



## AVALIAÇÃO DO ESPRAIAMENTO POR ANÁLISE DE VÍDEOS DE ENSAIOS EM MODELO FÍSICO

Conceição J.E.M. Fortes<sup>1</sup>, Umberto Andriolo<sup>2</sup>, Rute Lemos<sup>1</sup>, Antonella Manta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil

<sup>2</sup>INESC Coimbra, Department of Electrical and Computer Engineering

[jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt), [uandriolo@mat.uc.pt](mailto:uandriolo@mat.uc.pt), [rlemos@lnec.pt](mailto:rlemos@lnec.pt)

### Resumo

O objetivo deste trabalho é a comparação de duas metodologias utilizadas na avaliação do espraçamento durante os ensaios em modelo físico bidimensional realizados no âmbito do projeto BSafe4sea. As metodologias utilizadas foram a tradicional de medição da altura de espraçamento com uma sonda resistiva e uma metodologia baseada em análise de vídeos, tendo sido avaliado o seu desempenho para uma das condições de teste. Em relação aos resultados obtidos, em termos de  $R_{U2\%}$  e  $R_{U_{max}}$ , verificou-se que o andamento e ordem de grandeza dos valores obtidos com as duas técnicas era bastante semelhante, embora os valores obtidos pela análise do vídeo tenham sido, em geral, superiores aos obtidos pela sonda. Constatou-se, assim, que a técnica de imagem de vídeo é uma alternativa viável para medir o espraçamento. Recomenda-se, no entanto, o uso de luz difusa durante os testes, bem como a instalação fixa da câmara, para melhorar a precisão dos resultados obtidos com esta técnica.

### Introdução

A determinação do espraçamento em quebra-mares de talude é fundamental para avaliar o risco de ocorrência de galgamento e inundação deste tipo de estruturas marítimas, e, por conseguinte, é fulcral para o dimensionamento dessas estruturas. Este problema ainda se torna mais premente devido ao previsível aumento da frequência e intensidade da agitação marítima incidente nas estruturas marítimas, e consequente aumento do espraçamento e galgamento devido às alterações climáticas.

No âmbito do projeto BSafe4sea ([bsafe4sea.lnec.pt](http://bsafe4sea.lnec.pt)), foi realizado no LNEC um conjunto de ensaios em modelo físico de um perfil (zona do cais) do quebra-mar de talude do porto da Ericeira, cujo objetivo, entre outros, foi a determinação dos valores de espraçamento para diferentes condições de tempestade, incluindo cenários de alterações climáticas.

Usualmente a determinação do espraçamento em ensaios em modelo físico é efetuada com recurso a uma sonda resistiva colocada ao longo do talude. No entanto, esta técnica tem algumas limitações, uma vez que não efetua medições corretas quando a lâmina de água que ascende sob o talude passa entre a sonda e o talude ou quando o galgamento origina salpicos que atingem a sonda em locais onde que não existe qualquer espraçamento. Uma metodologia alternativa é o uso de câmaras de filmar e de técnicas de processamento de imagem.

Nestes ensaios, foram utilizadas as duas metodologias: a medição da elevação da superfície livre com a sonda resistiva e a filmagem com uma câmara de vídeo do lado exterior do canal e posterior tratamento das imagens com recurso a metodologia proposta por Andriolo *et al.* (2016).

Com ambas as metodologias, e utilizando uma análise temporal, obtiveram-se e compararam-se alguns dos parâmetros estatísticos obtidos para o espraçamento, nomeadamente,  $R_{U_{max}}$ ,  $R_{U_{min}}$ ,  $R_{U_{med}}$ ,  $R_{U2\%}$ ,  $R_{U1/10}$ ,  $R_{Us}$ . O objetivo deste trabalho é a comparação destas duas metodologias utilizadas e avaliação do seu desempenho para uma das condições de teste realizada nos ensaios em modelo físico.

### Métodos

#### Modelo Físico

Os ensaios em modelo físico foram realizados num canal de ondas irregulares do LNEC, Mendonça *et al.* (2021)], tendo sido implementado o perfil da seção da zona de cais do quebra-

mar de talude do porto de Peniche, à escala 1/50. Trata-se de um canal com 0.8 m de largura e 50 m de comprimento que tem implementado um sistema de retroação capaz de absorver, com o movimento da pá do batedor, as ondas refletidas pela estrutura testada. No que se refere ao protótipo, o manto protetor tem uma espessura de cerca de 4.0 m, sendo constituído por duas camadas de tetrápodes de 160 kN cujo talude se desenvolve com um declive de 2:3, entre a cota de coroamento, a +8.0 m (ZH), e a cota de fundação, a -8.0 m (ZH), Figura 1.

