

Modelação física da resposta à agitação incidente de um trecho do quebra-mar do porto da Ericeira

Physical modeling of incident waves on the breakwater stretch of Ericeira port

João Alfredo SANTOS^{1,4}, Rute LEMOS², C.J.E.M. FORTES², Maria Graça NEVES^{2,3}, Liliana PINHEIRO², Marco PINTO³, Carolina SANCHES², Joana GUEIFÃO³, Ana Catarina ZÓZIMO²

¹ ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa, jasantos@dec.isel.ipl.pt

² LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, rlemos@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, gneves@lnec.pt, lpinheiro@lnec.pt, carol.mvs_94@hotmail.com, aczozimo@lnec.pt

³ FCT/UNL, Campus da Caparica 2829-516 Caparica, Portugal, fmm.pereira@campus.fct.unl.pt, j.gueifao@campus.fct.unl.pt

⁴ CENTEC – Centre for Marine Technology and Ocean Engineering, Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, jasantos@dec.isel.ipl.pt

RESUMO: Para caracterizar a resposta de um trecho do quebra-mar de taludes do porto da Ericeira à agitação marítima nele incidente, realizaram-se no canal de ondas irregulares do LNEC um conjunto de ensaios com um modelo reduzido desse mesmo trecho. Nesta comunicação descreve-se a instalação experimental, incluindo os diversos instrumentos utilizados para medir as séries temporais das várias grandezas de interesse e o programa de ensaios, apresentando-se as grandezas medidas num subconjunto dos ensaios considerado mais interessante. Nestas grandezas incluem-se a elevação da superfície livre associada à agitação incidente, o espraçamento ao longo do talude, o volume de água de água galgado, a pressão em vários pontos da superestrutura e a erosão do manto protetor utilizando um sensor cujo funcionamento se baseia na tecnologia *Time of Flight*.

Palavras-Chave: agitação marítima; espraçamento; galgamento; superestrutura; dano.

ABSTRACT: To characterize the response to the sea waves of a stretch of rubble-mound breakwater of the Ericeira port, a set of scale model tests with such a stretch were carried out in the LNEC irregular wave flume. This paper presents the experimental set up, including the equipment used to measure the time series of the several quantities of interest as well as the test programme and the measured quantities in a subset of the tests considered most interesting. These quantities include the free-surface elevation associated to the incident sea waves, the run up along the armour layer slope, the overtopped volume, the pressure at several points of the superstructure and the erosion of the armour layer using a sensor based on the *Time of Flight* technology.

Keywords: Wave; runup; overtopping; superstructure; damage.

1. INTRODUÇÃO

Na costa de Portugal continental, os quebra-mares de talude são a estrutura de proteção portuária mais comum. Essa é a razão para o estudo em modelo físico reduzido da resposta à agitação marítima, em termos do espriamento, galgamento, esforços na superestrutura e erosão do manto protetor, de um trecho do quebra-mar do porto da Ericeira. Com efeito, embora já existam modelos numéricos capazes de estimar de forma razoável aquelas respostas, importa sempre afinar e confirmar a bondade dessas previsões comparando-as com valores medidos em ensaios com modelo físico reduzido, onde é possível selecionar a gama de condições de agitação marítima a testar.

Neste artigo descreve-se a instalação experimental, incluindo os diversos instrumentos utilizados para medir as séries temporais das várias grandezas de interesse e o programa de ensaios, apresentando-se as grandezas medidas num subconjunto dos ensaios considerado mais interessante. Assim, depois deste capítulo de introdução, apresenta-se a instalação experimental e os equipamentos utilizados. Depois, descreve-se o programa de ensaios seguido e alguns detalhes da sua implementação.

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

No canal de ondas irregulares n.º 1 do LNEC (CO11) representou-se, à escala 1:50, o fundo frente à secção correspondente ao cais acostável do molhe do porto da Ericeira, bem como a própria secção, como mostrado na Fig. 1a, 1b. Este é um canal com 0.8 m de largura, 50 m de comprimento capaz de absorver com o movimento da pá as ondas refletidas pela estrutura testada.

Depois do fundo horizontal - correspondente à cota -27,0 m (ZH) - tem-se um talude com a inclinação de 1,6% e 26,0 m de comprimento (1300 m no protótipo) a que se segue um talude com a inclinação de 4,3% que termina 0,45 m acima do fundo do canal, que corresponde à cota -4,5 m (ZH) no protótipo, no plano da fundação do quebra-mar. O manto protetor tem uma espessura de 0,09 m (4,50 m no protótipo), é composto por duas camadas de tetrápodes com 2,4 N (300 kN no protótipo) e o seu declive é 2:3. O ponto mais alto da superestrutura está 0,27 m acima do plano da fundação, o que corresponde a uma cota no protótipo de + 9,00 m (ZH). Na Fig. 1a os níveis indicados referem-se ao protótipo, enquanto as distâncias indicadas são do modelo.

