



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 LEMOS<sup>1</sup>; Conceição J.E.M. FORTES<sup>2</sup>; Ana MENDONÇA<sup>3</sup>; Paulo ROSA-SANTOS<sup>4</sup>; Francisco TAVEIRA-PINTO<sup>5</sup>; Ermanno de ALMEIDA<sup>6</sup>; Bas HOFLAND<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, [rlemos@lnec.pt](mailto:rlemos@lnec.pt)

<sup>2</sup> Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, [jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt)

<sup>3</sup> Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, [amendonca@lnec.pt](mailto:amendonca@lnec.pt)

<sup>4</sup> Eng. Civil, U Porto, [pjsantos@fe.up.pt](mailto:pjsantos@fe.up.pt)

<sup>5</sup> Eng. Civil, U Porto, [fpinto@fe.up.pt](mailto:fpinto@fe.up.pt)

<sup>6</sup> Eng. Civil, Deltares / TU Delft, [e.dealmeida@tudelft.nl](mailto:e.dealmeida@tudelft.nl)

<sup>7</sup> Eng. Civil, Deltares / TU Delft, [b.hofland@tudelft.nl](mailto: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 Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e em colaboração com Deltares, NL, foram realizados testes com a mesma configuração do quebra-mar, mas utilizando um modelo físico tridimensional (3D), à escala geométrica 1:35. Os resultados obtidos permitiram analisar a evolução do dano no manto resistente do quebra-mar (talude anterior, talude posterior e cabeça), assim como o galgamento, para condições de teste com e sem sobrelevação do nível médio da água do mar, considerando ou não a reconstrução do talude do quebramar entre testes consecutivos de uma 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.

Em termos gerais, concluiu-se que o dano era mais elevado na proximidade do nível de repouso da água e que aumentava com a altura de onda significativa. Os danos foram, em geral, menores nos testes com ondas multidirecionais. Observaram-se, ainda, diferenças significativas entre os testes com danos cumulativos e com reconstrução do quebra-mar após cada teste. Nos ensaios realizados no LNEC com aumento do nível médio do mar e alternância entre dois níveis de maré, verificou-se um ligeiro aumento do dano devido ao aumento da faixa onde ocorre erosão do perfil.

**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, para além do aumento do nível médio da água do mar, a ocorrência mais frequente de eventos extremos e ainda mudanças da direção dominante da agitação marítima. 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 pensada, sempre que possível, sem aumentar significativamente as suas dimensões e, conseqüentemente, os custos associados.

Isso significa que é necessário caracterizar convenientemente a resposta dessas estruturas considerando os efeitos das mudanças climáticas, no que diz respeito ao espraio, ao galgamento e à estabilidade, bem como avaliar o impacto das novas condições de agitação e níveis de água do mar na estabilidade do manto resistente anterior e posterior (HYDRALAB+, 2017).

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

Revela-se, assim, 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 ensaio mais eficientes. Reconstruir ou não o 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 muito importantes que se pretende investigar.

No âmbito do estudo de estratégias para a adaptação aos efeitos das alterações climáticas, o projeto HYDRALAB+ (H2020-INFRAIA-2014-2015) reúne um conjunto 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 da água do mar. Importa também referir que existe uma tarefa específica do sub-projeto RECIPE intitulada "Damage characterization under variable and unsteady test conditions", cujo objetivo é desenvolver técnicas experimentais 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 espraio 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, tendo sido também realizados testes com ondas multidirecionais.

