



## Projecto COMIBBS: Modelação Física da Propagação de Ondas em frente a uma Estrutura Costeira

Conceição Juana Fortes, Maria da Graça Neves, Rute Lemos, Maria Teresa Reis, João Alfredo Santos, Liliana Pinheiro

Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.

E-mail: jfortes@lnec.pt gneves@lnec.pt, rlemos@lnec.pt, treis@lnec.pt, jasantos@lnec.pt, lpinheiro@lnec.pt

### Sumário

Nesta comunicação, descreve-se o conjunto de ensaios experimentais, realizados em canal para simular a propagação de ondas sobre uma praia de inclinação constante (1:20), que termina numa estrutura de protecção marginal bastante comuns em Portugal Continental. Foram efectuados ensaios com ondas regulares e irregulares, associadas a diferentes alturas de onda e níveis de água, usando diferentes escalas do modelo (1:10 a 1:60). Os resultados obtidos consistiram nas séries temporais da elevação da superfície livre, da pressão sobre a estrutura, do nível de água atingido sobre a estrutura e do volume galgado na mesma, para diferentes condições de agitação incidente. Descrevem-se também as análises de dados realizadas, quer no domínio temporal, quer no domínio da frequência e apresentam-se os resultados obtidos para um caso de estudo, nas três escalas ensaiadas.

Este trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de modelação combinada proposta no âmbito do projecto CoMIBBS-HYDRALABIII, utilizando em conjunto modelos numéricos e físicos, para estudos de interacção entre ondas/fundo/estruturas e mais concretamente no caso do LNEC para avaliar a influência da escala do modelo físico na simulação da propagação de ondas e evolução morfológica em frente a estruturas de protecção costeira.

**Palavras chave:** HYDRALAB III-CoMIBBS, Modelo físico, Efeitos de escala, Propagação de ondas, Rebentação

## 1 INTRODUÇÃO

O projecto CoMIBBS (*Composite Modelling of the Interactions between Beaches and Structures*) - Modelação Combinada de Interações entre Praias e Estruturas - é um dos projectos de investigação conjunta do projecto HYDRALAB III, uma iniciativa de integração de infraestruturas apoiada pelo 6º programa quadro de investigação e desenvolvimento da União Europeia, van Os *et al.* (2004). O projecto COMIBBS visa o desenvolvimento de novas metodologias que combinem a utilização conjunta de modelos físicos e numéricos para melhorar a eficiência de estudos de hidrodinâmica, interacção entre ondas e estruturas e morfodinâmica sedimentar.

No âmbito deste projecto, o LNEC propôs-se efectuar o estudo, LNEC (2008), da influência da escala do modelo físico na: (i) simulação da propagação de ondas (regulares e irregulares) até estruturas de defesa costeira (estruturas de protecção marginal, quebra-mares submersos)



## 6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

onde a rebentação das ondas tem um papel importante; (ii) simulação da evolução do perfil de praia em frente a este tipo de estruturas. O estudo relacionado com a hidrodinâmica das ondas é o assunto tratado nesta comunicação.

Mais concretamente, no caso da hidrodinâmica, o principal objectivo foi a utilização de um modelo numérico para definir a escala óptima de ensaios em modelo físico de simulação da propagação de ondas e, em especial, da rebentação sobre uma praia de inclinação constante que termina numa estrutura de defesa costeira. Em contrapartida, os resultados do modelo físico podem ser usados para calibrar os parâmetros do modelo numérico de modo a que possa descrever com maior realismo o escoamento (e especialmente a rebentação) na zona em estudo.

É de salientar que ensaios em modelo físico são necessários para estudar os complexos processos físicos envolvidos na rebentação das ondas e na zona da interacção onda-estrutura, que, até agora, não são convenientemente simulados por modelos numéricos. No entanto, a escala na qual o modelo físico é construído, influencia a precisão das medições das características da onda. Desta forma, o modelo numérico é uma ferramenta importante para escolher a "melhor" escala para o modelo físico, uma vez que pode ser executado para diferentes escalas, de forma rápida e eficiente. Em resumo, a combinação dos dois tipos de modelos (numérico e físico) será de grande vantagem para a modelação física pois a escolha de uma escala óptima dá maior confiança nos resultados respectivos e, ao mesmo tempo, é uma solução mais económica. Na verdade, com este procedimento, evita-se um grande número de ensaios em modelo físico com diferentes escalas, que são bastante dispendiosos e morosos. Por outro lado, os resultados do modelo físico serão utilizados para afinar o modelo numérico e, desta forma, melhorar o seu desempenho.

A metodologia proposta, LNEC (2008) e Fortes *et al.* (2008), inclui um modelo numérico que ajuda no projecto e concepção da instalação experimental e na determinação dos efeitos de escala esperados. Por outro lado, o modelo físico fornece as informações necessárias para a calibração dos parâmetros do modelo numérico, Lemos *et al.* (2009). Mais concretamente, os passos da metodologia são, Figura 1:

1. Utilização do modelo numérico, COULWAVE, Lynett e Liu (2002), para diferentes escalas. Isto é efectuado de forma sistemática de modo a escolher a escala cujos erros devidos a efeitos de escala sejam inferiores a um valor pré-determinado;
2. Seleccionada a escala, constrói-se e opera-se o modelo físico medindo com precisão as características da onda na rebentação e na zona próxima da estrutura;
3. Utilizam-se os resultados do modelo físico para melhorar o desempenho do modelo numérico, através da calibração dos seus parâmetros.

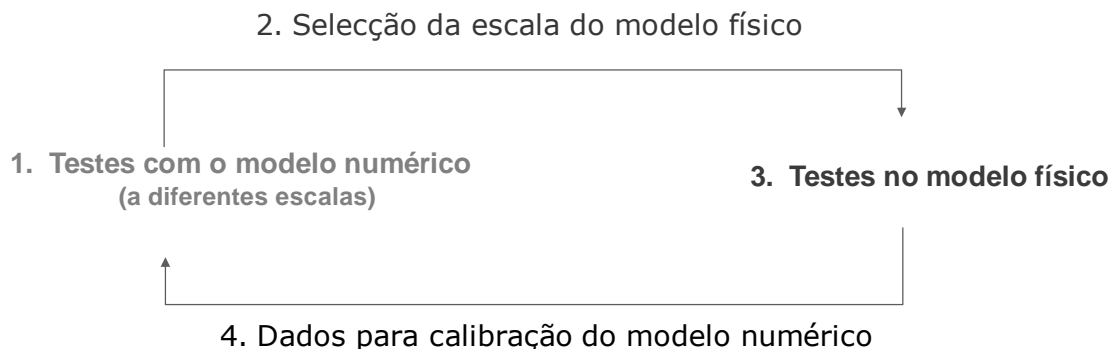


Figura 1. Metodologia combinada.

O ponto fulcral desta metodologia é a capacidade do modelo numérico para simular com precisão a propagação de ondas até à zona de rebentação, para qualquer escala a utilizar no modelo físico, i.e., de ser capaz de reproduzir os efeitos de escala que acontecerão no modelo físico. Nesse sentido, é necessário calibrar o modelo numérico com dados provenientes de ensaios em modelo físico em diferentes escalas.



