

GALGAMENTO NUM QUEBRA-MAR DE TALUDE EM CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: RESULTADOS OBTIDOS EM MODELO FÍSICO E COM FÓRMULAS EMPÍRICAS

Ana Mendonça¹, Conceição Juana Fortes¹, Maria Teresa Reis¹, Rute Lemos¹, Maria Graça Neves¹, André Ramos¹, Rui Capitão¹

¹ Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RESUMO

O projeto HYDRALAB+ (H2020-INFRAIA-2014-2015) reúne uma rede Europeia de institutos de hidráulica para o estudo de estratégias de adaptação às alterações climáticas através de ensaios experimentais e cujos resultados são essenciais para a calibração e validação de modelos numéricos, fórmulas empíricas, redes neuronais, etc. Os ensaios experimentais desenvolvidos no LNEC, no âmbito do HYDRALAB+, Tarefa 8.2 do RECIPE tem como objetivo a análise do dano num quebra-mar de talude, do galgamento e do espraçamento para quatro cenários de temporal correspondentes a situações extremas associadas a cenários de alterações climáticas. Os ensaios foram realizados num canal de ondas irregulares no qual foi implementada uma secção transversal do quebra-mar, com um manto constituído por enrocamento.

No presente estudo comparam-se os valores do galgamento medidos nos ensaios em modelo físico com resultados estimados por fórmulas empíricas. Testou-se o efeito de um temporal num cenário de alterações climático, através do aumento da altura significativa de onda com o aumento do nível de água. Foi testado um conjunto de condições de agitação incidentes em combinação com dois níveis de maré.

A análise dos resultados é feita com o intuito de estimar com precisão a ocorrência de galgamento em quebra-mares, um fenómeno que ainda se torna mais relevante em cenários de alterações climáticas. Com efeito, nestes cenários é previsível a subida do nível médio do mar, bem como o aumento da intensidade e frequência de temporais, o que pode dar origem a fenómenos de espraçamento/galgamento cada vez mais frequentes, tornando assim cada vez mais vulneráveis as estruturas de proteção costeiras e portuárias, bem como as zonas por elas protegidas.

1. INTRODUÇÃO

Na conceção e avaliação da segurança de estruturas costeiras e portuárias o espraçamento e o galgamento são dos principais fenómenos físicos a ter em conta no projeto de novas estruturas e na verificação da segurança de estruturas já existentes.

Com efeito, é fundamental uma correta previsão do espraçamento/galgamento da onda, na medida em que os danos provocados por estes fenómenos devem situar-se abaixo de limites pré-definidos, quer em condições normais de operação, quer em condições extremas, de forma a garantir, não só, a estabilidade da estrutura, mas também, a segurança de pessoas e bens que essa estrutura protege. A sua determinação tem ainda como objetivo principal a definição da cota de coroamento da estrutura, bem como servir de indicador de possíveis galgamentos e de transmissão de energia através da estrutura.

Este problema ainda se torna mais importante em cenários de alterações climáticas. Com efeito, nestes cenários é previsível a subida do nível médio do mar, bem como o aumento da intensidade e da frequência de tempestades, o que pode dar origem a fenómenos de espraçamento/galgamento cada vez mais frequentes, tornando mais vulneráveis as estruturas costeiras e portuárias. Desta forma, são cada vez mais importantes estimativas precisas destes fenómenos, que se baseiam essencialmente em resultados de ensaios em modelo físico reduzido.

No âmbito do projeto HYDRALAB+ (H2020-INFRAIA-2014-2015), foi realizado num canal de ondas irregulares do LNEC um conjunto de ensaios em modelo físico de um perfil de um quebra-mar de talude, no qual foi feita a análise da propagação de ondas, do espraçamento, do galgamento e da estabilidade do perfil, para situações extremas correspondentes a cenários de alterações climáticas (Hofland et al., 2017; Mendonça et al., 2017; Silva et al., 2017).

Os ensaios foram desenvolvidos no âmbito da Tarefa 8.2 do RECIPE, do projeto HYDRALAB+, com o objetivo de avaliar o dano e o galgamento no perfil de um quebra-mar, com um talude permeável, constituído por enrocamento. Foi definido um total de 15 ensaios, considerando valores de altura de onda significativa, período de pico e níveis de água que permitissem a simulação de eventos extremos.

A campanha de ensaios foi definida de forma a simular 4 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 água; B) efeito cumulativo de tempestades com um nível de água constante; C) período de onda constante; D) efeito cumulativo de tempestades com um nível de água constante e reconstrução do modelo.

Foram ainda realizados dois ensaios adicionais para o mesmo perfil, mas com um talude impermeável. Estes ensaios foram realizados com um nível de água e um período de pico constantes e alturas de onda significativas crescentes.