O objetivo dos ensaios foi a análise da resposta da estrutura marítima a diferentes estados de agitação incidentes (tempestades e cenários de alteração climática). Nesse sentido foram efetuadas medições de agitação, espriamento, galgamento e pressão e a avaliação do dano da estrutura para esses estados de agitação.

Realizaram-se ensaios com agitação irregular, com a duração de 1000 ondas, para três níveis de maré. No nível de preia-mar, reproduziram-se períodos de pico de 1.70 s, 1.98 s e 2.26 s, e alturas de onda significativas de 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 e 0.17 m. Nos níveis de baixa-mar e médio, apenas se efetuaram ensaios para a altura significativa de 0.17 m.

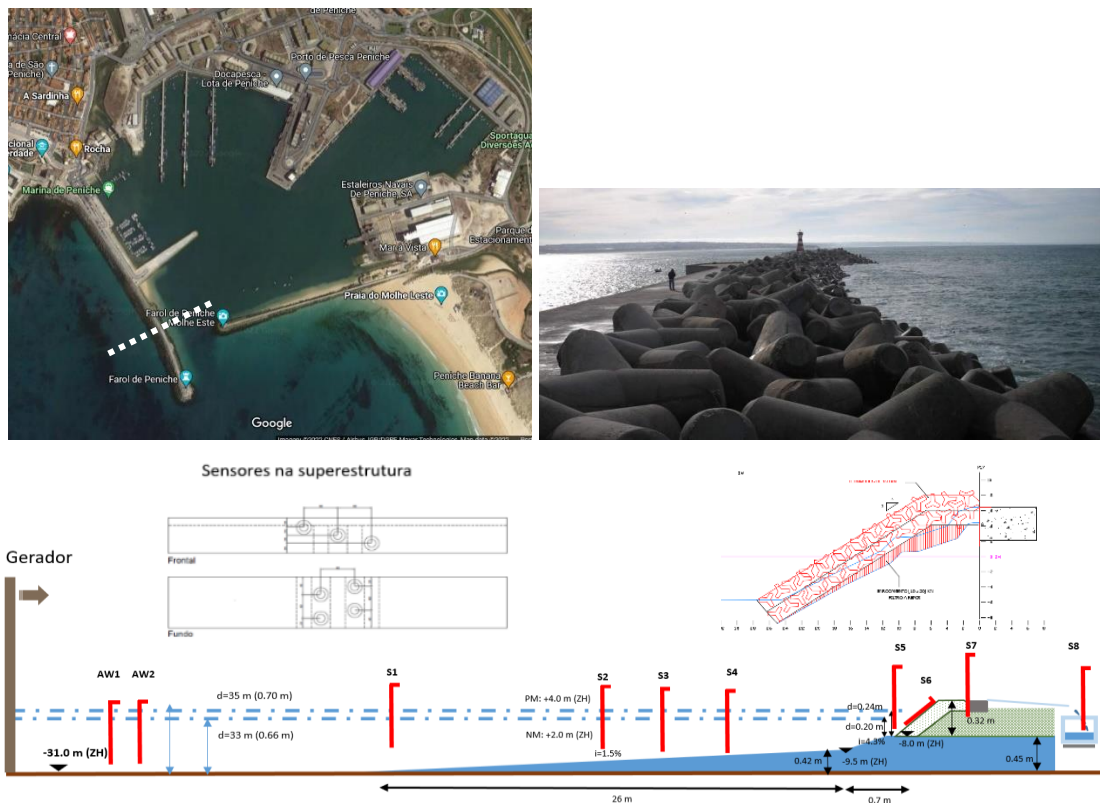


Figura 1. Peniche (em cima) Implantação do modelo no canal e características do perfil transversal ensaiado (em baixo)

Para a medição da propagação da agitação marítima utilizou-se um conjunto de 5 sondas, S1 a S5, **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** A frequência de aquisição das sondas foi de 128 Hz. Para a avaliação do espriamento, efetuou-se a medição da elevação da superfície livre com uma sonda resistiva, S6, colocada ao longo do talude (Figura 2b) e colocou-se também uma câmara de vídeo para a filmagem do ensaio, posicionada em frente à estrutura (fora do canal), do lado de fora do canal.