## 6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Para esse efeito, foram efectuados os seguintes procedimentos:

- Definição do caso de estudo – A zona da praia de S. Pedro de Estoril foi escolhida como área de estudo e utilizou-se o modelo numérico de Boussinesq, COULWAVE, para a simulação a diferentes escalas
- Ensaios em modelo físico – Realizaram-se vários ensaios em modelo físico em diferentes escalas para calibração e validação do modelo COULWAVE e para determinação dos erros devido a efeitos de escala no modelo físico;
- Cálculos numéricos - Com os resultados do modelo físico, calibrou-se o modelo numérico COULWAVE e determinaram-se os erros numéricos (por comparação com o modelo físico).

Nesta comunicação, descrevem-se os ensaios em modelo físico realizados para estabelecimento da metodologia da modelação combinada, LNEC (2008), Fortes *et al.* 2008a, 2008b, Lemos *et al.* 2009, Reis *et al.* (2009).

Nos dois canais do LNEC simulou-se a propagação das ondas ao longo de um fundo de declive constante (1:20) que termina numa estrutura de protecção marginal com inclinação 1:1.5. Os testes foram realizados utilizando escalas diferentes (1:10, 1:20, 1:30, 1:40 e 1:60), para diferentes condições de onda incidente. Efectuaram-se ensaios com ondas regulares e com ondas irregulares, associados a diferentes alturas de onda e níveis de água.

Os canais encontravam-se equipados com 6 sondas para medição da elevação da superfície livre, 4 transdutores de pressão na estrutura, uma sonda na estrutura para medição do espraiamento e um equipamento de medição dos volumes galgados. Efectuaram-se também filmagens dos ensaios, o que permitiu identificar a posição da rebentação na maioria dos ensaios efectuados. Esses testes permitiram a calibração do modelo numérico utilizado na modelação combinada e na avaliação dos erros devidos aos efeitos da escala no modelo físico.

Nas próximas secções, apresenta-se uma descrição geral das condições em protótipo e dos ensaios em modelo físico realizados, nomeadamente as condições experimentais, o equipamento de medição, as condições de teste e o tipo de medições efectuadas. Escolheu-se uma das condições de protótipo para ilustrar o tipo de dados obtidos e as análises estatísticas e espectrais realizadas. Avaliou-se também a influência da escala do modelo nos resultados experimentais obtidos.

## 2 PROTÓTIPO

No presente trabalho, estuda-se a propagação das ondas ao longo de praia de declive constante 1:20 que termina numa estrutura impermeável de inclinação 1:1.5. Este caso simula uma hipotética defesa costeira localizada em São Pedro do Estoril, Cascais, na costa oeste de Portugal Continental. Foram consideradas duas configurações diferentes, Figura 2.

- Caso A, em que a propagação das ondas se inicia a 357.4 m antes da estrutura, num fundo à cota de 10 m (ZH);
- Caso B, em que a propagação se inicia a 714.8 m antes da estrutura, num fundo à cota de 20 m (ZH).

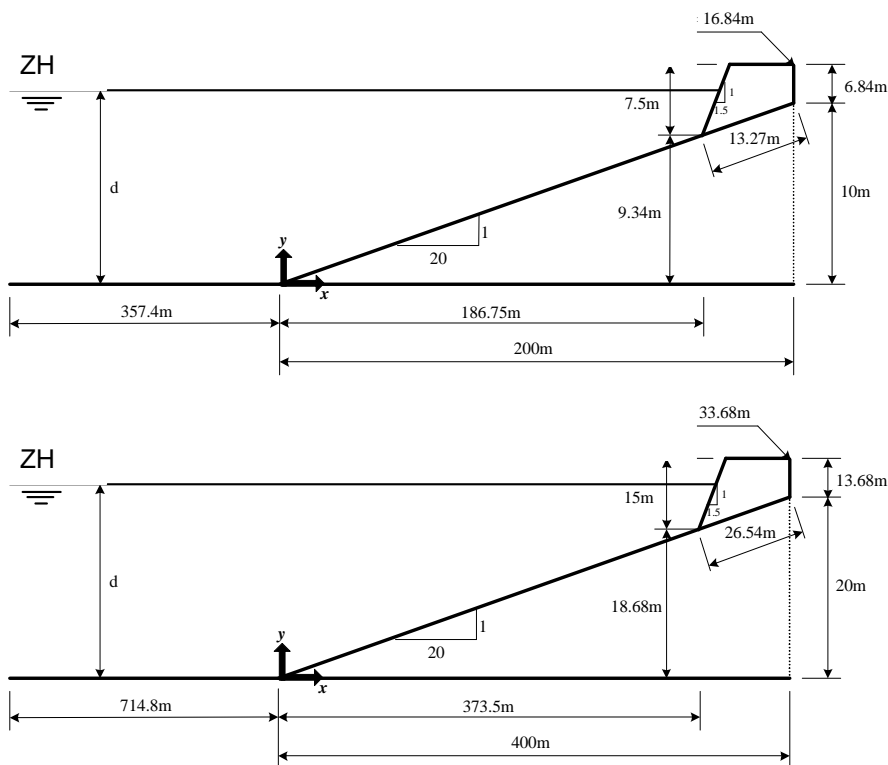


Figura 2. Secções no Protótipo. Caso A (cima) e Caso B (baixo).

Com base no regime de agitação marítima na costa oeste de Portugal, foi seleccionado um conjunto de condições de agitação marítima representativo da gama que é possível ocorrer próximo das estruturas aí construídas. Assim, foram seleccionadas, quatro valores de altura de onda incidente (1.0 m, 2.0 m, 4.0 m e 6.0 m) e três períodos de ondas (8 s, 12 s e 14 s), Tabela 1. Os níveis de maré considerados foram: 0.0 m e 1.5 m Z.H para o caso A e 0.0 m e 3.0 m Z.H. para o caso B.

Tabela 1. Características das ondas incidentes. Valores de protótipo.

Onda	Período da onda (s)	Altura de onda (m)
Regular	8	1, 2, 4
	12	2, 4, 6
	14	2, 4, 6
Irregular	8	2
	12	4
	14	4 ou 6

É de salientar que se trata de um caso de teste bastante complexo, dado que ao longo do domínio ocorre um conjunto de fenómenos que alteram significativamente as características da onda, i.e., levam ao aumento da altura de onda, à modificação da sua forma em perfil, à sua rebentação e ao espriamento (*run-up*), *run-down*, reflexão parcial na estrutura e galgamento da estrutura.

### 3 ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

#### 3.1 Configurações experimentadas

As condições em protótipo, casos A e B, foram reproduzidas a escalas diferentes em dois dos canais de ondas irregulares do LNEC, designados por COI1 e COI2. O canal COI1 tem, aproximadamente, 50 m de comprimento, 80 cm de largura e 80 cm de profundidade enquanto o canal COI2 tem 70 m de comprimento, 3 m de largura e 2 m de profundidade, Figura 3. Em ambos os canais é possível a geração de ondas regulares e irregulares. Para tal, estão equipados com um gerador do tipo pistão com um sistema de absorção activa onda, AWASYS, Troch (2005), que permite uma absorção dinâmica da reflexão.

Para reproduzir as secções transversais do protótipo correspondentes aos casos A e B, apresentados na Figura 2, os ensaios em modelo físico foram construídos e operados de acordo com a lei de semelhança de Froude. O perfil longitudinal do fundo de cada canal é mostrado da Figura 4 à Figura 6, sendo  $y$  a coordenada vertical e  $x$  a distância horizontal até ao batedor. Este perfil consiste numa rampa de 20 m com inclinação de 1:20 que termina numa estrutura reflectora com inclinação de aproximadamente 1:1.5.

