

MIGUEL COUTO CARVALHO

Licenciado em Engenharia Civil

DESEMPENHO DE METODOLOGIAS BASEADAS EM VÍDEO PARA A DETERMINAÇÃO DO ESPRAIAMENTO EM MODELOS FÍSICOS

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – PERFIL DE ESTRUTURAS

Universidade NOVA de Lisboa

Junho, 2024

DESEMPENHO DE METODOLOGIAS BASEADAS EM VÍDEO PARA A DETERMINAÇÃO DO ESPRAIAMENTO EM MODELOS FÍSICOS

MIGUEL COUTO CARVALHO

Licenciado em Engenharia Civil

Orientadora: Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes,
Investigadora Principal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Coorientadora: Professora Doutora Maria da Graça Neves
Professora Associada com Agregação, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Arguentes: Professor Doutor Luís Miguel Chegas da Costa Gil

Orientador: Professora Doutora Maria da Graça Neves

Membros: Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Desempenho de metodologias baseadas em vídeo para a determinação do espraio em modelos físicos

Copyright © MIGUEL COUTO CARVALHO, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVAThesis Word [11].

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha gratidão à Exma. Professora Doutora Maria Graça Neves, orientadora da NOVA FCT, por todo o apoio e disponibilidade ao longo da dissertação.

O meu mais profundo agradecimento à Doutora Conceição Juana Fortes, orientadora do LNEC, por me proporcionar a oportunidade de realizar a minha dissertação no LNEC, pela orientação, disponibilidade e ensinamentos partilhados ao longo deste percurso e principalmente por ter acreditado em mim desde o primeiro dia.

Um especial agradecimento à Engenheira Rute Lemos, por toda a ajuda e pelo contínuo apoio e disponibilidade ao longo de toda esta jornada.

O caminho não se faz sozinho, pelo que não posso deixar expressar o meu agradecimento aos colegas do LNEC, César, Joana e Rui, por toda ajuda nesta fase crucial do meu percurso académico, como também agradecer ao meu colega e grande amigo Pedro Jacinto, por enfrentarmos juntos os desafios encontrados durante os anos de curso e por ser não só o colega, mas o amigo que sei que poderei sempre contar.

Agradeço à minha família, à minha irmã Laura e em especial aos meus pais, pela educação que me proporcionaram ao longo da minha vida, sem esquecer a minha tia que sempre me apoiou.

RESUMO

Os quebra-mares de talude são estruturas de proteção portuária muito comuns em Portugal. O seu dimensionamento é habitualmente realizado partindo de fórmulas semi-empíricas, sendo necessário recorrer-se a ensaios em modelo físico reduzido (2D e 3D), a fim de confirmar o seu comportamento adequado.

Nesse âmbito, um dos parâmetros importantes para o dimensionamento é o espraio, o qual em modelos físicos se pode estimar utilizando diferentes metodologias. Uma delas é a baseada na análise de imagens vídeo através da metodologia *TimeStack*. Esta metodologia, que foi aplicada e validada em modelos físicos 2D, tem limitações relacionadas com a necessidade de identificação manual das cristas correspondentes aos espraio, visíveis na imagem *TimeStack* sendo, por isso, morosa e sujeita a erros. Por outro lado, é de grande interesse a aplicação desta metodologia em ensaios 3D e para diferentes incidências de ondulação.

O objetivo principal do presente trabalho é o aperfeiçoamento, aplicação e validação da metodologia de determinação do espraio em modelos físicos de quebra-mares de talude, baseada na análise de imagens de vídeo com recurso à técnica *TimeStack* (Andriolo, 2019). Pretende-se também que esta nova metodologia seja computacionalmente eficiente e aplicável a modelos físicos tridimensionais com diferentes obliquidades da agitação incidente num quebra-mar de taludes.

O caso de estudo é o Porto das Lajes das Flores, para o qual foi construído e explorado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil um modelo físico tridimensional com a representação, no modelo, da batimetria e da estrutura à escala 1:58.9. Foram realizados trinta ensaios para diferentes condições de agitação, três níveis de maré e dois rumos de incidência da agitação e obtiveram-se vídeos da totalidade dos ensaios e medições de espraio com sonda resistiva colocada sobre o talude do quebra-mar.

O aperfeiçoamento da metodologia *TimeStack* existente, consistiu na aplicação de diferentes filtros e métodos de análise de imagem com vista a automatizar o processo de seleção das cristas de espraio de imagem *TimeStack*, o que era anteriormente efetuado manualmente. A implementação desta melhoria aumentou significativamente a qualidade dos dados obtidos e tornou a tarefa de deteção das cristas independente do técnico que a executa, tornando-a mais célere e viabilizando assim o uso corrente desta técnica em ensaios de modelo físico. Por outro lado, desenvolveu-se um procedimento para criar uma imagem *TimeStack* correspondente à duração integral do vídeo, viabilizando o prosseguimento do processamento do vídeo de uma forma integral, com menor exigência computacional e tempo de processamento. Este desenvolvimento é particularmente importante para vídeos de longa duração, como são os dos ensaios correntes.

O desempenho desta nova metodologia *TimeStack* foi bom, com resultados de espraio ($Ru_{2\%}$, Ru_{max} e Ru_m) que tem um andamento e uma ordem de grandeza semelhantes aos obtidos a partir das medições da sonda para as diferentes condições de ensaios testadas.

Assim, a metodologia desenvolvida, associada a uma maior automatização dos procedimentos e otimização dos recursos computacionais, demonstrou ser uma ferramenta eficiente, fiável e de fácil utilização na determinação do espraio em ensaios em modelos tridimensionais de quebra-mar de taludes com diferentes obliquidades da agitação incidente.

Palavras chave: Espraio, Quebra-mares de taludes, Modelo físico tridimensional, Análise de Vídeo, Metodologia *TimeStack*

ABSTRACT

Rubble mound breakwaters are very common harbour protection structures in Portugal. Their design is usually based on semi-empirical formulas, and it is necessary to use physical models (2D and 3D) to confirm their appropriate behaviour.

In this context, one of the important parameters for design is the runup, which in physical models can be estimated using different methods. One of these is based on video images analysis using the *TimeStack* methodology. This methodology, which has been applied and validated in 2D physical models, has limitations related to the need to manually identify the runup crests visible in the *TimeStack* image, and is therefore time-consuming and prone to errors. On the other hand, it is of great interest to apply this methodology in 3D tests and for different wave incidences.

The main objective of this work is to improve, apply and validate the methodology for determining runup in physical models of breakwaters, based on video images analysis using the *TimeStack* technique (Andriolo, 2019). This new methodology is also intended to be computationally efficient and applicable to three-dimensional physical models with different obliquities of the incident waves on a rubble-mound breakwaters.

The case study is the Port of Lajes das Flores, for which a three-dimensional physical model was built and operated at the National Civil Engineering Laboratory, with the representation, in the model, of bathymetry and structure at a scale of 1:58.9. Thirty tests were carried out, for different wave conditions, 3 tide levels and 3 wave directions. Videos were taken of all the tests as well as runup measurements with a resistive probe placed on the breakwater slope.

The procedure adopted to improve the *TimeStack* methodology consisted of applying different filters and image analysis methods in order to automate the process of selecting the runup crests in the *TimeStack* image, which was previously carried out manually. The implementation of this improvement significantly increased the quality of the data obtained and

made the task of detecting crests independent of the technician carrying it out, making it faster and thus enabling the current use of this technique in physical model tests. On the other hand, a procedure was developed to create a *TimeStack* image corresponding to the entire duration of the video, making it possible to continue processing the video in an integral way, with less computational requirements and processing time. This development is particularly important for long-term videos, such as those in current physical model tests.

The performance of this new *TimeStack* methodology was good, with runup results ($Ru_{2\%}$, $Ru_{\max}$ and Ru_m) that were similar in behaviour and order of magnitude to those obtained from the probe measurements, for the different test conditions tested. This new methodology is more computationally efficient and applicable to three-dimensional physical models and to different obliquities of the incident wave agitation on a rubble-mound breakwater.

Thus, the developed methodology, associated with a greater automation of procedures and optimization of computational resources, proved to be an efficient, reliable and easy-to-use tool in the runup estimation in tests on three-dimensional models of rubble-mound breakwaters with different obliquities of incident agitation.

Keywords: Runup, Rubble mound breakwaters, Three-dimensional physical model, Video analysis, *TimeStack* methodology

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do Tema.....	1
1.2	Objetivos e Metodologia.....	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	ESPRAIAMENTO EM QUEBRA-MARES DE TALUDES	5
2.1	Quebra-mares.....	5
2.2	Espraçamento	7
2.2.1	Generalidades	7
2.2.2	Fatores Condicionantes.....	9
2.3	Modelação Física de Quebra-mares de Talude.....	13
2.3.1	Introdução	13
2.3.2	Relação de Semelhança e Escolha da Escala.....	15
2.3.3	Fontes de Erros e Efeitos de Escala.....	18
2.4	Avaliação do Espraçamento em Modelo Físico	19
2.4.1	Sonda Resistiva.....	19
2.4.2	Análise de Vídeo através da Metodologia <i>TimeStack</i>	20
3	CASO DE ESTUDO - PORTO DAS LAJES DAS FLORES.....	23
3.1	Porto das Lajes das Flores	23
3.2	Ensaio em Modelo Físico	25
3.2.1	Caracterização Geral.....	25

3.2.2	Equipamento Experimental.....	26
3.2.3	Agitação Marítima e Níveis de Maré.....	28
3.2.4	Metodologia Geral dos Ensaios	29
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	31
4.1	Descrição da Metodologia desenvolvida para Análise do Espraimento.....	32
4.2	Análise de Resultados dos Ensaios	40
4.2.1	Rumo E20N.....	40
4.2.2	Rumo S35E.....	51
4.3	Análise Comparativa com a Formulação Empírica do EurOtop.....	64
5	CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO.....	69
	BIBLIOGRAFIA.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Quebra-mar de taludes (adaptado de Pedro, 2015): 1-Núcleo, 2-Submanto, 3-Manto resistente, 4-Superestrutura, 5- Pé do talude.	7
Figura 2.2 – Representação esquemática dos fenómenos de espraçamento e refluxo (adaptado de USACE, 2011).	8
Figura 2.3 – Representação esquemática dos diferentes tipos de rebentação (adaptado de EurOtop, Van der Meer et al., 2018).....	11
Figura 2.4 – Representação em planta do ângulo de incidência β	11
Figura 2.5 – Exemplos de blocos artificiais de betão: cubo Antifer (esquerda), Tetrápodo (direita)	12
Figura 2.6 – Modelos físicos 2D (esquerda) e 3D (direita) referentes ao prolongamento do quebra-mar exterior do porto de Leixões, LNEC.....	14
Figura 2.7 – Sonda resistiva	19
Figura 2.8 – Registo da série temporal obtido na sonda de espraçamento	20
Figura 3.1 – Açores. Flores. Porto das Lajes das Flores. Localização da zona em estudo (Google Earth e aerografica.pt)	24
Figura 3.2 – Situação anterior à passagem do furacão Lorenzo. Planta.....	24
Figura 3.3 – Perfil-tipo do troço do quebra-mar correspondente à zona de avaliação do espraçamento (adaptado de MSW, 2022)	26
Figura 3.4 – Aspeto do modelo físico	26
Figura 3.5 – Locais de medição da agitação marítima e posicionamento das sondas no modelo	27
Figura 3.6 – Localização da sonda de espraçamento e das duas sondas para a medição da agitação.....	27
Figura 3.7 – Câmaras de filmar	28

Figura 3.8 – Aspeto geral dos ensaios com os rumos: E20N (em cima); S35E (em baixo)	30
Figura 4.1 – Localização do transeto utilizado no cálculo do espraçamento.....	33
Figura 4.2 – Imagem <i>TimeStack</i> resultante da aplicação do módulo ExtractTSK.m (a) e sua correspondência no modelo (b)	34
Figura 4.3 – Imagens <i>TimeStack</i> . a) Original; b) Filtrado inicial; c) Filtrado final, com acerto de parâmetros.....	35
Figura 4.4 – Imagem que auxilia na visualização para saber se os parâmetros foram bem calibrados	35
Figura 4.5 – Seleção manual das cristas de espraçamento	36
Figura 4.6 – Resultando no sinal após a passagem do filtro passa-baixo	37
Figura 4.7 - Exemplo de pontos a serem removidos da lista de espraçamentos.....	38
Figura 4.8 – Projeção dos pontos relativos a cada espraçamento e dos parâmetros estatísticos da série temporal.....	39
Figura 4.9 – Eventos de espraçamento ao longo do talude e identificação dos pontos correspondentes a Ru_{max} , Ru_{min} , $Ru_{2\%}$, e Ru_{med}	39
Figura 4.10 - Rumo E20N. BM (em cima), PM (meio) e PMS (em baixo). Valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos através da medição com sonda e com a metodologia <i>TimeStack</i>	41
Figura 4.11 – Rumo E20N. BM. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	42
Figura 4.12 – Rumo E20N. BM. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	42
Figura 4.13 – Exemplo de caso onde a localização da sonda relativamente ao transeto poderá originar um lapso temporal/espacial, influenciando os resultados.	44
Figura 4.14 – Imagem TSK com ocorrências de galgamentos indicadas pelas setas vermelhas.	45
Figura 4.15 – Rumo E20N. PM. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	46
Figura 4.16 – Rumo E20N. PM. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	46
Figura 4.17 – Rumo E20N. PMS. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	49
Figura 4.18 – Rumo E20N. PMS. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	49