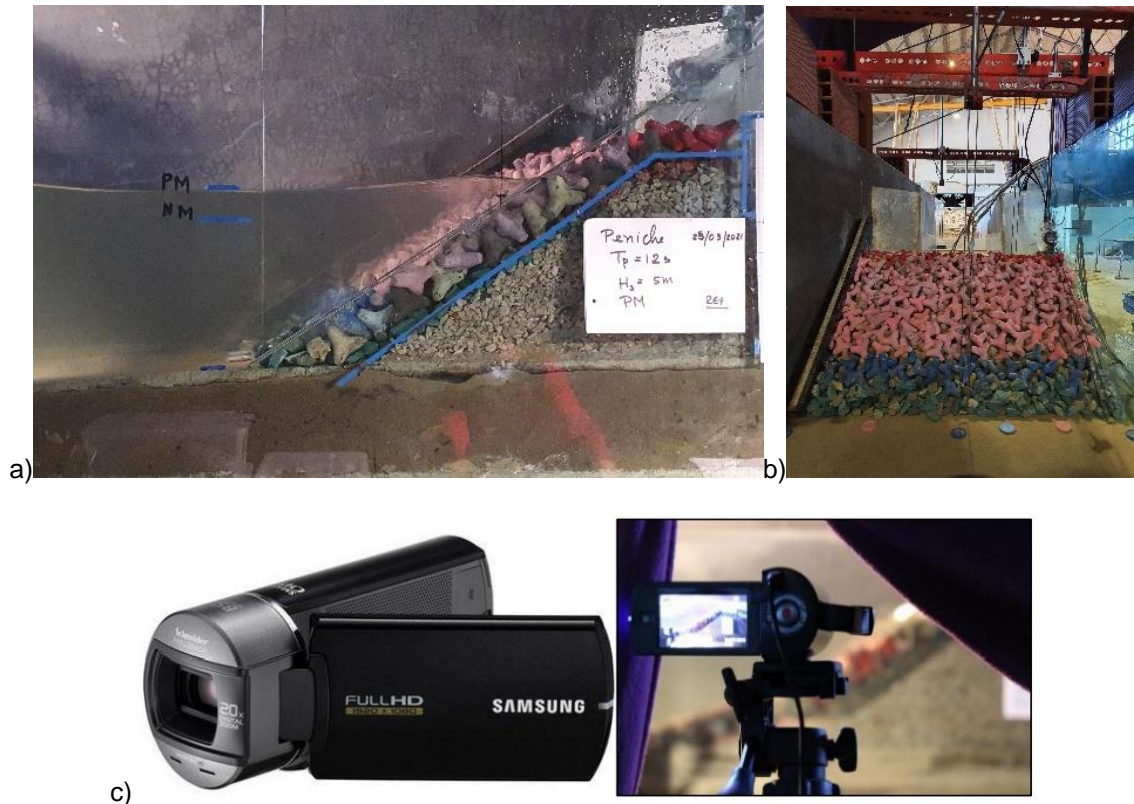


Figura 2. a) Perfil transversal do quebra-mar b) Sonda S5 e Sonda do espraçamento; c) Câmara de filmar

### Tratamento de dados de vídeo

A câmara de vídeo comercial (Samsung Digital Camcorder HMX Q10BP) filmou a sequência de imagens durante o ensaio com uma frequência de 50 frames/s, durante o tempo do ensaio. Os ensaios foram realizados durante o dia, com luz natural. No entanto, para evitar o efeito da luz solar na gravação vídeo, o modelo foi “tapado” com cortinas opacas e foram também colocados dois focos de luz VISICO VC 1000Q visando a seção transversal com o intuito de fornecer luz artificial e, assim melhorar a imagem da câmara de vídeo.