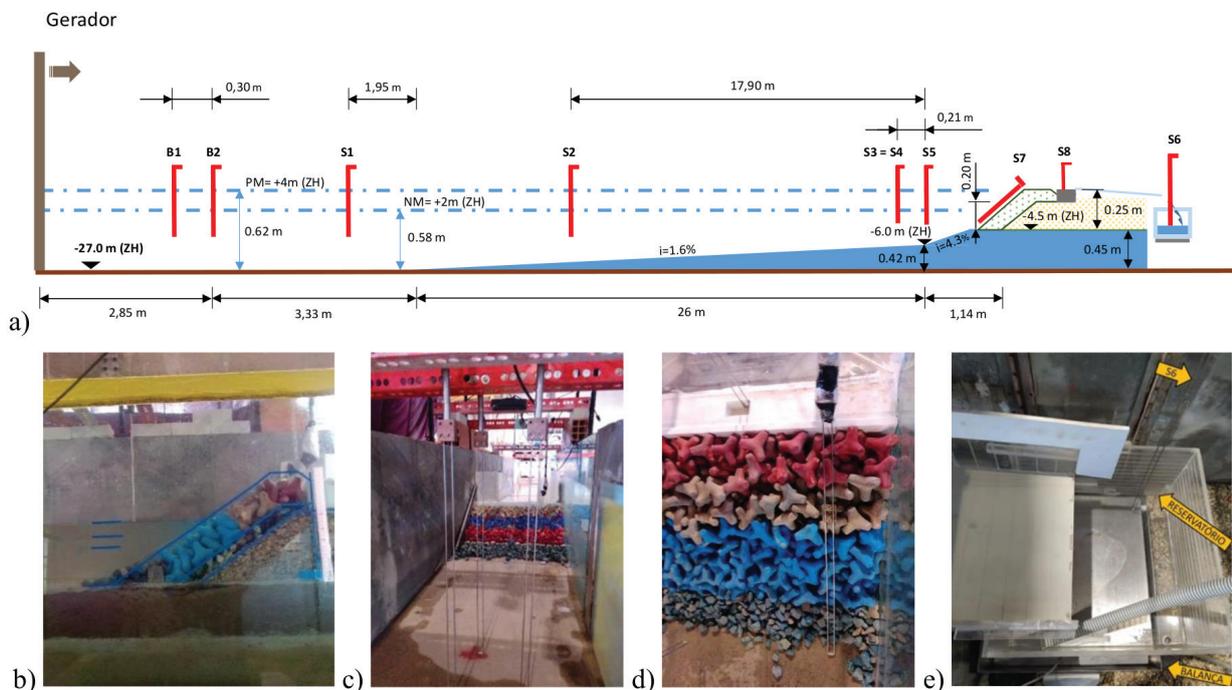


Figura 1. a) Esquema do modelo físico e do equipamento de medição no canal; b) Perfil transversal do quebra-mar; c) Sondas S3 a S5; d) Sonda de espriamento; e) Descarregador e reservatório para galgamentos.

Os estados de agitação gerados nos ensaios correspondiam a uma zona com o fundo à cota -27,00 m (ZH) sendo a agitação marítima nessa zona do canal medida com as sondas B1 e B2, Fig. 1a. As sondas S1 a S5 caracterizavam a agitação ao longo do canal, enquanto a sonda S6 media o nível da água no reservatório dos galgamentos e a sonda S7 o espriamento no talude do manto protetor. Fig. 1c, 1d e 1e. A sonda S8 identificava as ocorrências de galgamento. Todas estas sondas eram resistivas, sendo a frequência de aquisição das sondas B1 e B2 40 Hz e a das sondas S1 a S8 128 Hz.

A balança digital sob o reservatório de galgamento funcionava com uma frequência de amostragem de 1 Hz, Fig. 1e.. O descarregador que conduzia o volume de água galgado para o reservatório de galgamento tinha a secção de entrada na aresta da superestrutura 0,25 m acima da fundação da secção no modelo, correspondente à cota +8,0 m (ZH), e a sua largura variava de 0,75 m a 0,30 m ao longo de 0,6 m.

Para avaliar as forças exercidas pela agitação marítima na superestrutura do molhe, houve um conjunto de ensaios em que o sólido que representava no modelo aquela parte do perfil foi substituído por um dispositivo de dimensões idênticas, i.e., com 0,13 m de profundidade, 0,09 m de altura e que ocupa toda a largura do canal. Nas faces desta estrutura foram colocados 7 sensores

de pressão, Fig. 2. Estes sensores têm um diâmetro de 27 mm, tendo sido colocados 3 na face vertical da superestrutura exposta à agitação incidente, Sp1 a Sp3, e 4 no fundo da superestrutura, Sp4 a Sp7. Os sensores de pressão utilizados são da Honeywell (modelo ABH015PGC1B3), com sinal não amplificado e compensação de temperatura, saída variável entre 0 mV e 100 mV \pm 1 mV e tempo de resposta inferior a 0,5 ms. A frequência de amostragem nestes sensores foi de 128 Hz. Em qualquer das faces, a distância entre os centros dos sensores na direção da largura do canal era 80 mm. A caracterização da evolução do dano foi realizada através do levantamento da envolvente do manto com o sensor de movimento Kinect colocado cerca de 2,0 m acima do fundo do canal, Fig 3a. Estes levantamentos foram realizados sem água no canal, no início e no fim de cada série de ensaios, e com água no final de cada ensaio intermédio. De modo a referenciar as nuvens de pontos resultantes dos levantamentos, utilizaram-se 12 pontos de controlo, Fig. 3b, materializados com botões coloridos colocados no fundo do canal, frente ao pé do talude do manto protetor, no cimo dos cubos que servem de apoio aos elementos do manto e na superestrutura. As coordenadas destes pontos de controlo foram obtidas com uma Estação Total antes do início das séries de ensaios e são apresentadas na Tabela 1.