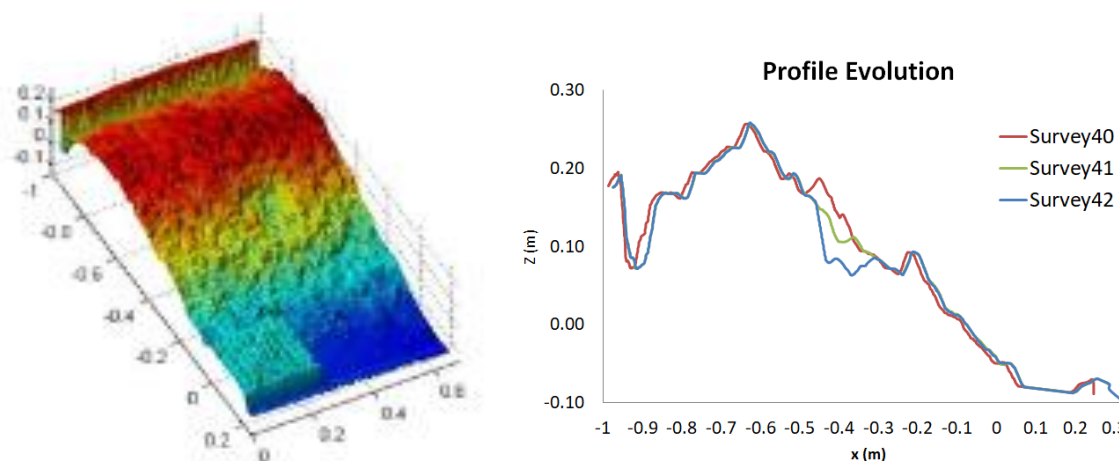
O trabalho realizado nas duas instituições teve como objetivos principais a análise da evolução do dano através de abordagens distintas na representação de tempestades. Para isso, foram realizados levantamentos dos modelos 2D e 3D, de modo a obter parâmetros representativos do dano. A análise dos resultados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

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).

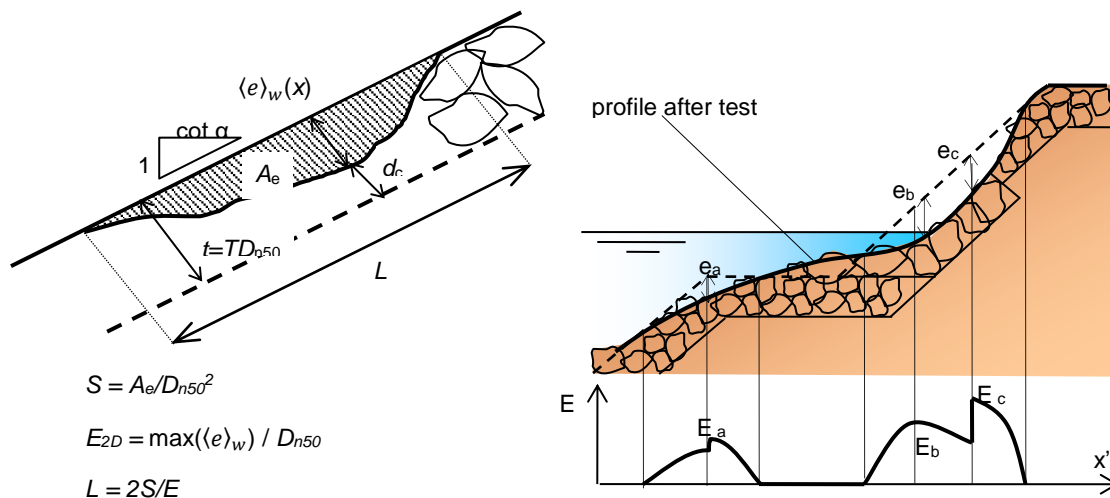
A Figura 1 ilustra a evolução do dano num modelo físico 2D de um quebra-mar de taludes, obtido a partir de levantamentos estéreo-fotogramétricos.



**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,  $S=A_e/Dn^2$ , onde  $A_e$  é a área erodida da secção nas imediações do nível de repouso da água e  $Dn$  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. ESTUDO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Introdução

De modo a obter levantamentos de alta resolução foram realizadas 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.

### 3.2 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.

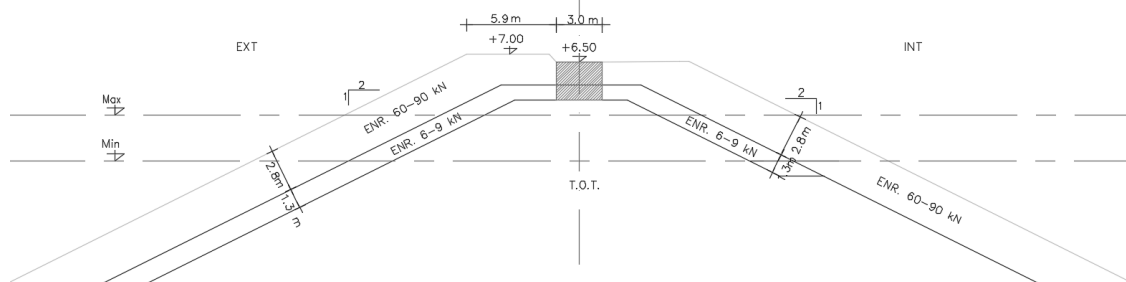
O canal está equipado com um gerador de ondas do tipo pistão com capacidade para absorção dinâmica das ondas refletidas através do uso de duas sondas localizadas em frente ao batedor (Figura 3). O modelo do quebra-mar (Figura 3) foi construído e operado de acordo com a lei de semelhança de Froude, à 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% de inclinação 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 consistiram na contabilização 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 ( $E$ ).