A metodologia seguida para extrair os valores de espraçamento através das imagens vídeo é a de Andriolo *et al.* (2018) e, é resumidamente:

1. No filme efetuado, extrair as imagens (*frames*) com uma frequência de 10 imagens por segundo;
2. Em cada imagem, identificar a linha transversal limite (transeto) coincidente com a face do talude do quebra-mar do modelo físico (linha vermelha), conforme mostrado na Figura 3. O transeto selecionado, não corresponde à posição da sonda usada para medir o espraçamento, pois a sonda está sujeita a deslocamentos devido à agitação que incide sobre a mesma;
3. Construir a imagem *timestack*, com base na amostra da série temporal de pixels de cores das várias sequências de imagens extraídas ao longo de todo filme. Obtêm-se a elevação, em pixels, sobre o talude ao longo do tempo;
4. Marcar manualmente as posições dos valores mais elevados da elevação (pixels) nas imagens *timestack*, obtendo uma imagem como a da Figura 4;
5. Calcular os valores discretos de espraçamento através da transformação das posições marcadas no ponto 4 nas imagens *timestack* em valores de cotas (cm) acima do nível médio do mar. Para este efeito, foi usado um código desenvolvido Matlab (Andriolo,

2018). O código permite a transformação dos valores de pixels para medições em cm, mediante formulas fotogramétricas comumente usadas na técnica de vídeo-monitorização.

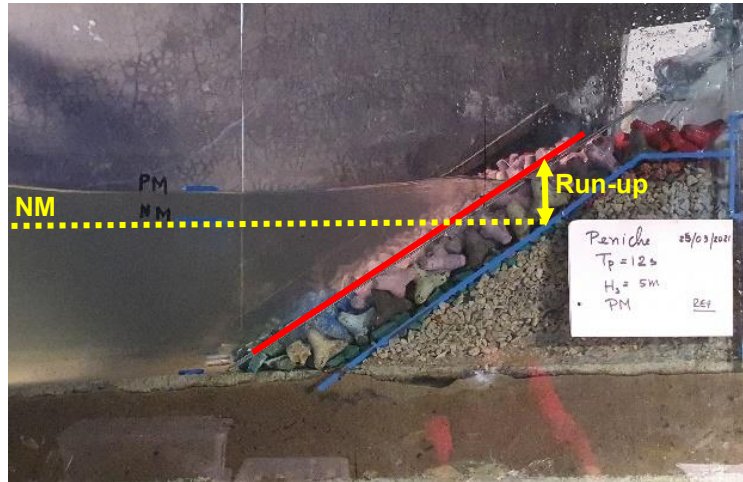


Figura 3. Identificação do nível médio do mar (linha tracejado amarelo) e do nível relativo ao qual se calcula o espraçamento (linha continua amarelo)

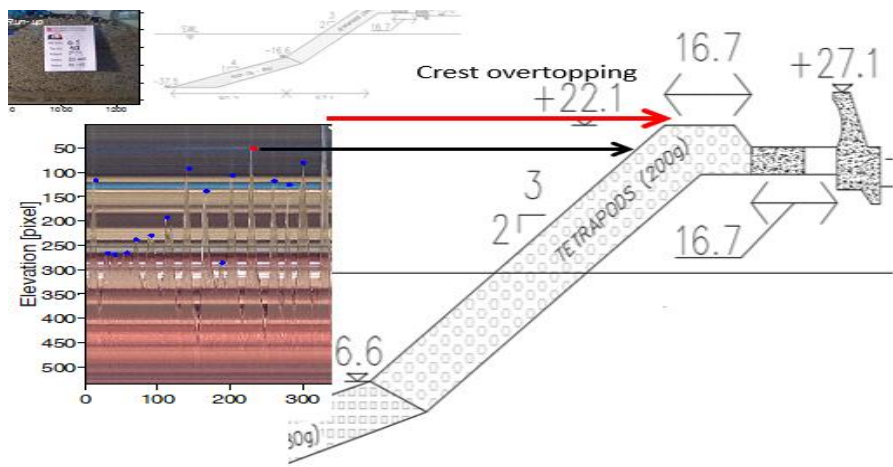


Figura 4. Exemplo de uma imagem *timestack* (a) e a sua correspondência no modelo (b)

#### Análise temporal das séries temporais de espraçamento

O cálculo dos valores estatísticos do espraçamento foi efetuado recorrendo à análise temporal do registo da elevação da superfície livre obtida quer pela sonda 6 quer pela análise das imagens de vídeo ao longo de cada ensaio. Os valores estatísticos obtidos foram:

- $R_{med}$ : média de todos os valores medidos de espraçamento;
- $R_{2\%}$ : valor que excede apenas 2% de todos os valores medidos;
- $R_{1/10}$ : média do decimo de valores mais elevados medidos;
- $R_{max}$ : máximo de todos os valores medidos;
- $R_{min}$ : mínimo de todos os valores medidos



- $Ru_s$ : média do terço de valores mais elevados medidos.