O presente trabalho incide na comparação entre os valores de galgamento obtidos nos ensaios em modelo físico e os previstos pela formulação empírica do EurOtop (2016), para os vários cenários de alterações climáticas.

Assim, apresentam-se de seguida, os ensaios em modelo físico realizados e as fórmulas empíricas utilizadas. Na secção 3 apresentam-se e discutem-se os resultados advindos da comparação entre os valores das fórmulas empíricas e os obtidos no modelo físico. As principais conclusões do presente trabalho terminam esta comunicação.

2. MÉTODOS

2.1. Modelação física

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 (AWA0 e AWA1) localizadas em frente ao baterdor (Figura 1).

O modelo do quebra-mar (Figura 1 e Figura 2) 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 $Re > 3 \times 10^4$).

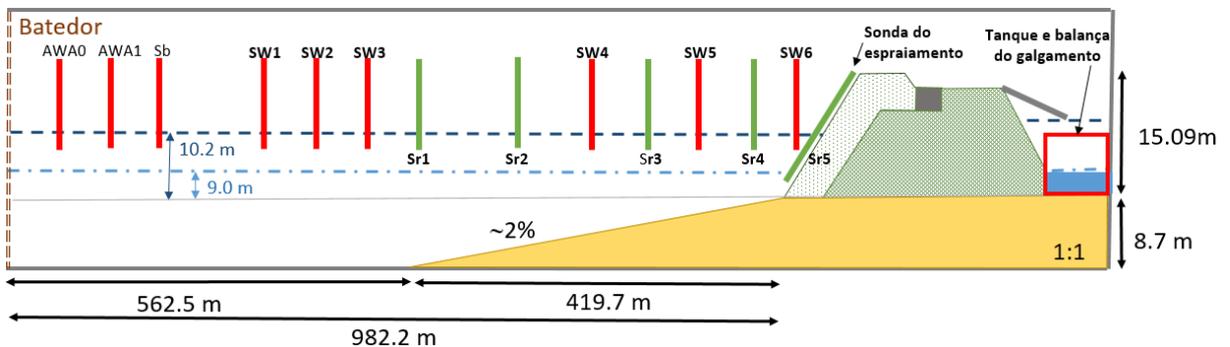


Figura 1. Esboço da configuração experimental em canal (valores à escala do modelo, para dois níveis de água testados).

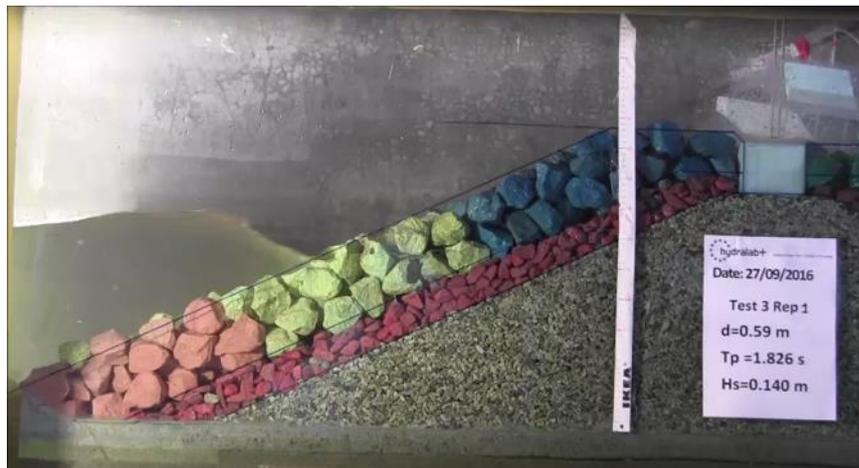


Figura 2. Perfil do quebra-mar ensaiado.

Foram realizados ensaios para análise do dano e do galgamento, num talude de enrocamento, para quatro cenários de alterações climáticas: A) desenvolvimento cumulativo padrão de uma tempestade (com aumento das alturas de onda) e com aumento do nível de água; B) desenvolvimento cumulativo padrão de uma tempestade com o nível de água constante; C)

período de onda constante; e D) desenvolvimento cumulativo padrão de uma tempestade, com o nível de água constante e com reconstrução do manto de enrocamento.

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). Todos os ensaios foram repetidos, pelo menos, três vezes.

Na Tabela 1 apresentam-se as condições nominais dos ensaios, onde H_s representa a altura de onda significativa no pé da estrutura e T_p o período de pico da onda. Os testes 1-7 representam a abordagem A; os testes 1-3 e 4-7 representam a abordagem B; os testes 1-3, 4-7 e 8-15 representam a abordagem C; e os testes 4-7, com reconstrução, representam a abordagem D.

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 (SW1-SW6 e Sr1-Sr4; Figura 1). Para a medição do espraio, foi utilizada uma sonda colocada no talude do quebra-mar (Sr5) (Figura 1). A frequência de aquisição é de 25 Hz.