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.

**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
<b>Reconstrução</b>						
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

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

### 3.3 Testes 3D realizados na FEUP

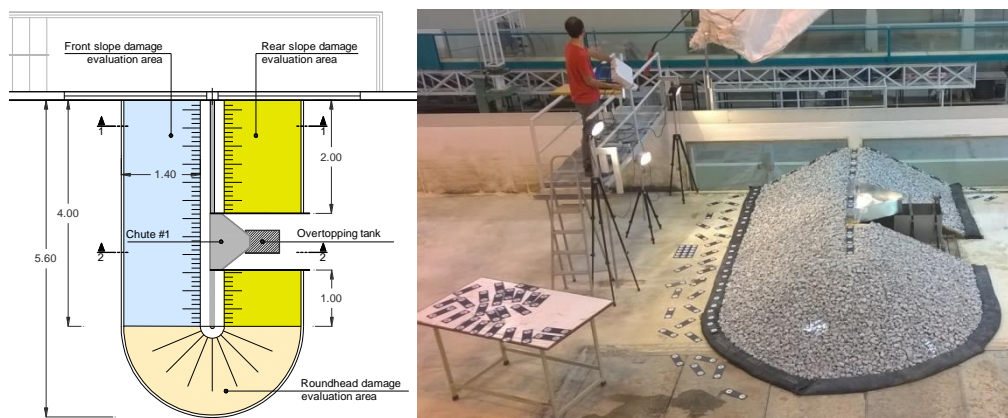
O trabalho experimental realizado na FEUP visou a obtenção de levantamentos 3D de alta resolução num modelo tridimensional de um quebra-mar de taludes, considerando os efeitos

3D da agitação marítima que resultam da própria tridimensionalidade do modelo, a subida do nível médio da água do mar, a incidência de ondas de crista curta no quebra-mar, assim como a reconstrução, ou não, do modelo físico após cada teste. A partir dos levantamentos 3D obtidos é possível analisar a evolução do dano nos taludes anterior e posterior da estrutura, com 4.0 m de desenvolvimento, e na zona da cabeça. Esse desenvolvimento de 4.0 m do tronco do modelo permite obter valores estatísticos válidos para os parâmetros de caracterização do dano,  $S$  e  $E$ .

Os testes foram realizados no tanque de ondas multidirecional do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP, que tem 28.0 m de comprimento, 12.0 m de largura e 1.2 m de profundidade. Este tanque está equipado com um gerador de ondas multidirecional com 12.0 m de largura que integra, também, um sistema de absorção ativa de reflexões. O quebra-mar de referência deste trabalho foi reproduzido à escala geométrica de 1:35, tendo o modelo ficado com as seguintes dimensões: 5.60 m de comprimento, 3.10 m de largura e 0.68 m de altura (Figura 6).

O manto resistente do quebra-mar era constituído por duas camadas de enrocamento, com uma espessura igual a  $2D_{n50}$ , em que  $D_{n50} = 32$  mm e  $D_{n85}/D_{n15} = 1.25$ . O manto resistente foi colocado sobre um núcleo materializado com material granular  $D_{n50} = 11.6$  mm. O talude do tronco e o perfil da cabeça apresentam uma inclinação de 1:2. O coroamento do quebra-mar, com 0.42 m de largura, inclui uma superestrutura de betão com uma largura de 0.10 m. As características da cabeça semicircular do quebra-mar eram semelhantes às da secção corrente do tronco. O manto resistente posterior do modelo foi interrompido de modo a permitir a instalação de um reservatório para quantificação do volume de galgamento (Silva et al., 2017).

