



ESTIMATIVA DO DANO NO MANTO RESISTENTE DE QUEBRA-MARES DE TALUDES, BASEADA NO VOLUME ERODIDO O CASO DO QUEBRA-MAR DE PONTA DELGADA

Rute Lemos, Conceição J. E.M. Fortes, Luís Gabriel Silva, Liliana V. Pinheiro (LNEC), Lucília Luís
(Consulmar – Projetistas e Consultores, Lda.), Filipe Mendonça (Portos do Açores, S.A)
rlemos@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, lgsilva@lnec.pt, lpinheiro@lnec.pt, lucilia.luis@consulmar.pt,
fmendonca@portosdosacores.pt

Resumo

Na sequência dos estragos causados pelo furacão Lorenzo no molhe principal do porto de Ponta Delgada, foi elaborado um projeto de reparação do mesmo, tendo havido necessidade de realização de ensaios em modelo físico tridimensional com o objetivo de avaliar a estabilidade da solução projetada.

Estes ensaios foram realizados num dos tanques de ondas irregulares do LNEC. Para uma melhor caracterização dos estragos observados durante os ensaios, foram realizados levantamentos tridimensionais da envolvente de cada troço do modelo, no início e no final de cada série de ensaios, com recurso a um sensor de posição Kinect®.

A solução projetada, por contemplar recargas nos vários troços, com diferentes tipos de blocos, diferentes espessuras de camadas, diferentes porosidades e diferentes inclinações de taludes, proporcionou a oportunidade de estimar o número de blocos removidos a partir de um parâmetro adimensional de dano baseado nas diferenças de volume entre os levantamentos inicial e final, as quais foram processadas usando o software de uso livre *CloudCompare*.

O objetivo deste trabalho é analisar a aplicabilidade do método de avaliação do dano através do volume erodido para os diferentes tamanhos, tipos de blocos e porosidades, bem como a otimização do espaçamento da malha utilizada para o cálculo dos volumes erodidos.

Introdução

Em 2 de outubro de 2019, o furacão Lorenzo atingiu as ilhas do Arquipélago dos Açores, provocando estragos nas infraestruturas portuárias, nomeadamente no molhe principal do porto de Ponta Delgada. No sentido da reposição das melhores condições de segurança, foi elaborado um projeto de reparação do molhe, tendo, nesse âmbito, sido necessária a realização dos ensaios em modelo físico tridimensional com o objetivo de avaliar a estabilidade da solução projetada, os quais foram realizados num dos tanques de ondas irregulares do LNEC.

Durante os ensaios de estabilidade em modelo físico reduzido, a evolução do dano foi realizada através de inspeção visual e da contabilização das quedas e movimentos dos blocos de acordo com o procedimento usual realizado pelo LNEC. Paralelamente a este método tradicional de avaliação do dano, recorreu-se também a levantamentos tridimensionais da envolvente do manto resistente, utilizando o sensor de posição Kinect. Estes levantamentos permitiram determinar o volume erodido entre ensaios consecutivos ou entre os levantamentos realizados no início e no final das séries de ensaios (correspondentes a um conjunto de ensaios com período de pico e nível de maré constantes sendo variável a altura significativa).

Fazendo uma abordagem dos diferentes métodos de avaliação do dano, este pode ser caracterizado por parâmetros baseados no número de blocos removidos, tais como o parâmetro Nod (van der Meer, 1988) ou no parâmetro adimensional do dano, $S=Ae/D_{n50}^2$ definido por Broderick and Ahrens (1982), onde Ae é a área erodida do perfil transversal nas imediações do nível de água e D_{n50} é o diâmetro nominal dos blocos constituintes do manto resistente. Melby e Kobayashi (1998) definiram a profundidade erodida como $e = (z_{before} - z_{after}) \cos \alpha$, onde z_{before} e z_{after} são as cotas da estrutura antes e depois de um ensaio, respetivamente, e α o ângulo que



define a inclinação do talude (sendo a erosão do perfil considerada com um valor positivo). Melby e Kobayashi também consideraram a profundidade erodida adimensional, $E_{2D} = \max(e)/D_{n50}$, onde e é calculada a partir de uma média ao longo de uma distância pré-definida de mD_{n50} , ao longo da secção. Contudo, estas medições apenas podem ser aplicadas em ensaios bidimensionais e no tronco de quebra-mares, em modelos 3D. Hofland *et al.* (2014) propôs um conceito de dano baseado na profundidade erodida $E_{3D,m}$, o qual inclui uma média móvel circular do padrão de erosão, podendo ser aplicável a estruturas de desenvolvimento curvo e cabeças em modelos tridimensionais de quebra-mares.

Com as recentes técnicas de levantamentos tridimensionais, a envolvente dos quebra-mares de taludes pode ser obtida com uma precisão sub-milimétrica. As técnicas de alta resolução mais utilizadas são o *laser scanning* (Rigden and Steward, 2012; Molines *et al.*, 2012; Puente *et al.*, 2014) e a estereofotogrametria (Hofland *et al.*, 2011; Lemos e Santos, 2017).

Apesar do grande progresso conseguido nestas áreas, o levantamento de envolventes de modelos físicos de grandes dimensões e com mantos resistentes compostos por blocos artificiais continua a ser um desafio, pois a medição da profundidade erodida pode ser fortemente afetada pelos intervalos entre os blocos, os quais podem erradamente ser contabilizados como erosão.

Deste modo, é necessária investigação adicional de modo a otimizar os parâmetros utilizados no pós-processamento das nuvens de pontos obtidas durante os levantamentos, assim como o espaçamento da malha utilizado no cálculo de volumes e distâncias.