Os casos A e B foram reproduzidos a três escalas geométricas diferentes, nomeadamente: 1:10, 1:20 e 1:30 e 1:20 para o Caso A e 1:20, 1:40 e 1:60 para o Caso B. A fim de reproduzir o Caso A à escala 1:10 e o Caso B à escala 1:20, construiu-se o modelo no canal COI2, Figura 4. Após os testes neste canal, foi então construída outra geometria no canal COI1, para reproduzir o caso A à escala 1:20 e o caso B à escala 1:40, Figura 5. Finalmente, neste mesmo canal, a estrutura que representa a estrutura de protecção marginal foi movida para uma posição mais próxima do batedor, para reproduzir o caso A à escala 1:30 e o caso B à escala 1:60, Figura 6.

A estrutura de protecção marginal é representada no modelo físico por uma superfície impermeável, feita de madeira. Para simular a rugosidade, foram colados blocos de esferovite naquela superfície, Figura 4 a Figura 6.



Figura 3. Canais COI1 (esquerda) e COI2 (direita).



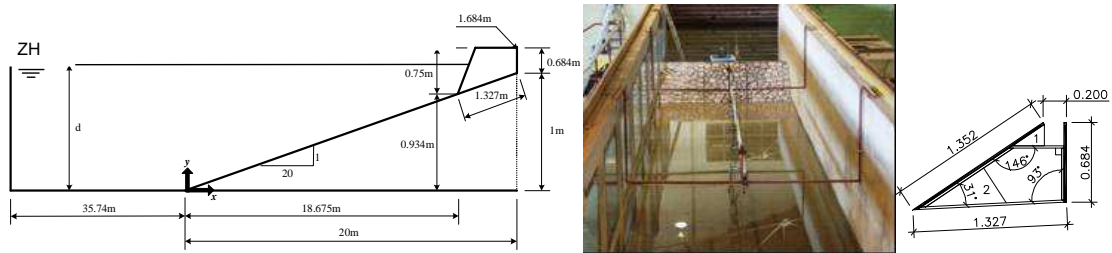


Figura 4. Escala 1:10 (Caso A) e 1:20 (Caso B). Secção do modelo físico. Esquema da estrutura.

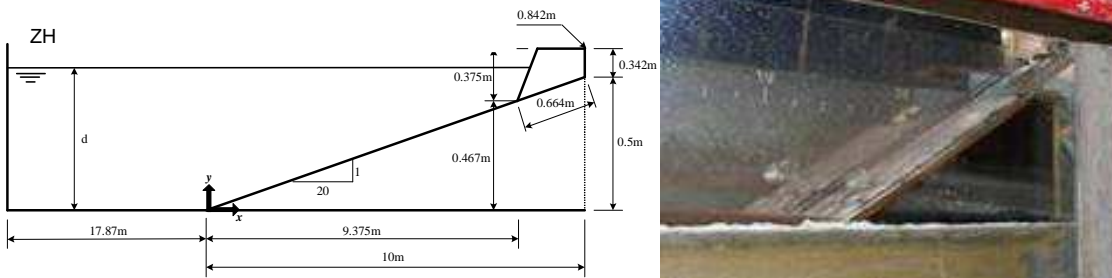


Figura 5. Escala 1:20 (Caso A) e 1:40 (Caso B). Secção do modelo físico.

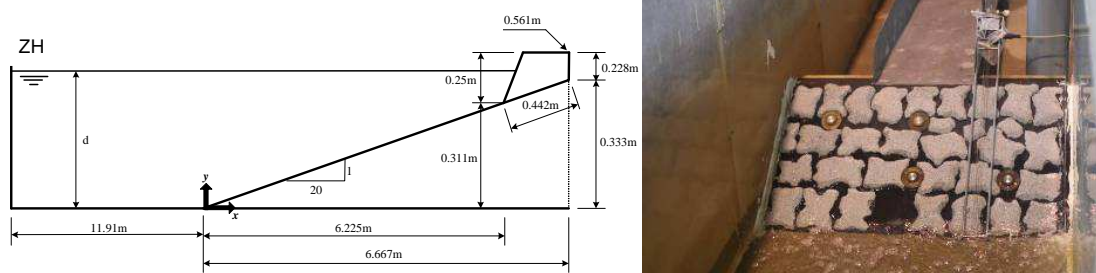


Figura 6. Escala 1:30 (Caso A) e 1:60 (Caso B). Secção do modelo físico.

### 3.2 Equipamento de medição

Em todos os ensaios, foram medidos os valores da elevação da superfície livre ao longo do canal, os níveis de espraiamento, os volumes galgados e as pressões na estrutura.

A fim de medir os valores da elevação da superfície livre, colocaram-se 8 e 6 sondas resistivas ao longo dos canais COI1 e COI2, respectivamente, Figura 7. Em ambos os canais, duas dessas sondas foram colocadas em frente ao gerador ( $x=-30.77$  m e  $x=-30.54$  m, à escala 1:10) para garantir a repetibilidade e o controle de qualidade dos ensaios e do sistema de absorção activa da reflexão. As restantes sondas (6 no COI1 e 4 para COI2) estavam posicionadas numa estrutura cuja posição podia variar em ensaios consecutivos a fim de caracterizar a elevação da superfície livre ao longo do canal para uma dada condição de teste, Figura 7.

Para cada condição de agitação incidente, caso e escala, o ensaio foi repetido quatro vezes, no caso de COI1 e seis vezes no caso de COI2, posicionando-se a estrutura móvel com o conjunto das sondas em localizações diferentes, a fim de medir a elevação da superfície livre em 24 diferentes localizações ao longo da rampa (Tabela 2).



Figura 7. Duas sondas junto ao batedor (esq.); Quatro sondas ao longo do canal (centro) – COI2; Seis sondas ao longo do canal – COI1 (dir.).

Tabela 2. Posição das sondas ao longo do canal, para as experiências realizadas no COI2 (à escala 1:10).

Posição	X3 (m)	X4 (m)	X5 (m)	X6 (m)
1	7.50	8.00	8.50	9.00
2	9.50	10.00	10.50	11.00
3	11.50	12.00	12.50	13.00
4	8.25	8.75	9.25	9.75
5	10.25	10.75	11.25	11.75
6	12.25	12.75	13.25	13.75

Note-se que para as alturas de onda mais elevadas não foi possível efectuar as medições nas posições 3 e 6, pois tal poria em perigo o equipamento de medição. Em ambos os canais, Figura 8, foi medido o nível de espraiamento, tendo sido para tal colocada uma sonda paralelamente ao talude da estrutura.

Para todos os ensaios, a pressão foi medida em quatro pontos, sobre a estrutura (Figura 8): dois numa secção localizada no centro da estrutura (sensores 2 e 3) mas a diferentes profundidades e os outros dois colocados às mesmas profundidades dos do centro, mas um do lado direito e outro do lado esquerdo (sensores 1 e 4). Os sensores 3 e 4 encontravam-se abaixo do nível de água no início dos ensaios, enquanto os sensores 1 e 2 encontravam-se emersos.