É de notar que apenas foram considerados os valores de elevação abaixo do coroamento da estrutura. Os valores acima dessa cota de coroamento são por definição galgamento e por isso não foram considerados.

No que diz respeito à metodologia utilizando a sonda resistiva 6, para cada registo de elevação da superfície livre, determinou-se a correspondente série temporal de valores do espraimento, calculando a elevação da superfície livre, acima do nível médio do mar (correspondentes apenas às cristas das ondas).

De modo a excluir pequenas elevações da superfície livre que alterariam o tratamento estatístico da série, o software de análise, criado em MatLab, utiliza um patamar de  $0.01 H_{max}$ , abaixo do qual a onda não é considerada.

Atendendo a que a sonda se encontra colocada sobre o talude, a cota de espraimento foi calculada tendo em conta a inclinação da mesma.  $Ru = \text{elevação} * \text{sen}(\text{alfa})$ , sendo *alfa* a inclinação do talude.

Relativamente à metodologia de imagem de vídeo, com a ajuda do programa MatLab de Andriolo *et al.* (2018), é possível transformar os valores de pixels para cm e obter os valores de espraimento, recorrendo formulas fotogramétricas comumente usadas na técnica de video-monitorização.

Com base nessa série temporal, é depois efetuado o cálculo de  $Ru_{max}$ ,  $Ru_{min}$ ,  $Ru_{2\%}$  e  $Ru_{med}$ , além do nível do próprio perfil.

## Resultados

Neste estudo foi considerado o ensaio correspondente a  $H_s=8$  m e  $T_p=12$  s. De acordo com a metodologia indicada, o vídeo é transformado numa imagem *timestack*, que agrega uma sequência de imagens extraídas (6000 imagens) do vídeo inicial com 30 minutos, com uma frequência de 10 imagens por segundo. Esta imagem *timestack* é serie temporal de valores da elevação (pixels) em função do tempo, Figura 5.

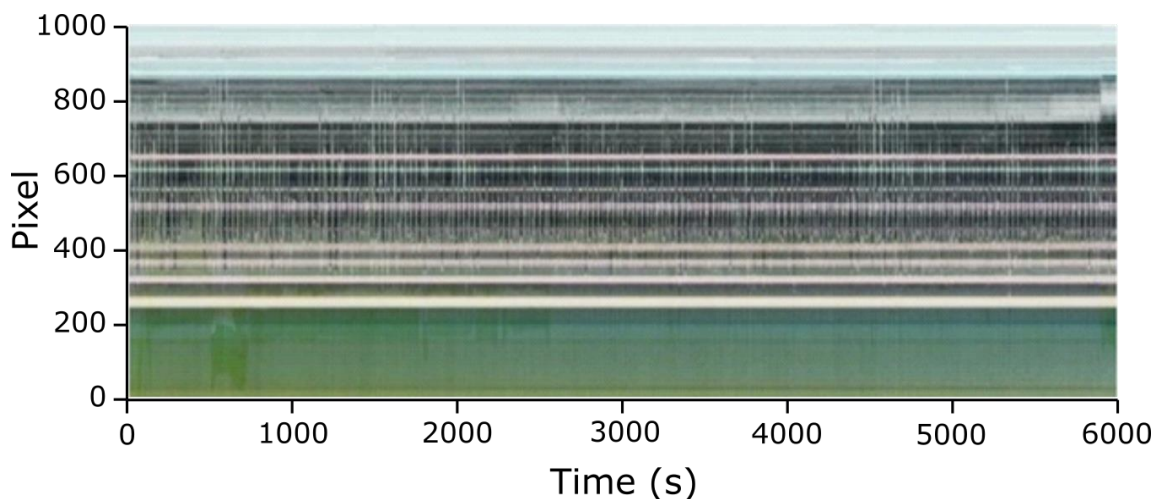


Figura 5. Imagem *timestack* do vídeo dos ensaios de Peniche.

Na Figura 6 identifica-se na imagem *timestack* os valores individuais mais elevados da elevação (pixels). Assim, foi possível obter os valores das coordenadas dos pontos de elevação,



novamente em pixels esquematicamente.