Tabela 1. 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						
8	11.1	12	3.7	0.37	2.191	0.123
9	8.1	12	3.7	0.27	2.191	0.123
10	11.1	12	4.2	0.37	2.191	0.140
11	8.1	12	4.2	0.27	2.191	0.140
12	11.1	12	4.7	0.37	2.191	0.157
13	8.1	12	4.7	0.27	2.191	0.157
14	11.1	12	5.2	0.37	2.191	0.173
15	8.1	12	5.2	0.27	2.191	0.173

Para a medição do caudal, utilizou-se uma balança que registava a cada segundo o peso da água que galgava a estrutura. O equipamento utilizado para recolher a água galgada consistiu num reservatório, localizado na parte de trás da estrutura. A água é direcionada para o reservatório através de uma rampa, com 40 cm de largura. O reservatório foi colocado sobre uma balança (KERN KXS-TM), possibilitando a medição da variação do galgamento no tempo. Os dados foram obtidos e guardados, em formato digital, a uma frequência de 1 Hz (Figura 3).



Figura 3. Configuração para as medições de galgamento.

2.2. Fórmulas empíricas

Os dados experimentais de galgamento, q , são comparados com os valores obtidos através das fórmulas empíricas do EurOtop (2016), descritas resumidamente nos próximos parágrafos.

O EurOtop (2016) propõe que as estimativas do galgamento para taludes de enrocamento ou taludes rugosos de 1:2 a 1:4/3 sejam descritas por:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.09 \cdot \exp \left[- \left(1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f} \right)^{1.3} \right] \quad (1)$$

onde

g : aceleração da gravidade (9.81 m/s²);

H_{m0} : altura de onda significativa espectral no pé da estrutura;

R_c : altura do bordo livre da estrutura relativamente ao nível de água;

γ_f : fator de influência relativo à dissipação induzida pela rugosidade e permeabilidade do talude.

O EurOtop (2016) define valores de γ_f para taludes de enrocamento ou taludes rugosos com declive de 1:1.5, para um parâmetro de rebentação, $\xi_{m-1,0}$ entre 2.8 e 4.5 (com $\xi_{m-1,0} = \tan \alpha / \sqrt{H_{m0} / L_{m-1,0}}$, α o ângulo entre o declive da estrutura e a horizontal e $L_{m-1,0} = gT_{m-1,0}^2 / 2\pi$ o comprimento de onda espectral em águas profundas obtido através do período de onda médio espectral, $T_{m-1,0}$). Para um talude de enrocamento com duas camadas e núcleo permeável, é recomendado um valor de $\gamma_f = 0.4$. No entanto, para $\xi_{m-1,0} > 5$, i.e., para um elevado período de onda, sugere-se que o fator de influência aumente do seguinte modo:

$$\gamma_{f\text{ mod}} = \gamma_f + (\xi_{m-1,0} - 5) \cdot (1 - \gamma_f) / 5.0 \quad (2)$$

Com um valor máximo de $\gamma_{f\text{ mod}} = 0.6$ para estruturas de enrocamento com um núcleo permeável.

A distribuição dos volumes individuais de galgamento pode ser representada pela distribuição probabilística de Weibull, dada pela percentagem de excedência da distribuição, pela Eq.3 (EurOtop, 2016):

$$P_{V\%} = P(V_i \geq V) = \exp \left[- \left(\frac{V}{a} \right)^b \right] \cdot (100\%) \quad (3)$$

$$P_{V\%} = P_V \cdot (100\%)$$

onde

V_i : volume individual de galgamento;

V : volume específico de galgamento;

P_V : probabilidade (entre 0 e 1) que o volume individual de galgamento (V_i) é inferior ao volume específico de galgamento (V);

$P_{V\%}$: percentagem de volumes que excedem o volume específico (V);

a : parâmetro da distribuição de Weibull; fator de escala dimensional que normaliza a distribuição (Eq. 4);

b : parâmetro da distribuição de Weibull; fator de forma adimensional para estruturas de enrocamento que ajuda na definição dos valores extremos da distribuição (Eq. 5; Zanuttigh *et al.*, 2013),

$$a = \left(\frac{1}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right)} \right) \left(\frac{qT_m}{P_{ov}} \right) \quad (4)$$

$$b = 0.85 + 1500 \left(\frac{q}{gH_{m0}T_{m-1,0}} \right)^{1.3} \quad (5)$$

onde Γ é a função Gamma. O parâmetro de escala, a , depende do galgamento médio, q , mas também do período de onda médio, T_m , e da probabilidade de galgamento, P_{ov} , ou, de forma equivalente, da duração da tempestade e do número efetivo de ondas galgadas (EurOtop, 2016).