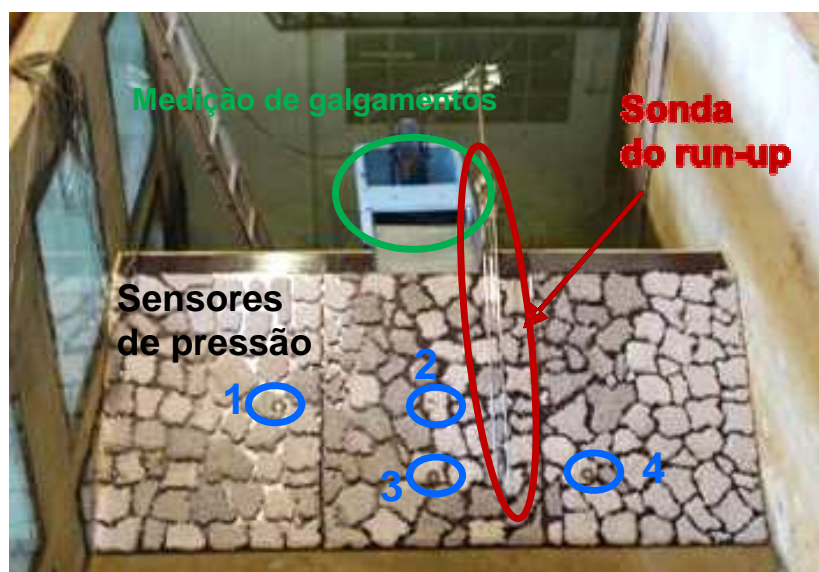


Figura 8. Localização dos quatro sensores de pressão nos ensaios. Sonda utilizada na medição do espraiamento (run-up).

Quanto à medição dos volumes galgados, Figura 9, utilizou-se um reservatório, com um descarregador triangular sobre uma das suas faces, que foi colocado a sotamar da estrutura. A água foi conduzida para o reservatório por meio de uma calha de 30 cm (COI1) ou 50 cm (COI2) de largura. Para medir a variação do nível da água dentro do reservatório durante cada ensaio, foi utilizado um limnómetro. Essa medição, juntamente com a curva de vazão do descarregador, permitiu a determinação do volume médio galgado.



Figura 9. Equipamento utilizado para calcular o volume galgado nos canais COI2 e COI1.

Foi utilizado um computador digital para armazenar os dados medidos nos ensaios. A frequência de aquisição dos dados foi de 100 Hz e 50 Hz, para COI1 e COI2 respectivamente. No caso dos ensaios com agitação regular, efectuaram-se ainda filmagens para definir a posição da rebentação e a forma de rebentação.

### **3.3 Características das ondas incidentes**

Em ambos os canais, os testes foram realizados utilizando ondas regulares e irregulares.

Os testes com ondas regulares tiveram a duração de 5 minutos, enquanto a duração dos testes com ondas irregulares variou com o valor do período da onda, entre 30 e 74 minutos, de forma a se ter uma média de 1000 ondas por ensaio. Efectuaram-se várias repetições de cada teste, i.e., em média 4 repetições para cada condição de agitação incidente no canal COI1 e seis no COI2. Para a agitação incidente irregular, foi usado um espectro JONSWAP, com um factor de  $\gamma=3.3$ .

No canal COI2, foram efectuados 264 ensaios: 192 com ondas regulares e 72 com ondas irregulares. No canal COI1, foram realizadas 352 ensaios: 256 com ondas regulares e 96 com ondas irregulares. Como já referido, não foi possível medir a superfície livre nos ensaios com maiores alturas (0.6 para a escala 1:10, 0.30 m para a escala 1:20 e 0.20 m para a escala 1:30), devido ao grande volume de água que atingiu as sondas. As condições de ensaio encontram-se resumidas na Tabela 3.





Tabela 3. Parâmetros de agitação para os casos A e B nas diferentes escalas ensaiadas.

Parâmetro		Escala					
		Protótipo	1:10	1:20	1:30	1:40	1:60
d (m)	Caso A	10.0	1.00	0.500	0.333	-	-
		11.5	1.15	0.575	0.383	-	-
	Caso B	20.0	-	1.000	-	0.500	0.333
		23.0	-	1.150	-	0.575	0.383
T, Tp (s)	1	8	2.53	1.79	1.46	1.26	1.03
	2	12	3.79	2.68	2.19	1.90	1.55
	3	14	4.43	3.13	2.56	2.21	1.81
H (m)	1	1	0.10	0.05	0.03	0.03	0.02
	2	2	0.20	0.10	0.07	0.05	0.03
	3	4	0.40	0.20	0.13	0.10	0.07
	4	6	-	0.30	0.20	0.15	0.10
Hs (m)	1	2	0.20	0.10	0.07	0.05	0.03
	2	4	0.40	0.20	0.13	0.10	0.07
	3	6	-	0.30	0.20	0.15	0.10

Finalmente, para o caso A, foi realizado um conjunto de trinta repetições à escala 1:30, para uma condição de agitação regular incidente de  $T=12$  s e  $H=4$  m, e para profundidades,  $d$ , de 10 m e 11.5 m (todos os valores referidos ao protótipo). Para o caso B, foram realizados conjuntos de trinta repetições para as escala 1:20 e 1:40 e para uma condição de agitação incidente de  $T=12$  s e  $H=4$  m, para  $d=20$  m e 23 m.

## 4 ANÁLISE DE DADOS

Para os casos A e B, com base nos dados medidos efectuou-se o:

- Cálculo da altura de onda significativa ao longo do canal (utilizando o método do zero ascendente) e a respectiva densidade espectral, com base nas séries temporais de elevação da superfície livre;
- Cálculo dos valores da pressão significativa e a respectiva densidade espectral, com base nas séries temporais medidas nos quatro sensores de pressão localizados sobre a estrutura;
- Cálculo do espraio máximo, com base na elevação da superfície livre medida na sonda colocada ao longo da estrutura;
- Cálculo do volume médio galgado, baseado na série de nível de água no reservatório e nas curvas de galgamento do descarregador de Basin.

A fim de ilustrar os dados medidos e as respectivas análises realizadas, foi seleccionada uma condição de agitação para ondas regulares: Caso A -  $T=14$  s e  $H=4$  m, para  $d=11.5$  m, o que corresponde a:  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m,  $d=1.15$  m à escala 1:10,  $T=3.13$  s,  $H=0.2$  m,  $d=1.15$  m à escala 1:20 e  $T=2.56$  s,  $H=0.13$  m,  $d=0.383$  m à escala 1:30.

### 4.1 Elevação da superfície livre

A Figura 10 mostra parte das séries temporais obtidas com os ensaios com ondas regulares para a condição de ensaio de  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m, i.e.,  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m,  $d=1.15$  m à escala 1:10 (Tabela 2) em dois pontos ao longo do canal ( $x=7.5$  m e 10.0 m).