O sensor de posição Kinect® revela-se uma ferramenta de grande utilidade, pois permite a obtenção de modelos tridimensionais em tempo real, sem o moroso pós-processamento da reconstrução. O uso deste sensor para o levantamento tridimensional de modelos físicos de quebra-mares de taludes foi já testado por diferentes autores. Soares *et al.* (2017) testou o uso deste sensor para detetar movimentos de cubos perfeitos e tetrápodes em dois modelos físicos. Musumeci *et al.* (2018) levou a cabo levantamentos da parte submersa do talude de quebra-mares usando o sensor Kinect durante a realização de ensaios 2D com blocos artificiais Accropode®. Sande *et al.* (2018) realizou testes com vista a uma abordagem da validação dos levantamentos com o sensor Kinect, com determinação da variação da sua precisão consoante os parâmetros e distâncias ao sensor usados nos levantamentos.

No presente trabalho, a avaliação do dano foi realizada com base no volume erodido tendo por base a metodologia utilizada em Lemos *et al.* (2019) durante um conjunto de testes em modelo 3D de um trecho de um quebra-mar de taludes cujo manto resistente era composto por cubos Antifer colocados de modo arrumado. Os principais objetivos deste trabalho são:

- Avaliar o volume erodido de diferentes trechos de um quebra-mar de taludes, cujos mantos resistentes são constituídos por diferentes tipos de blocos. São apresentados os resultados de seis séries de ensaios realizadas com diferentes níveis de maré, direções e condições de agitação;
- Testar a metodologia *ToF*, usando o sensor Kinect, sem água no tanque, de modo a avaliar o dano com base nas diferenças de volume encontradas entre o levantamento inicial e final realizados;
- Estimar o número de blocos removidos, representado por um parâmetro adimensional determinado com base no volume erodido.

Materiais e Métodos

Caraterização do modelo físico

O modelo físico tridimensional foi construído nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, num tanque de ondas do Pavilhão de Hidráulica Marítima com 38.1 m de comprimento, 15.7 m de largura (cerca de 600 m²) equipado com 2 geradores móveis de ondas irregulares com 6.0 m de comprimento cada, para profundidades de água até 0.75 m (Figura 1).



Figura 1. Aspeto do tanque utilizado para construção e ensaios do modelo físico de Ponta Delgada nas instalações experimentais do Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC.

A estrutura ensaiada compreendeu a reprodução à escala 1/65 (de acordo com a lei de semelhança de Froude) de um trecho do quebra-mar de Ponta Delgada numa extensão de cerca de 600 m. Este trecho era representativo dos cinco perfis-tipo PT3 a PT7 a adotar na solução de reparação da zona inicial do quebra-mar (Figura 2). Os perfis-tipo PT3 e PT7 apenas foram reproduzidos numa extensão de cerca de 50 m. Os troços correspondentes ao PT4, ao PT5 e ao PT6 foram reproduzidos na íntegra (Figura 3).

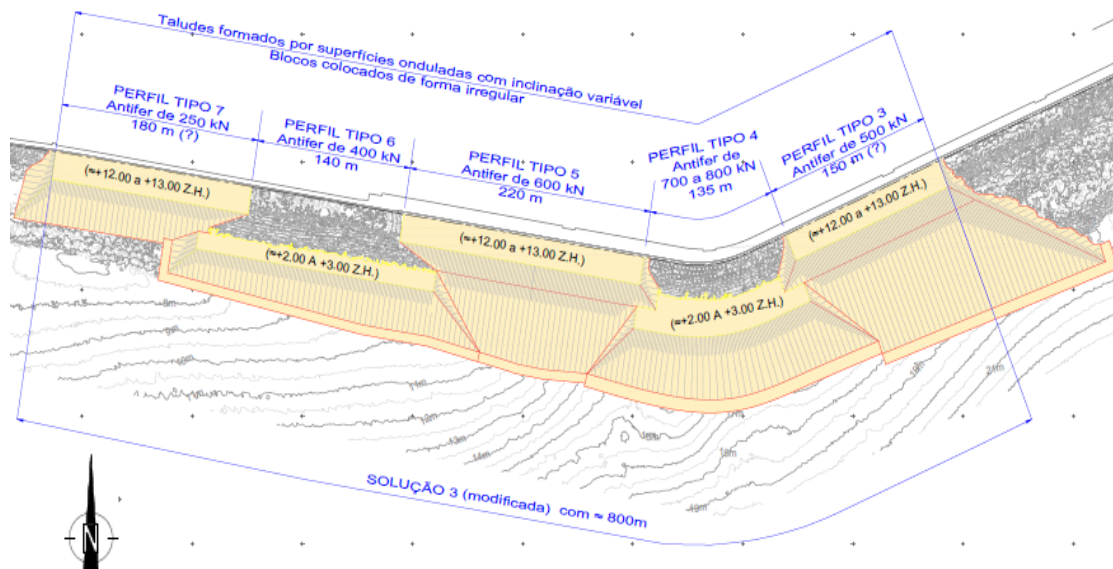


Figura 2. Planta das obras de reparação. Localização dos perfis-tipo do trecho a ensaiar.