A elevação da superfície livre da água foi medida utilizando sondas resistivas, tendo sido utilizado um conjunto de quatro sondas alinhadas perpendicularmente ao modelo de modo a determinar as características da agitação incidente. Nos testes com ondas de crista curta foi utilizado um conjunto de seis sondas colocadas numa configuração CERC6 (Davis and Regier, 1977).



**Figura 6.** Instalação do modelo físico no tanque de ondas da FEUP: vista em planta (esquerda), levantamento 3D da estrutura para posterior avaliação dos danos (direita)



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% $H_s$  e 80% $H_s$ , com mais 0.023 m de profundidade (0.8 m no protótipo). Esses dois testes foram realizados apenas após os testes iniciais com 60 e 60 e 80% $H_{s,d}$ , em que  $H_{s,d}$  representa a altura de onda significativa de projeto da estrutura.  $H_s$  e  $T_p$  representam a altura de onda significativa e o período de pico, respetivamente.

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  $\tan \beta = 0.03$ .

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

Séries	Condição (%)	60% $H_{s,d}$	80% $H_{s,d}$	100% $H_{s,d}$	120% $H_{s,d}$
	$H_s$ (cm) $T_p$ (s)	7.1 1.29	9.4 1.58	11.8 1.87	14.2 2.18
1: abordagem clássica		X	X	X	X
2: não cumulativo		-	X	XX	X
3: subida do nível da água do mar		X	X	X+SLR	X+SLR
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 6 apresenta o aspeto do modelo no final da Série 1 (aumento da altura de onda 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 4 apresenta a percentagem de blocos removida da zona ativa do manto em toda a largura da secção. Por seu lado, a Figura 7 apresenta a curva de danos acumulados em termos de percentagem de blocos removidos em relação ao número total de blocos da mesma zona do manto  $D(\%)$ .



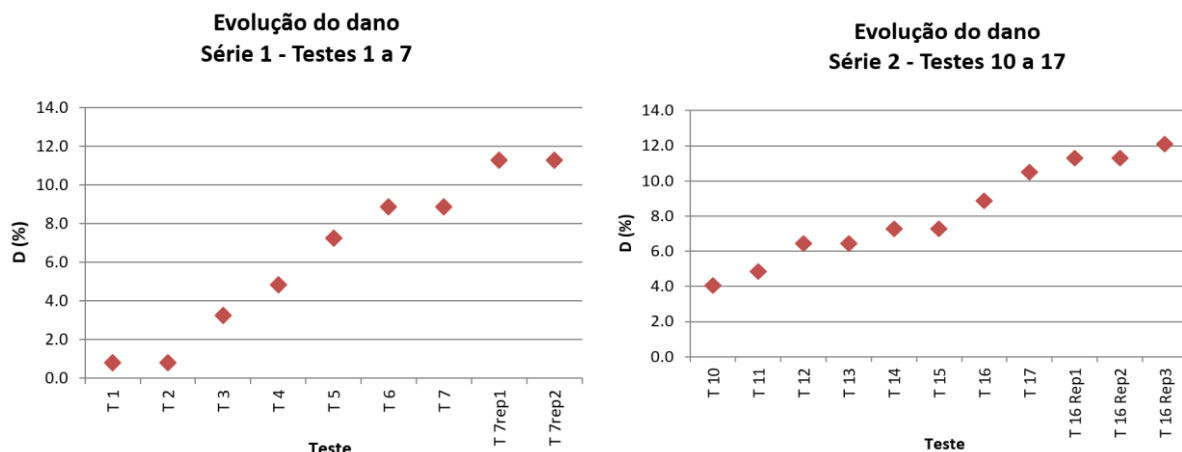
**Figura 6.** Aspeto do modelo no final da Série 1 (Esquerda) e da Série 2 (Direita)

