

Evolução Do Dano Num Quebra-Mar De Taludes Em Cenários De Alterações Climáticas

Lemos, Rute; Fortes, Conceição J.E.M.; Mendonca, Ana; Rosa-Santos, Paulo; Taveira-Pinto, Francisco; De Almeida Sousa, Ermanno; Hofland, Bas

Publication date

2018

Document Version

Accepted author manuscript

Published in

14 congresso da agua

Citation (APA)

Lemos, R., Fortes, C. J. E. M., Mendonca, A., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., De Almeida Sousa, E., & Hofland, B. (2018). Evolução Do Dano Num Quebra-Mar De Taludes Em Cenários De Alterações Climáticas. In *14 congresso da agua*

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

EVOLUÇÃO DO DANO NUM QUEBRA-MAR DE TALUDES EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Rute LEMOS¹; Conceição J.E.M. FORTES²; Ana MENDONÇA³; Paulo ROSA-SANTOS⁴; Francisco TAVEIRA-PINTO⁵; Ermano de ALMEIDA⁶; Bas HOFLAND⁷

¹ Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, rlemos@lnec.pt

² Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, jfortes@lnec.pt

³ Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, amendonca@lnec.pt

⁴ Eng. Civil, U Porto, pjsantos@fe.up.pt

⁵ Eng. Civil, U Porto, fpinto@fe.up.pt

⁶ Eng. Civil, Deltares / TU Delft, e.dealmeida@student.tudelft.nl

⁷ Eng. Civil, Deltares / TU Delft, b.hofland@tudelft.nl

Resumo

No âmbito do projeto HYDRALAB+ (H2020-INFRAIA-2014-2015), foi realizado no LNEC um conjunto de ensaios em modelo físico bidimensional (2D) de um perfil de um quebra-mar de talude em enrocamento, construído à escala geométrica 1:30, para diferentes condições de agitação marítima e níveis de maré correspondentes a cenários de alterações climáticas. Estas experiências tinham como objetivo analisar o dano, o espraçamento e o galgamento, nesses cenários.

Em paralelo, na FEUP, e em colaboração com Deltares, foram realizados testes com a mesma configuração de quebra-mar, mas utilizando um modelo físico tridimensional (3D), construído à escala geométrica 1:35. Os resultados obtidos permitiram analisar a evolução do dano no manto resistente do quebra-mar (talude de barlar, talude de sotamar e cabeça), assim como o galgamento, para condições com e sem sobrelevação do nível médio do mar, considerando ou não a reconstrução do talude do quebra-mar entre testes consecutivos da mesma série de testes. Foram também realizados testes com ondas multidirecionais.

O presente trabalho incide sobre a análise da evolução do dano para as diferentes sequências de tempestade em cenários de alterações climáticas. O dano é avaliado com base no tradicional método de contagem de blocos removidos e ainda com base no parâmetro adimensional do dano, S recorrendo a técnicas estereofotogramétricas. É também feita uma avaliação do parâmetro E_{2D} .

Em termos gerais, concluiu-se que não havia diferenças significativas entre os testes com danos cumulativos e com a reconstrução do quebra-mar após cada teste. Observou-se, também, que o dano era mais elevado na proximidade da superfície livre e que aumentava com a altura de onda significativa. Os danos foram, em geral, menores nos testes com ondas multidirecionais.

Palavras-chave: Evolução do dano, Alterações climáticas, Modelação física.

Tema: Hidrologia, hidráulica fluvial e obras hidráulicas.

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos cenários de mudanças climáticas prevê, além do aumento médio do nível do mar, a ocorrência mais frequente de eventos extremos e ainda mudanças da direção dominante da onda. Contudo, a probabilidade de falha das estruturas existentes sob tais condições não é ainda conhecida. De modo a assegurar o desempenho adequado dos quebra-mares de taludes em tais cenários, a sua adaptação deve ser projetada sem aumentar significativamente as suas dimensões e consequentemente, os custos associados.

Isso significa que é necessário caracterizar convenientemente a resposta dessas estruturas às mudanças climáticas, no que diz respeito ao espraçamento, ao galgamento e à estabilidade hidráulica, bem como avaliar de que modo as condições de agitação e níveis de maré alterados têm impacto na estabilidade no manto resistente principal e no manto do intradorso (HYDRALAB+, 2017).

A compreensão da progressão do dano sob as futuras mudanças climáticas é de extrema importância de modo a garantir uma gestão eficaz das defesas costeiras. A altura significativa das ondas, o período das ondas, a direção da tempestade e o nível da água são considerados as principais variáveis de projeto das estruturas costeiras. Normalmente recorre-se a ensaios em modelo físico reduzido no apoio ao projeto de estruturas de quebra-mares, sob a ação de diferentes condições agitação, que podem incluir também eventos extremos.

Revela-se, assim, ser necessário testar o maior número possível de condições de agitação de modo a determinar a probabilidade de falha da estrutura. Contudo, para concretizar este tipo de análise, há que tornar os procedimentos de ensaios mais eficientes. Questões como a reconstrução ou não do modelo físico no final dos testes, ou que tipo de método se revela mais eficaz para avaliar a evolução do dano ao longo das séries de ensaios, são questões comuns nos diferentes laboratórios de hidráulica marítima mas que não tem respostas consensuais, pelo que se julga importante a investigação estes temas.

No âmbito do estudo de estratégias visando a adaptação aos efeitos das alterações climáticas, o projeto HYDRALAB+ (H2020-INFRAIA-2014-2015) reúne uma rede internacional de instituições europeias que desenvolvem atividades de I&D no domínio da hidráulica, e pretende desenvolver metodologias experimentais que permitam melhorar o projeto de infraestruturas hidráulicas em relação a solicitações extremas e à subida do nível médio do mar, i.e., a cenários de alterações climáticas. Existe uma tarefa específica do sub-projeto RECIPE do projeto HYDRALAB+ intitulada “*Damage characterization under variable and unsteady test conditions*”, cujo objetivo principal é desenvolver técnicas experimentais e inovadoras, métodos e protocolos que caracterizem a evolução do dano em estruturas sob o efeito de eventos extremos.