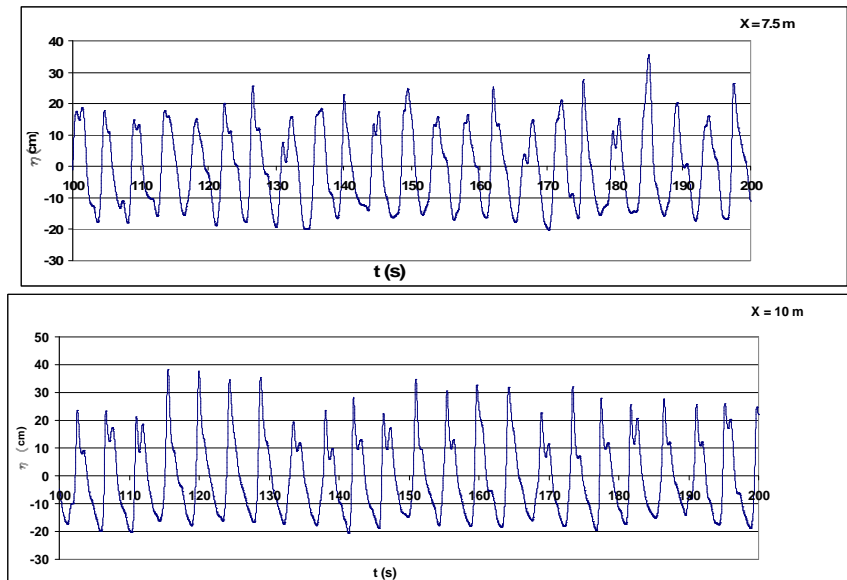


Figura 10. Séries temporais da elevação da superfície livre obtida nos ensaios com ondas regulares para a condição de ensaio relativa a  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m,  $d=1.15$  m nas sondas colocadas em  $x=7.5$  m (cima) e  $x=10$  m (baixo), à escala 1:10,

Na Figura 11 estão representadas as séries temporais da elevação da superfície obtida nas sondas colocada em  $x=7.5$  m e 10 m (em Hz), respectivamente, com recurso ao pacote SAM, Capitão (2002), para o ensaio de agitação regular com  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m,  $d=1.15$  m (à escala 1:10) e o respectivo espectro.

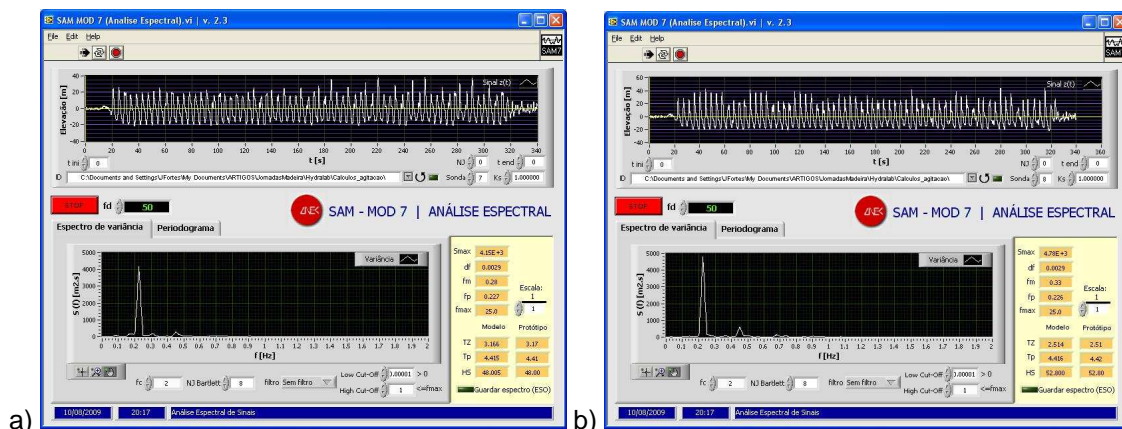


Figura 11. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Série temporal da elevação da superfície livre em  $x=7.5$  m (a) e  $x=10$  m (b) e respectivo espectro obtido no ensaio à escala, i.e., com  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m,  $d=1.15$  m (valores referidos à escala 1:10).

A transformação não-linear da onda ao longo do canal pode ser vista através da comparação das séries temporais da elevação da superfície livre nos dois pontos apresentados. De facto, para os ensaios com ondas regulares, à medida que  $x$  aumenta, a forma da onda toma uma forma assimétrica à medida que a onda se propaga ao longo do domínio, tornando-se as cristas mais aguçadas e as cavas mais achatadas. Verifica-se também o aparecimento de componentes harmónicas cuja energia associada vai aumentando com a distância ( $x$ ) à zona de geração das ondas pelo bater. No caso de  $x=7.5$  m a maior parte da energia concentra-se no período de pico e apenas uma parcela muito pequena está associada a uma componente harmónica, no caso de  $x=10$  m, a energia esta dividida pela frequência principal e pela 2<sup>a</sup> componente harmónica. As restantes componentes têm progressivamente menos energia à medida que a frequência aumenta.

## 4.2 Alturas de onda significativa

A partir das séries temporais da elevação livre em cada uma das posições das sondas ao longo do canal e utilizando o método do zero ascendente, com o programa SOPRO/ANOIAGI (Pinheiro e Fortes, 2008), foram calculadas as alturas de onda significativa correspondentes.

A Figura 12 representa os valores da altura significativa, ao longo do canal com ondas regulares para a condição de agitação:  $T=14$  s e  $H=4$  m, para  $d=11.5$  m, obtidas nas 3 diferentes escalas (1:10, 1:20 e 1:30), sendo os valores referidos ao protótipo.

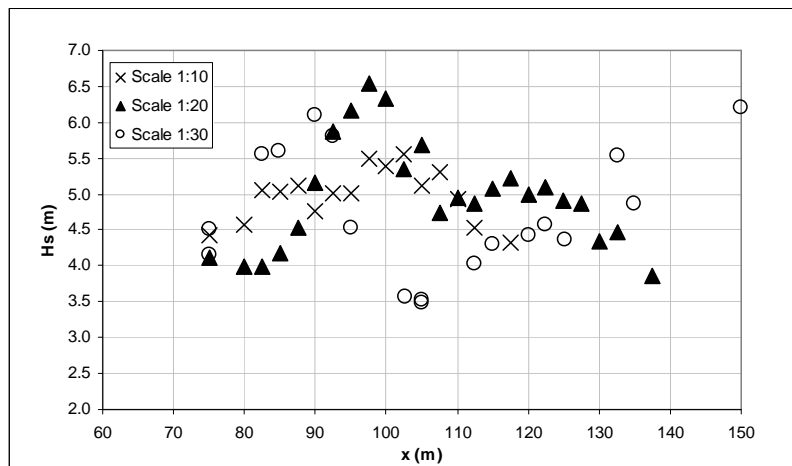


Figura 12. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Alturas significativas ao longo do canal obtidos nos ensaios realizados às escalas 1:10, 1:20 e 1:30 (valores referidos ao protótipo).

A Figura 12 mostra que, para as escalas 1:10 e 1:20, a evolução da altura de onda ao longo do canal é semelhante, i.e., há um aumento da altura de onda até à rebentação, ocorrendo depois um decréscimo, tal como esperado. As posições da rebentação são também semelhantes, i.e., 9.5 m e 10.0 m para as escalas 1:10 e 1:20, respectivamente. No entanto, existem algumas diferenças entre a altura das ondas ao longo do canal, obtidas nestes ensaios.

À escala 1:10, chegou-se a valores menores na zona de rebentação (entre  $x=90$  m e  $x=100$  m) (e mesmo após esta) inferiores aos observados à escala 1:20 e 1:30. Para estas diferenças contribui o facto de se terem verificado reflexões significativas à escala 1:10, que não foram tão significativas nos ensaios às outras escalas.

Quanto a escala 1:30, o andamento da altura de onda apresenta algumas diferenças relativamente ao verificado com as outras escalas: a rebentação verifica-se mais cedo e após a diminuição da altura de onda devido a essa rebentação dá-se o empoamento da onda, o que não se verifica nas outras escalas em que as alturas de onda tendem tendencialmente a diminuir.