Para estimar o número ou percentagem de ondas galgadas recorre-se à Eq. 6:

$$P_{ov} = N_{ow} / N_w = \exp \left[- \left(\frac{A_c D_n}{0.19 H_{m0}^2} \right)^{1.4} \right] \quad (6)$$

onde

N_{ow} : número de ondas galgadas;

N_w : número de ondas incidentes;

A_c : altura de coroamento da estrutura relativamente ao nível de água;

D_n : diâmetro nominal dos blocos (D_{n50} para enrocamento).

3. RESULTADOS

3.1. Análise temporal e espectral da elevação da superfície livre

As séries temporais de elevação da superfície livre, medidas no pé da estrutura (sonda SW6), foram analisadas nos domínios temporal e espectral. Através da análise temporal obtiveram-se, para cada série temporal da superfície livre incidente, os valores de altura de onda significativa, H_s , o período de onda significativo, T_s (relativo a H_s), e a altura de onda 1/10, $H_{1/10}$. Da análise espectral resultam os valores de altura de onda significativa espectral, H_{m0} , o período de onda médio espectral, $T_{m-1,0}$, e o período de pico, T_p .

Na Figura 4 observam-se os valores de H_{m0} obtidos para os testes 1 a 6 (Tabela 1) na sonda colocada no pé da estrutura. Observa-se também a média, μ , e o desvio padrão, σ , de H_{m0} obtidos para as repetições realizadas em cada teste. Os resultados obtidos apresentam alguma variabilidade que geralmente pode ser associada às repetições. No entanto, esta variabilidade poderá ser também devida, a que após algumas repetições (mas não todas), a estrutura tenha sido reconstruída e, na prática, este procedimento pode introduzir condições iniciais ligeiramente diferentes. Para ilustrar esta situação, a Figura 5 apresenta H_{m0} para o teste 3, onde as linhas a azul indicam os dias em que o modelo foi reconstruído.

O mesmo tipo de conclusões pode ser constatado a partir da Figura 6, que mostra os valores de $T_{m-1,0}$ obtidos para os testes 1 a 6 na sonda localizada no pé da estrutura. Os resultados obtidos mostram também alguma variabilidade, verificando-se que os testes realizados depois da reconstrução do modelo (repetições 2 e 3) apresentam, de uma forma geral, uma maior variabilidade relativamente à situação sem reconstrução.

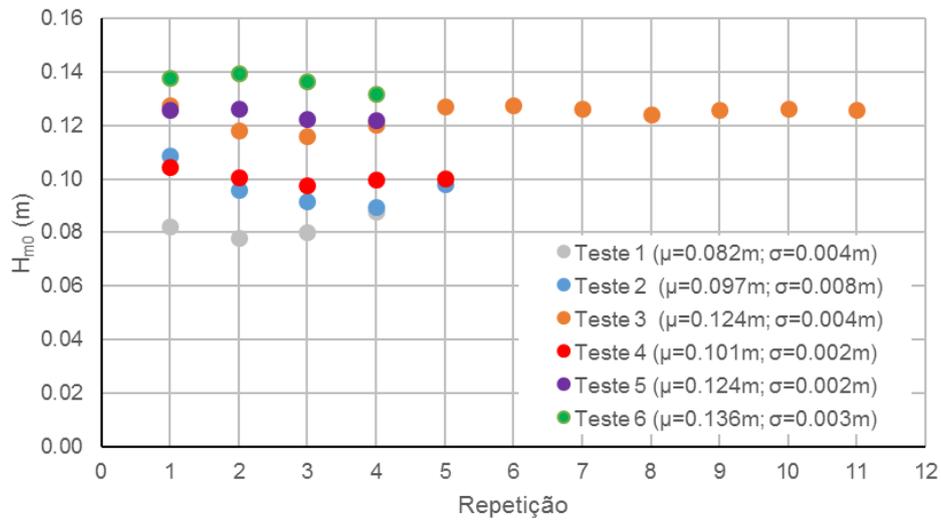


Figura 4. Valores das alturas de onda significativas espectrais medidas, H_{m0} , para os testes 1 a 6 e respectivas repetições