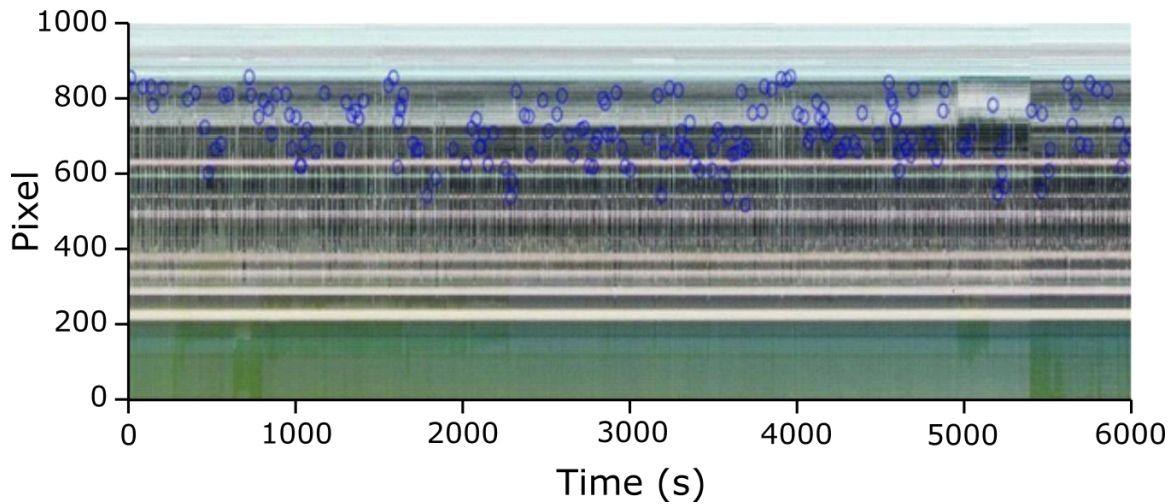


Figura 6. Identificação da posição mais elevada dos valores individuais (em blue) de elevação (pixels).

Com a ajuda do programa Matlab de Andriolo *et al.* (2018), é possível transformar os valores de pixels para cm e obter os valores de espraioamento.

Com base nessa série temporal, foi depois efetuado o cálculo de  $Ru_{min}$  (linha tracejada azul),  $Ru_{2\%}$  (linha tracejada preta) e  $Ru_{med}$  (linha tracejada verde), além do nível do próprio, Figura 7. Os valores do espraioamento em cm ao longo da sonda colocada no talude do manto foi, portanto, projetada no perfil da estrutura, Figura 8.

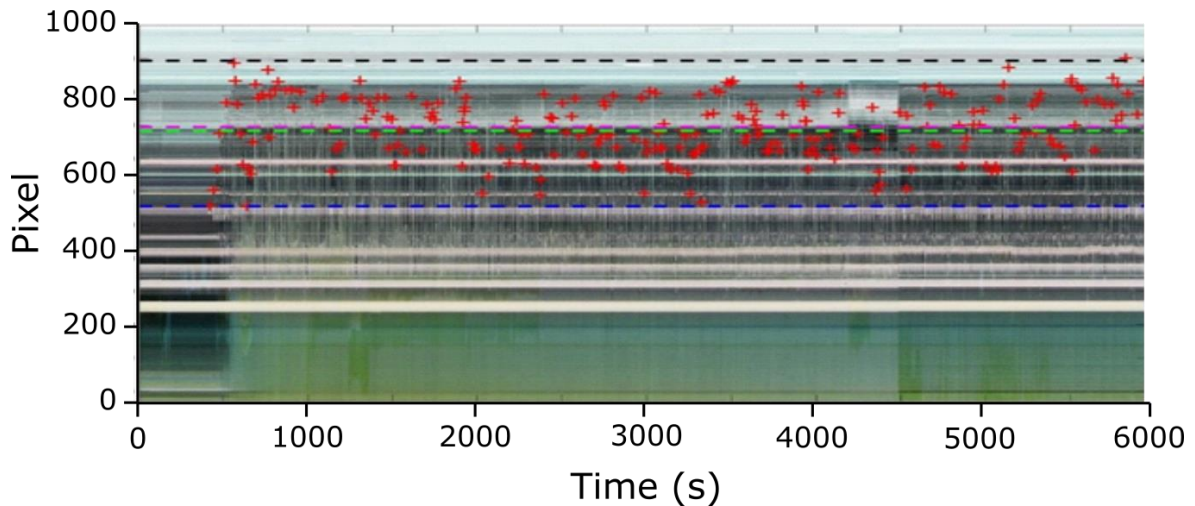


Figura 7. Identificação dos pontos relativos a cada run-up (cruzes vermelhas),  $Ru_{min}$  (linha tracejada rosa),  $Ru_{2\%}$  (linha tracejada preta) e  $Ru_{med}$  (linha tracejada verde).