É de salientar que em trabalhos anteriores, LNEC (2008), Fortes *et al.* (2008a, 2008b) e Lemos *et al.* (2009) efectuados para outras condições de agitação incidente de menor altura e período de onda (verificando-se menores reflexões na estrutura), os valores de altura de onda obtidos para as três escalas têm um andamento bastante semelhante ao longo do canal bem como são da mesma ordem de grandeza. Inclusive a altura na zona de rebentação e a posição de rebentação são semelhantes nas três escalas.

## 4.3 Pressão na estrutura

Apresenta-se na Figura 13, a série temporal obtida no sensor de pressão 1 (em Hz), Figura 8, para o ensaio de agitação regular com  $T=3.13$  s,  $H=0.2$  m,  $d=0.575$  m (escala 1:20) e o respectivo espectro, a fim de ilustrar os valores medidos nos sensores de pressão.

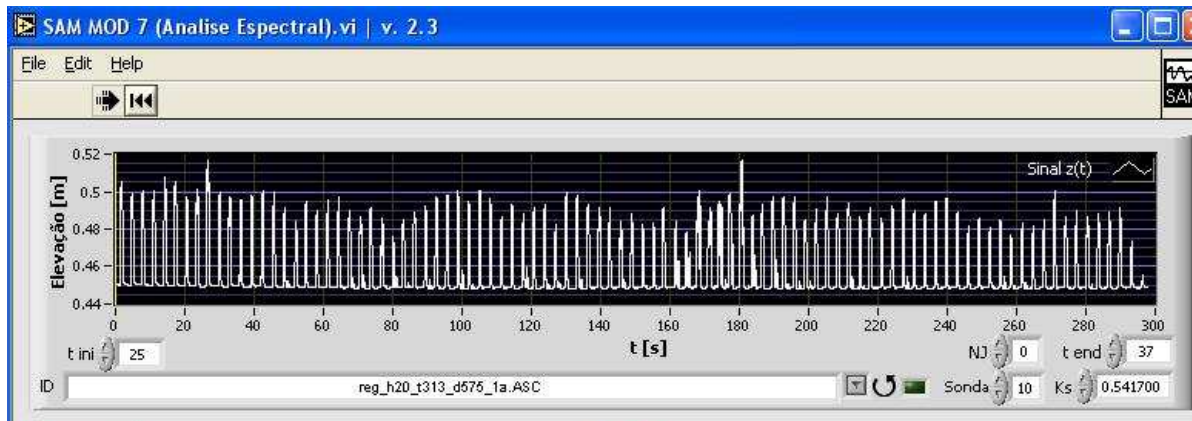


Figura 13. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Série temporal de pressão obtido no ensaio à escala 1:20, i.e., com  $T=3.13$  s,  $H=0.2$  m,  $d=0.575$  m (valores à escala 1:20).

Analisando o espectro estimado com base no sinal medido no sensor de pressão 1, Figura 14, verifica-se, tal como esperado, que a maior parte da energia se concentra no período de pico e que aparece energia em diversas harmónicas, progressivamente com menos energia à medida que a frequência aumenta. O mesmo tipo de andamento pode ser observado em todos os sensores e para as diferentes escalas.

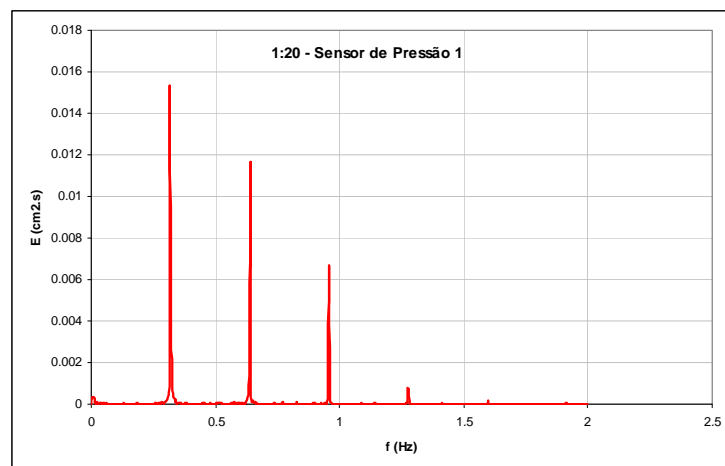


Figura 14. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Espectro de energia obtido no sensor 1 no ensaio à escala 1:20, i.e., com  $T=3.13$  s,  $H=0.2$  m,  $d=0.575$  m (valores à escala 1:20).

Na Figura 15 apresentam-se os resultados obtidos para a pressão nos sensores 1 a 4, para as diferentes repetições de ensaios (1, 1A, 2 e 2A) para os ensaios à escala 1:20. A figura mostra que os sinais de pressão obtidos nos sensores 1 e 2 e nos sensores 3 e 4 são bastante similares, o que permite concluir que os efeitos tridimensionais no canal não eram importantes. Os sensores 3 e 4 apresentam um valor mais elevado de pressão, já que se encontram localizados a cotas mais baixas.

A análise dos resultados obtidos para as escalas 1:10 e 1:30 mostra um andamento em todo semelhante ao obtido para a escala 1:20, podendo concluir-se que nestes ensaios o canal se comportava bidimensionalmente. Também se verifica que os valores obtidos nas diferentes repetições com as mesmas condições de agitação deram valores muito semelhantes, o mesmo se verificando para os ensaios para as escalas 1:10 e 1:30. As diferenças de pressão medidas nos ensaios 1, 1A, 2 e 2A apresentam desvios em relação ao valor médio inferiores a 5%.



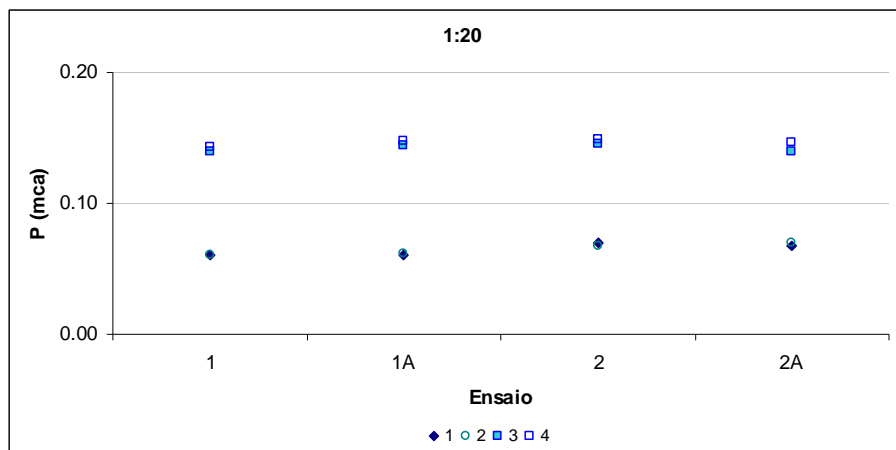


Figura 15. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Valores de pressão medidos no ensaio à escala 1:20, i.e., com  $T=3.13$  s,  $H=0.2$  m,  $d=0.575$  m (valores à escala 1:20).