Figura 4.19 - S35E. BM, PM e PMS. Valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos através da medição com sonda e com a metodologia <i>TimeStack</i>	53
Figura 4.20 – Rumo S35E. BM. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	54
Figura 4.21 – Rumo S35E. BM. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e $T_p=20$ s.....	54
Figura 4.22 – Rumo S35E. PM. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	57
Figura 4.23 – Rumo S35E. PM. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	57
Figura 4.24 – Rumo S35E. PMS. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	60
Figura 4.25 – Rumo S35E. PMS. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	60
Figura 4.26 – Rumo S35E. Visualização espaçamento entre os cubos no talude (imagem à esquerda) visualização do efeito na imagem TSK (imagem à direita) visualização dos efeitos de retenção da água no espaçamento entre os cubos no sinal (imagem a baixo).....	63
Figura 4.27 – Rumo S35E. fenómeno de retenção de água na berma de coroamento (à esquerda) e respetivos efeitos na imagem TSK (à direita).....	63
Figura 4.28 – S35E. Comparação entre os resultados ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir da sonda e da metodologia <i>TimeStack</i> com os valores estimados pela formulação do EurOtop	66
Figura 4.29 – E20N. Comparação entre os resultados ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir da sonda e da metodologia <i>TimeStack</i> com os valores estimados pela formulação do EurOtop	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais fatores de conversão entre o modelo e protótipo, tendo em conta a semelhança de Froude	16
Tabela 3.1 – Rumos E20N e S35E. Ensaios de agitação e de espraçamento. Condições de agitação marítimas relativas ao programa de ensaios, realizados para cada um dos níveis de maré BM, PM e PMS.....	29
Tabela 4.1 - Comparação entre os resultados obtidos com o <i>TimeStack</i> e com sonda. Resultados relativos ao estado de agitação com rumo E20N e níveis de maré de BM, PM e PMS	40
Tabela 4.2 - Rumo E20N. BM. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s	43
Tabela 4.3 - Rumo E20N. PM. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s	47
Tabela 4.4 - Rumo E20N. PMS. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s	50
Tabela 4.5 - Rumo S35E. Comparação entre os resultados obtidos com o <i>TimeStack</i> e com sonda. Resultados relativos ao estado de agitação e níveis de maré de BM, PM e PMS.....	52
Tabela 4.6 - Rumo S35E. BM. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s	55
Tabela 4.7 - S35E. PM. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s.....	57
Tabela 4.8 - Rumo S35E. PMS. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s	60

Tabela 4.9 - Rumo S35E. Comparação entre os resultados de espraçamento ($Ru_{2\%}$) e de espraçamento relativo ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir da sonda e da metodologia <i>TimeStack</i> com os valores estimados do EurOtop	64
Tabela 4.10 - Rumo E20N. Comparação entre os resultados de espraçamento ($Ru_{2\%}$) e de espraçamento relativo ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir da sonda e da metodologia <i>TimeStack</i> com os valores estimados do EurOtop	65

SÍMBOLOS

B	Largura da berma	(m)
dB	Distância vertical entre o meio da berma e o nível de água	(m)
D_n	Diâmetro nominal de um bloco	(m)
g	Aceleração da gravidade	(m/s ²)
H_s	Altura significativa	(m)
H_{m0}	Altura significativa espectral do estado de agitação	(m)
L_{m-1,0}	Comprimento da onda espectral	(m)
T_p	Período de pico	(s)
R_c	Desnível entre o máximo do nível de água e o coroamento da estrutura	(m)
R_e	Número de Reynolds	(-)
R_{u_s}	Espraçamento significativo, isto é a média dos 1/3 dos maiores espraia- mentos num registo	(m)
R_{u_m}	Espraçamento médio	(m)
R_{u_{max}}	Altura do maior Run-up	(m)
R_{u_{med}}	Mediana do Espraçamento	(m)
R_{u_{1/10}}	Média de 1/10 dos maiores espraçamentos num registo	(m)
R_{u_{2%}}	Espraçamento excedido apenas por 2% de todos os espraçamentos	(m)
T_{m-1,0}	Período médio espectral	(s)

W_m	Massa dos blocos no modelo	(g)
W_p	Massa dos blocos no protótipo	(kg)
ZH	Zero Hidrográfico	(m)
α	Ângulo do talude com a horizontal	(°)
β	Ângulo de incidência entre a direção de propagação das ondas e o eixo perpendicular à estrutura	(°)
γ_b	Coeficiente de redução devido a influência da existência da berma	(-)
γ_β	Coeficiente de redução devido a influência da obliquidade da onda	(-)
γ_f	Coeficiente de redução devido a influência da rugosidade/permeabilidade da estrutura	(-)
$\xi_{m-1,0}$	Parâmetro de rebentação da onda ou chamado número de Iribarren	(-)
π	Constante de Arquimedes com valor aproximado de 3.14	(-)
$\rho_{n,m}$	Massa volúmica dos blocos de proteção no modelo	(kg/m ³)
$\rho_{n,p}$	Massa volúmica dos blocos de proteção no protótipo	(kg/m ³)
λ	Escala do modelo	(1/λ)
Δ_m	Densidade submersa no modelo	(-)
Δ_p	Densidade submersa no protótipo	(-)

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do Tema

A determinação do espraçamento nas estruturas costeiras e portuárias é fundamental para compreender a ocorrência do galgamento, estudar as inundações e avaliar o seu impacto na segurança das pessoas e no normal desempenho das atividades económicas nas áreas protegidas por essas estruturas. Além disso, é uma componente crucial no dimensionamento da altura do coroamento das obras marítimas, em particular, em quebra-mares de talude, pois está relacionado ao galgamento destas estruturas.

Em complemento, a maioria dos cenários climáticos preveem o aumento do nível médio do mar, bem como o aumento da intensidade e a frequência de ventos e tempestades (IPCC, 2014), podendo causar mudanças na agitação marítima (alturas e períodos de onda) que atinjam as obras marítimas, incluindo mudanças na direção de incidência predominante dos estados de agitação. Estas alterações terão consequências a nível do espraçamento (e galgamento) que pode afetar a estabilidade e a funcionalidade dos quebra-mares de taludes, situação que deverá convenientemente caracterizada.

Nesse âmbito, uma das metodologias comuns para a determinação do espraçamento de quebra-mares (em cenários correntes ou em cenários de alterações climáticas) é a utilização da modelação física. Nesse sentido, esta determinação é efetuada, usualmente, em modelo físico reduzido bidimensional (2D) ou tridimensional (3D), recorrendo a uma sonda colocada sobre o talude do quebra-mar, procedimento que depende fortemente do modo de colocação da sonda. Com efeito, para uma determinação fidedigna do espraçamento, a instalação da sonda sobre o talude tem de ser "perfeita", sem que ocorra passagem de lâminas de água sob a sonda, nem salpicos na sonda em cotas mais elevadas, fatores que poderão conduzir,

respetivamente, a uma subestimação ou sobrestimação dos valores de espraçamento medidos. Dependendo do tipo de blocos naturais ou artificiais do talude e da sua inclinação nem sempre se consegue essa aplicação "perfeita".

Por outro lado, em ensaios 3D a medição do espraçamento fica limitada ao local de colocação da sonda no modelo físico, o que é bastante limitativo naqueles ensaios, dado que, devido à obliquidade da agitação, o espraçamento é variável de zona para zona do quebra-mar.

Para minorar estes problemas, foi desenvolvida uma metodologia baseada no uso de câmaras de filmar e de técnicas de processamento de imagem, seguindo a metodologia *TimeStack* (Andriolo et al., 2016, Andriolo, 2019a, 2019b). Esta metodologia consiste na utilização de algoritmos desenvolvidos em MATLAB que permitem a extração de "*frames*" do vídeo a analisar e delas extrair todos os pixels que se encontram num caminho (transepto) pré-definido, construindo, assim, uma imagem *TimeStack*, com os pixéis extraídos ao longo do período de duração do filme. Nesta imagem é possível identificar as cristas do espraçamento ocorridas durante o período de ensaio em análise. A identificação, manual ou através de um programa, das posições das cristas, permite obter a série temporal dos espraçamentos.

Esta metodologia já foi aplicada com sucesso a ensaios em modelo físico bidimensional, (Lemos et al., 2019, 2023a, 2023b). No entanto, um dos procedimentos para a sua aplicação envolve trabalho manual (detecção das cristas de espraçamento) que é muito moroso e sujeito a erros que podem ser muito significativos.

A aplicação desta metodologia com recurso à análise de imagens vídeo a ensaios de modelo tridimensional, a melhoria e a automatização desta metodologia sem recurso a trabalho manual e a análise em situações de obliquidade da agitação marítima incidente são os assuntos que se abordam na presente dissertação.

1.2 Objetivos e Metodologia

O objetivo principal do presente trabalho é o aperfeiçoamento, aplicação e validação da metodologia de determinação do espraçamento em modelos físicos tridimensionais de quebra-mares de talude, baseada na análise de imagens de vídeo com recurso à técnica *TimeStack* (Andriolo, 2019b, Lemos *et al.*, 2023b). Pretende-se que esta nova metodologia seja computacionalmente eficiente e aplicável a modelos físicos tridimensionais com diferentes obliquidades da agitação incidente num quebra-mar de taludes.

A nova metodologia é uma extensão da técnica previamente desenvolvida para modelos físicos bidimensionais que se baseia na metodologia *TimeStack*, tornando-a aplicável a modelos tridimensionais e a diferentes obliquidades da agitação incidente. Nesse sentido, no âmbito desta dissertação, foram efetuados melhoramentos dos algoritmos existentes e desenvolvimentos de novos algoritmos, com vista à automatização dos procedimentos e à otimização dos recursos computacionais.

Mais concretamente, a metodologia adotada consistiu na utilização de diferentes filtros e métodos de análise de imagem com vista a automatizar o processo de seleção das cristas de espraçamento na imagem *TimeStack*. Por outro lado, para lidar com vídeos de grande duração (i.e., com durações superiores a 10 minutos) incompatível com os meios computacionais disponíveis, bem como os elevados tempos de processamento da extração das imagens a partir do vídeo, foi criado um módulo que permite dividir o vídeo original em vídeos parciais (tantos quantos os necessários). Cada vídeo parcial é tratado individualmente, conduzindo a imagens *TimeStack* individuais, as quais são fundidas no final do módulo seguinte. Obtém-se, assim, uma imagem *TimeStack* correspondente à duração integral do vídeo.

A aplicação e validação desta metodologia foi efetuada em ensaios no tanque de ondas irregulares do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), utilizando o modelo reduzido tridimensional construído aquando do estudo da reconstrução do quebra-mar do porto das Lajes das Flores, Flores, Açores.

Durante os ensaios foram realizadas medições do espraçamento utilizando o método convencional, isto é, com uma sonda resistiva colocada sobre o talude do quebra-mar. Foram também realizadas medições do espraçamento, recorrendo à metodologia melhorada de análise dos vídeos obtidos durante os ensaios, com recurso à metodologia *TimeStack*.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho desenvolve-se em 5 capítulos.

Após o capítulo introdutório, apresentam-se no Capítulo 2, aspetos relacionados com o espraçamento em quebra-mares de taludes. Assim, é efetuada a descrição dos diferentes tipos de quebra-mares e dos seus constituintes, bem como do fenómeno de espraçamento e fatores condicionantes. Descreve-se os conceitos fundamentais da modelação física em quebra-mares de talude, sendo abordadas as condições de semelhança entre o modelo físico e o protótipo, a escolha da escala, fontes de erro e efeitos de escala. Termina este subcapítulo a descrição da

avaliação do espraçamento em modelo físico e das metodologias utilizadas nos ensaios para determinação do espraçamento.

O Capítulo 3 é dedicado ao caso de estudo do quebra-mar de proteção do Porto das Lajes das Flores, na ilha das Flores do arquipélago dos Açores, começando com uma breve introdução, e descrevendo os ensaios em modelo físico, nomeadamente as instalações de ensaio, o modelo físico, o equipamento experimental utilizado na geração e medição da agitação, do espraçamento e na aquisição de imagens, as condições de ensaio e a metodologia geral dos ensaios

O Capítulo 4 inicia-se com a descrição do algoritmo desenvolvido nesta tese para estimar o espraçamento em quebra-mares de talude, a partir da análise de imagem vídeo obtida com a técnica *TimeStack*, o qual foi modificado para permitir a automatização da identificação das cristas de espraçamento nas imagens de vídeo e incluir procedimentos para a otimização dos recursos computacionais. Em seguida, efetua-se a apresentação e análise dos resultados experimentais obtidos através das diferentes metodologias, bem como o estudo dos efeitos da obliquidade no espraçamento em quebra-mar de talude.

A dissertação termina, no Capítulo 5, com a apresentação das conclusões advindas do trabalho realizado e das perspectivas de desenvolvimento das metodologias utilizadas, bem como algumas recomendações para estudos futuros.

ESPRAIAMENTO EM QUEBRA-MARES DE TALUDES

Neste capítulo aborda-se os conceitos básicos relacionados com quebra-mares de talude e o fenómeno do espraçamento. são também referidos conceitos fundamentais da modelação física em quebra-mares de talude (condições de semelhança entre o modelo físico e o protótipo, a escolha da escala, fontes de erro e efeitos de escala). Por fim, descrevem-se as metodologias utilizadas nos ensaios em modelo físico para a medição do espraçamento bem como para a análise de resultados.

2.1 Quebra-mares

Os quebra-mares são estruturas construídas com o intuito de criar zonas de abrigo em áreas costeiras, constituindo um obstáculo à propagação normal de ondas de gravidade geradas pelo vento sobre uma superfície de água. Exemplos das funções dos quebra-mares são:

- Permitir a atracação de navios;
- Garantir a segurança das operações de carga e descarga de navios;
- Proteger as instalações portuárias;
- Melhorar as condições de manobra na entrada de portos.