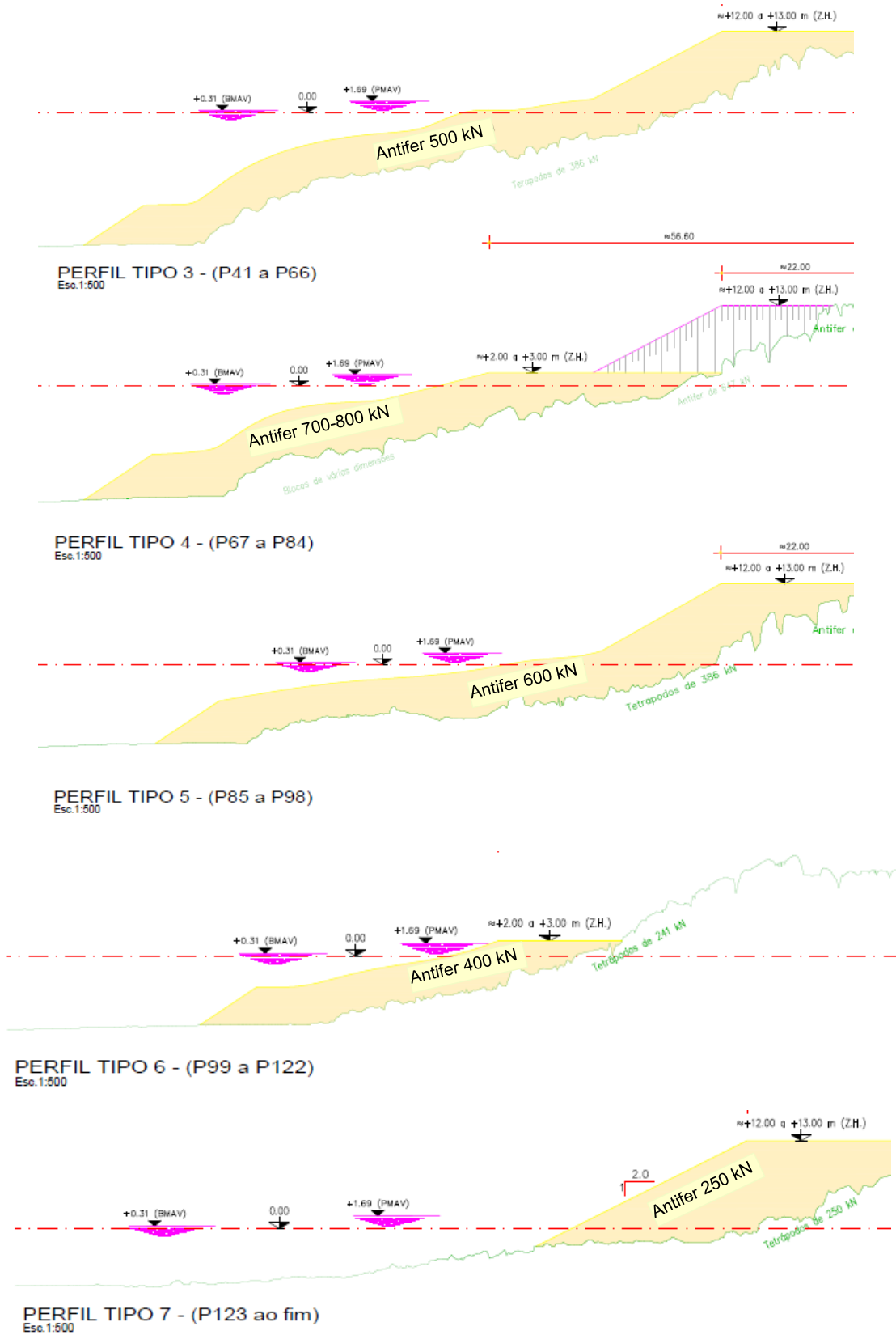


Figura 3. Perfis-tipo P3 a P7.

As secções testadas representam um quebra-mar de taludes com mantos constituídos por blocos Antifer e por cubos perfeitos com colocação desarrumada, cujas características, se resumem na Tabela 1.

Embora o talude da secção P4 apresentasse cubos Antifer de 540 kN com colocação arrumada nas suas cotas superiores, optou-se por não estudar o comportamento dessa zona, atendendo ao baixo nível de dano observado durante os ensaios. Pela mesma razão, não se incluiu também neste estudo a faixa superior do manto da secção P6, constituída por tetrápodes de 250 KN.

A Figura 4 ilustra as diferentes secções do quebra-mar. As secções P4A e P6B não foram alvo do presente trabalho, por apresentarem características semelhantes às secções P4B e P6A a elas adjacentes.

Tabela 1. Características dos blocos utilizados nas secções testadas.

Secção	Tipo de bloco	Peso no protótipo (kN)	Massa no modelo (g)	Peso específico no modelo (kN/m ³)	Diâmetro nominal Dn (m)	Volume no modelo (dm ³)
P3	Cubos Antifer	500	141	24.1	0.040	0.0911
P4A	Cubos Antifer	700-800	229	24.1	0.046	0.0954
P5	Cubos perfeitos	600	225	22.9	0.042	0.0964
P6A	Cubos Antifer	400	122	23.6	0.038	0.0519
P7	Cubos Antifer	250	70	24.1	0.031	0.0292

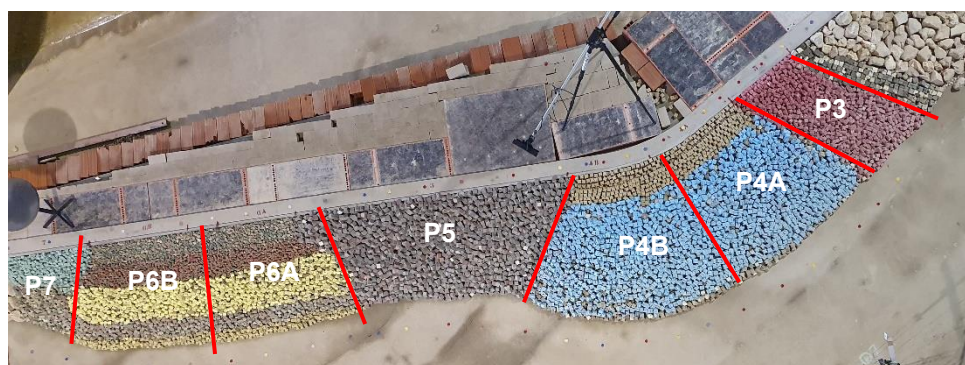


Figura 4. Apeto do modelo e delimitação das secções em estudo.