Para poder comparar os resultados obtidos nos ensaios realizados em diferentes escalas, os valores medidos nos sensores 2 e 3 foram convertidos a valores à escala 1:1. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 16. Como se pode observar, a pressão aumenta ligeiramente da escala 1:10 para a 1:20 e as diferenças são inferiores a 8%. Para a escala 1:30, a pressão apresenta valores mais próximos dos medidos para a escala 1:10, mas ligeiramente superiores, com diferenças inferiores a 2%.

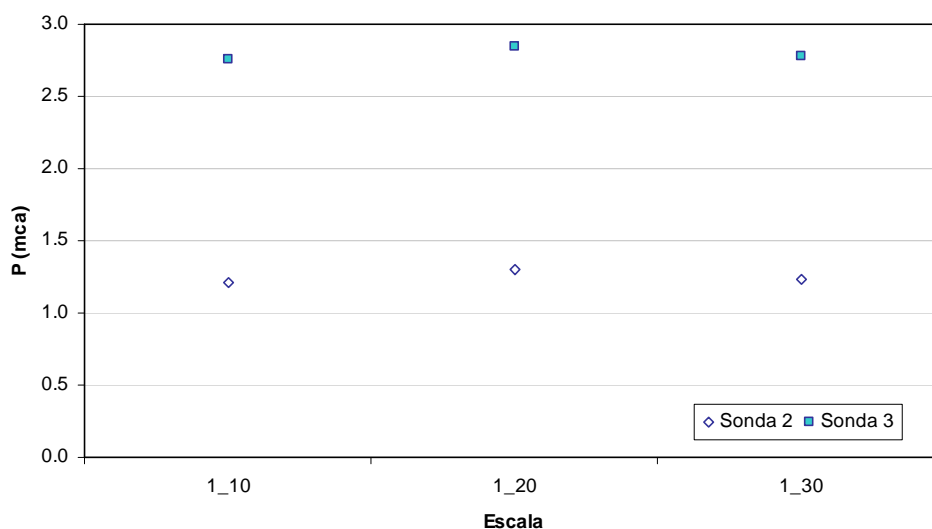


Figura 16. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Valores de pressão medidos nos ensaios de ondas regulares nas diferentes escalas (valores convertidos à escala 1:1).

#### 4.4 Espreamento (*runup*)

A Figura 17 ilustra parte de três das séries da elevação da superfície livre obtidas na sonda de medição do run-up, Figura 8, num ensaio com ondas regulares e com as condições de agitação de  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m, à escala 1:10 ( $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m e  $d=1.15$  (à escala 1:10)).

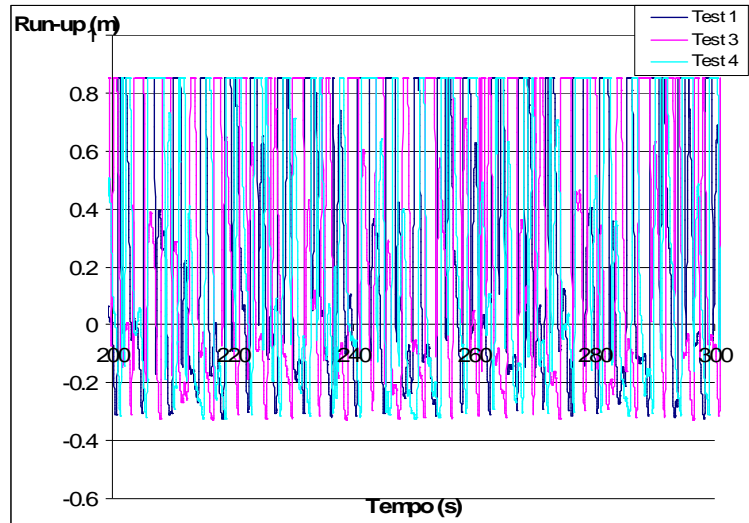


Figura 17. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Séries temporais da elevação da superfície livre na sonda de medição do run-up no ensaio à escala 1:10, i.e., com  $T=4.43$  s,  $H=0.4$  m e  $d=1.15$  m (valores referidos à escala 1:10). Test 1, 3 e 5 correspondem a cada uma repetições efectuadas para esta condição de agitação incidente.

A Figura 18 compara o valor máximo do espraio obtidos para as três escalas diferentes testados para o caso A com uma onda regular  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (na escala 1:10, 1:20 e 1:30).

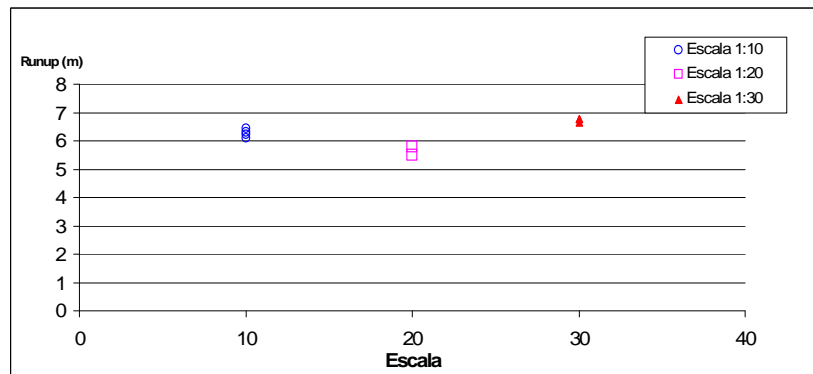


Figura 18. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Valores máximos do runup obtidos para os ensaios às escalas 1:10 a 1:30 (convertidos a valores à escala 1:1).

Observa-se que, para ondas regulares, os valores máximos do espraio foram semelhantes (da mesma ordem de grandeza) para as três escalas consideradas e variam entre o mínimo de 5.5 m e 6.8 m. Os valores médios são também similares para as três escalas, i.e., 0.62, 0.56 e 0.67 m para escalas 1:10, 1:20 e 1:30, respectivamente.

Apesar do exposto, verifica-se que o valor máximo do espraio diminui ligeiramente da escala 1:10 para a 1:20 com diferenças inferiores a 10%. Para a escala 1:30, o valor máximo do espraio apresenta valores mais próximos dos medidos para a escala 1:10, mas ligeiramente superiores, com diferenças inferiores a 8%.

A escala 1:20 é a que conduz a valores mais baixos relativamente aos obtidos com as outras escalas. É de salientar que para a escala 1:20, houve dois (de um total de quatro) testes que não puderam ser considerados, devido a problemas com o equipamento para medição.



## 4.5 Galgamento

O volume médio de galgamento,  $Q$  ( $m^3/s/m$ ), para cada ensaio foi determinado somando o volume associado à variação do nível da água dentro do reservatório, Figura 9, com o volume descarregado e considerando este volume total por unidade de tempo e por metro linear de estrutura. As curvas de vazão dos descarregadores triangulares foram as seguintes:

- Escala 1:10:  $q = 0.351h^{2.5}$ , com  $\theta = 27^\circ$
- Escala 1:20:  $q = 0.547h^{2.47}$ , com  $\theta = 45^\circ$
- Escala 1:30:  $q = 1.108h^{2.47}$ , com  $\theta = 80^\circ$

onde  $q$  é o caudal descarregado (em  $m^3/s$ ),  $h$  é a altura de água acima da soleira do descarregador (em m) e  $\theta$  é o ângulo de abertura do descarregador (em  $^\circ$ ). A precisão das medições do volume médio de galgamento,  $Q$ , foi  $\pm 5E-6 m^3/s/m$ .