Neste enquadramento, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) realizou, em modelo físico bidimensional (2D), ensaios de estabilidade e galgamentos de um quebra-mar de taludes, em enrocamento, construído à escala geométrica 1:30, para quatro cenários de

tempestade correspondentes a cenários de alterações climáticas, com medição do galgamento e do espraçamento e avaliação do dano na estrutura.

Em paralelo, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e em colaboração com Deltares, foram realizados testes com a mesma configuração de quebra-mar, mas utilizando um modelo físico tridimensional (3D), construído à escala geométrica 1:35.

O trabalho realizado nas duas instituições teve como objetivos principais a análise da evolução do dano através de abordagens distintas na representação de tempestades. Para isso, foram realizados levantamentos dos modelos 2D e 3D, de modo a obter parâmetros representativos do dano. A análise dos resultados obtidos em ambos os laboratórios permitiu a comparação das técnicas de medição do dano, bem como a discussão da repetibilidade os resultados.

O artigo começa com uma breve descrição da literatura existente sobre métodos de avaliação do dano, seguida de uma breve descrição dos modelos físicos e equipamento de medição e da apresentação dos resultados. O último capítulo consiste nas conclusões obtidas com a análise dos resultados.

2. LITERATURA

A quantificação do dano em modelos físicos de quebra-mares tem sido prática comum há décadas (IAHR, 2011). Contudo, devido às novas técnicas de medição recentemente disponíveis, tornou-se possível o levantamento 3D da envolvente dos modelos com resolução submilimétrica. As técnicas de alta resolução mais comuns são os levantamentos com laser terrestre (Rigden e Steward, 2012; Molines et al., 2013; Puente et al., 2014) e a estereofotogrametria (Hofland et al., 2011, Lemos e Santos, 2013, Lemos et al. 2017).

A Figura 1 ilustra a evolução do dano num modelo físico 2D de um quebra-mar de taludes, obtido a partir de levantamentos estéreo-fotogramétricos.

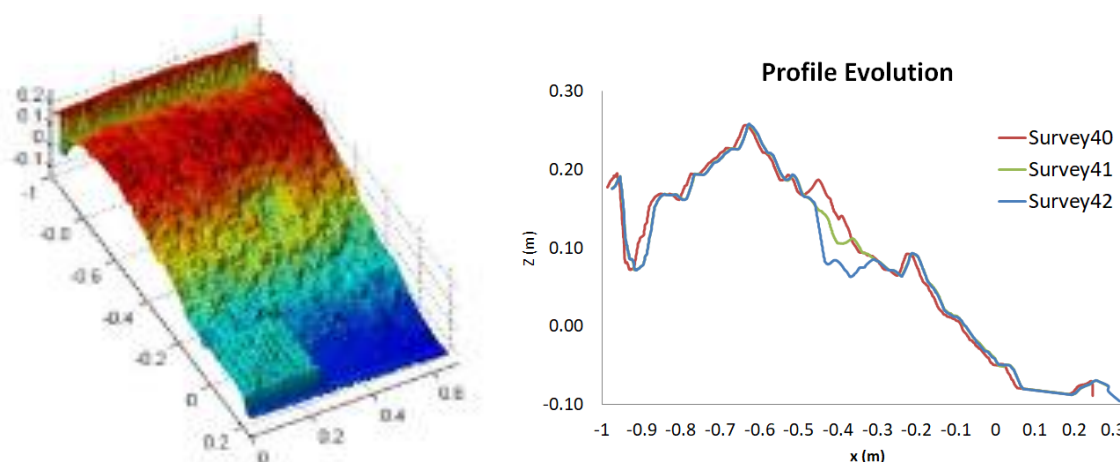


Figura 1. Representação da envolvente e da evolução de um perfil obtidos a partir de levantamentos estereofotogramétricos

Tradicionalmente o dano em modelos físicos de quebra-mares de taludes pode ser caracterizado através da contagem de blocos removidos e pela determinação da área erodida do perfil. Neste ultimo caso, Broderick e Ahrens (1982) e Van der Meer (1988) definiram o parâmetro adimensional do dano, $S=A_e/D_n^2$, onde A_e é a área erodida da secção nas imediações do nível de repouso da água e D_n o diâmetro nominal dos blocos que compõem o manto resistente do modelo do quebra-mar.

Recentemente Hofland et al. (2014, 2016) testou um novo parâmetro de dano em modelos físicos 2D e 3D para taludes em enrocamento, baseado na profundidade erodida adimensional (E), associada a medições realizadas com estereofotogrametria digital. A (Figura 2) ilustra os conceitos de parâmetro adimensional do dano (S) e profundidade erodida adimensional (E).

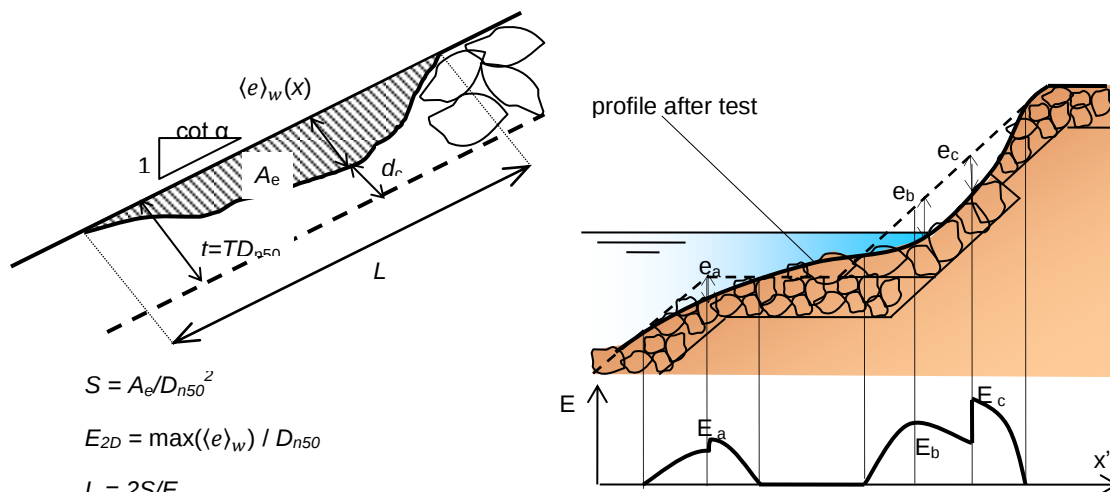


Figura 2. Parâmetro adimensional do dano (S) e profundidade erodida adimensional (E)