Figura 5. Aspeto do modelo das seções P3 a P7.

Foram realizados ensaios com agitação proveniente de três direções (SSW, S e WSW), associadas a dois níveis de maré, a alturas de onda significativa (H_s) entre 8 e 15 m e a períodos de pico (T_p) entre 12 s e 20 s. A Tabela 2 apresenta as condições de ensaio junto ao gerador, em valores de protótipo.

Tabela 2. Condições de ensaio junto ao gerador (valores de protótipo)

Série de ensaios	Nível de maré	Teste	Duração (horas)	T_p (s)	H_s (m)
1 (SSW) 3 (S) 5 (WSW)	0.0 m(ZH)	1	3	12	8
		2	3	14	9
		3	6	16	10
		4	6	18	11
		5	6	12	12
		6	6	16	12
		7	6	20	15
2 (SSW) 4 (S) 6 (WSW)	2.5 m(ZH)	1	3	12	8
		2	3	14	9
		3	6	16	10
		4	6	18	11
		5	6	12	12
		6	6	16	12
		7	6	20	15

Avaliação do dano

A avaliação do dano ocorrido nos diferentes troços do modelo foi realizada utilizando duas técnicas diferentes: A tradicional metodologia de contagem de blocos removidos e dos movimentos destes ao longo do ensaio, e uma metodologia baseada na utilização do sensor de movimento Kinect®, colocado cerca de 2 m acima do troço do modelo objeto de levantamento, para obter um modelo tridimensional de superfície do manto resistente no início e no final de cada ensaio (Tabela 2). Notar, no entanto, que para o referido trabalho os levantamentos intermédios não foram considerados. Para cálculo do volume erodido apenas se considerou o levantamento inicial e final (ao fim de cada série de ensaios) sem água.

O sensor de movimento Kinect (modelo 2.0) tem um sensor de profundidade composto por um projetor de infravermelhos e um sensor CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) monocromático os quais trabalham complementarmente para “verem” em 3-D independentemente da luz. Contém ainda uma câmara RGB, a qual adquire os três componentes da cor (vermelho, verde e azul).

O sensor Kinect utiliza a tecnologia “*Time of Flight*”, para estimar a posição de um ponto relativamente ao sensor, medindo o tempo que um feixe infravermelho demora a percorrer a distância entre o sensor e o objeto e a regressar, considerando a velocidade da luz. Na aquisição das nuvens de pontos, foi utilizado o software de uso livre KinectFusion (Izadi *et al.*, 2011). A Figura 6 ilustra o equipamento usado para realizar os levantamentos tridimensionais do modelo.

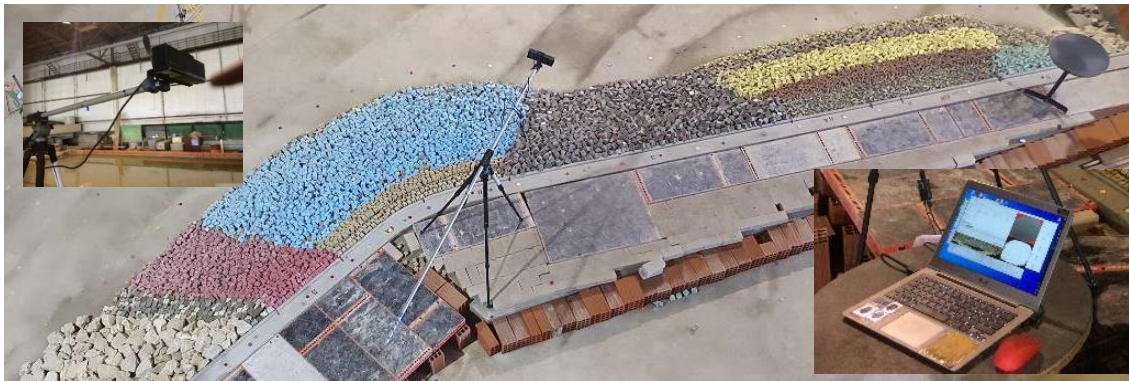


Figura 6. Sensor Kinect.

Os parâmetros do sensor usados nos levantamentos foram: *Voxel volume resolution*: 512 para os três eixos coordenados x, y e z; *Voxel for meter*:128 e uma distância de aquisição entre 0.5 m e 8 m.

Foi realizado um levantamento topográfico do modelo de modo a obter as coordenadas dos pontos a serem usados como pontos de controlo para georreferenciar as nuvens de pontos resultantes de cada levantamento do modelo. Esses pontos (Figura 7), localizados no coroamento do modelo e também no chão do tanque na zona adjacente ao pé do talude, foram obtidos usando uma estação total.



Figura 7. Pontos de controlo usados para georreferenciar as nuvens de pontos.

As nuvens de pontos obtidas foram processadas usando as ferramentas e algoritmos do software

open source CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2006). Esses algoritmos permitiram calcular o volume erodido, por comparação das nuvens inicial e final e, baseado nesse volume, estimar um parâmetro adimensional (S_{3D}) representativo do número de blocos removidos do manto. O cálculo do volume erodido baseia-se no processo de criação da malha a partir das nuvens de pontos, onde a definição do espaçamento da malha desempenha um papel importante. Este espaçamento define o tamanho da célula elementar usada no processo de cálculo do volume.

Para calcular o volume, o software *CloudCompare* soma a contribuição de cada célula. Esta contribuição é o volume do paralelepípedo elementar correspondente à área da célula elementar, multiplicada pela distância entre nuvens ($dV = \text{espaçamento da mala} * \text{espaçamento da malha} * \text{distância}$).