**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



**Figura 7.** Evolução do dano em termos de percentagem de blocos removidos

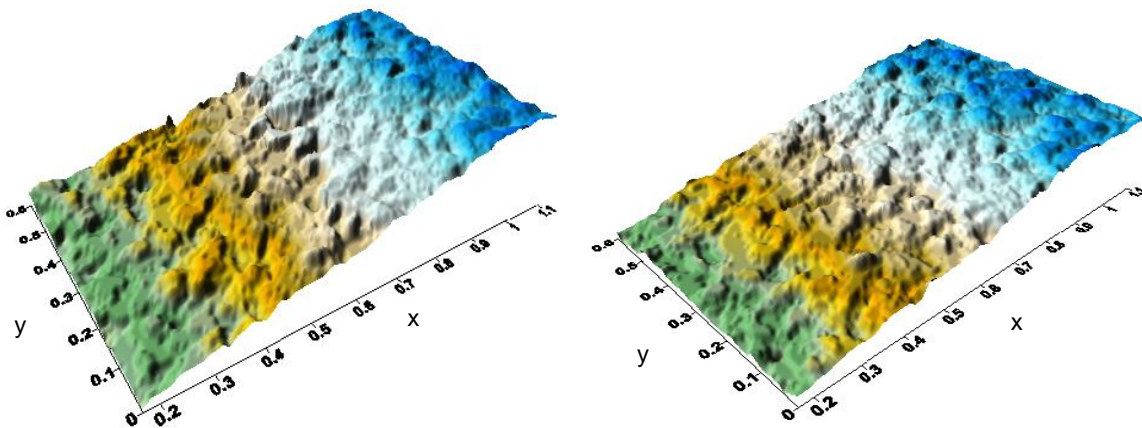
Da análise da curva de danos para a Série 1 verifica-se que a progressão do dano aumenta com a altura de onda significativa, mesmo nas situações em que o nível de maré é constante (Entre os testes 1-3 e entre os testes 4-5.). Esta tendência parece manter-se quando analisado o efeito cumulativo do aumento 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).

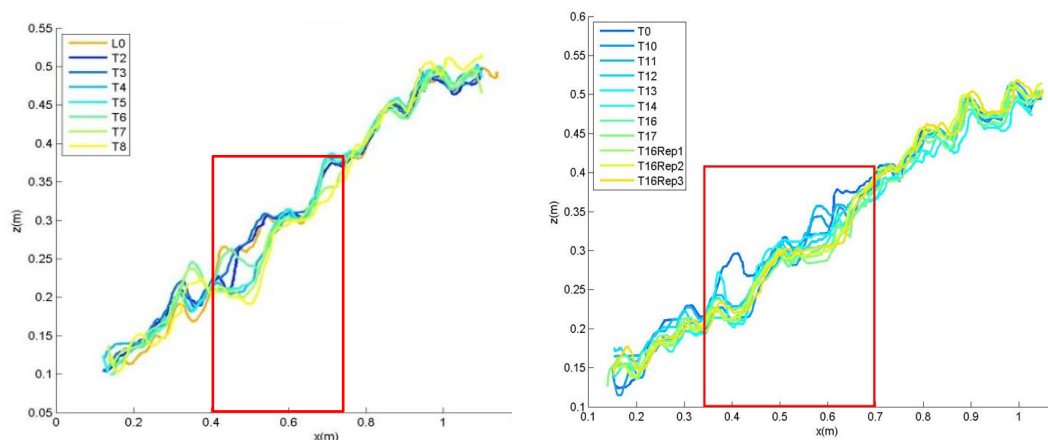
De acordo com o critério de classificação de estragos referido no *Coastal Engineering Manual* (U.S.A.C.E., 2006), o dano acumulado no final das duas séries de ensaios correspondem a um dano intermédio (existem blocos removidos, mas sem exposição dos filtros).

### **Cálculo dos parâmetros do dano**

Na Figura 8 encontram-se representadas as superfícies resultantes dos levantamentos realizados no final das séries de ensaios 1 e 2, enquanto na Figura 9 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 extensão do talude ligeiramente maior, sensivelmente entre  $x=0.35$  m e 0.7 m (painel direito da Figura 9).