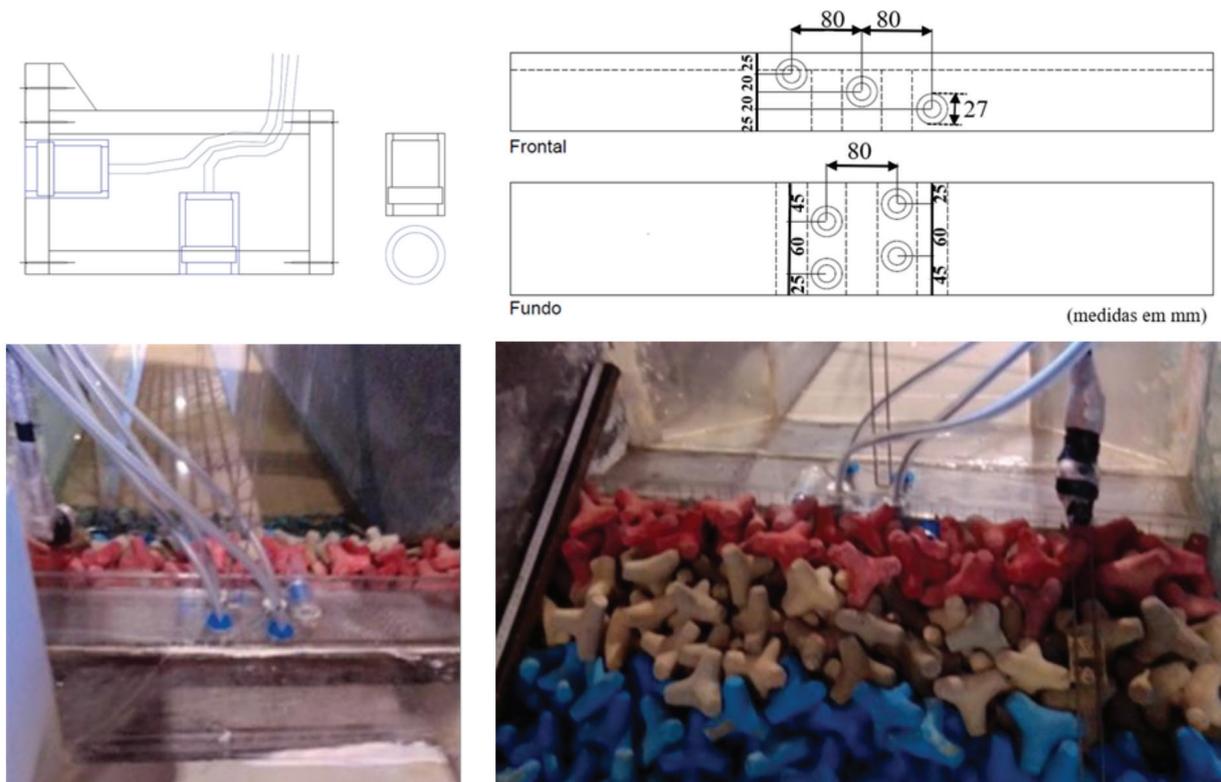


Figura 2. Disposição dos sensores de pressão Sp1 a Sp8 na superestrutura do modelo físico da secção.



Figura 3. a) Sensor de movimento Kinect. b) Pontos de controle.

Tabela 1. Coordenadas dos pontos de controle no modelo do quebra-mar testado

Zona do modelo	Ponto	Coordenadas		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Superestrutura	1	59	1008	292
	2	198	1069	284
	3	391	1017	289
	4	593	1081	285
	5	759	1008	284
Cubos do pé do talude	6	256	505	67
	7	440	510	66
Fundo em frente à estrutura	8	10	271	12
	9	189	291	13
	10	394	263	13
	11	626	287	13
	12	773	257	12

3. ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizados 3 conjuntos de testes distintos: Com o primeiro, pretendeu-se caracterizar o espraçamento e o galgamento, enquanto com o segundo conjunto de testes mediram-se as pressões na superestrutura, tendo o terceiro conjunto de testes como objetivo caracterizar a evolução do dano do manto protector. Em qualquer dos conjuntos de testes mencionados, as condições de agitação marítima testadas foram estabelecidas com base no regime de agitação marítima na zona de estudo (Zózimo *et al.* 2021). Todos os estados de agitação gerados tinham uma configuração espectral empírica do tipo JONSWAP com um fator de pico de 3,3.

Os testes foram realizados para três profundidades diferentes na zona mais funda do canal, na ausência de ondas: 0,55 m, 0,58 m e 0,62 m, correspondentes no protótipo aos níveis de maré, baixa-mar, BM, (+0.3 m ZH), nível médio, NM, (+2,0 m ZH) e preia-mar, PM, (+4,0 m ZH). Nos subcapítulos seguintes utilizam-se estas designações para os níveis de maré em vez daquelas profundidades.

3.1 Espraçamento e galgamento

Realizaram-se ensaios com agitação irregular, com a duração de 1000 ondas, para os três níveis de maré. Foram gerados estados de agitação com períodos de pico, T_p , de 1,70 s, 1,98 s e 2,26 s (12 s, 14 s e 16 s no protótipo), e alturas significativas, H_s , de 0,08 m, 0,10 m, 0,12 m, 0,14 m e 0,17 m (respetivamente 4, 5, 6, 7 e 8,5 m no protótipo). A Tabela 2 mostra como foram combinadas aquelas características dos estados de agitação, bem como o número de testes realizados em cada uma daquelas combinações. A avaliação do espraçamento foi realizada através de uma sonda colocada ao longo do talude (S7), Fig. 1d, enquanto para o galgamento foram usadas duas técnicas de modo a melhor confirmar os resultados obtidos: a pesagem da água galgada e a medição do nível dentro do reservatório através da sonda resistiva S6 (Fig. 1e).

Durante os ensaios, a medição do espraçamento foi limitada nas situações de maior galgamento uma vez que água ultrapassava claramente a sonda instalada no talude. Nessas situações considerou-se o máximo do espraçamento igual ao desnível entre a cota do coroamento e o nível de repouso. Por outro lado, a medição do galgamento também teve limitações, uma vez que nas situações de

grande galgamento, a bomba instalada no interior do reservatório não conseguia extrair a água com velocidade superior aquela que entrava no reservatório.