Foi realizada uma calibração prévia, utilizando testes com um pequeno número de blocos removidos de modo a acertar o melhor espaçamento de malha a utilizar no cálculo do volume erodido. Após diferentes experiências com o espaçamento da malha variando entre 1 mm e 10 mm, a melhor combinação de densidade de pontos e estimativa de blocos removidos foi obtida com um espaçamento de malha de 3 mm para os levantamentos onde se registou menor dano e de 6 mm nos levantamentos com maior número de blocos removidos. Espaçamentos menores que 3 mm conduziram a uma sobrestimação do dano, enquanto espaçamentos superiores a 6 mm conduziram a uma importante perda de densidade das nuvens.

A relação entre o volume erodido da área danificada e o volume unitário de um bloco do manto resulta na estimativa do número de blocos removidos, $S_{3D} = (VE * (1 - P)) / (Dn^3)$ onde VE é o volume total erodido, P é a porosidade do manto resistente e Dn o diâmetro nominal dos blocos do manto. O número estimado de blocos removidos foi então comparado com o número de blocos removidos obtido no final de cada ensaio, através do tradicional método de contagem visual.

Resultados e Discussão

Da Figura 8 à Figura 12 são apresentados os levantamentos tridimensionais mais ilustrativos do dano em cada uma das 5 secções do quebra-mar. São ainda apresentados os respetivos mapas de diferenças entre os levantamentos realizados no início e no final das séries de ensaios, onde a erosão se encontra representada com valores negativos e com cor vermelha e a acreção com valores positivos e com cor azul. De um modo geral, os mapas de erosão/acreção permitem avaliar a presença de quedas nas zonas de cor mais intensa e de forma bem delimitada ou de movimentos nas zonas com menor intensidade de cor e de forma mais alongada (Figura 12).

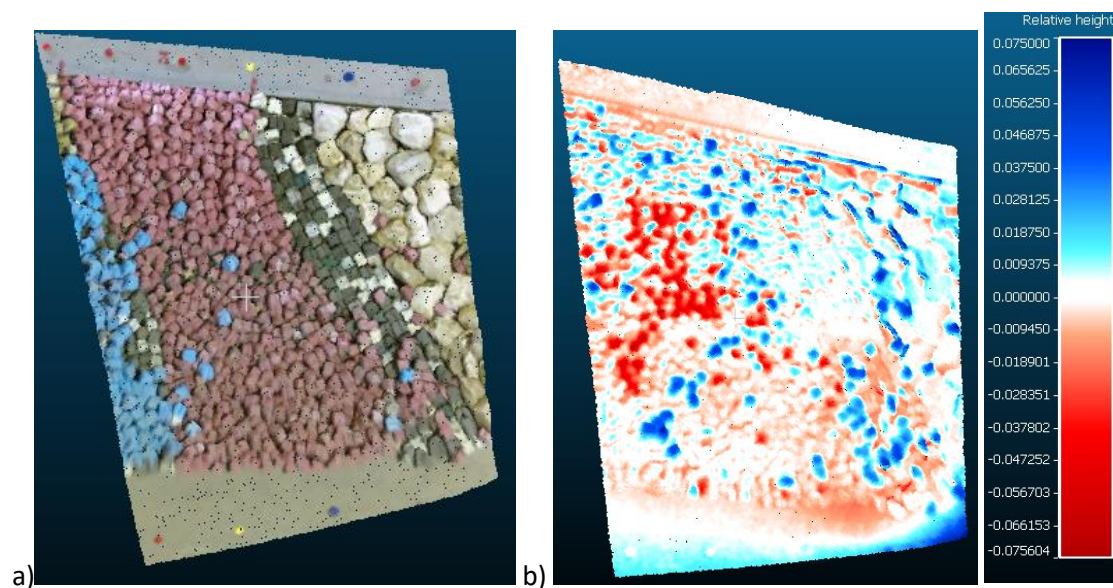


Figura 8. Zona 3. Levantamento realizado no final da Série 4 (Rumo S_PM). Nuvem de pontos (a) e mapa de diferenças (b).

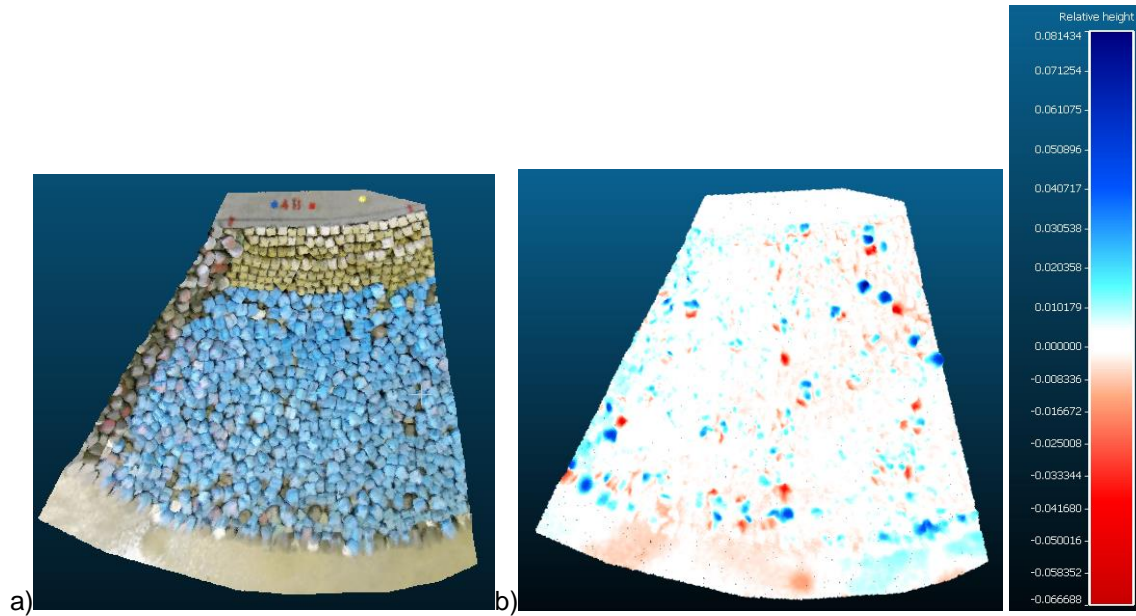


Figura 9. Zona 4. Levantamento realizado no final da Série 2 (Rumo SSW_PM). Nuvem de pontos (a) e mapa de diferenças (b).