O critério de classificação do dano S proposto por Van de Meer (1988) é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Critério de classificação do dano, S , para mantos com duas camadas de enrocamento (Van der Meer, 1988)

Inclinação do talude	Dano Inicial	Dano Intermédio	Ruína
1:1.5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	2	6-9	12
1:4-1:6	3	8-12	17

3. OS MODELOS FÍSICOS

De modo a obter levantamentos de alta resolução foram levadas a cabo duas campanhas de ensaios com condições de ensaio semelhantes, as quais consistiram em:

- Testes 2D realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal, onde foi contabilizado o dano cumulativo para quatro abordagens distintas na representação de tempestades;
- Testes 3D realizados na Faculdade de Engenharia do Porto (FEUP), Portugal, onde foi estudada a cabeça e cerca de 4 metros do tronco do quebra-mar, considerando os efeitos tridimensionais da agitação, nomeadamente o impacto das ondas de crista curta.

Testes 2D realizados no LNEC

Os ensaios foram realizados no LNEC, no Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas (NPE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA), num canal de ondas irregulares (COI 1) com cerca de 50 m de comprimento, uma largura e uma profundidade operativas de 80 cm.

O canal está equipado com um gerador de ondas do tipo pistão com capacidade para absorção dinâmica das ondas refletidas através do uso de duas sondas localizadas em frente ao batedor (Figura 3). O modelo do quebra-mar (Figura 3) foi construído e operado de acordo com a lei de semelhança de Froude, à escala geométrica 1:30, de modo a assegurar efeitos de escala reduzidos (alturas de onda deverão corresponder a números de Reynolds $Re > 3 \times 10^4$).



Figura 3. Canal de ondas irregulares COI1 (esquerda) e modelo físico bidimensional (direita)

Os fundos à frente do modelo desenvolvem-se numa rampa de inclinação com cerca de 2.1% ao longo de cerca de 14 m de comprimento. A secção transversal possui uma largura de cerca de 0.8 m ($18D_{n50}$) e o seu manto resistente é composto por duas camadas de enrocamento ($2D_{n50}$) de $D_{n50}=0.0445$ m, cujo talude se desenvolve com uma inclinação de 1:2 (Figura 4). A cota de coroamento do modelo está a cerca de 0.5 m acima do pé do talude. O modelo possui ainda uma superestrutura em betão com cerca de 10 cm de largura. A largura da berma exterior de coroamento é de 19.7 cm.

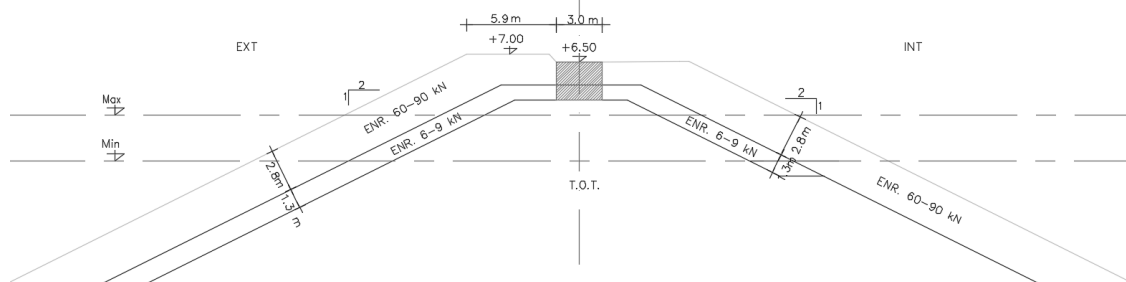


Figura 4. Secção transversal do modelo (valores de protótipo)

A campanha de testes foi definida de forma a simular quatro abordagens distintas na representação de tempestades: A) efeito cumulativo de tempestades (através do aumento da altura significativa de onda) com o aumento do nível de maré (Testes 1-7); B) efeito cumulativo de tempestades com um nível de água constante (Testes 1-3 e 4-7; C) período de onda constante (Testes 1-3, 4-7 e 10-17); D) efeito cumulativo de tempestades com um nível de água constante (Testes 4-7) e reconstrução..

Efetuar-se-iam ensaios de ondas irregulares para um espectro empírico de JONSWAP, com um fator de pico de 3.3. As durações dos ensaios foram de 1980 s, 2160 s e 2400 s para os períodos de pico de 10 s, 11 s e 12 s, respetivamente (aproximadamente 1000 ondas). O Teste 7 foi repetido duas vezes e o Teste 16 três vezes. As condições nominais de ensaio são apresentadas na Tabela 2, na qual H_s representa a altura de onda significativa no pé da estrutura e T_p o período de pico da onda.

Para cada teste, efetuaram-se medições da elevação da superfície livre, do espraio e do caudal médio galgado. Para a medição da elevação da superfície livre, foram distribuídas dez sondas resistivas ao longo do canal. Para a medição do espraio foi utilizada uma sonda colocada no talude do quebra-mar. A frequência de aquisição foi de 25 Hz.

Contudo, o presente trabalho focar-se-á apenas na análise da estabilidade sob a ação desses quatro cenários. O estudo do galgamento e do espraio encontra-se publicado em Mendonça *et al.* (2017b, 2018).

No que diz respeito aos ensaios realizados no LNEC, os resultados de estabilidade obtidos são expressos em termos do número acumulado de blocos removidos da zona ativa do manto no final de cada ensaio, bem como através do cálculo da área erodida e, consequentemente, do parâmetro adimensional do dano (S) a partir dos levantamentos estereofotogramétricos no final de cada ensaio. A partir destes levantamentos foi ainda calculada a profundidade erodida adimensional (E).

Tabela 2. Condições nominais dos ensaios no pé da estrutura.