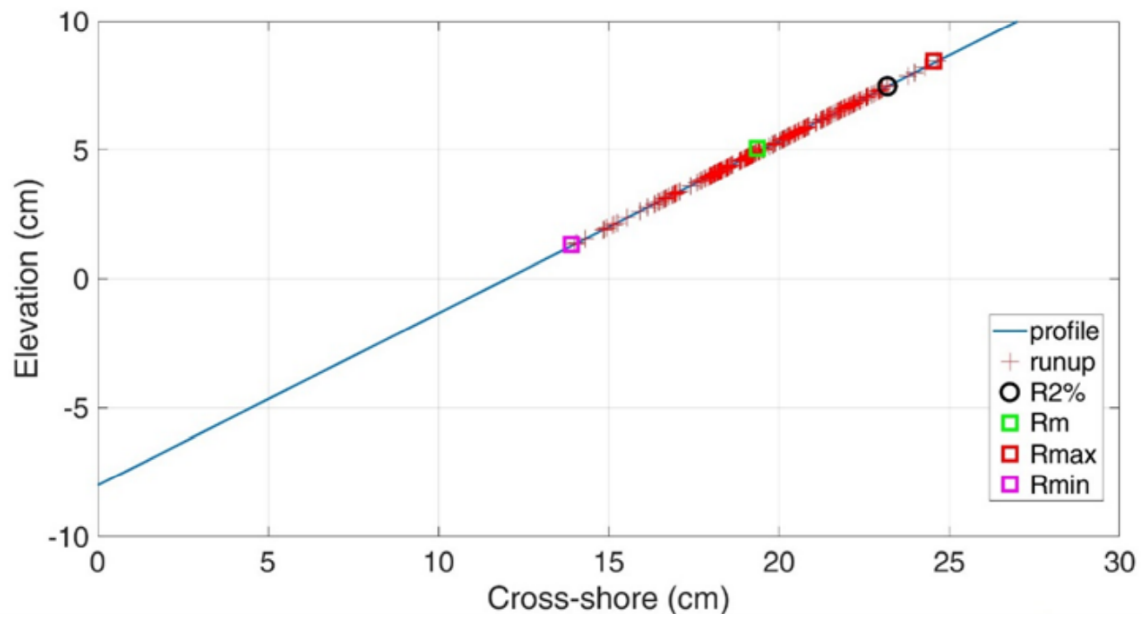


Figura 8. Identificação dos pontos relativos a  $R_{max}$ ,  $R_{min}$ ,  $R_{U2\%}$  e  $R_{med}$ .

Por fim, são exibidos os resultados obtidos por meio de códigos em MatLab, sobrepondo-os ao modelo físico, como na Figura 9.