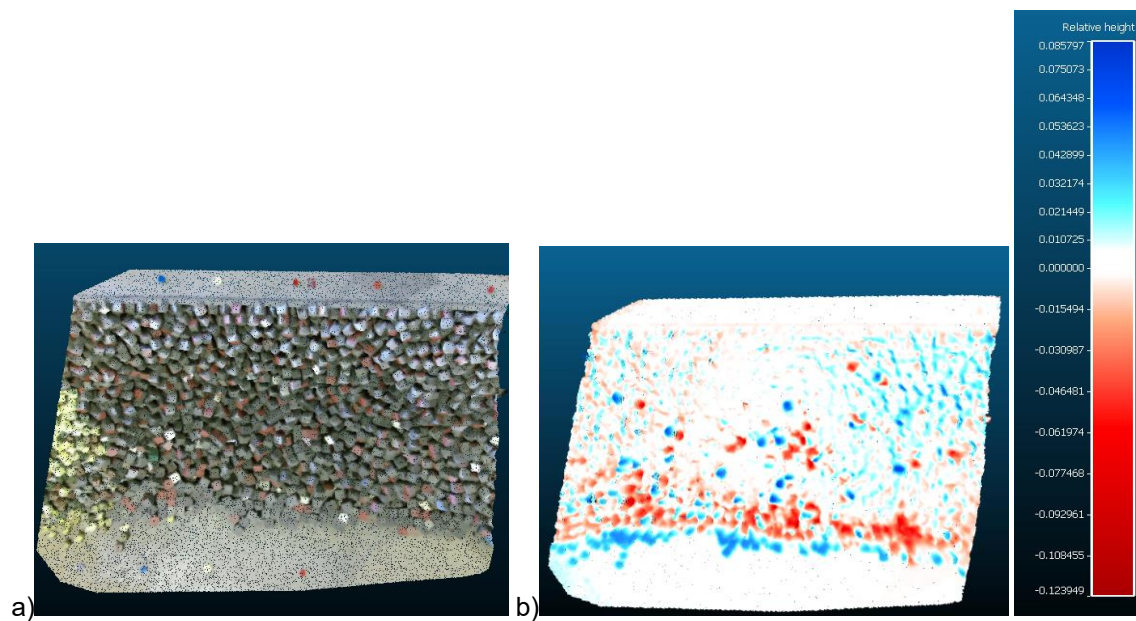


Figura 10. Zona 5. Levantamento realizado no final da Série 4 (Rumo S_PM). Nuvem de pontos (a) e mapa de diferenças (b).

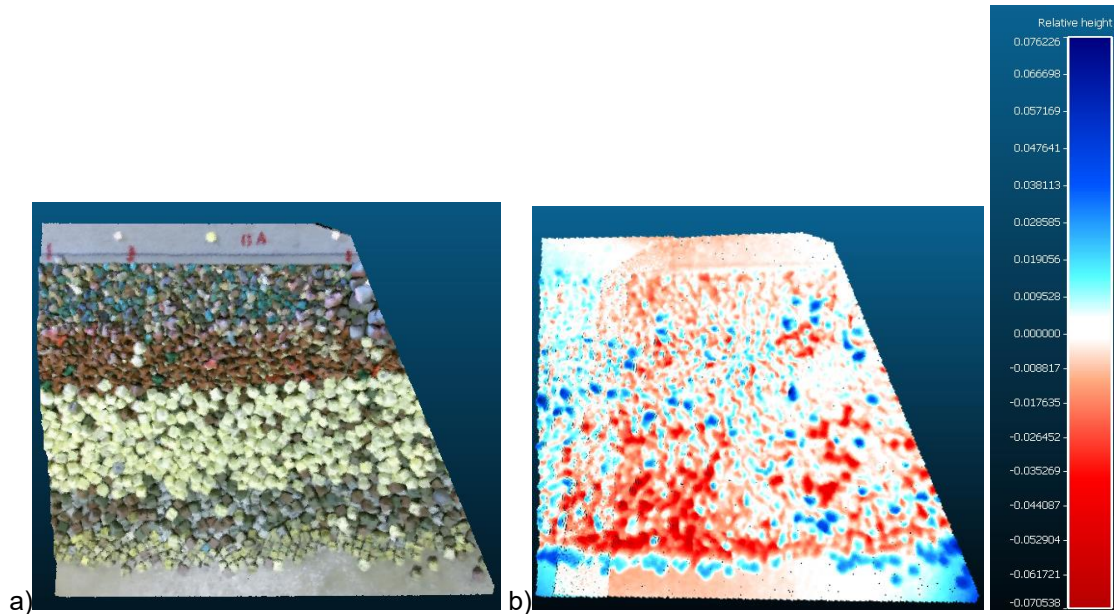


Figura 11. Zona 6. Levantamento realizado no final da Série 4 (Rumo S_PM). Nuvem de pontos (a) e mapa de diferenças (b).