A ação da onda é reduzida através de uma combinação de reflexão e de dissipação da energia da agitação incidente no quebra-mar de talude.

Os principais tipos de quebra-mares convencionais são:

- Quebra-mar de talude;
- Quebra-mar vertical;
- Quebra-mar misto.

Estes quebra-mares, no caso de existir ligação a terra, são denominados enraizados, caso contrário serão denominados destacados.

A seleção do quebra-mar a utilizar numa dada zona costeira depende:

- Disponibilidade de materiais utilizados na construção;
- Disponibilidade do equipamento adequado a construção;
- Profundidade do local de implantação;
- Função do quebra-mar.

Em Portugal, os quebra-mares de taludes são as estruturas mais comuns nas obras de abrigo portuário e defesa costeira, sendo essencialmente concebidas para a redução da agitação marítima das zonas abrigadas por essas estruturas, possibilitando, desse modo, uma melhoria das condições de navegação e operação dentro do porto e uma garantia das condições de segurança das pessoas e bens, durante o tempo de vida útil da estrutura.

Este tipo de quebra-mar tem como principais vantagens:

- Facilidade de construção, pois não são necessários equipamentos especializados;
- Pode ser construído em fundos sem características de resistência especiais e irregulares;
- Manutenção simples, do ponto de vista técnico;
- Não existe limitações quanto à profundidade.

Contudo, tem algumas desvantagens tais como, por exemplo, a necessidade de grandes quantidades de materiais de construção e a manutenção periódica.

De uma forma simplificada, os quebra-mares de taludes são constituídos por (Figura 2.1):

1. Núcleo: zona de enchimento, de forma prismática, situada no interior do quebra-mar, e geralmente constituída por material de dimensões variadas designado T.O.T. (todo o tamanho). Tem como função atenuar a propagação das ondas, suportar o manto resistente e o submanto;
2. Submanto: zona constituída por uma ou mais camadas de enrocamentos selecionados, de pesos iguais ou diferentes. Destina-se a evitar a saída de finos do núcleo, protegendo-o da erosão, e aumentar a porosidade do talude, apresenta a função de filtro separando o material mais fino do núcleo do material do manto resistente;
3. Manto resistente: faixa externa do talude e sobre o qual se dá o embate direto das ondas. É constituído por blocos (naturais ou artificiais) dispostos, em geral, em duas

camadas. Tem como função dissipar a energia das ondas da agitação e prevenir a erosão do submanto e do núcleo devido a ação da agitação marítima;

4. Superestrutura: bloco de betão ou alvenaria, em geral maciço, de coroamento. Destina-se a facilitar o acesso a veículos, incluindo gruas para a sua manutenção, permitindo ainda a instalação de infraestruturas, como por exemplo “pipe-lines”. Poderá ainda ter um muro-cortina, cuja função é melhorar a segurança ao galgamento;
5. Pé do talude ou Risberma: constituído por enrocamento ou blocos, tem como função o suporte da camada resistente do manto.

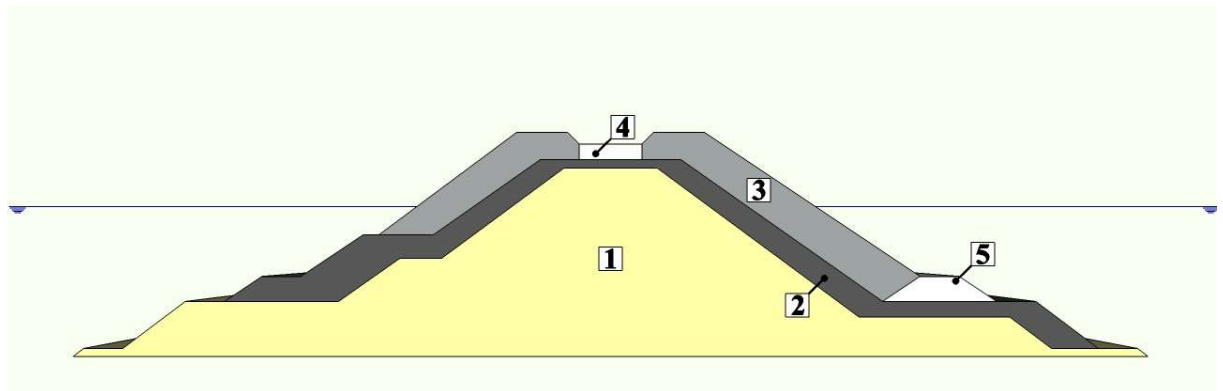


Figura 2.1 – Quebra-mar de taludes (adaptado de Pedro, 2015): 1-Núcleo, 2-Submanto, 3-Manto resistente, 4-Superestrutura, 5- Pé do talude.

2.2 Espraçamento

2.2.1 Generalidades

O impacto da agitação marítima incidente em quebra-mares de taludes pode causar danos na estrutura e equipamentos, suspensão das atividades pesqueiras, condicionamento da náutica e operacionalidade do porto, restrição de atividades turísticas, interrupção da circulação de pessoas e tráfego em zonas de risco e, num cenário mais grave, a perda de vidas humanas (Silva et al., 2012).

Assim, importa compreender e antever de uma forma correta os fenómenos que resultam da interação das estruturas marítimas com a ação das ondas (refração, difração, rebentação, espraçamento, galgamento, etc.). Desses fenómenos, salienta-se, neste trabalho, o espraçamento.

Designa-se como espraçamento, ou *run-up* (R_u), a cota máxima atingida por uma onda, medida na vertical acima do nível de repouso da água. O refluxo, ou *run-down*, R_d , é referente à fase de oscilação descendente em que a onda atinge a cota mínima (*set-down*), ou seja, abaixo do nível de água estática (Antunes do Carmo, 2016). O espraçamento é assim definido através da altura na vertical, R_u , que a água atinge sobre a estrutura em relação ao nível de água em repouso. A Figura 2.2 apresenta o fenómeno de espraçamento e de refluxo, com o nível definido pela distância vertical entre o nível de água em repouso e as cotas máxima e mínima atingidas pela onda incidente, respetivamente.

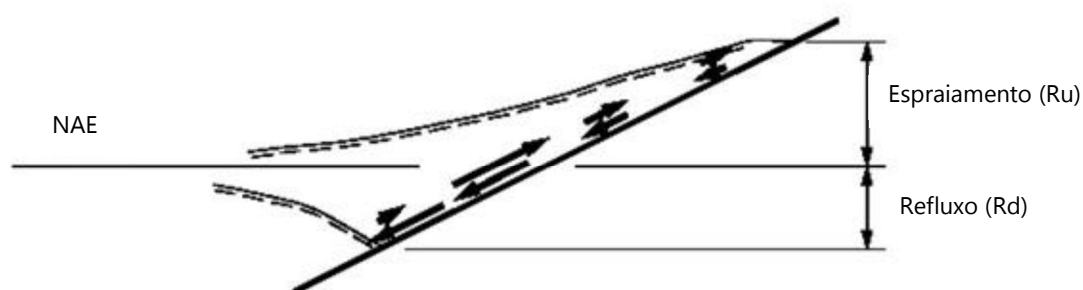


Figura 2.2 – Representação esquemática dos fenómenos de espraçamento e refluxo (adaptado de USACE, 2011).

Se essa altura máxima, R_u (espraçamento), for superior ao bordo livre da estrutura, R_c (desnível entre a cota de coroamento da estrutura e o nível da água em repouso), dá-se o galgamento da estrutura, razão pela qual o espraçamento tem um papel importante no dimensionamento da altura do coroamento do quebra-mar de forma a mitigar a ocorrência do galgamento.

Segundo o European Overtopping Manual, EurOtop (Van der Meer et al., 2018), a altura de espraçamento associada a um estado de agitação pode ser caracterizada por $R_{u2\%}$. Esta é a altura de espraçamento, que é excedida por 2% do número de ondas incidentes num registo de um estado de agitação. Pode ser estimada pela equação:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.65 * \gamma_b * \gamma_f * \gamma_\beta * \xi_{m-1,0} \quad \text{Eq. 2.1}$$

H_{m0} - Altura da onda significativa espectral

γ_b - Coeficiente de influência da existência da berma no talude da estrutura

γ_f - Coeficiente de influência da rugosidade/permeabilidade da estrutura

γ_β - Coeficiente de influência da obliquidade das ondas relativamente a estrutura

$\xi_{m-1,0}$ - Parâmetro de rebentação da onda ou chamado número de Iribarren que é dado pela equação:

$$\xi_{m-1,0} = \frac{\tan \alpha}{\left(H_{m0}/L_{m-1,0}\right)^{1/2}} \quad \text{Eq. 2.2}$$

em que $L_{m-1,0}$ é o comprimento de onda espectral, determinado da seguinte forma:

$$L_{m-1,0} = \frac{(g * T_{m-1,0})}{2\pi} \quad \text{Eq. 2.3}$$

sendo g a aceleração da gravidade e $T_{m-1,0}$ o período médio espectral do estado $m0$ de agitação calculado com os momentos de ordem -1 e 0 do espectro.

De notar que os valores do espraçamento fornecidos pela Eq. 2.1 não podem ultrapassar o limite superior dado por:

$$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1 * \gamma_{f \text{ surging}} * \gamma_\beta * \left(\frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b} * \xi_{m-1,0}} \right) \quad \text{Eq. 2.4}$$

Assim, o valor a ser considerado na estimativa do espraçamento será o menor dos valores obtidos entre a Eq. 2.1 e a Eq. 2.4.

De notar que, para valores de $1.8 \leq \xi_{m-1,0} \leq 10$, o fator de rugosidade γ_f aumenta linearmente até 1 de acordo com:

$$\gamma_{f \text{ surging}} = \gamma_f + \frac{(\xi_{m-1,0} - 1.8) * (1 - \gamma_f)}{8.2} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Com um máximo de $R_{u2\%}/H_{m0} = 3,0$ para estruturas com um núcleo impermeável e 2,0 para um núcleo permeável.

2.2.2 Fatores Condicionantes

Na interação entre a onda e a estrutura, são vários os fatores que podem condicionar o fenómeno de espraçamento, sendo importante a análise pormenorizada de cada um desses

fatores. É possível identificar fatores relacionados com as condições da agitação marítima e fatores relacionados com a morfologia das estruturas costeiras.

A agitação marítima é o principal fator condicionante do espraçamento. A sua ação é caracterizada pelos valores característicos da altura da onda, do período da onda e da direção de propagação de estado de agitação.

Outro fator que influencia o espraçamento é o tipo de rebentação da onda sobre a estrutura, que se pode definir com base no número de Iribarren, $\xi_{m-1,0}$.

A forma como a onda rebenta sobre a estrutura influencia fortemente o espraçamento. O número de Iribarren, equação (2.2), é um parâmetro adimensional que relaciona o declive da estrutura onde a onda se propaga com a declividade da onda.

O número de Iribarren permite classificar o tipo de rebentação das ondas, podendo-se distinguir a rebentação progressiva (*spilling*), a rebentação mergulhante (*plunging*), a rebentação colapsante (*collapsing*) e a rebentação de fundo (*surging*).

Para valores de $\xi_{m-1,0} < 0.2$ associa-se a ocorrência de rebentação Progressiva, onde a dissipação de energia ocorre numa maneira continua num percurso relativamente longo, formando uma esteira de espuma sobre o talude. Este tipo de rebentação ocorre normalmente em fundos quase horizontais, ou seja, zonas com declive suave.

Quando a rebentação ocorre de forma súbita, com a crista a dobrar-se em voluta e a cair para a frente, tem-se rebentação Mergulhante, que ocorre normalmente em zonas de declive intermédio e correspondendo a valores do número de Iribarren, $0.2 < \xi_{m-1,0} < 2$ e 3.

Rebentação Colapsante é o tipo de rebentação em que a crista de onda não chega verdadeiramente a rebentar por completo, embora a face da onda se torne progressivamente mais inclinada, acabando por colapsar com grande produção de espuma. Ocorre normalmente em zonas com grande declive do fundo ou quando a declividade da onda é relativamente pequena. Corresponde a valores do número de Iribarren no intervalo aproximado de $\xi_{m-1,0} \approx 2$ a 3.

Por fim, para valores de número de Iribarren superiores a 2-3, ocorrerá uma rebentação de Fundo, normalmente associada a declives acentuados. A crista e a face frontal da onda mantêm-se praticamente inalteradas à medida que a onda atinge a costa, podendo não ocorrer qualquer rebentação. A Figura 2.3 ilustra os diferentes tipos de rebentação.