**Figura 8.** Envolventes resultantes dos levantamentos. Esquerda: Série 1. Direita: Série 2

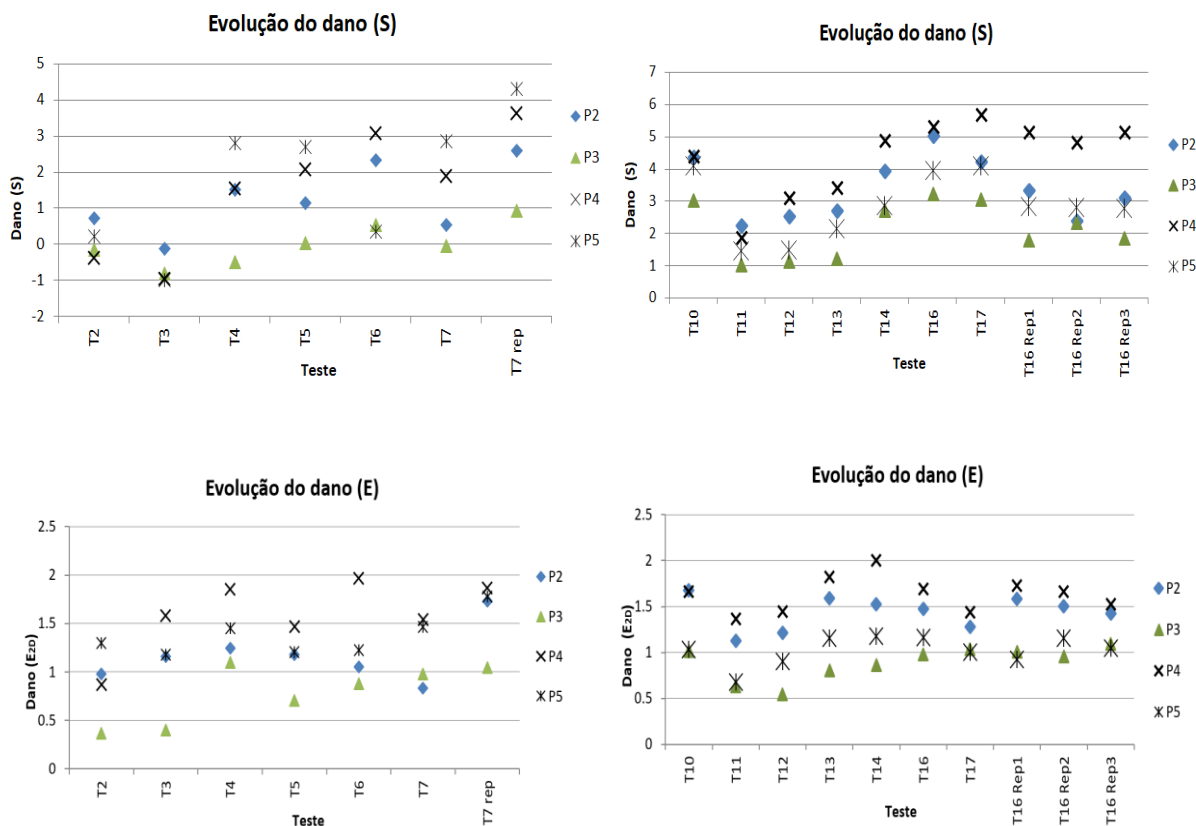


**Figura 9.** Evolução dos perfis representativos do dano para as suas séries de ensaios. Esquerda: P5 (Série 1) Direita: P4 (Série 2)

Na Figura 10 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.