A Fig. 4 apresenta as séries temporais do espraimento a) medido na sonda S7, e do galgamento b) para o nível PM e agitação incidente de $T_p=1,70$ s e $H_s=0,12$ m.

Tabela 2. Número de testes realizados em cada condição de agitação marítima para avaliação do espraimento e do galgamento.

Nível de maré	BM			NM			PM		
T_p (s) H_s (m)	1,70	1,98	2,26	1,70	1,98	2,26	1,70	1,98	2,26
0,08	3	7	8	-	-	-	-	-	-
0,10	7	10	7	-	-	-	-	-	-
0,12	9	14	8	-	-	-	1	-	-
0,14	8	5	2	-	-	-	-	-	-
0,16	-	-	-	6	5	6	2	2	2
0,17	8	6	2	-	-	-	-	-	-

Na Fig. 5 apresenta-se, para o nível de preia-mar e para 3 valores diferentes do período da agitação incidente, a evolução do caudal médio galgado, representado por barras verticais, e do valor espraimento que é excedido por apenas 2% das ondas incidentes, representado por círculos, com a

altura significativa do estado de agitação. A figura confirma, para o mesmo valor do período de pico, o aumento do valor característico do espraimento com a altura significativa do estado de agitação incidente no quebra-mar. Mais, o aumento do período de pico do estado de agitação implica também um aumento do valor característico do espraimento, sendo também claro que tal aumento está limitado ao desnível entre o coroamento da estrutura e o nível de repouso (0,12 m). O caudal médio galgado no estado de agitação por metro de desenvolvimento do coroamento da estrutura segue a mesma evolução já indicada para o valor característico do galgamento.

3.2 Pressão na superestrutura

Reproduziram-se nestes ensaios as condições dos ensaios de espraimento e galgamento que conduziram a pequenos valores de caudal galgado, já que o objetivo era analisar as pressões na superestrutura. Assim foram realizados ensaios com as profundidades correspondentes ao nível médio (0,58 m) e de preia-mar (0,62 m). Realizaram-se ensaios com agitação irregular e com ondas regulares, sendo que neste último caso a duração de cada teste era a correspondente a apenas 100 ondas. Nos ensaios com agitação irregular os estados de agitação gerados tinham períodos de pico de 1,70 s e 1,98 s (12 s e 14 s no protótipo) e para cada um desses períodos de pico as alturas de onda significativas consideradas foram 0,08m e 0,10 m

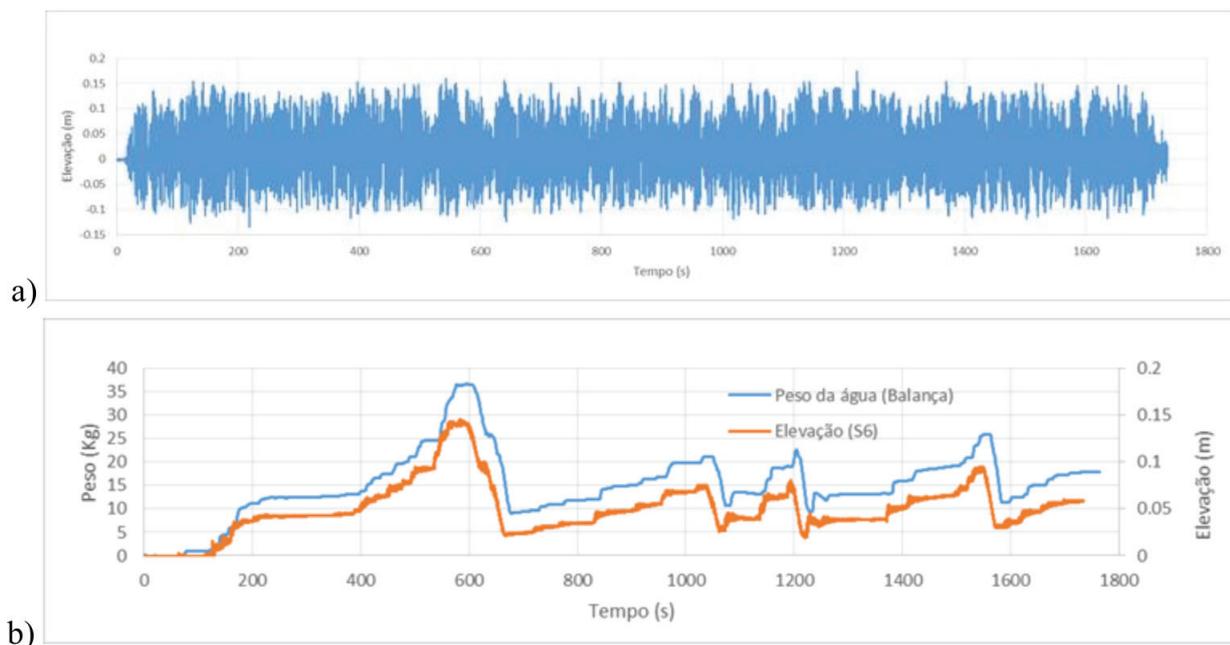


Figura 4. a) Série temporal da elevação do espraimento (sonda S7). b) Séries temporais da elevação da superfície livre no reservatório (S6) e da pesagem de água galgada. Nível de PM, $T_p=1,70$ s, $H_s=0,12$ m.

