixa-Mar. Em ambos os casos, existe um claro aumento do valor de  $r0$  na zona de fundo plano, enquanto as alturas de onda incidentes são idênticas nas duas zonas.



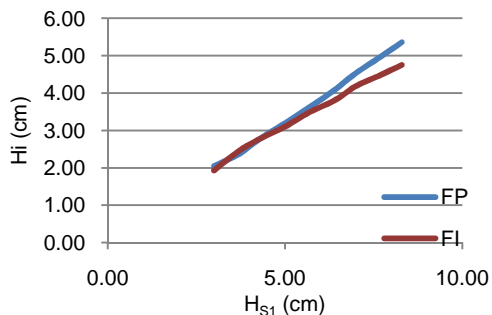
a) Reflexão total para  $T=11$  s.



b) Altura incidente para  $T=11$  s.

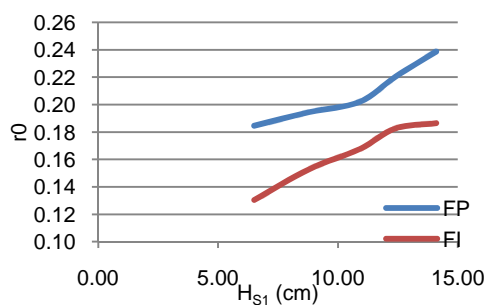


c) Reflexão total para  $T=14$  s.

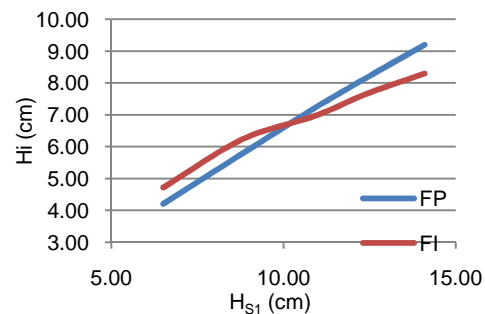


d) Altura incidente para  $T=14$  s.

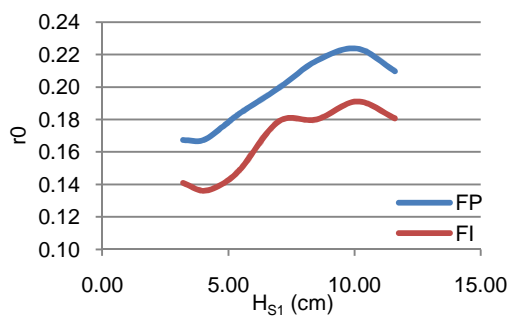
Figura 7: Evolução de  $r_0$  e  $H_i$  relativamente a  $H_{S1}$  em situação de Baixa-Mar.



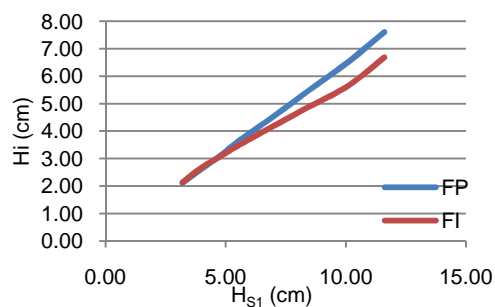
a) Reflexão total para  $T=11$  s.



b) Altura incidente para  $T=11$  s.



c) Reflexão total para  $T=14$  s.



d) Altura incidente para  $T=14$  s.

Figura 8: Evolução de  $r_0$  e  $H_i$  relativamente a  $H_{S1}$  em situação de Preia-Mar.

### 3.3 FRIGAARD E BRORSEN 1995

#### 3.3.1 Validação do método em tempo diferido

O método de Frigaard e Brorsen (1995), é aplicado às mesmas ondas de teste sintéticas consideradas em 3.2.1 para o método de Mansard e Funke (1980). A tabela 5 resume os resultados obtidos após a aplicação do programa *FRIGAARD*, desenvolvido em *MATLAB*.

Tabela 5: Testes de separação de ondulação pelo método de Frigaard e Brorsen (1995).