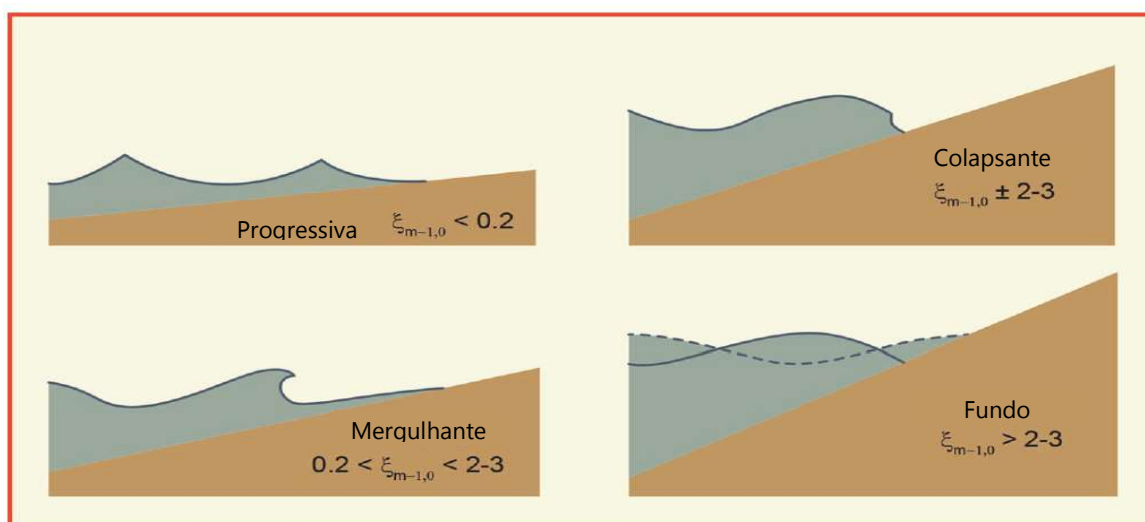


Figura 2.3 – Representação esquemática dos diferentes tipos de rebentação (adaptado de EurOtop, Van der Meer et al., 2018)

Outro fator que pode afetar o espraçamento relaciona-se com o ângulo de incidência das ondas, β . Na análise da rebentação das ondas através do número de Iribarren descrito anteriormente, não se leva em conta o ângulo de incidência das ondas, β . Este é definido pelo ângulo entre a direção de propagação da onda e a direção perpendicular à estrutura (Figura 2.4). Assim, para ondas com incidência perpendicular à estrutura corresponde um valor de $\beta = 0^\circ$.

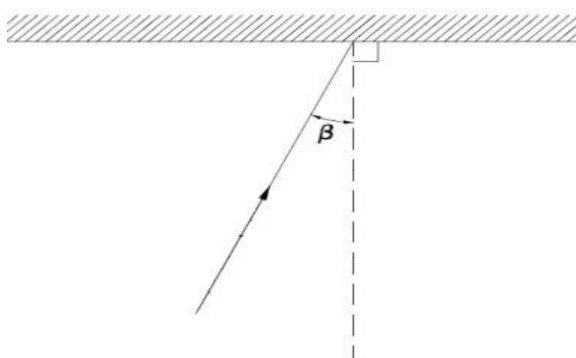


Figura 2.4 – Representação em planta do ângulo de incidência β

A direção principal das ondas determina o ângulo de incidência, mas devido à dispersão direcional das ondas na natureza (ondas de crista curta), existem ondas com ângulos de ataque diferentes da direção principal. Assim, mesmo que a direção principal seja maior que 90° , haverá sempre ondas que atingirão a estrutura. Essa quantidade de ondas que ainda atinge a estrutura torna-se menor para ângulos de incidência maiores, influenciando, assim, o espraçamento e o galgamento. Este processo é descrito no Manual Europeu de Galgamento (*EurOtop, Van der Meer et al., 2018*).

Outros fatores que condicionam o espraçamento são as características da estrutura, nomeadamente dos quebra-mares de talude, pois estes têm um papel essencial no controlo e mitigação do espraçamento e, conseqüentemente do galgamento. Desde o seu material até à geometria, todos devem ser cuidadosamente estudados, pois tanto podem amenizar o espraçamento como podem amplificá-lo.

No dimensionamento da estrutura tem de ser analisada a distância vertical entre o coroamento da estrutura e o nível de água em repouso (R_c), um parâmetro de elevada importância. A solução mais vantajosa, seria adotar estruturas com cotas de coroamento muito altas. No entanto, estas soluções acarretam investimentos elevados e fortes impactos visuais em zonas turísticas. A rugosidade, a permeabilidade e o declive dos taludes, bem como a eventual berma, têm grande importância na caracterização do espraçamento.

A rugosidade e a permeabilidade do manto resistente são características que refletem o tipo de material constituinte do manto da estrutura, e a sua disposição. Não existe nenhuma norma específica para a utilização dos diferentes tipos de materiais. A escolha depende essencialmente do peso requerido para garantir a estabilidade da estrutura. Os quebra-mares de taludes eram inicialmente constituídos por enrocamentos lançados de forma a criar uma secção transversal trapezoidal. Atualmente podem também ser utilizados os blocos artificiais de betão (Figura 2.5), cujas formas e tamanhos são analisados e ajustados para melhorar o desempenho do quebra-mar face às condições a que são expostos.



Figura 2.5 – Exemplos de blocos artificiais de betão: cubo Antifer (esquerda), Tetrápodo (direita)

Em casos onde seja necessário um aumento da dissipação da energia, pode ser colocada uma berma no talude exterior. A berma é uma descontinuidade no perfil do talude, caracterizada pela sua profundidade (dB), a distância vertical entre o meio da berma e o nível da água, e pela sua largura (B). Quanto maior for essa largura, maior será a dissipação de energia, desde que a berma esteja a uma profundidade relevante para a dissipação de energia.

2.3 Modelação Física de Quebra-mares de Talude

2.3.1 Introdução

O espraçamento (e galgamento) em estruturas marítimas são fenómenos complexos e de difícil quantificação, pelo que é fundamental o conhecimento destes fenómenos que resultam da interação da agitação incidente com as estruturas marítimas, de forma a diminuir os possíveis estragos provocados nestas estruturas pela agitação marítima, aquando do seu dimensionamento (Rodrigues, 2011) ou durante a sua vida útil. Estas ocorrências dependem essencialmente das características das ondas e da estrutura marítima.

Os ensaios em modelo físico são, sem dúvida, uma representação suficientemente aproximada do conjunto de fenómenos envolvidos na interação da agitação incidente com as estruturas marítimas, permitindo a simulação simultânea de vários fenómenos (Fortes *et al.*, 2014). Os autores acrescentam ainda que a modelação física acaba por ser mais eficiente a modelar fenómenos físicos que os métodos empíricos, podendo também ser usada na calibração/validação de modelos numéricos.

Estes ensaios são realizados à escala reduzida, utilizando-se a menor escala possível, de modo a obter um modelo o mais próximo possível do tamanho real reduzindo-se os possíveis efeitos de escala.

Atendendo a que os quebra-mares de taludes são estruturas cujo dimensionamento hidráulico/estrutural do manto resistente carece de validação através de ensaios em modelo físico reduzido, todos os fenómenos de interação onda-estrutura acima descritos, terão de ser representados o mais fielmente possível.

De acordo com a zona da estrutura representada, os estudos em modelo físico podem dividir-se em tridimensionais (3D) ou bidimensionais (2D). Nos ensaios tridimensionais, é reproduzida a linha de costa da zona em estudo, a batimetria e a geometria das obras, de modo a simular o melhor possível os fatores intervenientes nas características da agitação reproduzidas. Este tipo de ensaios é realizado em tanques de ondas. Nos ensaios bidimensionais reproduz-se apenas um trecho (secção transversal) da obra em estudo, sendo construídos e explorados em canais de ondas irregulares. Em ambos os casos, o objetivo dos ensaios é a análise do comportamento hidráulico e/ou estrutural, face à ação da agitação marítima.

Um ensaio consiste, normalmente, na atuação de um estado de agitação caracterizado por uma altura de onda significativa (H_s), um período de pico (T_p) proveniente de uma determinada direção de agitação (rumo), para um determinado nível de maré.

Na Figura 2.6 são apresentados exemplos de modelos físicos 2D e 3D referentes ao prolongamento do quebra-mar exterior do porto de Leixões.

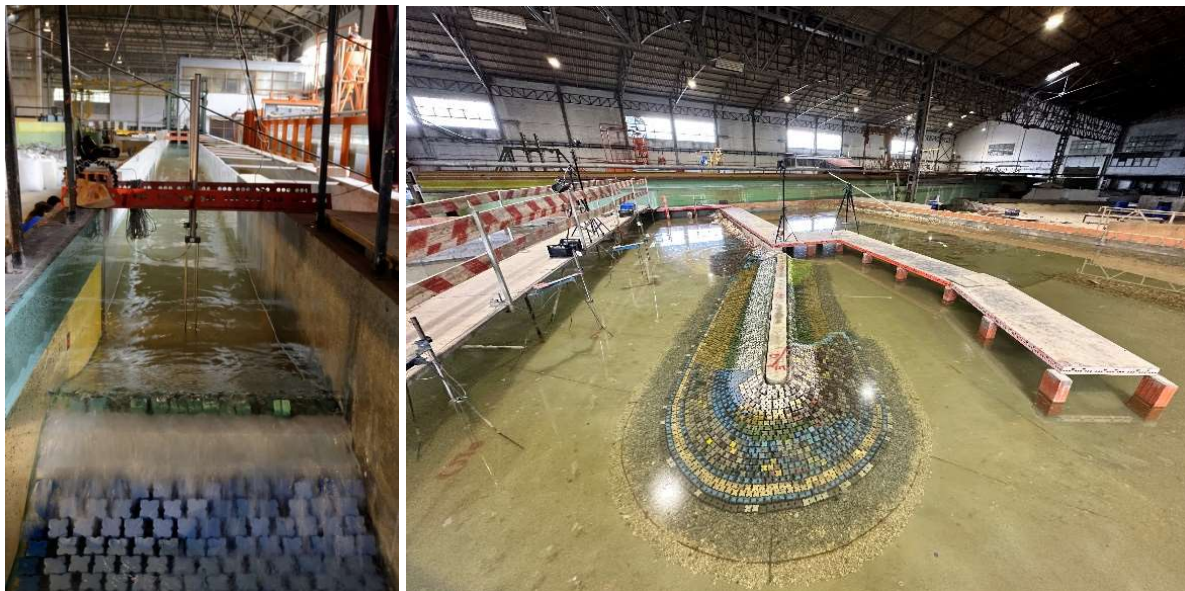


Figura 2.6 – Modelos físicos 2D (esquerda) e 3D (direita) referentes ao prolongamento do quebra-mar exterior do porto de Leixões, LNEC

Os ensaios em modelo físico (3D ou 2D) de quebra-mares de taludes podem ainda ser classificados segundo os seus objetivos. Poderão classificar-se em:

- Ensaios de estabilidade: têm como finalidade avaliar as quedas e os movimentos do manto resistente (blocos artificiais e/ou enrocamento) para cada troço da estrutura em estudo, quando sujeita à agitação marítima incidente. Em geral, essa avaliação é visual, permitindo determinar a percentagem de quedas e movimentos totais. Com base nessa percentagem, é atribuído um grau de classificação de quedas e movimentos de acordo com uma tabela em uso no LNEC (Lemos & Silva, 2013). De notar que sendo esta observação visual, ela é fortemente condicionada pela experiência e sensibilidade do observador;
- Ensaios de agitação, nos quais é feita a aquisição dos dados das sondas colocadas nos locais onde se pretende estudar a agitação marítima. Usualmente, com os dados adquiridos durante este tipo de ensaios, são calculados os índices de agitação em cada ponto de interesse, são calculados através da relação entre as alturas de onda significativas (H_s) verificadas em cada ponto e as verificadas à saída do gerador;

- Ensaios de pressão, os quais, tal como o próprio nome indica, têm como finalidade avaliar as pressões exercidas pela agitação marítima sobre determinados pontos da estrutura, através da utilização de sensores de pressão;
- Ensaios de galgamento: contemplam a qualificação visual dos galgamentos bem como a sua quantificação;
- Ensaios de espraçamento: contemplam a determinação da cota máxima atingida por uma onda no talude da estrutura, medida na vertical acima do nível de repouso da água.

Todos os tipos de modelo físico contemplam uma 1ª fase de construção, onde é feita a preparação dos elementos a reproduzir, seguindo-se a implantação da batimetria e a construção da obra marítima e zona costeira adjacente. Numa 2ª fase é feita a exploração do modelo, a qual contempla a calibração da agitação marítima e a realização do programa de ensaios previsto. Finalmente, numa 3ª fase, procede-se à análise e interpretação dos dados obtidos bem como da preparação dos relatórios finais.

2.3.2 Relação de Semelhança e Escolha da Escala

É importante que o comportamento do modelo e do protótipo seja semelhante (semelhança modelo-protótipo) de modo a inferir dos ensaios o que se passa na realidade. Para tal, é necessário verificar-se a semelhança geométrica (relação constante entre comprimentos homólogos), cinemática (relação constante entre movimentos homólogos) e dinâmica (relação constante entre forças homólogas).

Para que todos os fenómenos envolvidos sejam bem reproduzidos à escala, ou seja, sejam os mesmos no modelo e no protótipo, os números de Froude, Weber, Reynolds e Cauchy deveriam ser iguais no modelo e no protótipo. No entanto, estes critérios não podem ser satisfeitos simultaneamente. Assim, de acordo com os principais fenómenos em jogo, opta-se por um destes números e com base nele definem-se as escalas do modelo.

Nos ensaios em modelo reduzido de quebra-mares, os principais fenómenos são associados a escoamentos em superfície livre, ou seja, as forças da gravidade e inércia são extremamente importantes. A fim de garantir a semelhança entre os escoamentos no modelo e no protótipo é necessário respeitar a semelhança de Froude, isto é, terá de se garantir a igualdade entre o número de Froude no modelo e o número de Froude no protótipo.

É necessário ter em conta que a semelhança de Froude só será relevante quando as forças de viscosidade, sempre presentes, forem desprezáveis em relação às forças de gravidade e

de inércia. Quando essas forças não são desprezáveis, terá de ser respeitada, também, a semelhança de Reynolds.