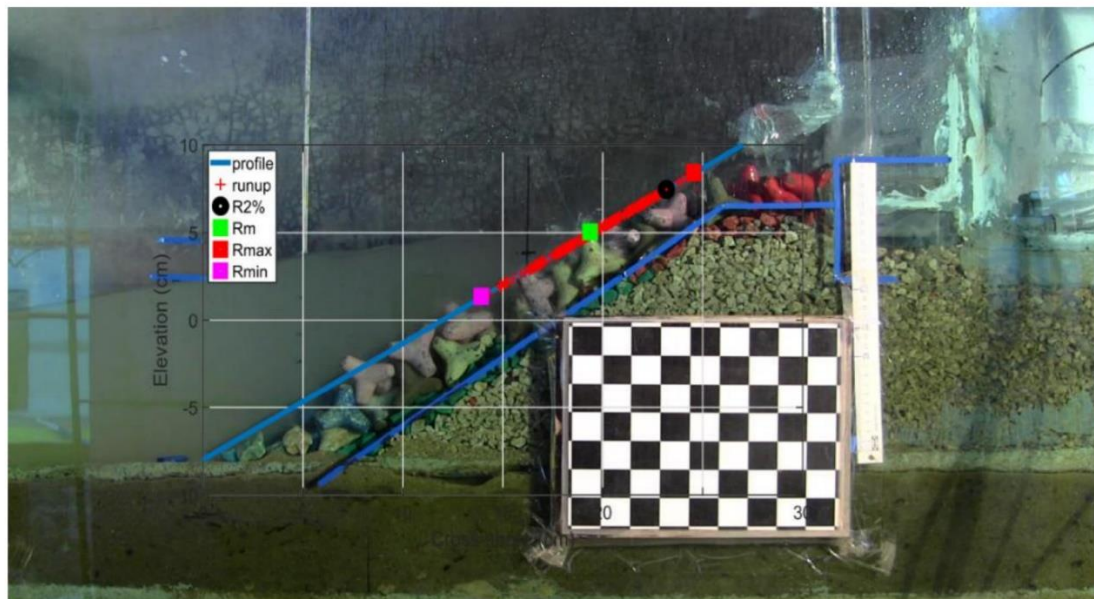


Figura 9. Sobreposição dos valores do espraiamento obtidos no modelo físico.

Na Figura 10 apresentam-se os resultados de  $R_{U2\%}$  e  $R_{U_{max}}$  obtidos pelas duas metodologias. Verifica-se que há uma razoável concordância entre ambas, verificando-se que os resultados do vídeo são superiores aos obtidos pela sonda.

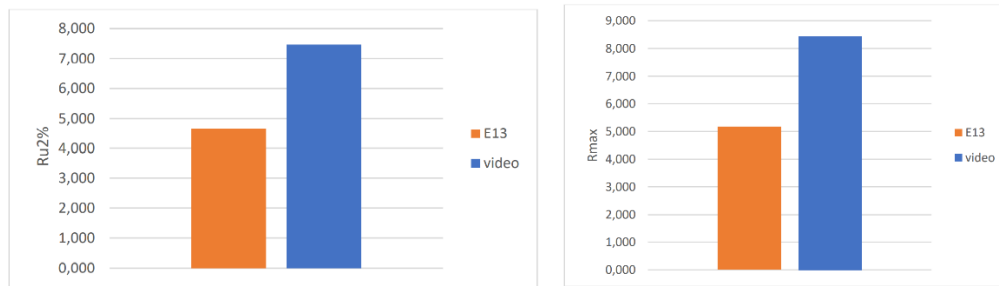


Figura 10. Valores de  $Ru_{2\%}$  e  $Ru_{max}$  referentes ao teste E13 obtidos através da sonda 6 (laranja) e através da análise do vídeo (azul)

As diferenças observadas estão relacionadas com as limitações de ambas as metodologias, nomeadamente: no caso da sonda, a turbulência gerada pelos impactos das ondas na estrutura e os próprios deslocamentos dos blocos dessa estrutura, podem levar a medições pela sonda. Por outro lado, o transeito para produção de *timestack* (linha vermelha na Figura 3) foi definido como encostado ao talude da secção do quebra-mar, enquanto a sonda estava afastada, em média 2 cm acima.

### Conclusões

Neste trabalho, descreve-se a aplicação da técnica de vídeo à determinação do espriamento em quebra-mares de talude com blocos artificiais. Esta técnica foi aplicada durante o ensaio em modelo físico de uma secção do quebra-mar de Peniche, para uma condição de agitação incidente de  $H_s=8$  m,  $T_p=12$  s, com o nível de preia-mar.

Os resultados obtidos com a técnica de vídeo foram comparados com as medições de uma sonda sobre o talude e confirmaram que a técnica de imagem de vídeo é uma alternativa viável para medir o espriamento. É, no entanto, necessário garantir a luz adequada para uma melhor qualidade da filmagem.

### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito dos projetos BSafe4Sea, Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017, e To-Sealart (PTDC/EAM-OCE/31207/2017) financiados pela FCT.

### Referências bibliográficas

ANDRIOLO, U.; POSEIRO, P.; REIS, M.T.; BASTOS, A.P.; FORTES, C.J.E.M.; GARCIA, T. (2016). Investigating the use of a video-technique for wave run-up measurements on a breakwater in a laboratory flume. 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica. Lisboa, 21, 22 e 23 de junho. 478-480pp. ISBN 978-989-705-097-8.