Teste	Protótipo			Modelo		
	Nível (m)	T_p (s)	H_s (m)	Nível (m)	T_p (s)	H_s (m)
1	9.1	10	3.2	0.30	1.826	0.107
2	9.1	10	3.7	0.30	1.826	0.123
3	9.1	10	4.2	0.30	1.826	0.140
4	10.1	11	3.7	0.34	2.008	0.123
5	10.1	11	4.2	0.34	2.008	0.140
6	10.1	11	4.7	0.34	2.008	0.157
7	10.1	11	5.2	0.34	2.008	0.173
Reconstrução						
10	11.1	12	3.7	0.37	2.191	0.123
11	8.1	12	3.7	0.27	2.191	0.123
12	11.1	12	4.2	0.37	2.191	0.140
13	8.1	12	4.2	0.27	2.191	0.140
14	11.1	12	4.7	0.37	2.191	0.157
15	8.1	12	4.7	0.27	2.191	0.157
16	11.1	12	5.2	0.37	2.191	0.173
17	8.1	12	5.2	0.27	2.191	0.173

Os levantamentos do modelo no final de cada ensaio foram realizados através de estereofotogrametria, utilizando um pacote de *software* que corrige a refração da luz na interface ar-água (Ferreira, 2006), não sendo por isso, necessário esvaziar o canal entre levantamentos. O equipamento utilizado consistiu em duas câmaras fotográficas montadas numa configuração fixa sobre o canal e aptas a disparar duas fotografias em simultâneo a partir de um portátil.

Para uma melhor caracterização do manto resistente, este foi dividido em cinco perfis separados entre si de 10 cm (Figura 5). Durante as séries de testes, foi feito um levantamento inicial da secção e um levantamento no final de cada teste de modo a permitir a comparação da área erodida desses perfis ao longo da série de ensaios, tomando como ponto de comparação o levantamento inicial. Devido a problemas na aquisição dos pares estereofotogramétricos, não foi possível apresentar os resultados dos testes T1 e T15.

Foi desenvolvido um algoritmo que tem como *input* as nuvens de pontos resultantes do levantamento estereofotogramétrico, e permite, para cada levantamento, extrair perfis pré-definidos, comparando-os com os do perfil inicial, e calcular a área erodida (A_e), bem como consequentemente o parâmetro adimensional do dano S . O parâmetro E foi também calculado para cada um dos perfis.



Figura 5. Localização dos perfis levantados

Testes 3D realizados na FEUP

As séries de testes realizada na FEUP tiveram como objetivo a obtenção de levantamentos de alta resolução de quebra-mares de taludes considerando os efeitos tridimensionais da agitação, nomeadamente o impacto das ondas de crista curta e a avaliação do dano numa secção da curva da cabeça. Adicionalmente, foi testada uma secção do tronco com a largura de 4.0 m de modo a obter valores estatísticos válidos para os parâmetros de caracterização do dano, S e E .

Os testes foram realizados o tanque de ondas multidirecional do laboratório da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP. Este tanque tem 28.0 m de comprimento, 12.0 m de largura e 1.2 m de profundidade e está equipado com um gerador multidirecional com 12.0 m de largura com sistema de absorção ativa da reflexão da onda. O quebra-mar de referência foi reproduzido à escala geométrica de 1:35. O modelo do quebra-mar tem 5.6 m de comprimento, 3.1 m de largura e 0.68 m de altura (Figura 6).

O manto resistente é constituído por duas camadas de enrocamento (espessura equivalente a $2D_{n50}$), onde o $D_{n50} = 32$ mm e $D_{n85}/D_{n15} = 1.25$, colocados sobre o núcleo com $D_{n50} = 11.6$ mm. O talude desenvolve com uma inclinação de 1:2. O coroamento, composto por uma superestrutura de 0.1 m, localiza-se a uma cota de 0.42 m. O tronco do quebra-mar possui cerca de 4.0 m de largura. As características da cabeça semicircular são semelhantes às da secção do tronco. O manto resistente do intradorso do modelo encontra-se interrompido de modo a permitir a instalação de um reservatório para permitir a quantificação do volume de galgamento o qual foi alvo de estudo em Silva et al., 2017.

A elevação da superfície livre foi medida usando sondas resistivas, tendo sido utilizado um conjunto de quatro sondas alinhadas em frente ao modelo de modo a determinar as características da agitação incidente.

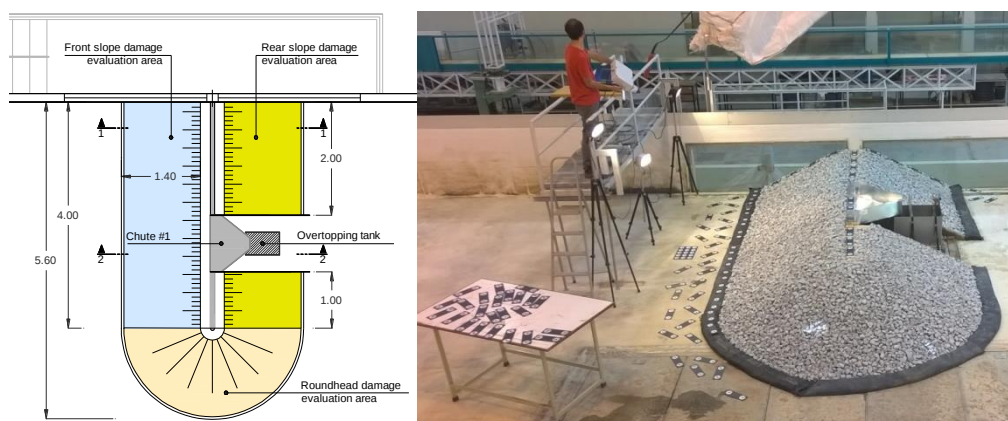


Figura 6. Modelo físico de FEUP. Esquerda: Planta. Direita: Medição do dano

O dano na estrutura foi avaliado recorrendo também a uma técnica estereofotogramétrica (Raaijmakers et al., 2011). A estrutura foi fotografada com um conjunto manual de duas

câmaras com o tanque vazio. Usando um número aproximado de 50 pares de fotos, foi criada uma nuvem de pontos, cujo pós-processamento é descrito em Hofland et al. (2011).

O programa de testes realizado encontra-se descrito na Tabela 3. Todos os testes foram realizados com uma profundidade de 0.566 m, exceto os testes com sobrelevação, os quais foram realizados após os testes iniciais com 60%Hs e 80%Hs, com mais 0.023 m de profundidade, de modo a simular o efeito do aumento do nível médio do mar em cerca de 0.8 m no protótipo.