De modo a assegurar que o escoamento nas camadas do manto de proteção é turbulento no modelo (tal como no protótipo, sob as condições de projeto), deverá ser cumprido o seguinte critério relativo ao número de Reynolds (R_e) (Eq. 2.6):

$$R_e = \frac{\sqrt{g H_s \cdot D_n}}{\nu} > 3 \cdot 10^4 \quad \text{Eq. 2.6}$$

sendo:

- R_e – Número de Reynolds;
- H_s – Altura significativa (m);
- D_n – Diâmetro nominal de um bloco (m);
- g – Aceleração da gravidade (m/s^2);
- ν – Viscosidade cinemática da água ($= 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) (m^2/s).

Os principais fatores de conversão entre o modelo e protótipo, tendo em conta a semelhança de Froude, estão apresentados na seguinte tabela (Tabela 2.1):

Tabela 2.1 – Principais fatores de conversão entre o modelo e protótipo, tendo em conta a semelhança de Froude

Parâmetros	Froude
Equação	$\frac{U}{\sqrt{g l}} = \text{Constante}$
Comprimento/ Altura	$L_p = L_m \cdot \lambda$
Área	$A_p = A_m \cdot \lambda^2$
Volume	$V_p = V_m \cdot \lambda^3$
Tempo/ Período	$T_p = T_m \cdot \sqrt{\lambda}$
Velocidade	$U_p = U_m \cdot \sqrt{\lambda}$

onde:

- λ - Escala
- U - Velocidade do fluido (m/s);
- g - Aceleração da gravidade (m/s^2);
- l - Profundidade
- L_p - Comprimento no protótipo
- L_m - Comprimento no modelo
- A_p - Área no protótipo
- A_m - Área no modelo
- V_p - Volume no protótipo
- V_m - Volume no modelo
- U_p - Velocidade no protótipo
- U_m - Velocidade no modelo
- T_p - Tempo no protótipo
- T_m - Tempo no modelo

A relação entre as massas dos blocos no modelo e no protótipo é dada pela Eq. 2.7. Esta equação é essencial para a determinação da escala do modelo, pois garante que o número de estabilidade entre o protótipo e o modelo são iguais, e permite determinar a mesma conhecendo o peso dos blocos do modelo que se querem utilizar e vice-versa.

$$W_m = \left(\Delta_p \cdot \frac{(W_p \cdot 1000)^{1/3}}{\Delta_m \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\rho_{a,m}}{\rho_{a,p}} \right)^{1/3} \right)^3 \quad \text{Eq. 2.7}$$

sendo:

- W_m – Massa dos blocos no modelo (g);
- W_p – Massa dos blocos no protótipo (kg);
- $\rho_{a,m}$ – Massa volúmica dos blocos de proteção no modelo (kg/m^3);
- $\rho_{a,p}$ – Massa volúmica dos blocos de proteção no protótipo (kg/m^3);
- λ – Escala do modelo ($1/\lambda$);
- Δ_m e Δ_p – Densidade submersa no modelo e no protótipo, dada por (Eq. 2.8):

$$\Delta = \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w}$$

Eq. 2.8

2.3.3 Fontes de Erros e Efeitos de Escala

Uma das principais fontes de erro deve-se ao comportamento do modelo físico, o qual não é uma reprodução exata do protótipo devido a distorções provocadas pela construção à escala e a impossibilidade de cumprir todas as razões de semelhança em simultâneo. Estes efeitos denominam-se efeitos de escala. Alguns exemplos de efeitos de escala são:

- Salpicos no modelo são também salpicos no protótipo;
- Escoamento através dos filtros do núcleo (a menor porosidade no modelo introduzirá maiores perdas de carga);
- Galgamentos diferentes no modelo e no protótipo resultantes de uma incorreta reprodução da porosidade no modelo (o galgamento aumenta com a diminuição da porosidade);
- Influência da viscosidade da água na garantia de obtenção de escoamento ser turbulento.

Outra fonte de erro designada por efeitos de modelo, deve-se a distorções provocadas pelas condições de fronteira devido a limitações na construção e à exploração dos modelos, estando associado a reproduções incorretas de aspetos como a reflexão, rugosidade e materiais. Um aspeto importante a considerar nos efeitos de modelo é a não reprodução à escala da resistência mecânica dos materiais constituintes dos blocos. Os blocos no modelo têm uma resistência superior à do protótipo, pelo que não se verificam fissuras e roturas resultantes do choque entre eles ou de quedas (como acontece na realidade).

Uma fonte de erro em todos os ensaios em modelo físico são as de medições e as incertezas inerentes à medida os quais poderão estar associados ao equipamento e sua calibração.

Estas fontes de erro e incertezas refletem-se nos diferentes resultados obtidos, por exemplo:

- Na repetição dos testes (que necessitam de tratamento estatístico);
- Nas várias constantes de calibração do equipamento de medição do nível da superfície livre;
- Nos diferentes resultados quando comparados diferentes sistemas de medição;
- Na repetibilidade dos ensaios.

2.4 Avaliação do Espraimento em Modelo Físico

2.4.1 Sonda Resistiva

Na maioria dos ensaios bidimensionais e tridimensionais, para a quantificação do espraimento através de sonda resistiva, esta é colocada ao longo do talude do quebra-mar no local aonde se pretende calcular o espraimento (Figura 2.7).

O cálculo dos valores estatísticos do espraimento é realizado através da análise temporal do registo da elevação da superfície livre, obtida tanto pela sonda resistiva (Figura 2.8) como pela análise das imagens de vídeo durante cada ensaio. Os valores estatísticos obtidos foram:

- Ru_m : média de todos os valores medidos de espraimento;
- $Ru_{2\%}$: valor que excede apenas 2% de todos os valores medidos;
- $Ru_{1/10}$: média do décimo de valores mais elevados medidos;
- Ru_{max} : máximo de todos os valores medidos;
- Ru_{min} : mínimo de todos os valores medidos;
- Ru_s : média do terço de valores mais elevados medidos.



Figura 2.7 – Sonda resistiva

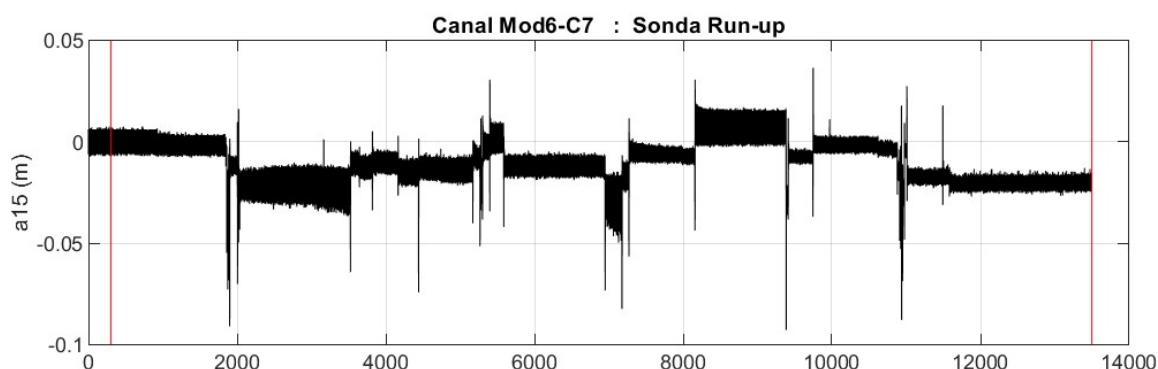


Figura 2.8 – Registo da série temporal obtido na sonda de espraçamento

Para este efeito, para cada registo de elevação da superfície livre, determina-se a correspondente série temporal de valores do espraçamento, calculando a elevação da superfície livre acima do nível médio do mar (correspondente apenas às cristas das ondas). Para excluir pequenas elevações da superfície livre que poderiam interferir no tratamento estatístico da série, o software de análise, desenvolvido em MATLAB (Lemos, 2019), utiliza um patamar de $0.01 * H_{max}$, abaixo do qual a onda não é considerada. Considerando que a sonda está colocada sobre o talude, a cota de espraçamento foi calculada levando em conta a inclinação da mesma, considera-se que $Ru = \text{elevação} * (\sin \alpha)$, onde α é a inclinação do talude.

2.4.2 Análise de Vídeo através da Metodologia *TimeStack*

A metodologia *TimeStack* tem sido aplicada por vários autores, para diferentes fins, como a estimativa das características das ondas (altura das ondas) perto da costa (Gal et al., 2011), a evolução da zona de rebentação (Yoo et al., 2011) ou o volume galgado em ensaios em modelo físico bidimensionais (Özer, 2019). Para a definição da linha de espraçamento, Anriolo (2016) utiliza também esta metodologia.

Em ensaios em modelo físico bidimensional no LNEC, foram obtidos resultados promissores dos parâmetros do espraçamento das ondas, utilizando uma câmara de vídeo comum e seguida a metodologia *TimeStack* proposta por Andriolo et al. (2016). São exemplos destas aplicações de Poseiro (2019), Andriolo (2019a, 2019b) e Andriolo (2022), Lemos *et al.* (2023a, 2023b).

Esta metodologia consiste na utilização de algoritmos desenvolvidos em MATLAB que permitem a extração de "*frames*" do vídeo a analisar e delas extrair todos os pixels que se encontram num caminho (transepto) pré-definido, construindo, assim, uma imagem *TimeStack*, com os pixéis extraídos ao longo do período de duração do filme. Nesta imagem, é

possível identificar as cristas do espraçamento ocorridas durante o período de ensaio em análise. A identificação das posições das cristas permite obter a série temporal dos espraçamentos.

No LNEC, a metodologia foi aplicada nos ensaios em modelo físico bidimensionais do porto de Ericeira (Poseiro, 2022) e nos ensaios do porto de Peniche (Lemos *et al.*, 2022).

No entanto há limitações nesta metodologia, sendo a principal relacionada com a morosidade e erros associados na identificação das posições das cristas do espraçamento, pois a mesma é feita de forma manual. Notar também que todos os trabalhos referidos até agora são aplicações da metodologia em ensaios de modelo físico bidimensionais.

CASO DE ESTUDO - PORTO DAS LAJES DAS FLORES

Neste capítulo descreve-se o caso de estudo do porto das Lajes das Flores, Flores, Açores bem como os ensaios em modelo físico realizados para a determinação do espraimento (caraterização geral, equipamento experimental, condições de agitação e metodologia geral).

3.1 Porto das Lajes das Flores

O Porto das Lajes das Flores está situado na costa Sueste da ilha das Flores do grupo Oriental do Arquipélago dos Açores, Figura 3.1.

Trata-se um porto comercial que era protegido por um quebra-mar de taludes cuja implantação em planta é a apresentada na Figura 3.2. Em 2 de outubro de 2019, o furacão Lorenzo atingiu as ilhas do Arquipélago dos Açores e, em particular, a ilha das Flores, provocando inúmeros estragos, entre os quais a destruição do quebra-mar de proteção do porto das Lajes das Flores, Figura 1.1.

Nestas circunstâncias, a Portos dos Açores, S.A., iniciou todas as diligências no sentido de proceder à reconstrução desta estrutura, nomeadamente ao desenvolvimento do novo projeto do quebra-mar e ao concurso para a sua reconstrução.

No âmbito do desenvolvimento do projeto de execução da nova obra de proteção, foi solicitado ao LNEC a realização de ensaios em modelo físico de agitação, estabilidade e galgamento e pressões da antiga e da nova solução. Na presente dissertação, apenas se realizaram ensaios em modelo físico para determinação do espraimento na antiga solução do quebra-mar, Figura 3.2.

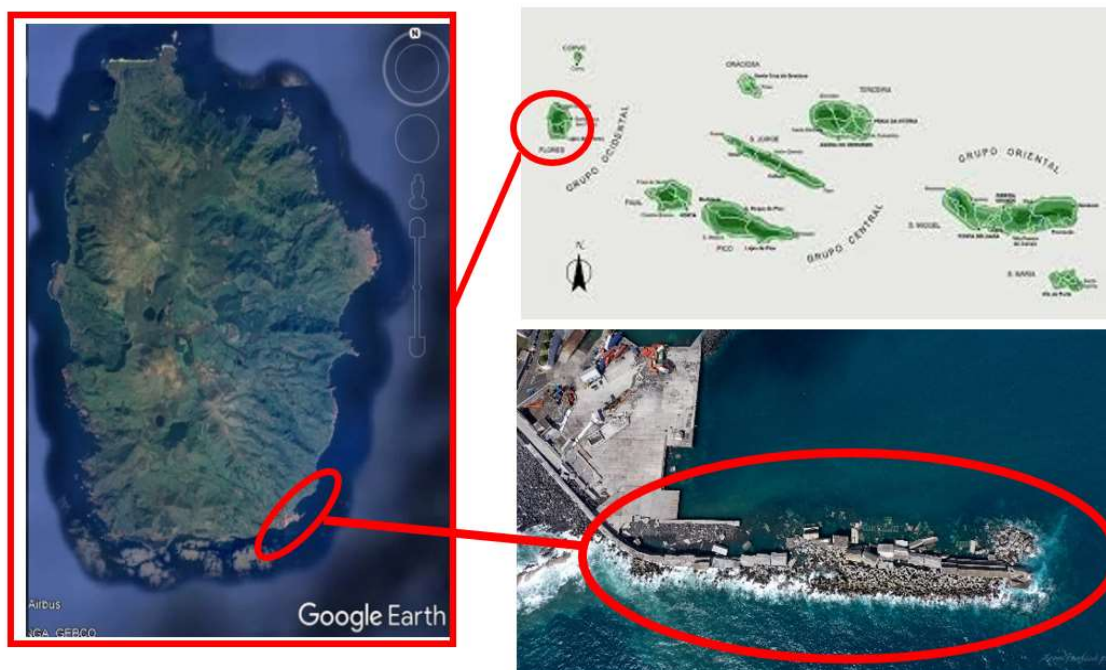


Figura 3.1 – Açores. Flores. Porto das Lajes das Flores. Localização da zona em estudo (Google Earth e aerografica.pt)