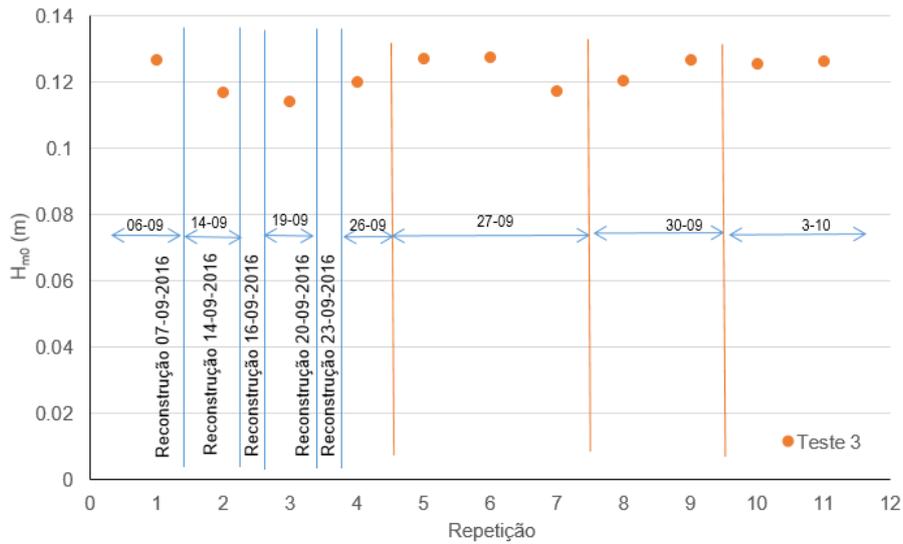


Figura 5. Valores das alturas de onda significativas espectrais medidas, H_{m0} , para o teste 3.

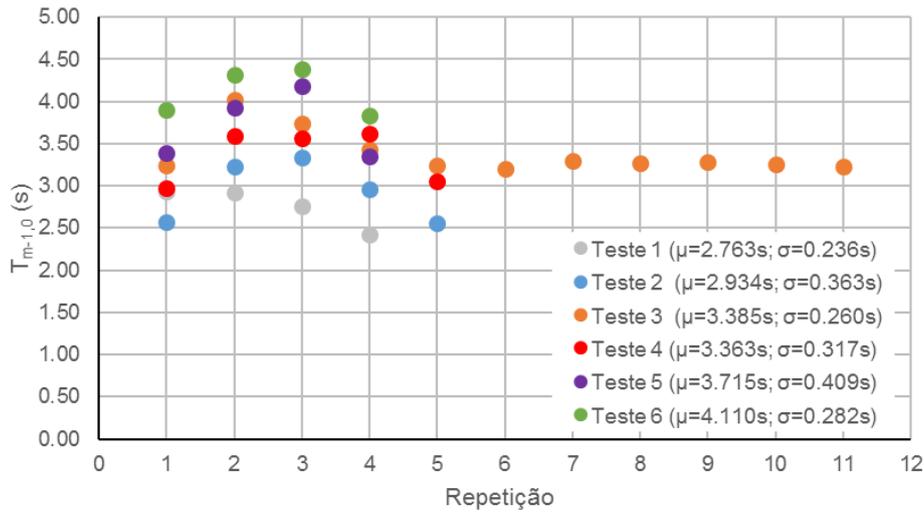


Figura 6. Valores do período de onda médio espectral medido, $T_{m-1,0}$, para os testes 1 a 6 e respectivas repetições.

3.2. Galgamento médio

Nos ensaios em modelo físico descritos na secção 2 obtiveram-se valores de galgamento médio para cerca de 80 testes. Para diferentes condições de agitação, analisou-se e comparou-se o galgamento total e individual com os valores correspondentes obtidos com fórmulas empíricas existentes (EurOtop, 2016). Nesta comunicação, apresentam-se apenas os resultados referentes aos testes 1 a 6 (32 testes).

A Figura 7 apresenta o galgamento médio por unidade de comprimento da estrutura, q , em função de H_{m0} , para os testes 1 a 6. Como esperado, para a mesma profundidade (testes 1 a 3 e testes 4 a 6), q aumenta com H_{m0} .

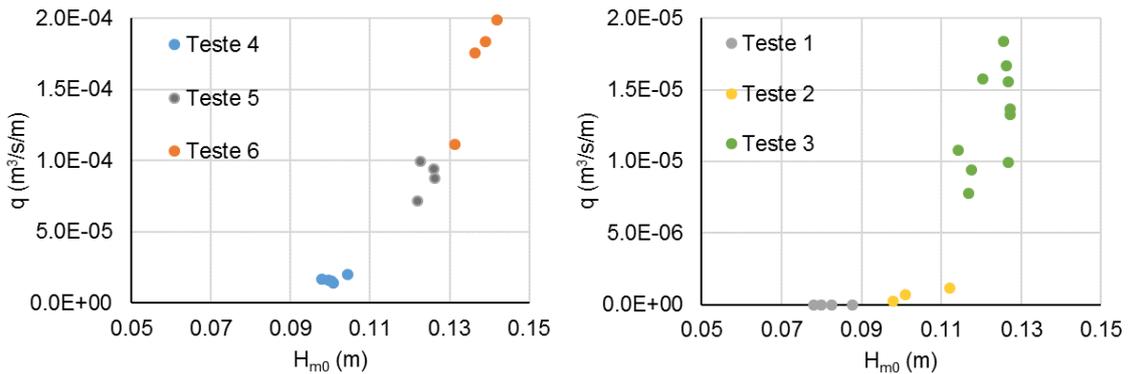


Figura 7. Relação entre os valores de galgamento médio medidos, q , e os valores das alturas de onda significativas espectrais medidas H_{m0} : testes 1 a 6.