Os testes foram realizados com agitação irregular, consistindo cada teste em 1000 ondas, geradas de acordo um espectro empírico de JONSWAP, com um fator de pico de 3.3. Na série de testes 4 foram usadas ondas de crista curta. Em todos os testes foi usada uma declividade constante $sp = 0.03$.

Tabela 3. Programa de ensaios 3D realizado na FEUP. Valores de modelo

Condição (%)	60%Hs	80%Hs	100%Hs	120%Hs
H_s (cm)	7.1	9.4	11.8	14.2
T_p (s)	1.29	1.58	1.87	2.18
Séries				
1: abordagem clássica	X	X	X	X
2: não cumulativo	-	X	XX	X
3: subida do nível do mar	X	X	X	X
4: ondas de crista curta	X	X	X	X

4. RESULTADOS

4.1 CAMPANHA DE ENSAIOS REALIZADA NO LNEC

DETERMINAÇÃO DA PERCENTAGEM DE BLOCOS REMOVIDOS

A Figura 7 apresenta o aspeto do modelo no final da Série 1 (aumento da altura significativa de onda associada ao aumento do nível de maré (Testes 1-7) e da Série 2 (período de onda constante e nível de maré variável). A Tabela 2 apresenta a percentagem de blocos removida.



Figura 7. Aspeto do modelo no final da Série 1 (Esquerda) e da Série 2 (Direita)

Tabela 4. Percentagem de blocos removidos D (%) para as duas séries de ensaios

Série 1	Teste	1	2	3	4	5	6	7	7Rep1	7Rep2
	D (%)	0.8	0.8	3.2	4.8	7.3	8.9	8.9	11.3	11.3

Série 2	Teste	10	11	12	13	14	15	16	17	16Rep1	16Rep1	16Rep1
	D (%)	4.0	4.8	6.5	6.5	7.3	7.3	8.9	10.5	11.3	11.3	12.1

A Figura 8 apresenta a curva de danos acumulados em termos de percentagens de blocos removidos em relação ao número total de blocos da zona ativa do manto, D (%).

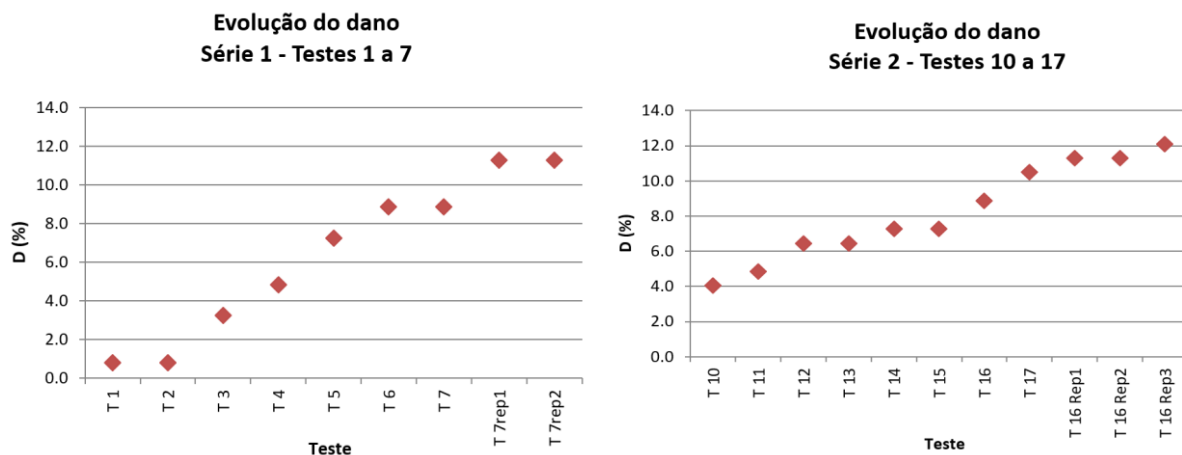


Figura 8. Evolução do dano em termos de percentagem de blocos removidos

Da análise da curva de danos para a Série 1 verifica-se que a progressão do dano aumenta com a altura de onda significativa, mesmo nas situações em que o nível de maré é constante (Entre os testes 1-3 e entre os testes 4-5.). Esta tendência parece manter-se quando analisado o efeito cumulativo do aumento da H_s e do nível de maré (Testes 1-7). Devido à estabilização do talude, a percentagem de quedas tendeu a manter-se, após as duas repetições do Teste 7.

No que diz respeito à análise da Série 2 de ensaios, o dano aumenta também com a altura de onda significativa, verificando-se, contudo, uma ligeira estabilização aquando dos ensaios com o nível de maré inferior, voltando a aumentar com a subida do nível de maré. Apesar do aumento do nível de maré, a percentagem de quedas no final desta série de ensaios apresentou valores semelhantes aos da Série 1 (Testes 1 a 7).

De acordo com o critério de classificação de estragos referido no *Coastal Engineering Manual* (U.S. Army Corps of Engineers, 2006), o dano acumulado no final das duas séries de ensaios correspondem a um dano intermédio (existem blocos removidos, mas sem exposição dos filtros).

CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO DANO

Na Figura 9 encontram-se representadas as superfícies resultantes dos levantamentos realizados no final das séries de ensaios 1 e 2, enquanto na Figura 10 é apresentada a evolução dos perfis representativos da secção, onde ocorreu o maior dano (perfil P5 e Perfil P4 para as séries de ensaio 1 e 2, respetivamente). Nestas figuras é visível que, para ambas as séries de ensaios, a zona onde a erosão foi mais relevante se situa em torno do nível de repouso, verificando-se, para ambas as séries de ensaios, a existência de duas zonas de área erodida, associadas a cada nível de maré. Essas duas áreas são mais visíveis no caso particular da Série 2, onde os níveis de maré são mais distintos (diferença de 3 m no protótipo e 0,1 m no modelo). Neste caso, a zona ativa ocupou uma maior extensão do talude, sensivelmente entre $x=0.35$ m e 0.7 m (Figura 10 b).

Na Figura 11 é apresentada a evolução do dano em função dos parâmetros de dano, S , e E , calculados para os perfis P2 a P5 de ambas as séries de ensaios. Os resultados do Perfil P1 foram excluídos por terem sido influenciados pela proximidade do vidro do canal de ondas irregulares.