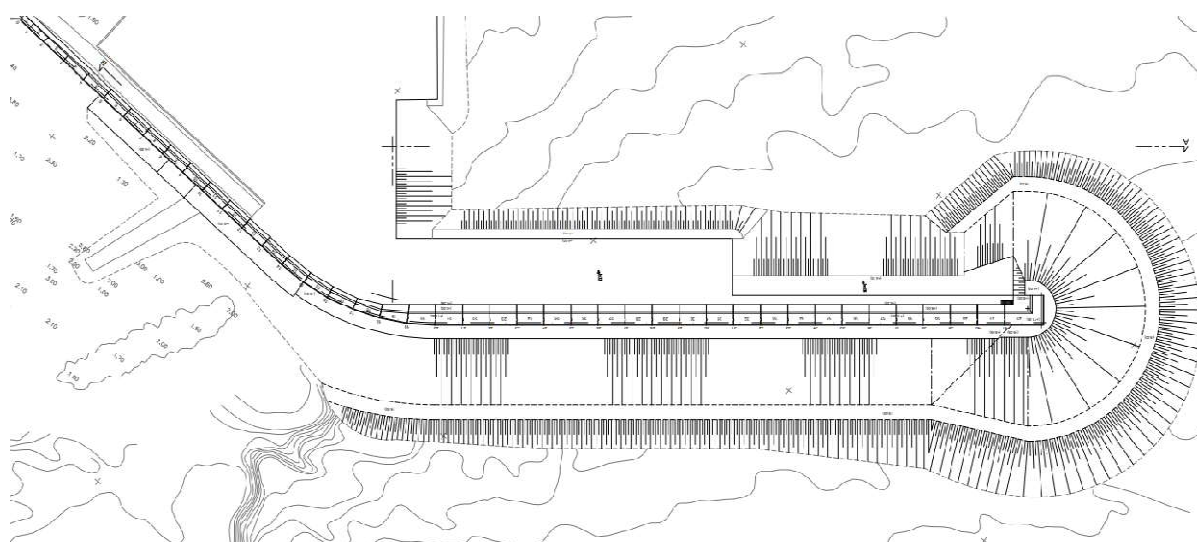


Figura 3.2 – Situação anterior à passagem do furacão Lorenzo. Planta

Nesse sentido, foi construído um modelo físico tridimensional no LNEC da solução antiga para o quebra-mar, constituído por blocos cúbicos tipo Antifer, fabricados com betão de alta densidade. Foram efetuados ensaios para 3 níveis de maré, 3 direções de agitação marítima e várias condições de agitação definidas pelo valor da altura significativa e do período de pico.

No final dos referidos ensaios e no âmbito desta dissertação, o modelo físico tridimensional foi utilizado com o objetivo de validar a nova metodologia desenvolvida para a estimativa do espraçamento ao longo do talude do quebra-mar (objetivo da presente tese). Assim, foi instalado um conjunto de equipamentos (câmaras e sonda resistiva) e realizados um conjunto de ensaios suplementares focados na estimação do espraçamento.

Nos próximos subcapítulos, procede-se à descrição dos ensaios em modelo físico realizados do âmbito do presente trabalho.

3.2 Ensaios em Modelo Físico

3.2.1 Caracterização Geral

O quebra-mar de talude apresenta as seguintes características, Figura 3.3:

- manto de proteção exterior em talude com inclinação 1.5H:1V, constituído por blocos cúbicos do tipo Antifer de 56.8 t, fabricados em betão simples com massa específica de 2.70 t/m^3 e colocados com um espaçamento de 0.9 m entre si, ao nível da base;
- berma do pé de talude constituída por blocos cúbicos tipo Antifer de 56.8 t, iguais aos do manto de proteção;
- manto de proteção do talude interior com inclinação 3H:2V, constituído por uma única camada de blocos cúbicos tipo Antifer de 56.8 t;
- tapete de proteção da berma de pé de talude em enrocamento de 1 a 3 t.
- O núcleo constituído por T.O.T (Pedra de todo o tamanho), correspondendo a um núcleo como permeável.

Os blocos foram colocados de forma arrumada, com identificação nítida de fiadas, Figura 3.4.

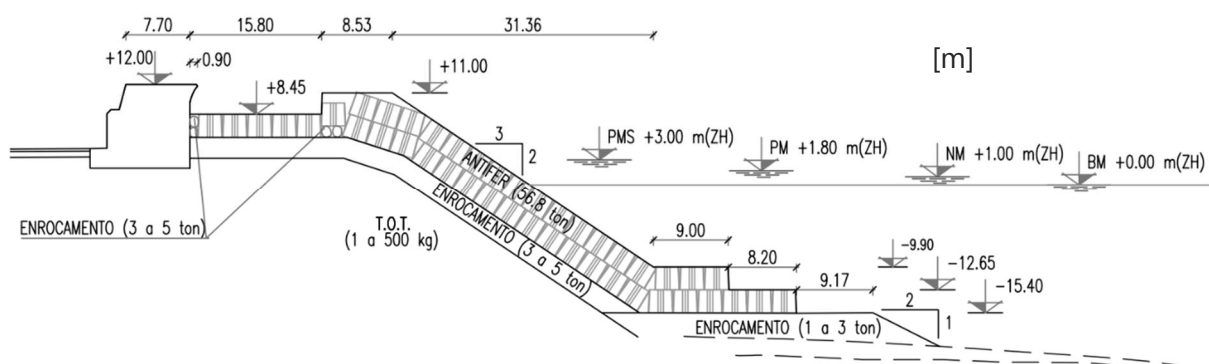


Figura 3.3 – Perfil-tipo do troço do quebra-mar correspondente à zona de avaliação do espraçamento (adaptado de MSW, 2022)

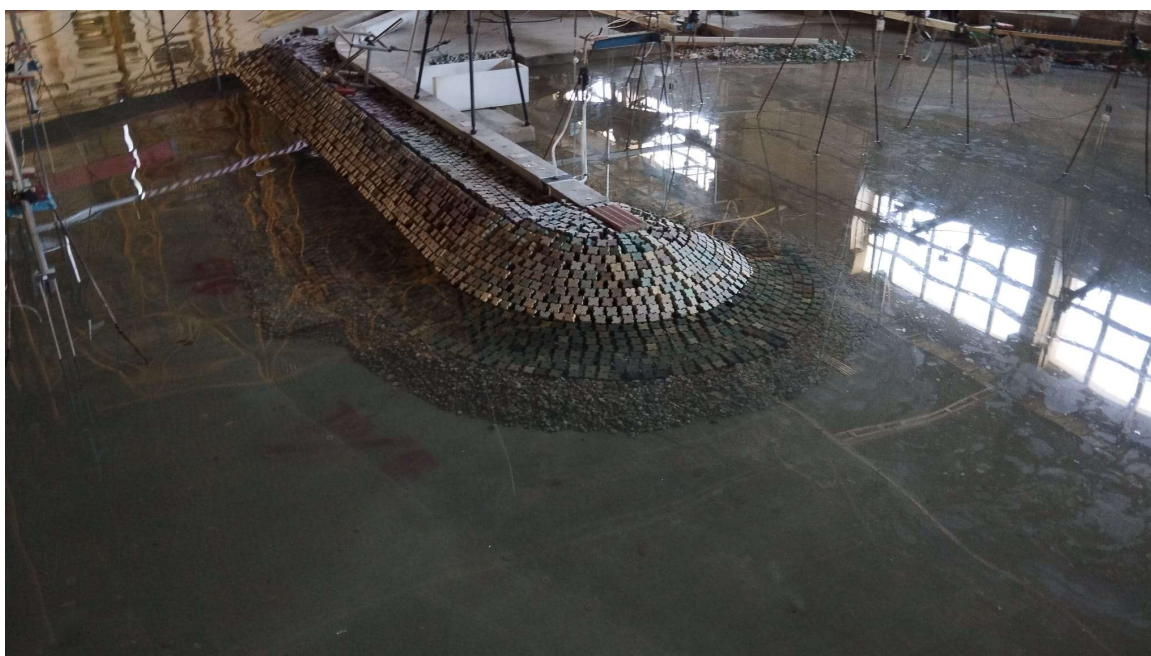


Figura 3.4 – Aspeto do modelo físico

3.2.2 Equipamento Experimental

Instalou-se no modelo físico vários equipamentos de medição, tais como sondas resistivas, camaras de filmar, sensores de pressão e reservatórios.

Com vista ao registo da elevação da superfície livre, foi colocado um conjunto de sondas resistivas. Para além de duas sondas de controlo colocadas junto ao gerador de ondas (S1 e

S2), foi colocada mais 1 sondas para medir a agitação (S17) em frente à zona de interesse, cujo posicionamento no modelo físico se representa na Figura 3.5 e Figura 3.6.

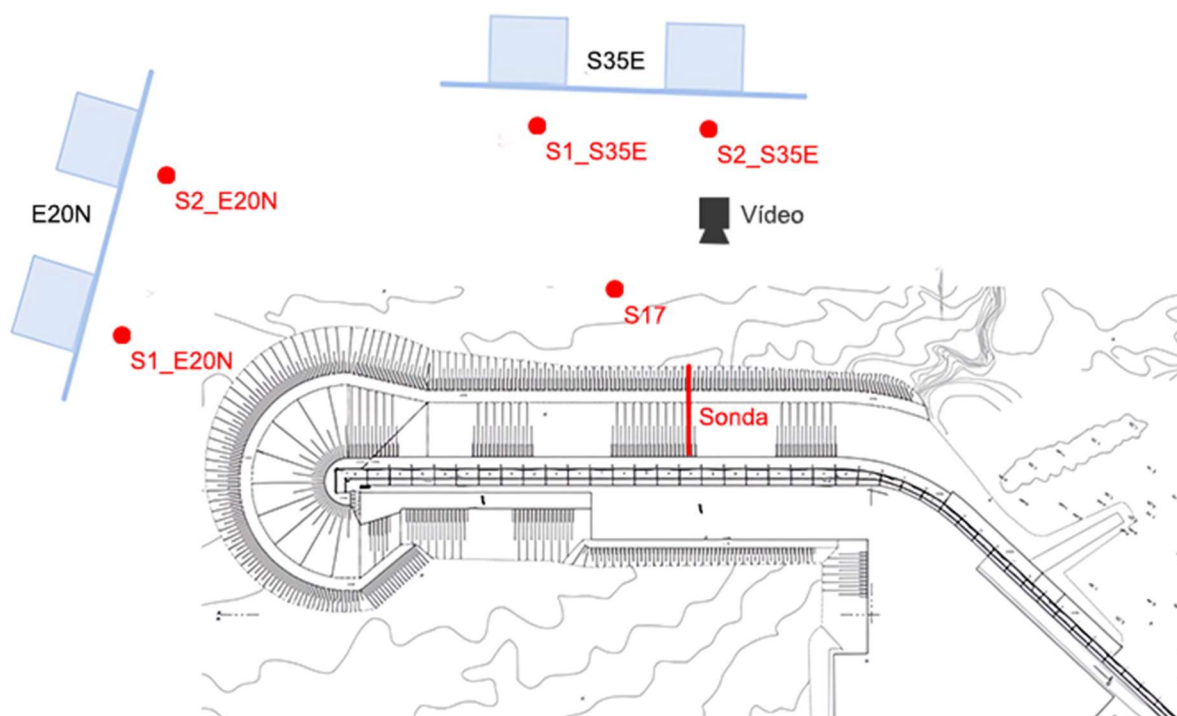


Figura 3.5 – Locais de medição da agitação marítima e posicionamento das sondas no modelo

Ao longo do talude do quebra-mar, foi colocada uma sonda resistiva com 0.6 m de comprimento posicionada para a medição do espraio, Figura 3.6.



Figura 3.6 – Localização da sonda de espraio e da sonda para a medição da agitação

Foram também utilizadas 2 câmaras vídeo com o objetivo de filmar o espreamento ocorrido em cada ensaio (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Câmaras de filmar

As câmaras de vídeo registaram a sequência de imagens durante o ensaio (aproximadamente 20 minutos), com uma frequência de 25 *frames* por segundo. Os ensaios foram conduzidos durante o dia, sob luz natural. Contudo, para prevenir o efeito da luz solar na gravação do vídeo, foi instalado um foco de luz VISICO VC 1000Q, direcionado para a secção transversal, com o propósito de fornecer iluminação artificial e, assim, melhorar a qualidade da imagem da câmara de vídeo.

3.2.3 Agitação Marítima e Níveis de Maré

Foi simulada agitação marítima irregular de acordo com uma configuração espectral empírica do tipo JONSWAP, que consiste em uma relação empírica que define a distribuição da energia com a frequência no oceano, tendo sido aplicado um fator de pico $\gamma=3.3$ e contemplando-se a reprodução de grupos de ondas segundo o método utilizado usualmente no LNEC.

Foram reproduzidas as direções correspondentes a E20N e S35E (sobre a cota -40.0 m (ZH)), às quais se associou a reprodução de diferentes valores de período de pico do espetro (Tp) de 16 s e 20 s, consoante o tipo de ensaios efetuado, Tabela 3.1.

Os ensaios foram realizados com três níveis de maré constantes: 0.0 m (ZH), +1.8 m (ZH) e +3.0 m (ZH), correspondentes a baixa-mar mínima (BM), preia-mar máxima (PM) e preia-mar com sobrelevação (PMS), respetivamente.