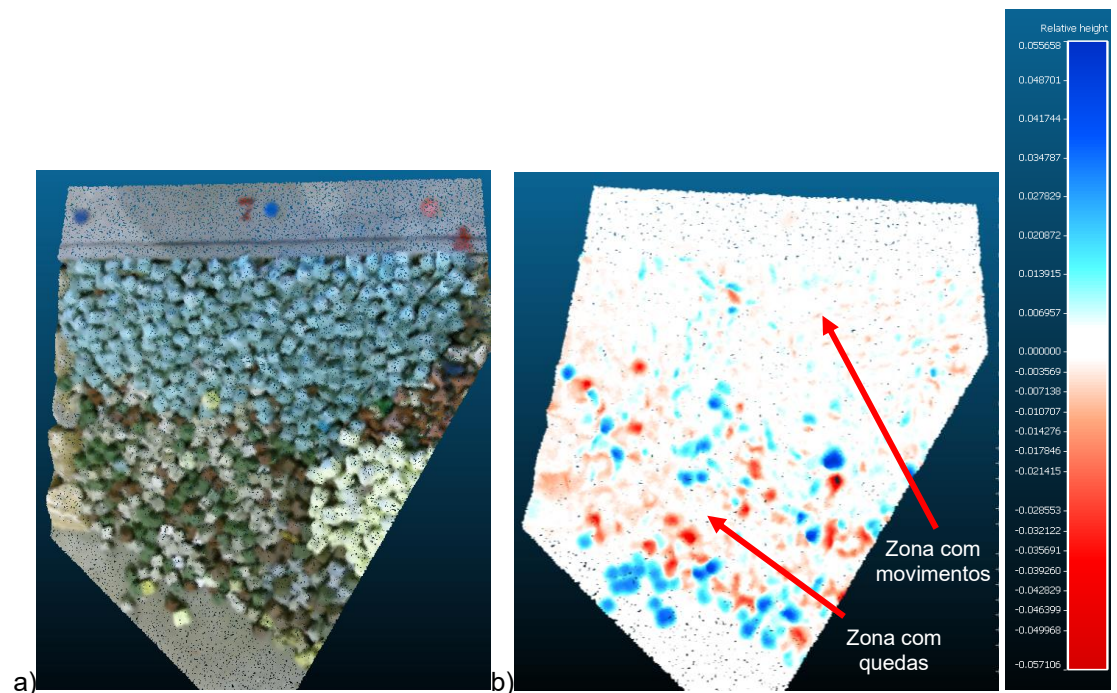


Figura 12. Zona 7. Levantamento realizado no final da Série 1 (Rumo SSW_BM). Nuvem de pontos (a) e mapa de diferenças (b).

A Tabela 3 apresenta os valores dos volumes de erosão obtidos, bem como o número de blocos removidos contados e os estimados com base no volume erodido. Os volumes são apresentados em decímetros cúbicos de modo a tornar o a dimensão do dano mais elucidativa, de acordo com as dimensões do modelo.



Tabela 3. Volume erodido e número estimado e contado de blocos removidos.

	Secção	Volume erodido (dm ³)	Blocos removidos		Diferenças (Estimados-Contados)
			Estimados (S _{3D})	Contados	
Série1 (SSW_BM)	P3	4.37	48	42	6
	P4	0.31	15	13	2
	P5	9.9	48	68	-20
	P6	8.0	72	72	0
	P7	1.8	30	36	-6
Série2 (SSW_PM)	P3	7.63	84	80	4
	P4	0.53	26	26	0
	P5	11.7	57	51	6
	P6	8.6	78	81	-3
	P7	2.8	46	48	-2
Série3 (S_BM)	P3	6.67	73	76	-3
	P4	0.58	29	26	3
	P5	13.2	64	85	-21
	P6	7.9	72	126	-54
	P7	1.3	21	24	-3
Série4 (S_PM)	P3	7.78	85	67	18
	P4	0.41	20	19	1
	P5	15.8	77	85	-8
	P6	16.6	150	144	6
	P7	1.5	25	24	1
Série5 (WSWS_BM)	P3	2.26	25	21	4
	P4	0.31	15	13	2
	P5	3.9	19	17	2
	P6	1.1	10	9	1
	P7	0.7	12	12	0
Série6 (WSW_PM)	P3	1.68	18	16	2
	P4	0.22	11	13	-2
	P5	3.5	17	17	0
	P6	2	18	18	0
	P7	0.8	7	6	1

Genericamente, os valores de blocos contados e estimados convergiram, especialmente nas séries 5 e 6, associadas ao rumo WSW onde, em geral, se verificaram menos quedas de blocos.

Foi na secção P6, onde se verificou a maior disparidade entre o número de blocos removidos contados e estimados, mais particularmente na série de ensaios 3 (Rumo Sul associado ao nível de maré de BM) onde a diferença entre o número de blocos estimados e contados atingiu o valor de 54 blocos. Esta disparidade poderá ser justificada pelo facto dos espaços deixados em aberto pelas quedas durante um ensaio, virem a ser ocupados no ensaio seguinte por outros blocos removidos em cotas superiores, levando a que o volume erodido no final da série de ensaios não corresponda à totalidade de blocos removidos. Este tipo de comportamento é bastante comum em mantos compostos por enrocamento e a pequena dimensão dos blocos Antifer em causa, poderá ter induzido um comportamento semelhante na série de ensaios em questão.

Na secção P5, verificou-se genericamente uma maior disparidade entre o número de blocos removidos contados e estimados, relativamente às outras secções, mais particularmente na série de ensaios 1 e 3 (Rumo Sul associado ao nível de maré de BM) onde a diferença entre o número de blocos estimados e contados atingiu o valor de 21 blocos.