A Figura 8 apresenta a relação entre os valores de galgamento médio relativo estimados e medidos, $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$, e os valores do bordo livre relativo, R_c/H_{m0} , para os testes 2 a 6 (para o teste 1 não há registo de galgamento). Os valores estimados foram obtidos através da Eq. 1 (utilizando o valor médio do fator de atrito dos testes, $\gamma_{f\text{mod}} = 0.544$; linha contínua) e um intervalo de confiança de 90% (linha pontilhada) sugerido no EurOtop (2016). A figura mostra que os valores obtidos através da fórmula empírica estão de acordo com os valores de galgamento médio medidos nos ensaios, encontrando-se todos no intervalo de confiança de 90% da Eq. 1. Para valores de $q/(gH_{m0}^3)^{0.5} < 10^{-5}$ os valores estimados são menos precisos e correspondem a valores de galgamento médio inferiores a 0.5 l/s/m (teste 2), onde a ocorrência de efeitos de escala é espetável.

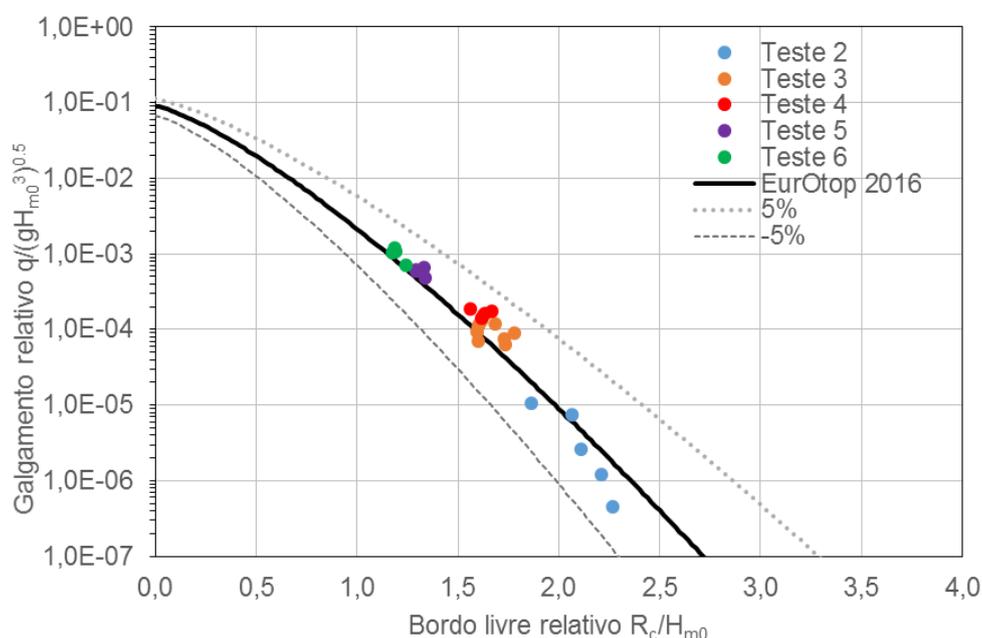


Figura 8. Valores de galgamento médio relativo estimado (Eq. 1 obtida com $\gamma_{f\text{mod}} = 0.544$ e intervalo de confiança de 90%; EurOtop, 2016) e medido, $q/(gH_{m0}^3)^{0.5}$. Relação com o bordo livre relativo, R_c/H_{m0} : testes 2 a 6.

3.3. Galgamento individual

Os volumes individuais do galgamento, V_i , medidos em cada teste estão representados na Figura 9. O volume galgado adimensional (relação entre o volume individual e a média dos volumes individuais do teste), V_i/V_{average} , é representado relativamente à probabilidade de não excedência de cada volume individual do teste (relativo ao número de ondas), P_{ov} .

A Figura 9 mostra que a probabilidade do volume máximo individual ser inferior ou igual a cerca de oito vezes a média dos volumes dos testes é 100 %.