Tabela 3.1 – Rumos E20N e S35E. Ensaios de agitação e de espraçamento. Condições de agitação marítimas relativas ao programa de ensaios, realizados para cada um dos níveis de maré BM, PM e PMS

Período de pico (s)	Hs (m)		
	6	8	10
16	o Ω	o Ω	-
20	o Ω	o Ω	o Ω

o - Ensaio de E20N

Ω - Ensaio de S35E

As características da agitação marítima reproduzidas foram sendo controladas ao longo do programa de ensaios, quer junto ao gerador de ondas (S1 e S2 da Figura 3.6), quer em frente ao talude exterior do quebra-mar (S17 da Figura 3.6).

3.2.4 Metodologia Geral dos Ensaios

A metodologia utilizada durante os ensaios de agitação e de espraçamento consistiu, para cada condição de agitação incidente (Hs, Tp, Dir) testada (Tabela 3.1) e durante a duração de ensaio (cerca de 20 minutos):

- Registo das elevações da superfície livre nas sondas S1, S2 e S17, Figura 3.6;
- Registo da elevação da superfície livre na sonda disposta ao longo do talude do quebra-mar, Figura 3.6;
- Registo vídeo efetuado com as 2 câmaras de filmar, Figura 3.7;

Na Figura 3.8 apresentam-se alguns aspetos gerais dos ensaios com diferentes direções.



Figura 3.8 – Aspeto geral dos ensaios com os rumos: S35E (em cima); E20N (em baixo)

Após o finalizar de cada ensaio, procedeu-se à aplicação do programa MATLAB do LNEC de análise temporal e espectral aos registos das sondas S1, S2 e S17 (Pinheiro, 2019), para obtenção das características de agitação (H_s , T_p).

Posteriormente, efetuou-se a análise dos vídeos com a metodologia *TimeStack*.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo descreve-se o trabalho efetuado para melhoria da análise de espraio com a metodologia de *TimeStack* e apresentam-se e analisam-se comparativamente os resultados obtidos (parâmetros Ru_{max} , Ru_m e $Ru_{2\%}$) para diferentes condições de agitação marítima, resultantes da aplicação das duas técnicas utilizadas neste trabalho: a medição através da metodologia *TimeStack* otimizada e com sonda resistiva. É também analisado o comportamento da metodologia *TimeStack* para diferentes incidências da agitação marítima, S35E (Frontal) e E20N (Oblíquo). Finalmente comparam-se os resultados de $Ru_{2\%}$ com os valores do EurOtop (Van der Meer et al., 2018).

Durante esta análise, de modo a poder relacionar o valor de Ru_{max} com o bordo livre (R_c), foi aferida a correta representação da geometria do modelo relativamente à geometria do projeto (Figura 4.2). Esta aferição foi realizada através de um levantamento tridimensional realizado com recurso a um sensor de posição Kinect V.2.

Os valores do bordo livre (R_c) do quebra-mar para os níveis de maré Baixa-mar (BM), Preia-mar (PM) e Preia-mar sobrelevada (PMS) são 10.95 m, 9.15 m e 7.95 m, respetivamente. O valor de altura atingida pelo espraio é comparativamente menor à medida que o nível de maré aumenta, atendendo a que a altura de bordo livre diminui com o aumento do nível de maré.

Na análise dos resultados ao longo deste trabalho, o critério definido como ocorrência de galgamento foi o da cota mais alta do talude (a berma de coroamento) ser atingida pelo espraio.

4.1 Descrição da Metodologia desenvolvida para Análise do Espraimento

A metodologia utilizada para extrair os valores de espraimento a partir das imagens de vídeo é baseada no trabalho de Andriolo *et al.* (2016), Lemos *et al.* (2023a, 2023b), tendo sido melhorada nesta dissertação com a alteração e inclusão de alguns módulos que superam limitações já identificadas anteriormente (procedimento manual para a identificação das cristas de espraimento e impossibilidade de analisar um vídeo de longa duração, por exigência computacional).

Estes módulos adicionais possibilitam quer a identificação automática das cristas de espraimento, reduzindo a necessidade de intervenção do técnico responsável pela execução desta metodologia, como a análise todos os *frames* de um vídeo de longa duração. Assim, o método *TimeStack* torna-se mais eficaz e eficiente, permitindo a sua aplicação de forma recorrente em ensaios de modelos físicos, sem a necessidade de um extenso processo manual na análise de vídeos de longa duração ou na identificação das cristas do espraimento.

A anterior metodologia consistia em 3 módulos desenvolvidos em Matlab (**ExtractTSK.m**, **Picar.m** e **Createprofile.m**) e 2 funções. A nova metodologia consiste na utilização de 6 módulos de software. Os módulos **ExtractTSK.m** e **Createprofile.m**, foram modificados, o módulo **Picar.m** foi eliminado e os módulos **DivVideos.m**, **Filtro.m**, **LerPontos.m** e **CriarR.m** foram desenvolvidos de raiz no presente trabalho.

De seguida, descreve-se detalhadamente os diferentes módulos.

O 1º módulo de software (**DivVideos.m**) tem como objetivo preparar o vídeo para ser utilizado sem restrições no módulo seguinte. Isto deve-se ao fato de que o próximo módulo só consegue ler vídeos com uma frequência de 30 *frames* por segundo, apenas quando o vídeo é de curta duração. Assim, o módulo **DivVideos.m** divide o vídeo original em um determinado número de vídeos parciais, de menor duração e uma frequência de 30 *frames* por segundo para que, posteriormente, o conjunto desses vídeos parciais mais curtos possa ser processado pelo próximo módulo;

O 2º módulo de software (**ExtractTSK.m**) carrega cada vídeo parcial a ser analisado e extrai as imagens (*frames*) com uma frequência de 30 imagens por segundo, correspondente à frequência dos vídeos gerados pelo módulo anterior. Este módulo foi melhorado para permitir que se defina várias linhas transversais (transetos) coincidentes com a face do talude do quebra-mar do modelo físico, conforme indicado pela linha vermelha na Figura 4.1. O transeto

selecionado deve idealmente corresponder à posição da sonda usada para medir o espraio-mento, embora nem sempre seja possível devido aos deslocamentos da sonda causados pela agitação durante os ensaios. Este módulo permite a seleção de 1 ou mais transetos.

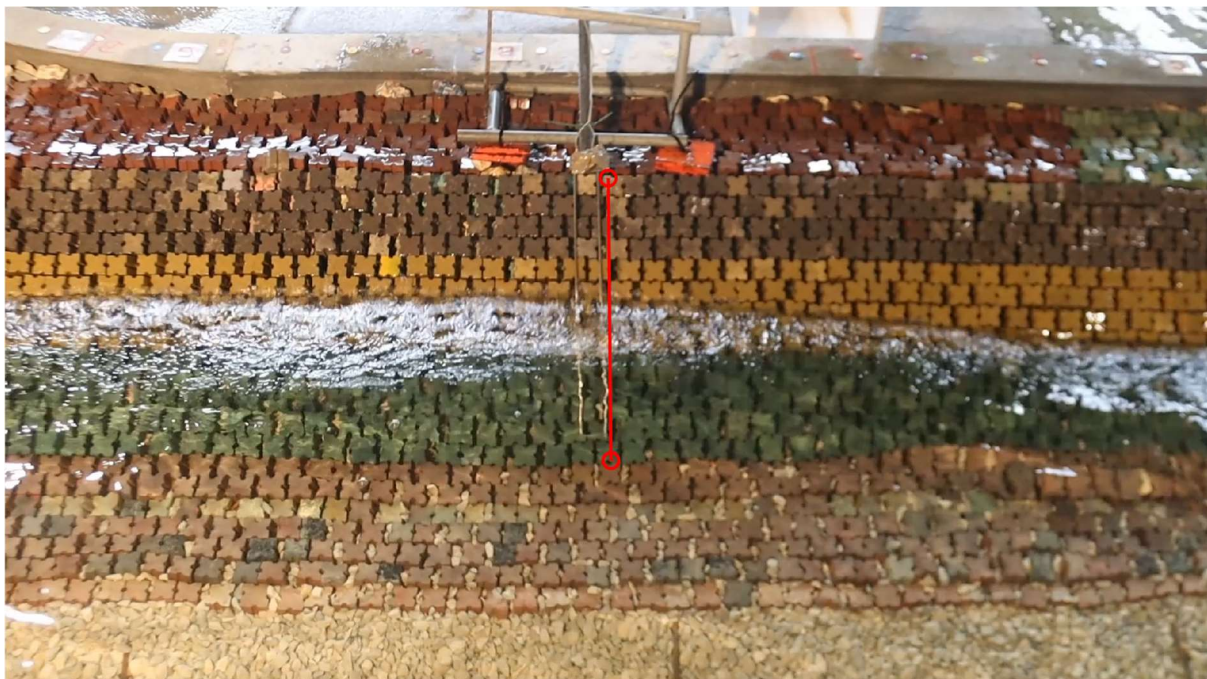


Figura 4.1 – Localização do transeto utilizado no cálculo do espraioamento

A aplicação deste módulo resulta numa imagem *TimeStack* (que corresponde ao transeto localizado na Figura 4.2b), com base na amostra da série temporal de pixels de cores das várias sequências de imagens extraídas ao longo de todo o filme. Obtém-se a elevação da superfície livre sobre o talude, em pixels, na zona definida pelo(s) transeto(s) ao longo do tempo.

Este processo é realizado para cada vídeo parcial, sendo as várias imagens resultantes posteriormente fundidas, construindo assim uma imagem semelhante à representada na Figura 4.2a. Repete-se esse procedimento para cada transeto. Para esse efeito, no código **ExtractTSK.m**, é essencial inserir o número de vídeos parciais resultantes da divisão do filme original.

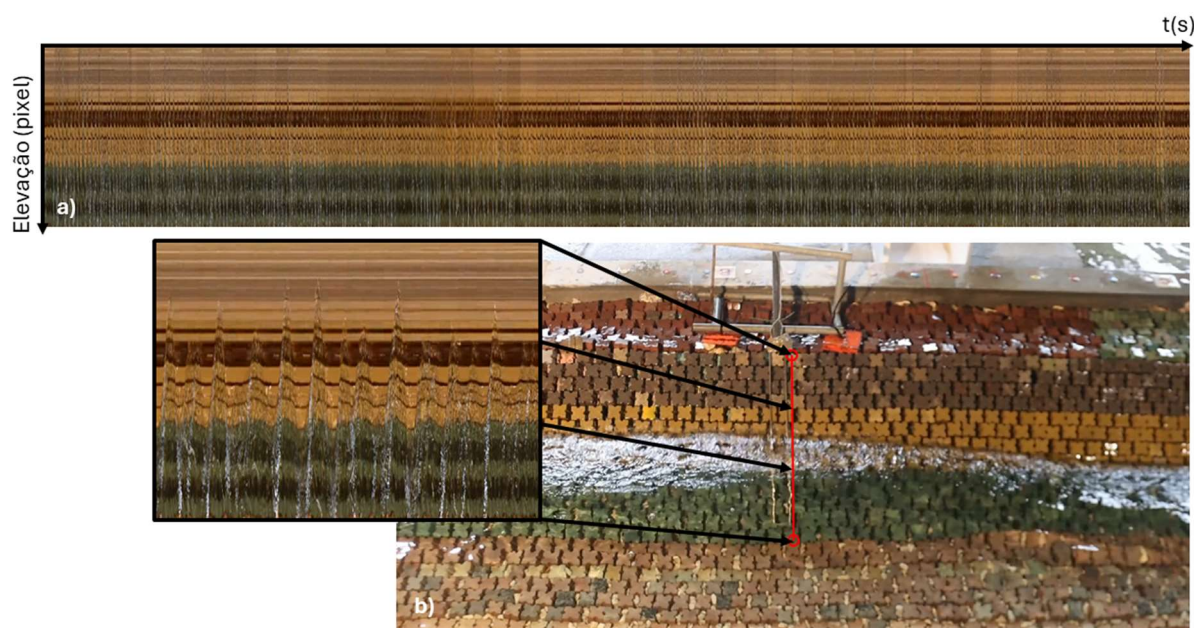


Figura 4.2 – Imagem *TimeStack* resultante da aplicação do módulo ExtractTSK.m (a) e sua correspondência no modelo (b)

O 3º módulo (**Filtro.m**) aplica uma sequência de filtros de imagem que separa as regiões onde há presença de água do restante, sendo as zonas onde há presença de água pintadas a branco, enquanto as demais regiões são identificadas a preto, tal como ilustrado Figura 4.3c. O procedimento da filtragem consiste em:

- Criar uma outra imagem copiada da imagem original (TSK) (Figura 4.3a) e aplicar o comando "mover", deslocando 2 pixels para a direita da posição inicial;
- Aplicar o comando "subtrair", subtraindo a imagem original (TSK) pela imagem movida;
- Aplicar um filtro limiar 1, obtendo o resultado apresentado na Figura 4.3b;
- Aplicar um filtro gaussiano, seguido por mais uma etapa de filtro limiar 2, resultando na Figura 4.3c;
- Com o objetivo de visualizar e avaliar os resultados obtidos, aplica-se uma função que cria uma imagem com os pixels mais claros entre a imagem (Figura 4.3a) e (Figura 4.3c), depois sobrepõe-se o resultado desta operação com transparência de 30% à Figura 4.3a, obtendo assim a imagem representada na Figura 4.4;
- A imagem representada na Figura 4.4 permite verificar se os filtros estão bem calibrados ou não, ou seja, se as manchas brancas que servirão de base para o processamento seguinte são coerentes com os locais onde há presença de água. Em caso contrário, ajusta-se os parâmetros iniciais e executar este módulo novamente.