Da análise destes gráficos, verifica-se que para ambos parâmetros usados na avaliação do dano, estes aumentam e diminuem ao longo das séries de ensaios, conferindo aos gráficos um aspeto de “dentes de serra”, resultante da alternância entre erosão e acreção. Este fenómeno torna-se mais evidente na Série 2, devido à alternância entre níveis de maré.

Com os ensaios realizados com aumento do nível médio do mar e alternância entre dois níveis de maré, verificou-se um ligeiro aumento do parâmetro S devido ao aumento da área de perfil erodida, causado pelo aumento da faixa correspondente à zona ativa. Contudo, a profundidade erodida, E , apresentou valores da mesma ordem de grandeza em ambas as séries.

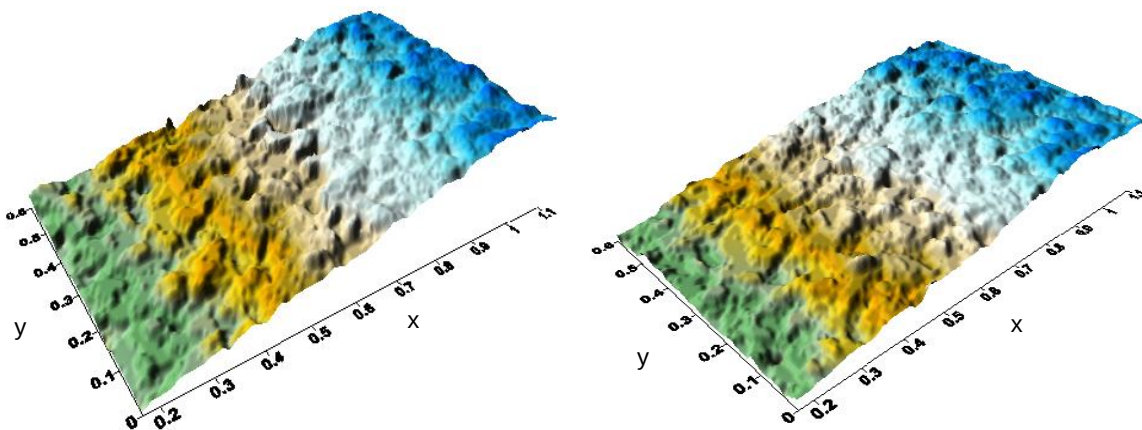


Figura 9. Envoltantes resultantes dos levantamentos. Esquerda: Série 1. Direita: Série 2

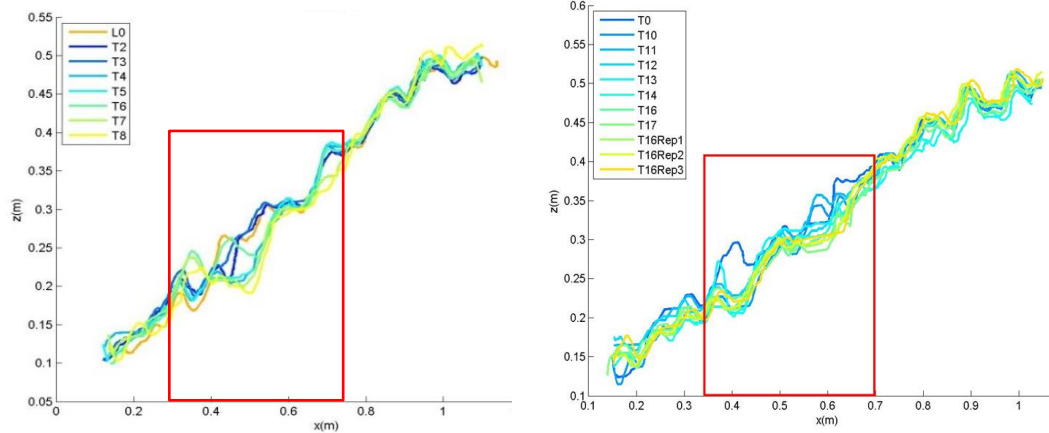


Figura 10. Evolução dos perfis representativos do dano para as suas séries de ensaios. Esquerda: P5 (Série 1) Direita: P4 (Série 2)