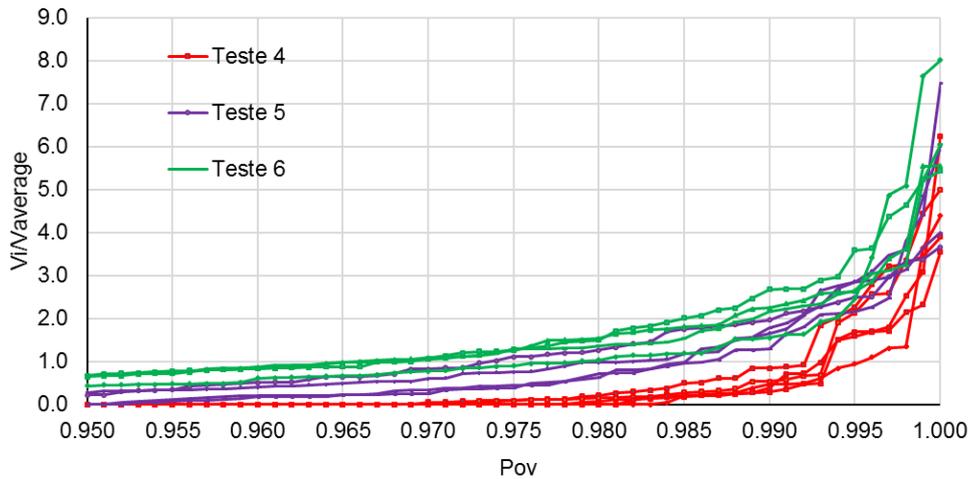


Figura 9. Valores adimensionais dos volumes individuais galgados medidos, $V_i / V_{average}$. Relação com a probabilidade de não excedência, P_{ov} : testes 4 a 6.

A Figura 10 apresenta os fatores de forma de Weibull, b , estimados (Eq. 5) e medidos para estruturas de enrocamento relativamente ao galgamento médio relativo, $q/(gH_{m0}T_{m-1,0})$. Verifica-se que para um galgamento $q/(gH_{m0}T_{m-1,0}) < 5 \times 10^{-5}$ o valor médio de b é cerca de 0.85, com dispersão aproximadamente nula, o que sugere que $b = 0.85$ pode ser usado para descrever o volume individual galgado. Os valores de b medidos estão muito próximos dos valores estimados.

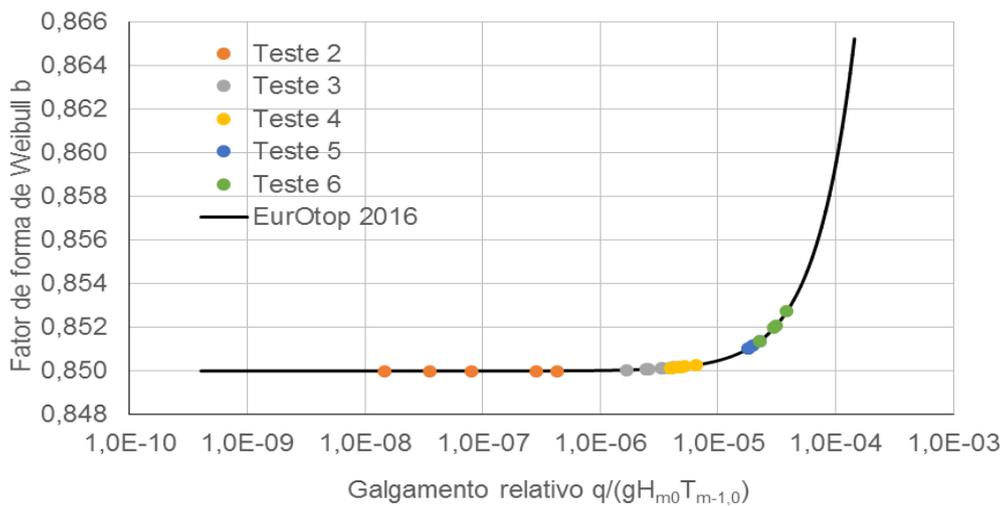


Figura 10. Valores dos fatores de forma de Weibull, b , estimados (Eq. 5; EurOtop, 2016) e medidos, para estruturas de enrocamento. Relação com os valores de galgamento médio relativo, $q/(gH_{m0}T_{m-1,0})$: testes 2 a 6.

A Figura 11 apresenta os valores estimados (Eq. 6) e medidos da percentagem de ondas galgadas em relação à altura de coroamento relativa, $A_c D_n / H_{m0}^2$. Os dados estão de acordo com os valores estimados pelas fórmulas empíricas do manual do EurOtop (EurOtop, 2016). No entanto, os testes apresentados (Testes 4, 5 e 6) cobrem um intervalo reduzido de percentagem de galgamento, com valores máximos de cerca de 9 %.