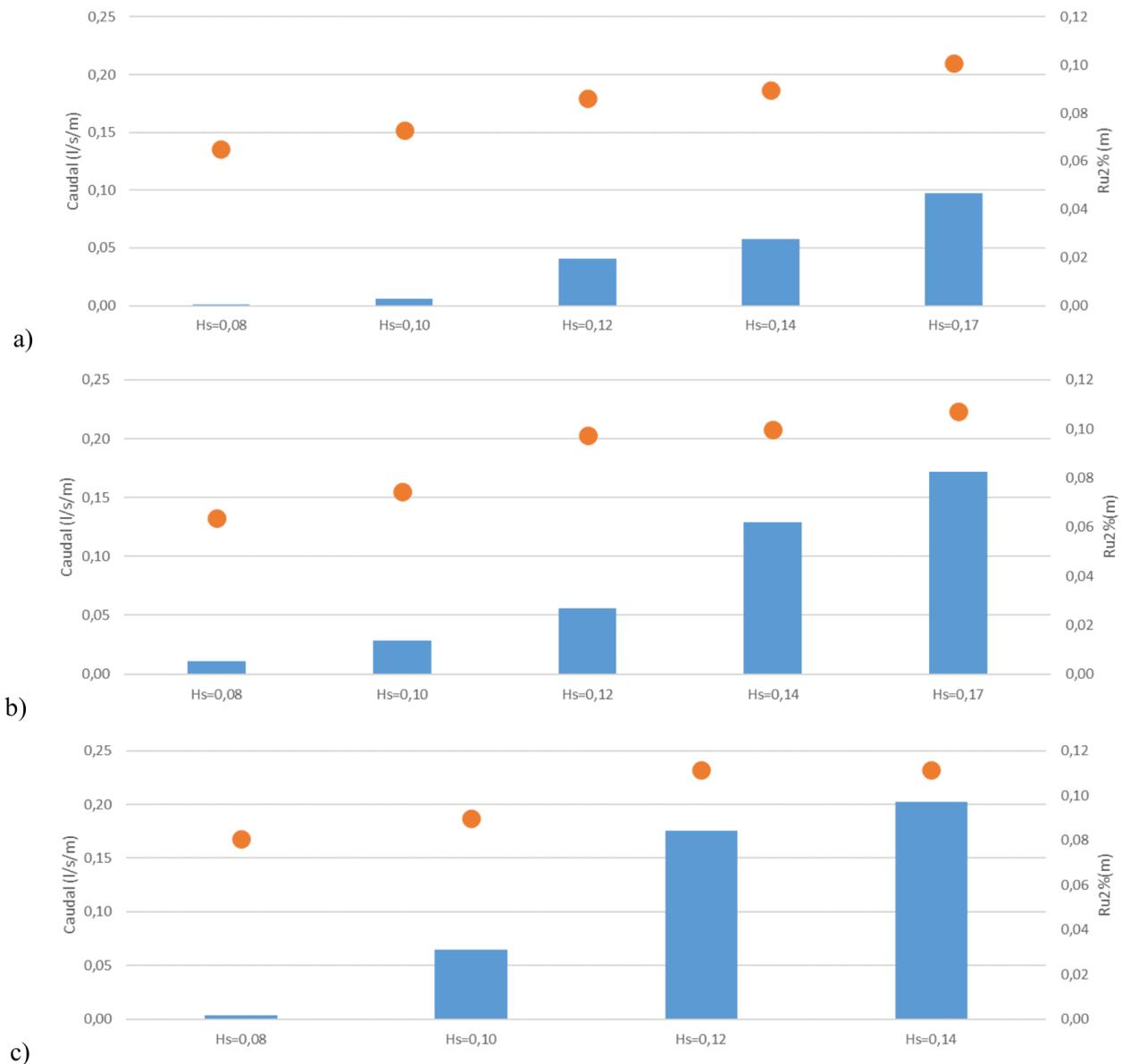


Figura 5. Evolução, para o nível de maré de preia-mar, do caudal médio galgado (barras) e do espraimento excedido apenas por 2% das ondas incidentes (círculos) com a altura significativa do estado de agitação incidente quando o período de pico desse estado de agitação é a) 1,70 s; b) 1,98 s; c) 2,26 s.

(4 m e 5 m) para a profundidade correspondente ao nível de preia-mar, enquanto para o nível médio foi considerada apenas a altura de onda significativa de 0,16 m (8 m). Nos ensaios com ondas regulares estas tinham períodos, T , de 1,70 s e 1,98 s (12 s e 14 s) e alturas de onda, H , de 0,08 m e 0,12 m (4 m e 6 m), para o nível PM, e de 0,11 m a 0,14 m (5.5 m a 7 m), para o nível NM. Na Tabela 3 apresenta-se um resumo das características dos ensaios realizados. Todos os ensaios foram repetidos.

Foram medidas as pressões na superestrutura, o espraimento e o galgamento, além da elevação da superfície livre no pé da estrutura e nas sondas

ao longo do canal. Apresenta-se na Fig. 6 a série temporal das pressões no sensor da face da estrutura colocado à cota mais alta, Sp_1 , para $H_s=0,10$ m, $T_p=1,70$ s, e profundidade correspondente a PM. Nestas condições de teste o sensor da base da superestrutura colocado a 0,45 m da parte frontal da estrutura, Sp_4 , não funcionou, pelo qual não se pode obter uma informação mais detalhada das pressões na base da estrutura. Em duas condições de teste com ondas regulares o sensor da parede frontal colocado numa cota mais baixa, Sp_3 , não funcionou corretamente.

Tabela 3. Características dos ensaios de pressão realizados.