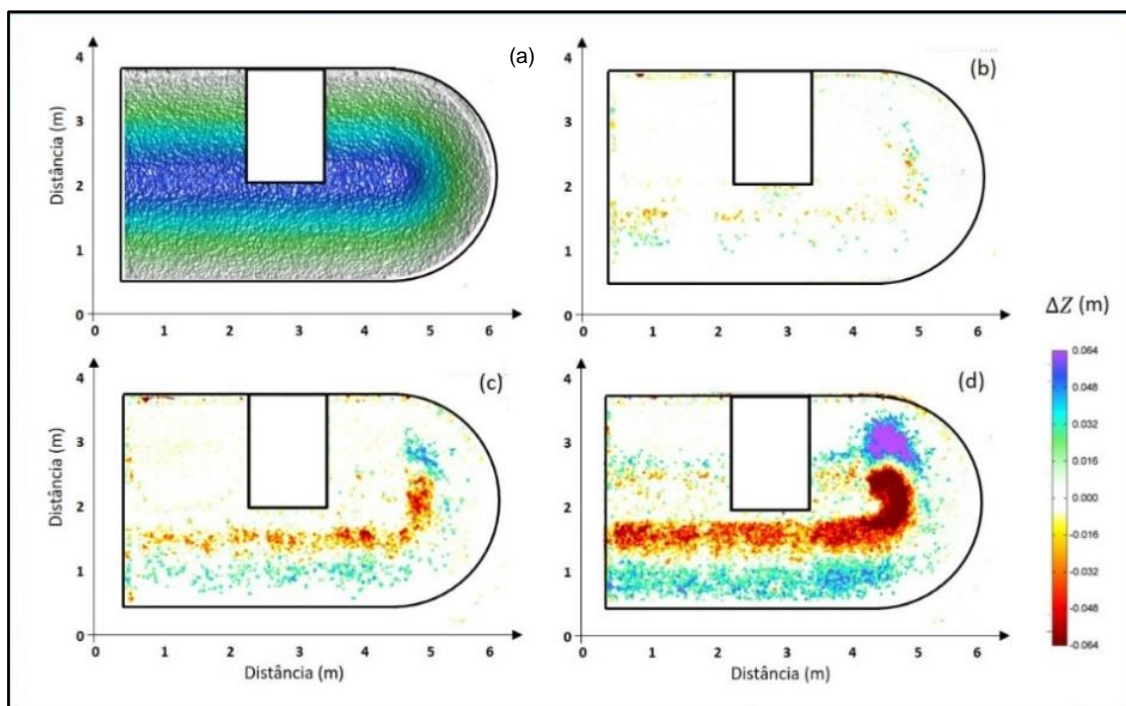


**Figura 10.** Evolução do dano em termos de parâmetro de dano,  $S$  e  $E$ , obtidos para os perfis P2 a P5

#### 4.2 Campanha de ensaios realizada na FEUP

Como se referiu na secção 3.3, os testes realizados na FEUP permitiram analisar a evolução do dano em três zonas do quebra-mar: talude anterior, talude posterior e cabeça do quebra-mar. Esta secção apresenta uma descrição essencialmente qualitativa de alguns dos principais resultados e conclusões.

A Figura 12 apresenta a evolução do dano na estrutura do quebra-mar de taludes para a Série 1. Tal como nos ensaios da Série 1 realizados no LNEC, o programa de testes seguiu a abordagem clássica (i.e., dano cumulativo). A análise da evolução do dano é realizada por comparação dos sucessivos levantamentos da estrutura com o levantamento inicial, ou seja, em termos de diferenças de cotas entre levantamentos tendo como referência a estrutura no início da série de testes. No talude posterior do quebra-mar existe uma zona que foi excluída da análise pois correspondia ao local onde esteve instalado o equipamento para medição dos galgamentos.



**Figura 11.** Evolução do dano no quebra-mar na série 1: levantamento inicial da estrutura (a), situação após os testes realizados para 80%  $H_{s,d}$  (b), 100%  $H_{s,d}$  (c) e 120%  $H_{s,d}$  (d)

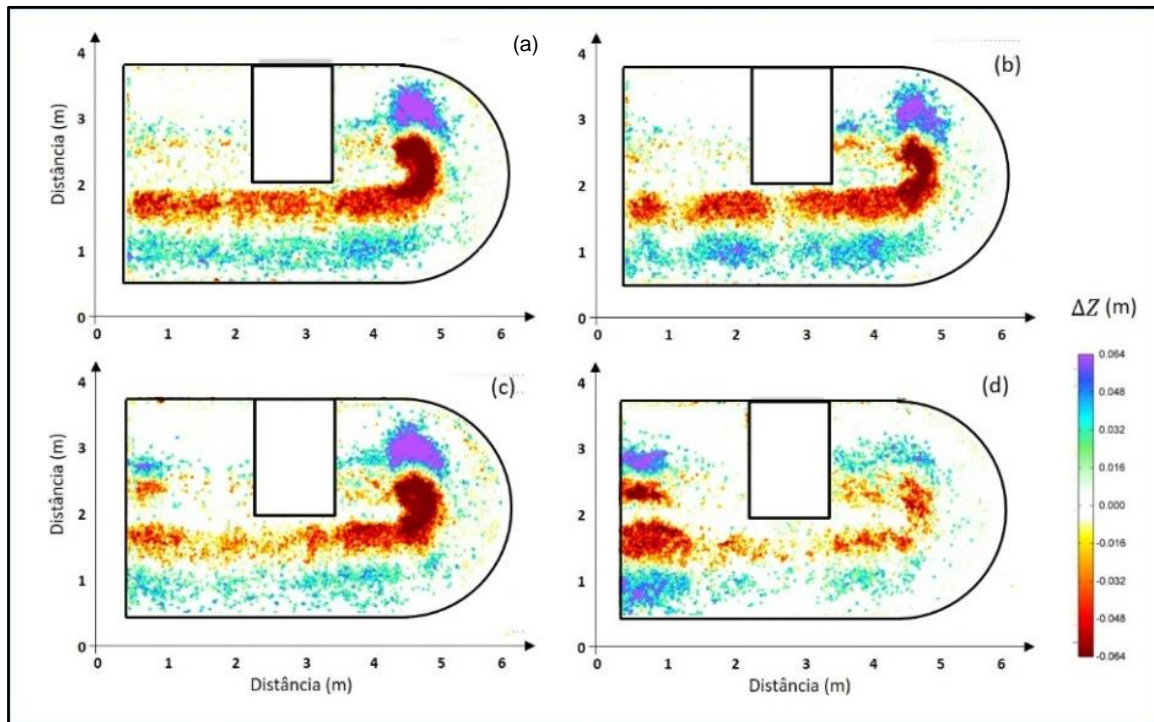
Os resultados apresentados na Figura 12 mostram que os danos aumentam com a altura de onda significativa, sendo apenas ligeiros para alturas de onda significativa inferiores à onda de projeto. A profundidade da erosão é mais acentuada junto ao nível de água de repouso e, em especial, no setor interior da cabeça.