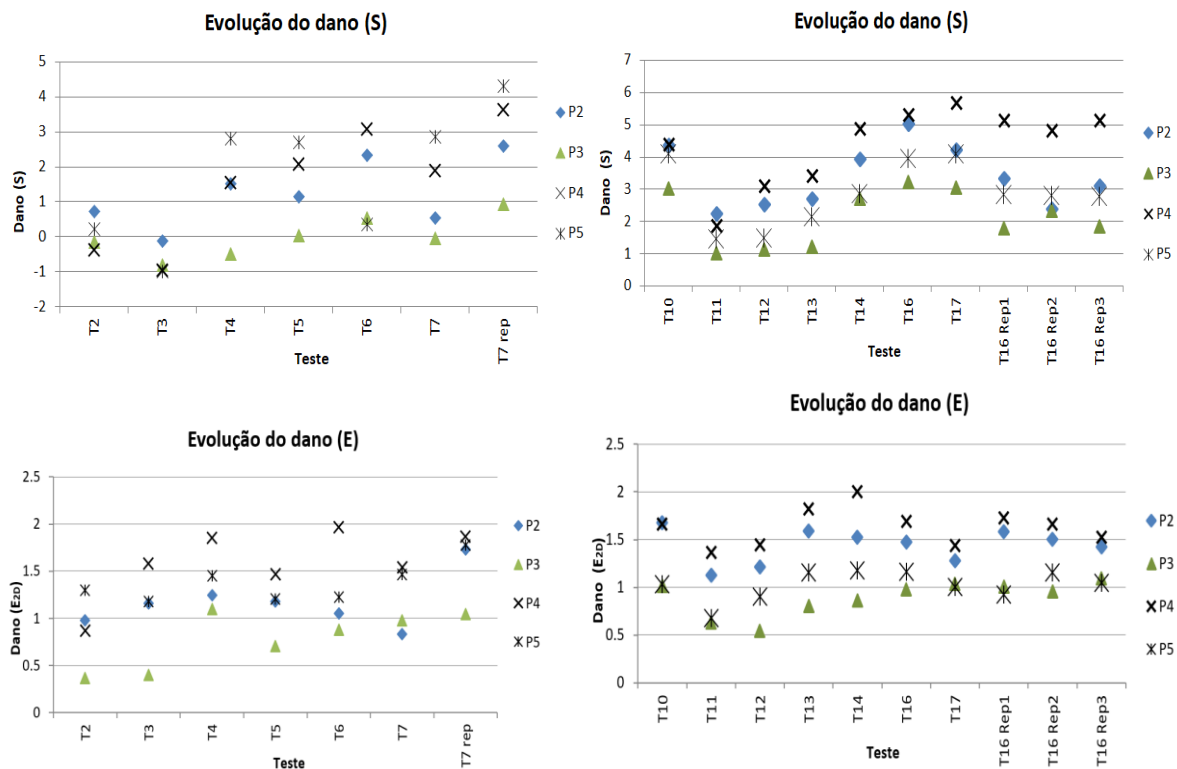


Figura 11. Evolução do dano em termos de parâmetro de dano, S e E, obtidos para os perfis P2 a P5

4.2 CAMPANHA DE ENSAIOS REALIZADA NA FEUP

A Figura 12 ilustra a evolução do dano em termos de diferenças de cotas na estrutura do quebra-mar para a Série 1. Tal como nos ensaios da Série 1 realizados no LNEC, verifica-se que a evolução do dano com a abordagem clássica (dano cumulativo) aumenta com a altura

de onda significativa. A profundidade da erosão é também mais acentuada junto ao nível de repouso da água e, em especial, no setor interior da cabeça.

A Figura 13 ilustra as diferenças de cota do modelo no final das quatro séries de ensaios. A Figura 14 ilustra a comparação entre os perfis de erosão das séries 1 e 3 e das séries 1 e 2, em termos de profundidade erodida adimensional (E). Ambas as figuras permitem concluir que a erosão é menor com os ensaios que consideram a subida do nível médio do mar, provavelmente devido ao galgamento e que os ensaios realizados com ondas de crista curta provocaram, de um modo geral, menor erosão. Conclui-se ainda que a Série 1 (abordagem clássica cumulativa) apresenta um nível de dano significativamente maior que a Série 2 (abordagem clássica incremental).

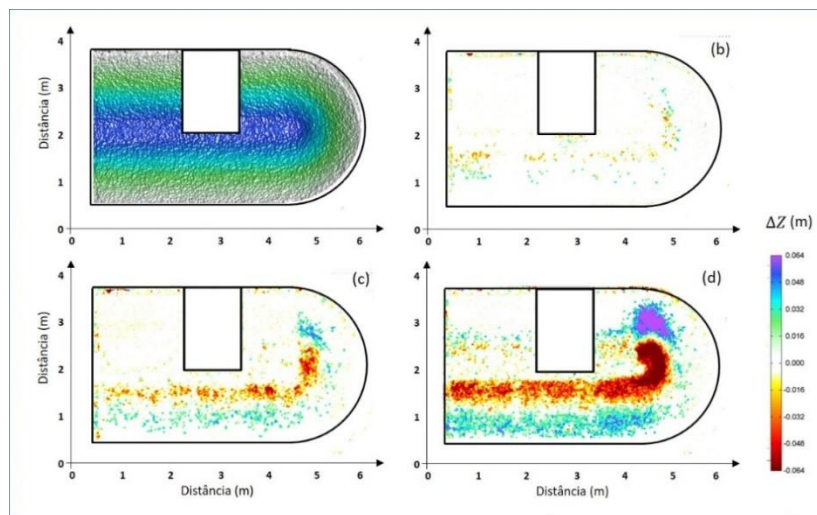


Figura 12. Evolução do dano na estrutura do quebra-mar na série 1: levantamento inicial da estrutura (a); situação após os testes realizados para 80% $H_{s,D}$, 100% $H_{s,D}$ e 120% $H_{s,D}$

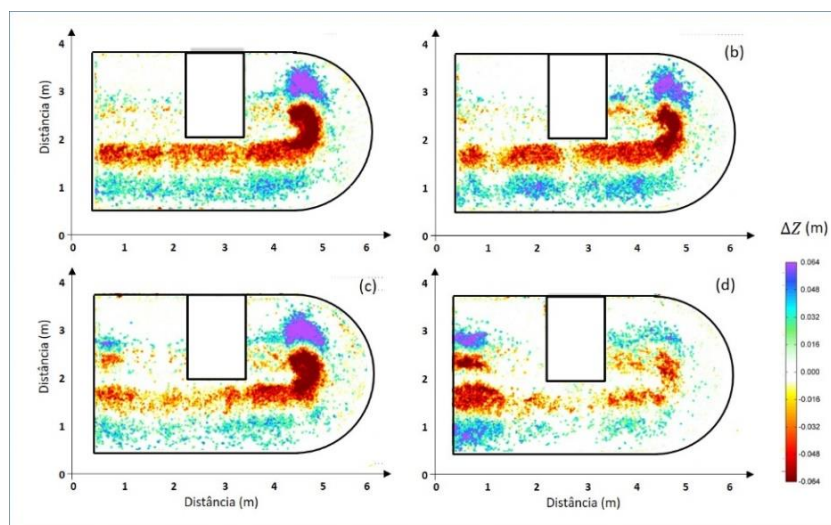


Figura 13. Evolução do dano para as 4 séries ensaiadas, após os testes realizados para 120% $H_{s,D}$

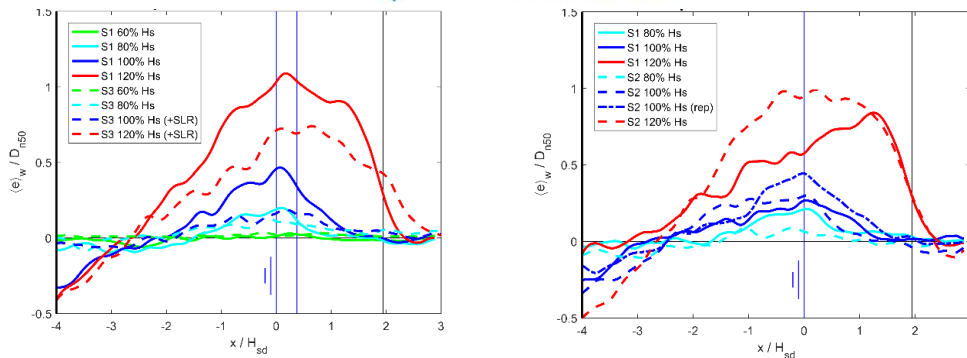


Figura 14. Esquerda: Perfis de erosão para a Série 1 (nível de maré constante) e 3 (aumento do nível médio do mar). Direita: Perfis de erosão para a Série 1 (cumulativa) e para a Série 2 (incremental)