Tp (s)	Hs (m)	Nível de maré	T (s)	H (m)	Nível de maré
1,70	0,08	PM	1,70	0,10	PM
1,70	0,10	PM		0,11	NM e PM
1,70	0,16	NM		0,12	NM e PM
1,98	0,08	PM		0,14	NM
1,98	0,10	PM	1,98	0,08	PM
1,98	0,16	NM		0,10	PM
				0,11	NM e PM
				0,12	NM
				0,14	NM

Os resultados dos ensaios de pressão correspondem a valores da componente da pressão induzida pelas ondas em metros de coluna de água (mca). Os sinais medidos em cada sensor foram analisados no domínio do tempo de forma a obter os valores da pressão máxima (positiva, Pmax), e ainda da média dos 1/10*n e dos 1/3*n valores mais altos do registo

de pressões, P1/10 e P1/3 respectivamente, sendo n o número total de eventos de pressão do registo. A título de exemplo apresenta-se na Fig. 7 os resultados das pressões obtidas para o ensaio realizado em preia-mar com Hs=4 m, Tp=12 s. Como se pode observar, as pressões na parede frontal da superestrutura são superiores às pressões na base da superestrutura, com máximos de pressão de 0,20 mca na parede frontal e de 0,15 mca na base. O número de eventos de pressão não é muito elevado, isto é, nem todas as ondas atingem a superestrutura, daí que P1/10 seja igual a Pmax em alguns sensores. Isto deve-se ao facto de a base da superestrutura estar 0,01m acima do nível de preia-mar e da superestrutura estar totalmente protegida pelo manto principal, fazendo com que esteja bastante protegida da acção da agitação. O valor máximo das pressões frontais ocorre a 0,045 m da base da superestrutura, reduzindo-se à medida que nos aproximamos da base da estrutura e do coramento da mesma. Já no que toca às subpressões e como esperado, elas reduzem-se à medida que nos afastamos da parede frontal.

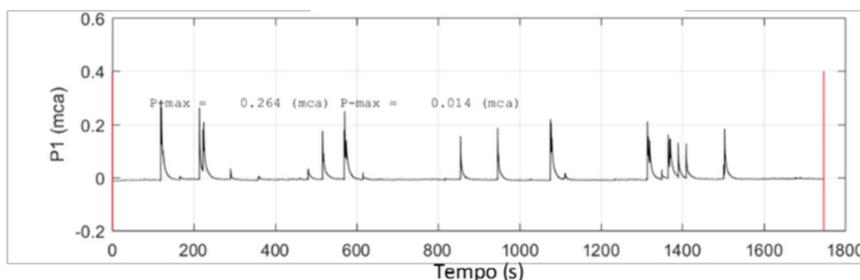


Figura 6. Série temporal das pressões no sensor SP1, para Hs=5 m, Tp=12 s, NM=+4,0 m (ZH).

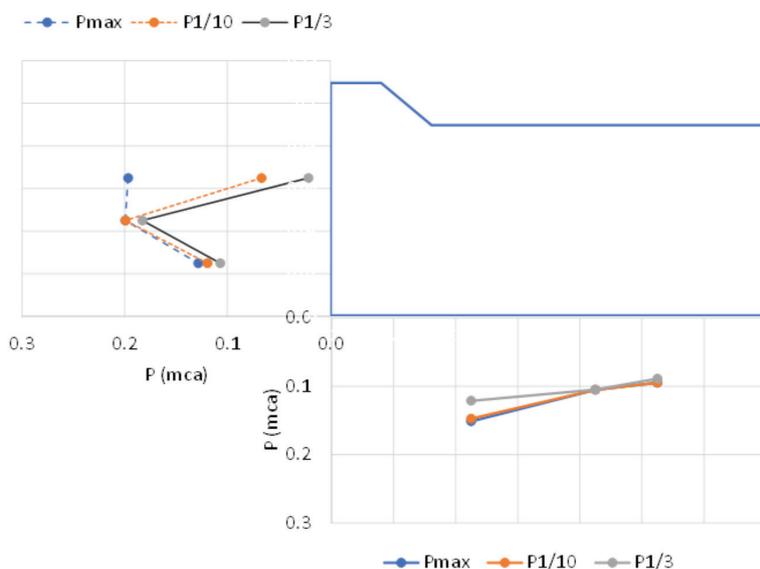


Figura 7. Valores das pressões para Hs=4 m, Tp=14 s, NM=+4,0 m (ZH).

3.3 Evolução do dano

Uma das grandezas que permite avaliar a evolução do dano no manto resistente de quebra-mares de taludes em ensaios em modelo físico é o volume erodido por acção da agitação marítima, o qual pode determinar-se a partir de levantamentos consecutivos da envolvente do manto. Melby (1999) apresentou uma fórmula para previsão da evolução do dano em quebra-mares de taludes com base nas características da agitação neles incidente, em ensaios de longa duração de modo a avaliar a velocidade de degradação dos mantos quando expostos prolongadamente a agitação extraordinária. O objetivo foi obter uma formulação de previsão da evolução do dano do manto resistente de um quebra-mar de taludes numa determinada fase da vida útil da estrutura.

Neste trabalho procurou-se reproduzir a sequência de ensaios de Melby, tendo sido considerados 2 níveis de maré: o nível médio, que origina uma profundidade no pé do talude de 0,13 m e uma profundidade de 0,58 m na zona mais profunda do canal e o nível de preia-mar, para o qual a profundidade no pé do talude é 0,17 m e a maior profundidade no canal é 0,62 m.

Na série A, estados de agitação iguais, cada um com a duração de 1000 ondas, atuavam na estrutura até estabilizar a erosão no manto. Nessa altura passava-se para o estado de agitação seguinte, de energia crescente. Começou-se com o nível médio e depois passou-se para o nível de preia-mar. Nas séries B e C o número de estados de agitação iguais incidentes na estrutura estava definido a priori. Na série B começava-se com o nível médio de maré, depois subia-se para o nível de preia-mar enquanto na série C se passava o oposto.