A Figura 19 compara os volumes médios de galgamento obtidos para os ensaios realizados às escalas 1:10 e 1:30 para o Caso A, com  $d=11.5$  m,  $H=4$  m e  $T=14$  s (ondas regulares). Para a escala 1:20, houve um problema com as medições da variação do nível da água dentro do reservatório, pelo que não existem resultados para  $Q$ . A figura mostra que as gamas de volumes médios de galgamento, convertidos a valores à escala 1:10, foram:

- Escala 1:10:  $3.32E-4 \leq Q \leq 9.32E-4 m^3/s/m$ ;
- Escala 1:30:  $2.36E-3 \leq Q \leq 2.94E-3 m^3/s/m$ .

Tal como pretendido, estes valores de  $Q$  são superiores à precisão das medições ( $\pm 5E-6 m^3/s/m$ ).

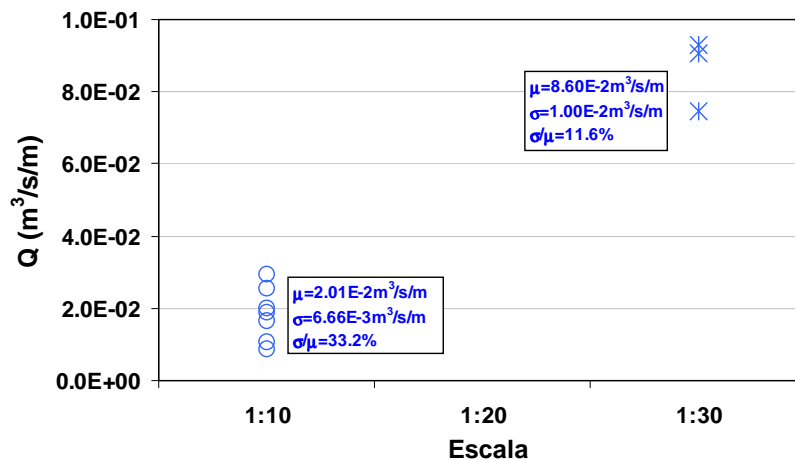


Figura 19. Caso A:  $T=14$  s,  $H=4$  m,  $d=11.5$  m (ondas regulares). Volumes médios de galgamento,  $Q$ , obtidos para os ensaios às escalas 1:10 e 1:30 (valores convertidos à escala 1:1).

Tal como para outros ensaios analisados anteriormente (Reis *et al.*, 2008), a Figura 19 sugere que, para ondas regulares e para as escalas testadas, a escala é importante e os valores dos volumes médios de galgamento aumentam à medida que a escala diminui. Ao contrário do que seria de esperar, o valor do coeficiente de variação de  $Q$ ,  $\sigma/\mu$ , para a escala 1:30 é inferior ao valor para a escala 1:10: diminuiu de 33.2% para 11.6%.

## 5 CONCLUSÕES

Na presente comunicação, descreveram-se os ensaios realizados no LNEC, para estudar a propagação das ondas ao longo de uma praia com declive de 1:20 que termina numa



## 6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

protecção marginal com um declive de 1:1.5. Os testes foram realizados para ondas regulares e irregulares, em modelos construídos a diversas escalas (desde 1:10 até 1:60) associadas a diferentes alturas de onda e níveis de água. Os resultados obtidos consistiram nas séries temporais da elevação da superfície livre, da pressão sobre a estrutura, do nível de água atingido sobre a estrutura e do volume galgado na mesma, para diferentes condições de agitação incidente.

Para uma condição de agitação incidente (Caso A -  $T=14$  s e  $H=4$  m, para  $d=11.5$  m), compararam-se os resultados obtidos, em termos de altura significativa da agitação marítima, do espraiamento, da pressão e do caudal galgado, para as diferentes escalas testadas, e as principais conclusões são:

- Alturas de onda: a escala do modelo têm importância na evolução da altura das ondas ao longo do canal. Em geral verificaram-se diferenças significativas quer ao nível do andamento dos valores de altura de onda no canal, especialmente entre as escalas 1:10 (1:10 ou 1:20) e a escala 1:30, quer relativamente aos valores de altura de onda na zona de rebentação que foram diferentes para as três escalas. Estas diferenças são consequências das significativas reflexões que se faziam sentir principalmente para a escala 1:10;
- Pressão: a escala do modelo é importante. No entanto, a variação da pressão com a escala do modelo não parece ser uniforme: aumenta quando se passa da escala 1:10 para 1:20 e diminui quando se passa da escala 1:10 para 1:30, embora com uma diferença menor;
- Espraiamento: a escala do modelo tem alguma influência nos valores medidos sendo as diferenças observadas nos resultados inferiores a 10%. No entanto, a variação do valor máximo de espraiamento não tem um comportamento uniforme com a variação da escala: diminui quando se passa de 1:10 para 1:20 e aumenta para 1:30;
- Galgamento: a escala do modelo é importante e o volume médio galgado parece aumentar à medida que a escala diminui.

De notar que todas estas conclusões se baseiam nos resultados de uma única situação de onda incidente. A extensão deste trabalho a outras condições de ensaio já foi iniciado e a sua continuação até a análise de todos os dados constitui o trabalho futuro.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do III HYDRALAB projecto, Contrato N. 022441 e FCT / POCTI projectos: PTDC/ECM/73145/2006 e PTDC/ECM/67411/2006.

## 7 Referências bibliográficas

- Capitão, R. 2002. Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima, Tese de doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.)
- Fortes, C.J.E.M., Neves, M.G., Santos, J.A., Capitão, R., Palha, A., Lemos, R., Pinheiro, L., Sousa, I. 2008a. A methodology for the analysis of physical model scale effects on the simulation of wave propagation up to wave breaking. Preliminary physical model results. Proc. OMAE 2008, ASME, No. 57767.
- Fortes, C.J.E.M., Lemos, R., Neves, M.G., Reis, M.T., Santos, J.A., Pinheiro, L., Palha, A., Capitão, R., Sousa, I. 2008b. Physical modelling of wave propagation and breaking in a flume using different geometric model scales. Proc. 2nd International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (CoastLab08), 2-5 July, Bari, Italy (in press).





**6<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária**  
**Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009**

- Lemos R., Fortes, C.J.E.M., Gil L., Neves M.G. 2009. The influence of the geometric scale model on the physical modelling of the wave propagation and breaking in a flume. *Journal of Coastal Research*, SI 56, pp. 583 – 592.
- LNEC 2008. CoMIBBS Task 2: Composite Modelling Report. LNEC Report. Dezembro. Lisboa,
- Lynett, P., Liu, P. L.-F., 2002. COULWAVE Code Manual, Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package.
- Pinheiro, L., Fortes, C.J.E.M. 2008. Análise de séries temporais: programa em Visual Basic for Applications, Janeiro.
- Reis, M.T., Neves, M.G., Fortes, C.J.E.M. 2008. Influence of physical model scale in the simulation of wave overtopping over a coastal structure. PIANC Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering, 7 a 9 de Outubro, Palermo, Itália.
- Troch, P., 2005. User Manual: Active Wave Absorption System. Gent University, Dep. Civil Engineering, Denmark.
- Van Os, A.G.; Soulsby, R.S.; Kirkegaard, J.; 2004. The future role of experimental methods in European hydraulic research: towards a balanced methodology. *J. Hydraulic Research*, 42:4, 341-356.