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados e analisados os resultados da evolução do dano em diferentes cenários de tempestade, obtidos a partir de modelos físicos 2D e 3D realizados no LNEC e na FEUP, respetivamente. Para ambas as campanhas de ensaios foram apresentados padrões e perfis de erosão. As principais conclusões retiradas do presente estudo foram:

- Tanto nos ensaios realizados no LNEC como na FEUP, a zona de erosão é mais profunda junto à linha de água, aumentando com a altura de onda significativa. Foi possível observar zonas de erosão diferenciadas na zona ativa de cada nível de maré;
- Com os ensaios realizados com aumento do nível médio do mar e alternância entre dois níveis de maré, verificou-se um ligeiro aumento do parâmetro S devido ao aumento da área de perfil erodida. Contudo, a profundidade erodida, E , apresentou valores da mesma ordem de grandeza em ambas as séries;
- No caso dos ensaios com simulação do aumento do nível médio do mar realizados na FEUP com um aumento de apenas cerca de 0.8 m (valor de protótipo), verificou-se a ocorrência de menos dano devido ao fenómeno de galgamento. Contudo, nos ensaios realizados no LNEC, onde o nível de maré sofreu um acréscimo de cerca de 1.0 m, verificou-se um ligeiro aumento dos parâmetros de dano S e E ;
- Adicionalmente, nos testes realizados na FEUP, as séries realizadas com dano cumulativo apresentaram uma erosão significativamente maior do que nos ensaios com reconstrução e os ensaios realizados com ondas de crista curta provocaram, de um modo geral, menor erosão que os restantes cenários reproduzidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do projeto Europeu H2020-INFRA-2014-2015, N.654110 - HYDRALAB+ Adaptation for Climate Change. Os autores agradecem também aos técnicos André Ramos e a Joana Simão pela sua ajuda na realização dos ensaios aqui descritos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Broderick, L.L., Ahrens, J.P. (1982). Riprap Stability Scale Effects. US Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center. Tech. Paper n. 82-3, Fort Belvoir, Virginia.

Ferreira, R., Costeira, J.P., Silvestre, C., Sousa, I., Santos, J.A. (2006). Using stereo image reconstruction to survey scale models of rubble-mound structures. Proc. CoastLab 2006. Porto, Portugal, pp. 107-116.

HYDRALAB+ (2017). Deliverable: Task 8.1 Critical review of challenges for representing climate change in physical models. Report of HYDRALAB+ project - EC contract no 654110.

Hofland, B., Van Gent, M.R.A., Raaijmakers, T., Liefhebber, F. (2011). Damage evaluation using the damage depth. Proc. Coastal Structures 2011. Yokohama, Japan.

Hofland, B., Disco, M., Van Gent, M.R.A. (2014). Damage characterization of rubble mound roundheads. Proc. CoastLab 2014, Varna.

Hofland, B., Van Gent, M.R.A. (2016). Automatic settlement analysis of breakwater armour layers. Abstract of CoastLab 2016, Ottawa, Canada.

IAHR (2011). *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network*. IAHR.

Lemos, R., Santos, J.A. (2013). Photogrammetric profile survey in scale model tests of rubble-mound breakwaters. Proc. 6th SCACR – Int. Short Course/Conference on Applied Coastal Research.

Lemos, R., Santos, J.A., Fortes, C.J.E.M. (2017). Rubble mound breakwater damage assessment through stereo photogrammetry in physical scale laboratory tests. Ribagua. Revista Iberoamericana del Agua, 15p. ISSN: 2529-8968.
<http://dx.doi.org/10.1080/23863781.2017.1381455>
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23863781.2017.1381455>

Mendonça, A., Lemos, R., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Neves, M.G., Ramos, A., Capitão, R. (2017). Overtopping events in breakwaters: comparison of 2D physical experiments and empirical formulae. 37th IAHR World Congress, August 13th to 18th, 2017 – Kuala Lumpur, Malaysia. 3749-3757pp. ISSN 1562-6865.

Mendonça, A., Lemos, R., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Neves, M.G., Ramos, A. (2017). Avaliação do espraçamento num quebra-mar de taludes: comparação entre os resultados

obtidos em modelo físico e com fórmulas empíricas. 13º SILUSBA, 13 a 15 de setembro de 2017, FEUP. 11p. ISBN 978-989-8509-19-2.

Molines, J., Herrera, M.P., Perez, T.J., Pardo, V., Medina, J.R. (2013). Laser Scanning technique to quantify randomness in cube and cubipod armour layers. Proc. Coastlab 2012. Ghent, Belgium.

Silva, E., Allsop, W.; Riva, R., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Mendonça, A.; Reis, M.T. (2017) - The conundrum of specifying very low wave overtopping discharges. ICE - Coasts, marine structures and breakwaters 2017, 5-7 September 2017, Liverpool, UK. 10p.

Puente, I., J. Sande, H. González-Jorge, E., Peña-González, E., Maciñeira, J., Martínez-Sánchez, P. A. (2014). Novel image analysis approach to the terrestrial LiDAR monitoring of damage in rubble mound breakwaters. Ocean Engineering 91(2014) pp. 273–280.

Raaijmakers, T., Liefhebber, F., Hofland, B., Meys, P. (2012). Mapping of 3D-bathymetries and structures using stereo photography through an air-water-interface. Proc. CoastLab 2012. Gent, B.

Rigden, T., Steward T. (2012). Use of 3D laser scanning in determining breakwater damage parameters. Proc. Coastlab 2012, Ghent, Belgium.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers (2006). Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110 2 1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).