Nos testes exploratórios realizados antes do início dos testes verificou-se a ausência de quaisquer danos no manto protetor para as condições de agitação testadas. Para se obter um manto protetor menos estável para a agitação incidente, decidiu-se, apenas nesta série de testes, substituir as duas camadas de tetrápodes de 2,4 N (300 kN) por um manto misto com uma camada com tetrápodes de 1,08N (135 kN) em cima dos quais foi colocada outra camada com tetrápodes ainda mais leves, 0,84 N (105 kN). Nesta série de testes incluiu-se ainda estados de agitação com a altura significativa de 0,16 m e de 0,19 m (respetivamente 8,0 m e 9,5 m no protótipo). A Tabela 4 sumariza as condições de teste consideradas.

Tabela 4. Níveis de maré e condições de agitação dos ensaios de estabilidade.

Série	Ensaio	Tp (s)	Hs (m)	Profundidade no pé do talude ht (m)	Duração do ensaio para 1000 ondas (min)	Número de ensaios
A	1	1,70	0,12	0,13	28	Até estabilizar o dano
	2	1,70	0,16	0,13	28	
	3	1,70	0,19	0,13	28	
	4	1,98	0,12	0,17	33	
	5	1,98	0,14	0,17	33	
	6	1,98	0,17	0,17	33	
B	1	1,70	0,12	0,13	28	1
	2	1,70	0,16	0,13	28	4
	3	1,70	0,19	0,13	28	4
	5	1,98	0,14	0,17	33	4
	6	1,98	0,17	0,17	33	4
C	4	1,98	0,12	0,17	33	2
	5	1,98	0,14	0,17	33	4
	6	1,98	0,17	0,17	33	4
	2	1,70	0,16	0,13	28	4
	3	1,70	0,19	0,13	28	4

Com vista à avaliação do volume erodido ao longo das séries de ensaios, no início de cada série foi feito, com o sensor Kinect, um levantamento tridimensional da superfície do modelo, sem água no canal. No final de cada um dos ensaios foi feito um levantamento com água no modelo. Todas as nuvens de pontos obtidas ao longo dos ensaios foram posteriormente georeferenciadas através dos pontos de controlo obtidos com a estação total. Na Fig. 8 apresentam-se os levantamentos efetuados com o sensor Kinect no início e no final da série A (após a atuação de $H_s=0,17$ m, $T_p=1,98$ s e profundidade no pé do talude de 0,17 m, correspondente ao nível de maré PM) com estabilização dos estragos. Na reconstrução do manto no final da série é evidente a perturbação no levantamento provocada pela sonda S7, a sonda dedicada à medição do espraiamento. Para evitar os valores anómalos associados, omitiu-se da análise realizada a faixa do manto sobre a qual esta sonda foi colocada, com cerca de 0,10 m de largura.

As nuvens de pontos obtidas com água foram posteriormente alinhadas com a nuvem a seco, com vista a corrigir a parte submersa do levantamento, uma vez que a luz infra-vermelha do sensor tem pouca capacidade de atravessar profundidades de água superiores a 0,05 m. Este alinhamento fino foi realizado utilizando o algoritmo Iterative Closest Point, ICP (Chen & Medioni, 1991) disponível no software de uso livre CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2006).

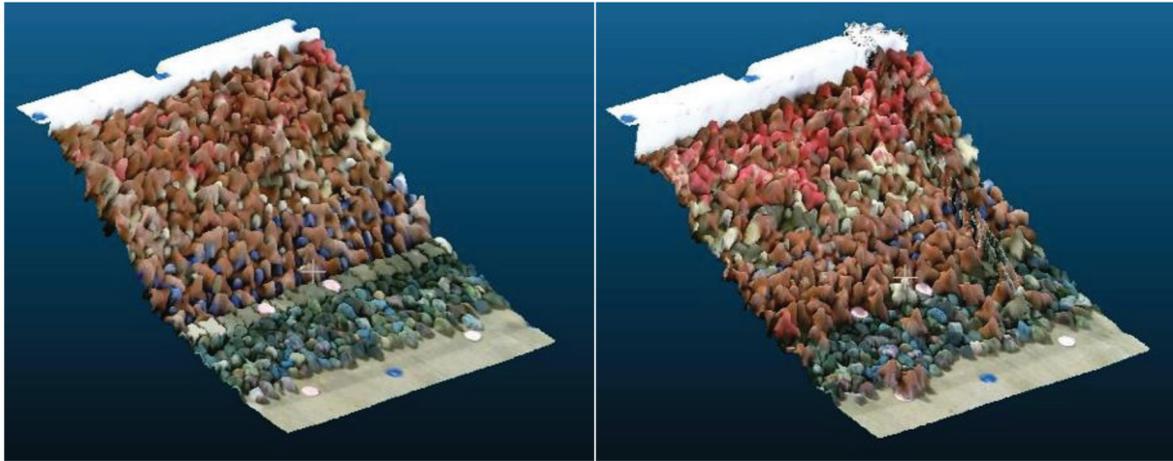


Figura 8. Aspetto de levantamentos realizados no início e no final da série A.

A comparação entre nuvens de pontos foi feita através do cálculo da diferença de volumes, o qual, por sua vez, tem por base as diferenças de distância entre as duas nuvens os “clusters” resultantes da discretização da nuvem de pontos numa malha cujas sub-unidades resultantes são tão mais pequenas (e o cálculo do volume mais fiável) quanto menor for o espaçamento da malha. No presente estudo utilizou-se um espaçamento de 1 mm.

O software, de uso livre, utilizado em todos os passos do pós-processamento das nuvens de pontos foi o *CloudCompare* (Girardeau-Montaut, 2006).

A Fig. 9 apresenta o mapa de diferenças entre as duas nuvens no início e no fim da série A. As regiões com a cor azul são aquelas onde ocorreu erosão, enquanto as com a cor vermelha são as onde ocorreu acreção. Na região mostrada, o total de erosão foi $0,045 \text{ m}^3$ e o de acreção foi $0,015 \text{ m}^3$. Na Fig. 10 apresenta-se um perfil da envolvente do manto aproximadamente a meio da largura do canal obtido a partir das mesmas nuvens de pontos.