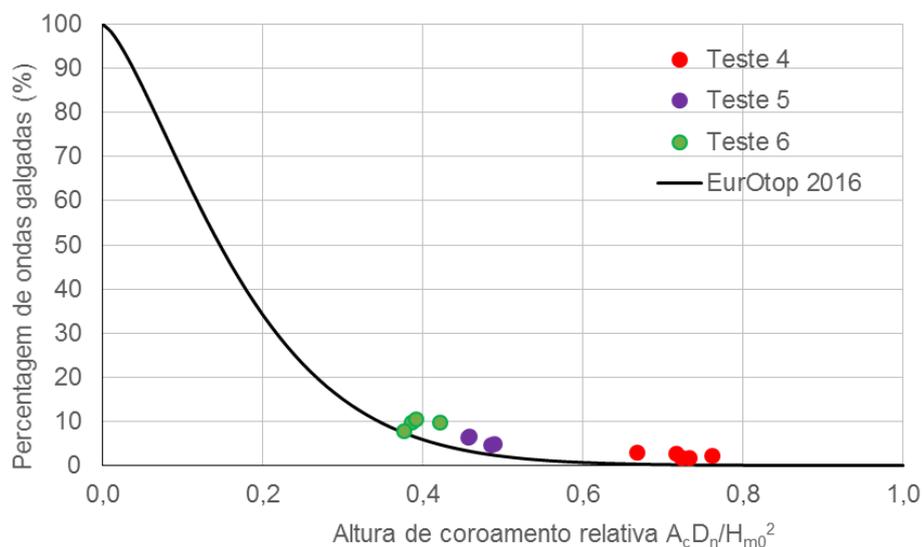


Figura 11. Valores estimados (Eq. 6; EurOtop, 2016) e medidos da percentagem de ondas galgadas, P_{ov} , para quebra-mares de enrocamento. Relação com a altura de coroamento relativa: testes 4 a 6.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os ensaios em modelo físico realizados em canal para a medição do galgamento na secção transversal de um quebra-mar de talude de enrocamento, sujeito a condições de agitação incidente extremas. Foram realizados ensaios para análise do dano, espraçamento e galgamento, para representação de quatro cenários: a) desenvolvimento cumulativo padrão de uma tempestade (com aumento das alturas de onda) e com aumento do nível de água; b) desenvolvimento cumulativo padrão de uma tempestade com o nível de água constante; c) período de onda constante; e d) desenvolvimento cumulativo padrão de uma tempestade, com o nível de água constante e com reconstrução do manto de enrocamento.

O presente estudo focou-se na análise do galgamento médio e individual e na comparação dos valores medidos do galgamento com os estimados pelas fórmulas empíricas do EurOtop (2016). De uma forma geral, a formulação utilizada reproduz corretamente os valores de galgamento medidos nos ensaios.

Os dados de galgamento médio obtidos em modelo físico, q , encontram-se num intervalo de confiança de 90 % das fórmulas empíricas do EurOtop (2016). Como esperado, para valores de $q/(gH_{m0}^3)^{0.5} < 10^{-5}$ as estimativas são menos precisas.

Relativamente aos volumes individuais de galgamento medidos nos ensaios, a probabilidade que o volume individual máximo não seja superior a oito vezes a média dos volumes dos testes é de 100%.

A distribuição probabilística teórica dos volumes individuais de galgamento assume-se seguir uma distribuição de dois parâmetros de Weibull. Os fatores de forma de Weibull, b , foram comparados para os valores medidos nos ensaios e estimados pelas fórmulas empíricas. Para um galgamento médio $q/(gH_{m0}T_{m-1,0}) < 5 \times 10^{-5}$, o valor médio de b é cerca de 0.85, com dispersão quase nula, sugerindo que $b = 0.85$ pode ser usado para descrever volumes individuais de galgamento. Os valores de b medidos estão assim de acordo com os valores propostos no EurOtop (2016), para estruturas de enrocamento.

Os valores da percentagem de ondas que galgam a estrutura, estimados (EurOtop, 2016) e medidos, foram analisados em função da altura de coroamento relativa, $A_c D_n / H_{m0}^2$. Os valores medidos estão de acordo com os valores estimados pelas fórmulas empíricas do manual do EurOtop.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do projeto Europeu H2020-INFRA-2014-2015, N.654110 - HYDRALAB+ *Adaptation for Climate Change*.

REFERÊNCIAS

- EurOtop, (2016). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com
- Hofland, B., Santos, P., Taveira Pinto, F., Almeida, E., Mendonça, A., Lemos, R., Fortes, J. (2017). "Measuring damage in physical model tests of rubble mounds". Proc. Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2017, 5 - 7 September 2017, Liverpool Waterfront, UK.
- Mendonça, A., Lemos, R., Fortes, J., Reis, M.T., Neves, M.G., Ramos, A., Capitão, R. (2017). "Overtopping events in breakwaters: comparison of 2D physical experiments and empirical formulae. Proc. 37th IAHR World Congress, 13-18 August 2017, Kuala Lumpur, Malásia.
- Silva, E., Allsop, W., Riva, R., Santos, P., Mendonça, A., Reis, M.T. (2017). "The Conundrum of Specifying very low Wave Overtopping Discharges". Proc. Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2017, 5 - 7 September 2017, Liverpool Waterfront, UK.
- Zanuttigh, B., Van der Meer, J.W., Bruce, T., Hughes, S. (2013). Statistical characterization of extreme overtopping wave volumes. Proc. ICE, Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2013, Edinburgh, UK.