Esta discrepância poderá justificar-se com o facto de o manto da secção P5 ser constituído por cubos perfeitos, o que favorece o efeito de oclusão durante o processo de levantamento com o sensor de posição Kinect. Este efeito traduz-se na impossibilidade de o sensor detetar os pontos das faces inferiores de objetos paralelepípedicos. Embora este efeito não afete o levantamento do contorno geral da envolvente, poderá introduzir incorreções na determinação do volume, tanto por excesso como por defeito.



Conclusões

O presente trabalho descreveu a utilização de uma metodologia de levantamentos tridimensionais não intrusiva baseada na tecnologia *Time of Flight (ToF)* utilizando o sensor de movimentos Kinect

Foi realizada a avaliação do dano de cinco trechos do quebra-mar de taludes correspondente ao projeto de reparação do molhe principal de Ponta Delgada. Esta avaliação foi realizada com base em seis séries de ensaios realizadas em modelo físico tridimensional do quebra-mar referido e teve como base a comparação das nuvens de pontos resultantes dos levantamentos realizados antes e no final de cada série de ensaios, sem água no tanque.

A comparação de nuvens de pontos permitiu o cálculo dos volumes erodidos e a partir destes, uma estimativa dos blocos removidos. De um modo geral, verificou-se que os resultados obtidos com esta técnica eram da mesma ordem de grandeza dos correspondentes resultados obtidos com o método tradicional de contagem de blocos por observação visual.

No que diz respeito ao uso do sensor Kinect, o seu uso revelou-se uma ferramenta valiosa no auxílio da evolução do dano do manto resistente em modelos físicos de quebra-mares, permitindo a avaliação do início do dano, através da visualização de pequenos afastamentos entre blocos não detetáveis com inspeção visual. Mais ainda, esta técnica é de maior utilidade na avaliação dos danos em taludes com colocação desarrumada, onde a dificuldade na deteção de movimentos ou mesmo de quedas é grande, permitindo deste modo detetar o início do dano em fases precoces.

Pretende-se investigar mais as potencialidades desta metodologia, alargando-a aos ensaios intermédios, cujos levantamentos foram realizados com água no tanque e, conseqüentemente, com o talude parcialmente submerso. Esta análise permitirá verificar a dinâmica do talude ao longo da série de testes, permitindo detetar fenómenos de erosão/acreção.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Administração dos Portos dos Açores, S.A. por autorizar o uso de imagens e resultados obtidos durante os ensaios em modelo físico reduzido. Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto BSafe4Sea, Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017, e To-SEAlert (Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017), ambos financiados pela FCT.

Referências Bibliográficas

- Broderick L. & Ahrens J.P. (1982). "Rip-rap stability scale effects". Technical Paper 82-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Girardeau-Montaut D. (2006) - Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles. PhD thesis (French).
- Hofland B., Disco M. & Van Gent M.R.A. (2014) - Damage characterization of rubble mound roundheads. Proc. of CoastLab 2014, Varna, Bulgaria.
- Hofland B., Van Gent M.R.A., Raaijmakers T. & Liefhebber F. (2011) - Damage evaluation using the damage depth. Proc
- Lemos R., Santos J.A. & Fortes C.J. (2017) - Rubble mound breakwater damage assessment through stereo photogrammetry in physical scale laboratory tests. RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua, Taylor and Francis (Published online: 25 Oct 2017).
- Lemos, R, Peña, E, Santos, J. A., Sande, J., Figuero, A., Alvarellós, A., Laiño, E., Reis, M.T., Fortes, C.J., Kerpen, N. (2019). "Measuring Armour Layer Damage in Rubble-mound Breakwaters under Oblique Wave Incidence". Coastal Structures 2019, Hannover, Germany. https://doi.org/10.18451/978-3-939230-64-9_030



- Maciñeira E. & Burcharth H.F. (2016) - Stability of cube armoured roundheads exposed to long crested and short crested waves. *Coastal Engineering*, 112, 99-112.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.03.002>
- Melby J.A. & Kobayashi N. (1998) - Progression and variability of damage on rubble mound breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(6), 286–294
- Molines J., Herrera M.P., Perez T.J., Pardo V. & Medina J.R. (2012) - Laser scanning technique to quantify randomness in cube and cubipod armour layers. *Proc. of CoastLab 2012*, Ghent, Belgium.
- Musumeci R., Moltisanti D, Foti E. & Battiato S. (2018). 3-D monitoring of rubble-mound breakwater damages. *Measurement*, 117 (March 2018), 347-364.
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23863781.2017.1381455>
- Puente I., Sande J., González-Jorge H., Peña E., Maciñeira E., Martínez-Sánchez J. & Arias P. (2014) - Novel image analysis approach to the terrestrial LiDAR monitoring of damage in rubble mound breakwaters. *Ocean Engineering*, 91, 273-280.
- Rigden T. & Steward T. (2012) - Use of 3D laser scanning in determining breakwater damage parameters. *Proc. of CoastLab 2012*, Ghent, Belgium.
- Sande, J., Laiño, E., Peña, J., Neves, M.G., Lemos, R., Figuero, A., Reis, M.T., Alvarellós, A. and Rabuñal, J. (2018). Application of scanning techniques for damage analysis in rubble mound breakwaters. *Proc. CoastLab 2018*, Santander, Spain.
- Soares F., Henriques M. & Rocha C. (2017) - Concrete block tracking in breakwater models. *Proc. of FIG Working Week 2017*, June, Helsinki, Finland.
- Van der Meer J.W. (1988) - Rock slopes and gravel beaches under wave attack. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, The Netherlands; also Delft Hydraulics Publ. 396.
- S. Izadi, David Kim, Otmar Hilliges, D. Molyneaux, Richard A. Newcombe, P. Kohli, J. Shotton, Steve Hodges, Dustin Freeman, A. Davison, A. Fitzgibbon (2011) - KinectFusion: real-time 3D reconstruction and interaction using a moving depth camera.