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram apresentados exemplos de um conjunto de ensaios realizados em modelo físico bidimensional de um quebra-mar de taludes. Estes ensaios compreenderam a avaliação do espraçamento, galgamento, forças na superestrutura e evolução do dano, utilizando diferentes técnicas de medição. Destes ensaios resultou um grande conjunto de dados cujo tratamento, ainda que parcial, permitiu tirar algumas conclusões quanto à viabilidade das técnicas, bem como as suas vantagens e desvantagens.

A avaliação do espraçamento foi realizada através de uma sonda colocada ao longo do talude. Sempre que ocorre galgamento o espraçamento máximo

medido fica limitado ao desnível entre a cota de coroamento e o nível de repouso no canal.

Para a avaliação do galgamento utilizaram-se duas técnicas distintas de modo a confirmar os resultados obtidos: a pesagem da água galgada e a medição da superfície livre dentro do reservatório, utilizando uma sonda resistiva. Quando o volume de galgamento era muito elevado, ambas as técnicas tiveram também limitações, uma vez que a bomba instalada no interior do reservatório não conseguia extrair a água com velocidade superior aquela que entrava no reservatório.

Nas medições da pressão observou-se que o número de eventos de pressão não é muito elevado pois nem todas as ondas atingem a superestrutura. O valor máximo das pressões frontais ocorre a $0,045 \text{ m}$ da base da superestrutura, reduzindo-se à medida que nos aproximamos da base da estrutura e do coramento da mesma. Já no que toca às subpressões e como esperado, elas reduzem-se à medida que nos afastamos da parede frontal.

Finalmente, no que diz respeito à avaliação da evolução do dano, a utilização do sensor Kinect mostrou-se bastante eficaz na obtenção de modelos tridimensionais de superfície, possibilitando a extração de perfis e a obtenção de indicadores do dano, tais como a área erodida e a profundidade erodida. A comparação entre as nuvens de pontos inicial final permitiu determinar os volumes de erosão e de acreção entre ambos os levantamentos. O único contratempo encontrado na aplicação desta técnica, foi a previsível distorção introduzida pela sonda de medição do espraçamento no levantamento tridimensional, o qual resultou na necessidade de excluir uma faixa de cerca de $0,05 \text{ m}$ do levantamento.

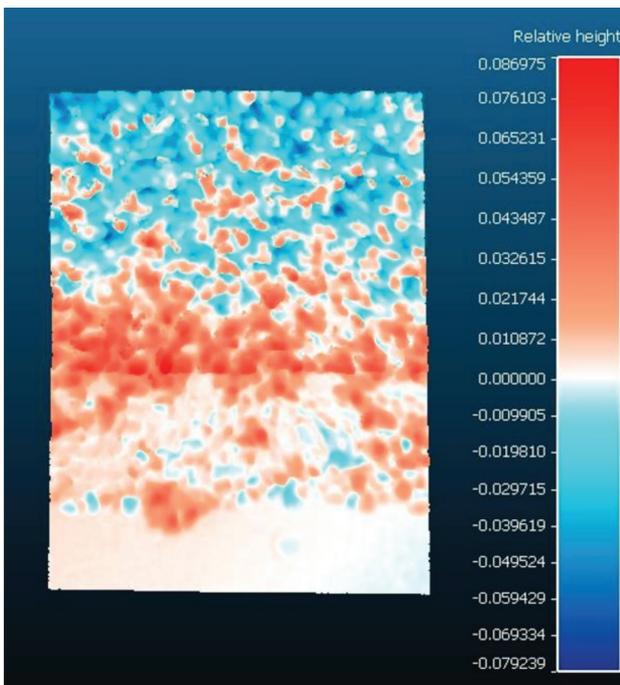


Figura 9. Mapa de diferenças entre o levantamento inicial e final da série A.

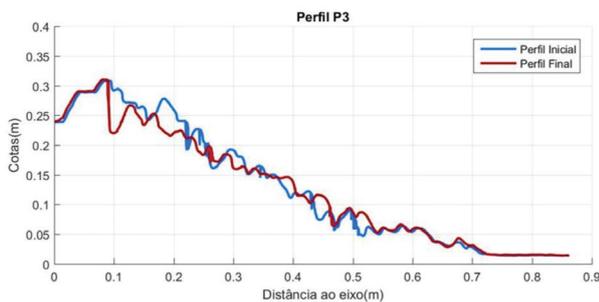


Figura 10. Perfis das envolventes do manto a meio da largura do canal obtido a partir das nuvens de pontos levantadas no início e no fim da série A.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito dos projetos To-SEAlert – Galgamento e inundação em zonas costeiras e portuárias: Ferramentas para um sistema de previsão e alerta, planeamento de emergência e de gestão do risco, ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017 e BSafe4Sea - Controlo da Segurança de Quebramares através da Análise de um Sistema de Previsão e Apoio à Decisão, ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017, ambos financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Agradece-se aos técnicos César Costa, Rosa Emília Soares e Simões Pedro a ajuda nos ensaios, bem como ao Doutor Fernando Soares da FCIências.ID o empréstimo do Kinect utilizado nos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chen Y. & Medioni G. 1991. Object modelling by registration of multiple range images. International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California.

Girardeau-Montaut D. 2006. Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles. PhD thesis (French).

Melby, J.A. 1999. Damage Progression on Rubble-Mound Breakwaters. Technical Report CHL-99-17, US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.

Zózimo A.C., Fortes C.J.E.M., Reis M.T., Pinheiro L.V., Smithers N. & Serrazina V. 2021. Protótipo do TO-SEALERT para o porto da Ericeira. 15.º Congresso da Água, 22 a 26 de março.