Os danos ao longo do desenvolvimento do talude anterior são relativamente uniformes. No talude posterior, os danos são ligeiros, mesmo após os testes realizados para um estado de



mar com uma altura de onda significativa igual a 120%  $H_{S,d}$ . De referir que o quebra-mar que serve de referência ao estudo apresenta mantos resistentes iguais no talude anterior e posterior.

A Figura 12 apresenta os danos na estrutura do quebra-mar no final das quatro séries de ensaios. A análise é, também, realizada por comparação do levantamento final da estrutura com o inicial, obtido no início da série de testes.



**Figura 12.** Danos no quebra-mar após os testes realizados para 120%  $H_{S,d}$ : série de testes com danos cumulativos (a), com reconstrução da estrutura entre testes (b), consideração da subida do nível médio da água do mar (c), e com ondas de crista curta (d).

A condição do quebra-mar no final da série de testes com danos cumulativos é claramente diferente da obtida na série em que se considera a reconstrução do quebra-mar após cada teste, Figura 13. Contudo, as diferenças observadas parecem estar dentro da variabilidade estatística expectável em testes repetidos para as mesmas condições (Hofland et al., 2017).

Nos testes com uma subida do nível médio da água do mar, a erosão no talude de barlar é menor, provavelmente devido ao galgamento da estrutura. No entanto, os danos no talude posterior são maiores. Os testes realizados com ondas de crista curta provocaram, em geral, menor erosão na cabeça e no tronco do quebra-mar. Os danos observados junto à parede lateral do tanque de ondas (Figura 13 (d)) devem-se à reflexão das ondas (ondas multidirecionais) nessa fronteira sem correspondência no protótipo, ou seja, são um efeito de laboratório.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados e analisados os resultados da evolução do dano para diferentes cenários de tempestade, obtidos a partir de estudos com modelos físicos 2D e 3D realizados no LNEC e na FEUP, respetivamente. As principais conclusões do presente estudo são:

- 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;
- Os ensaios realizados no LNEC 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;
- Nos ensaios realizados na FEUP com simulação do aumento do nível médio da água do mar (0.80 m no protótipo), verificou-se a ocorrência de menos dano no talude anterior, possivelmente devido ao aumento do galgamento da estrutura. Contudo, nos ensaios realizados no LNEC, onde o nível de maré sofreu um acréscimo 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.
- Davis, R. E., L. A. Regier. 1977. Methods for estimating directional wave spectra from multi-element arrays. Journal of Marine Research, 35, pp.453–477
- 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.
- Hofland, B.; Rosa-Santos, P.; Taveira-Pinto, F.; Almeida, E.; Lemos, R.; Mendonça, A.; Fortes, C.J.E.M. (2017) - Measuring damage in physical model tests of rubble mounds. ICE - Coasts, marine structures and breakwaters 2017, 5-7 September 2017, Liverpool, UK. 10p
- 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 v99olumes).