Teste	Dados de entrada					Posição das sondas (m)		Resultados do programa <i>FRIGAARD</i>					
	$h$ (m)	$H_i$ (m)	$T_i$ (s)	$H_r$ (m)	$T_r$ (s)	$x_1$	$x_2$	$r_0$	$r_p$	$H_i$ (m)	$H_r$ (m)	$T_{pi}$ (s)	$T_{pr}$ (s)
<i>O1i+O1r</i>	0.70	0.30	2.00	0.30	2.00	0.75	1.22	1.00	1.00	0.30	0.30	2.00	2.00
<i>O2i+O2r</i>	0.70	0.30	3.00	0.30	3.00	1.20	1.96	1.00	1.00	0.30	0.30	3.00	3.00
<i>O1i+O2r</i>	0.70	0.30	2.00	0.30	3.00	0.75	1.22	1.00	0.00	0.30	0.30	2.00	3.00
<i>O2i+O1r</i>	0.70	0.30	3.00	0.30	2.00	1.20	1.96	1.00	0.00	0.30	0.30	3.00	2.00
<i>O3i+O2r</i>	0.70	0.40	3.00	0.30	3.00	1.20	1.96	0.75	0.75	0.40	0.30	3.00	3.00
<i>O1i+O4r</i>	0.70	0.30	2.00	0.15	1.00	0.75	1.22	0.50	0.00	0.30	0.15	2.00	1.00
<i>O4i+O3r</i>	0.70	0.15	1.00	0.40	3.00	0.25	0.41	2.65	0.00	0.15	0.40	1.00	3.00

De notar que a posição das sondas foi determinada com base no comprimento de onda,  $L$ , da onda incidente, do modo como foi efectuado para os testes com o método de Mansard e Funke (1980). Como era esperado, os resultados são exactos, o que prova o bom funcionamento do método e a sua exactidão teórica, não existindo qualquer desvio dos valores das ondas geradas originalmente.

A aplicação do método aos dados dos ensaios em modelo 3D de Rabo de Peixe foi também testada mas não foi possível obter resultados coerentes, pelo que não foram incluídos neste artigo.

## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentaram-se dois métodos de separação de ondas unidireccionais incidentes e reflectidas: o método de Mansard e Funke (1980), para fundo plano ou de fundo inclinado, e o método de Frigaard e Brorsen (1995), para aplicação da separação em tempo real.

Estes métodos foram implementados na linguagem de programação *MATLAB* e aplicados a casos de dados sintéticos como forma de verificação da sua exactidão teórica e da sua adequada implementação computacional. Esta verificação permitiu constatar a exactidão dos métodos para sinais numéricos simulados desde que as distâncias entre sondas sejam criteriosamente escolhidas.

Notar que o método de Mansard e Funke (1980) produziu resultados coerentes quando aplicado a sinais provenientes de ensaios em modelo físico 3D. Porém, é de referir que estes bons resultados só foram atingidos porque houve o cuidado em dispor as sondas de acordo com o proposto por Mansard e Funke (1980) e alinhadas na direcção principal de propagação das ondas.

Quanto ao método de Frigaard e Brorsen (1995), verificou-se o seu bom funcionamento quando aplicado em tempo diferido.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Baldock, T.E., Simmonds, D.J., 1999. Separation of incident and reflected waves over sloping bathymetry. *Coastal Eng.* 38, pp. 167–176.
- Baquerizo, A., 1995. Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y de predicción. Tese de doutoramento. Universidade de Cantabria. 180 pp. (em espanhol).
- Capitão, R., 2002. Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Frigaard, P., Brorsen, M., 1995. A time domain method for separating incident and reflected irregular waves. *Coastal Eng.* 24, pp. 205-215.
- Goda, Y., Suzuki, Y. 1976. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. Proc. 15 th. Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Hawaii, Vol. 1, pp. 828-845.
- Mansard, E.P.D., Funke, E.R., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. Proc. 17th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Sidney, Vol. 2, pp. 154-172.