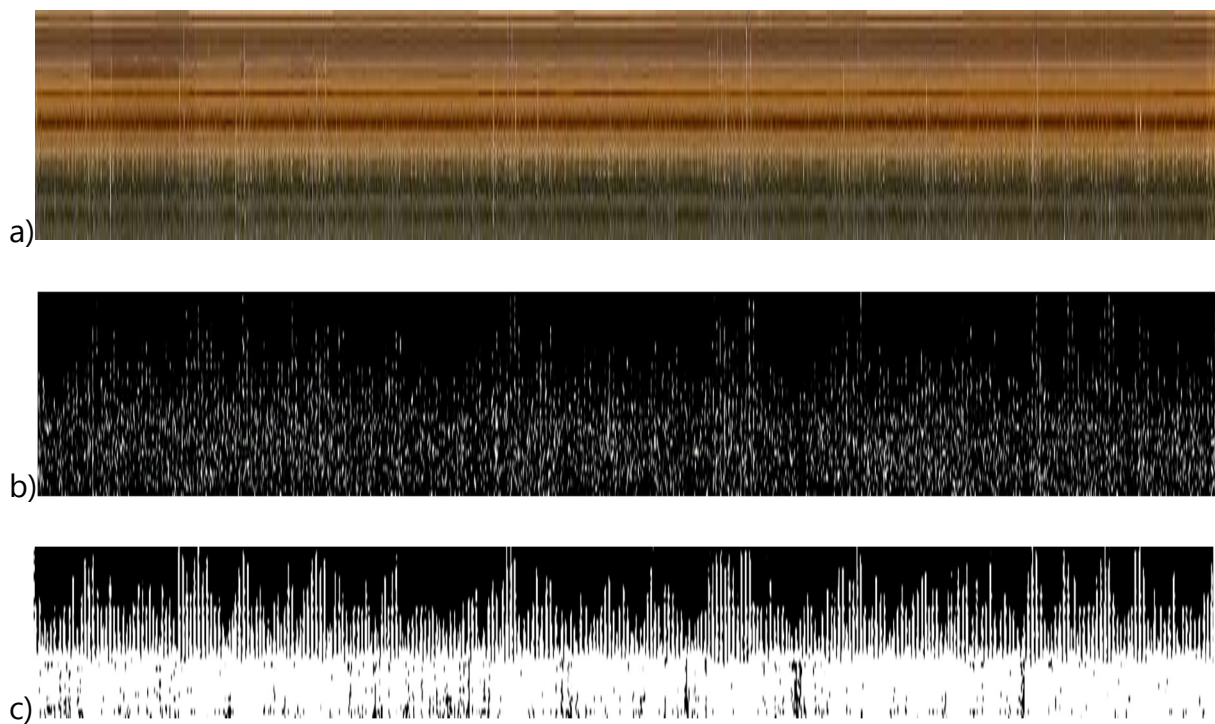


Figura 4.3 – Imagens *TimeStack*. a) Original; b) Filtrado inicial; c) Filtrado final, com acerto de parâmetros



Figura 4.4 – Imagem que auxilia na visualização para saber se os parâmetros foram bem calibrados

Os parâmetros que podem ser necessários alterar para a calibração deste módulo são:

- mover = 1: Este parâmetro indica quantos pixels a copia da imagem original deve ser movida em relação uma imagem original. Representa, portanto, o deslocamento desta imagem. Valores entre 1 e 6 são recomendados, e a escolha depende principalmente do *Frame Rate* do vídeo gravado.
- limiar1 = 12: Este parâmetro define um limite que determina que pixels serão considerados como relevantes e quais não serão. pixels com valores abaixo desse limite são descartados, sendo necessário ajustar este parâmetro até reter apenas as diferenças relevantes entre *frames*.
- desviopadrao = 5: Este parâmetro regula a intensidade do filtro gaussiano, utilizado para suavizar o sinal e remover ruídos, misturando os pontos brancos dispersos com

o preto na imagem. A ideia é evitar a presença de pontos brancos isolados, promovendo uma maior homogeneidade na imagem e tornando as zonas com muitos pontos brancos mais claras do que as zonas com apenas um ponto branco isolado.

- $\text{limiar2} = 8$: Este parâmetro filtra as manchas cinzentas produzidas pelo filtro gaussiano. Ele determina quais manchas cinzentas serão mantidas brancas e quais serão convertidas para preto. Em termos simples, serve para decidir quais regiões serão destacadas ou suprimidas na imagem resultante.

Uma sugestão para melhoria deste módulo seria criar um método iterativo através da aplicação do filtro de detecção de bordos, de modo a definir valores relativos à maior área ou comprimento do bordo. Os parâmetros seriam ajustados iterativamente até majorar ou minorar o número de áreas detetadas na imagem, o maior valor da área encontrado na imagem ou ainda o comprimento do maior bordo.

De notar, que na versão anterior desta metodologia, com o módulo *Picar.m*, era necessário identificar manualmente, com o rato, as cristas de espraioamento, como ilustrado na Figura 4.5.

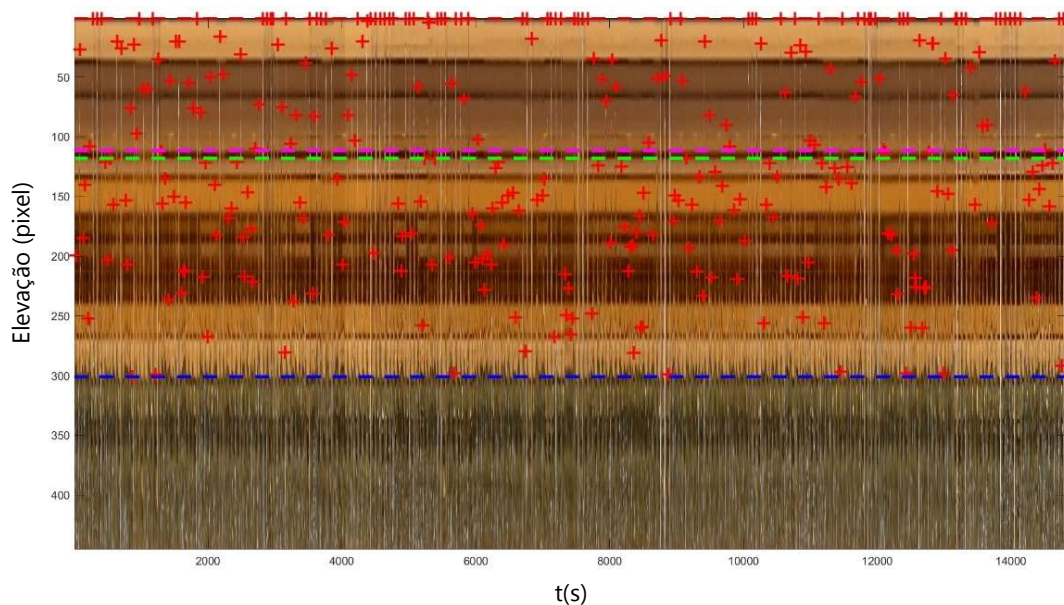


Figura 4.5 – Seleção manual das cristas de espraioamento

O 4º módulo, denominado (**LerPontos.m**), permite a identificação das cristas do espraioamento. Assim, este módulo lê a imagem representada na Figura 4.3c e encontra o pixel branco com o menor valor de coordenada Y (considerando que as coordenadas estão invertidas, porque é desta forma que o MATLAB faz a leitura dos pixels ao longo do eixo X). Este conjunto de

pontos forma um sinal, representado na Figura 4.6 a azul. Em seguida, esse sinal é filtrado por um filtro passa-baixa, resultando no sinal da Figura 4.6 a verde. Para o filtro passa-baixa, devem ser definidos dois parâmetros:

- $f_c = 0.1$: Frequência de corte do filtro, indicando a frequência a partir da qual as componentes de alta frequência serão atenuadas;
- $f_s = 1.5$: Frequência de amostragem, representando a taxa na qual o sinal é amostrado.

Em seguida, são detetadas as coordenadas dos mínimos ao encontrar o ponto em que a derivada negativa se torna positiva. Os pontos mínimos nesse gráfico correspondem aos máximos na imagem, pois, como explicado anteriormente, o MATLAB inverte as coordenadas.

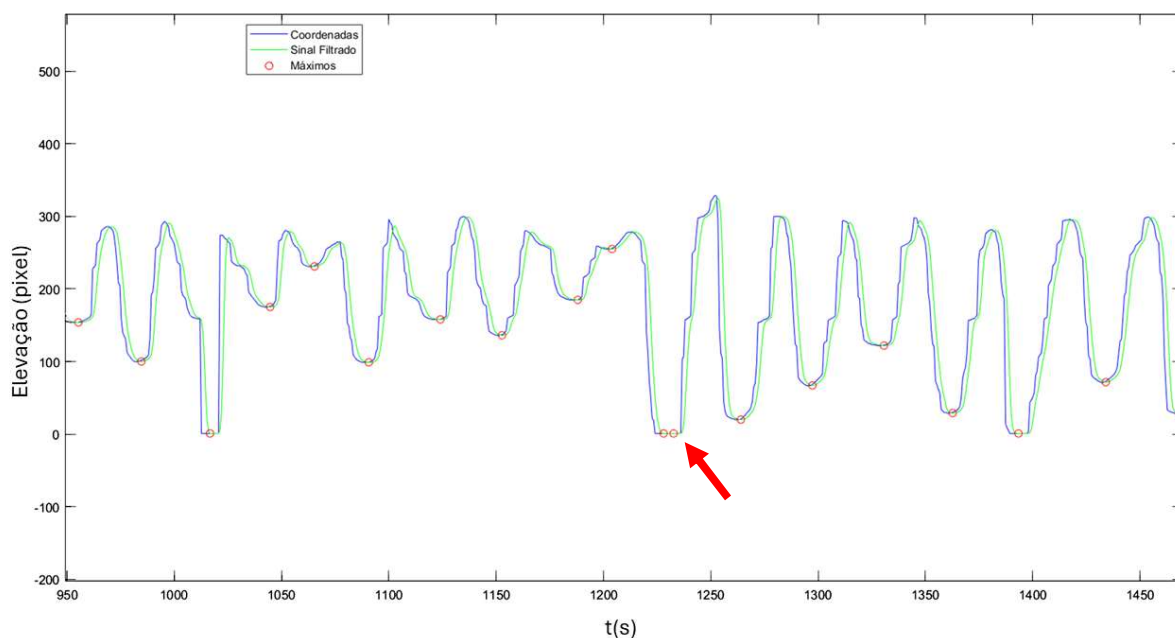


Figura 4.6 – Resultando no sinal após a passagem do filtro passa-baixo

O 5º módulo (**CriarR.m**), permite eliminar casos em que o espriamento é contabilizado duas vezes, sendo esse espriamento quase sempre associado a uma situação de galgamento, como indicado na Figura 4.6 pela seta vermelha.

Para cada um dos pontos "máximos" identificados na Figura 4.6, o código verifica no sinal obtido no anterior módulo se o ponto seguinte está a uma distância (à direita) inferior a um determinado parâmetro "margem" (que neste caso se fixou em 10 pixels). Se tal acontecer, o ponto é retirado.

Este 5º módulo possui muitos aspetos a serem melhorados, e um deles é torná-lo independente do parâmetro "margem", que precisa ser definido antes de executar o programa. Para eliminar a necessidade de definir esse parâmetro, é apenas necessário que o código utilize uma imagem do tipo da Figura 4.7 e verifique se existem só pixels brancos entre os dois pontos máximos. Caso isso aconteça, o segundo ponto deve ser removido, como mostra o esquema da Figura 4.7 onde os pontos removidos estão representados a vermelho.

No final deste módulo, é obtida a série temporal (em pixels) dos espraiaamentos encontrados.

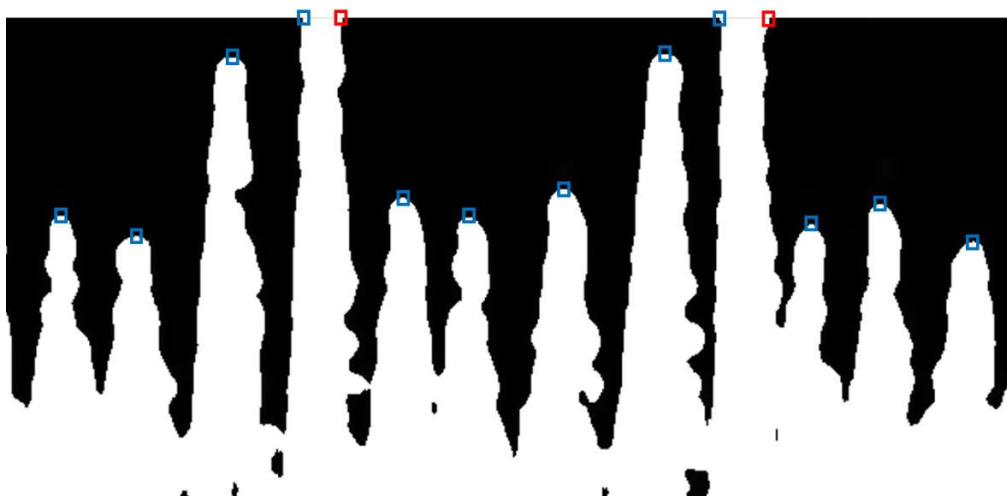


Figura 4.7 - Exemplo de pontos a serem removidos da lista de espraiaamentos

A última fase do processamento consiste na aplicação do 6º módulo (`createprofile.m`), onde são calculados os valores discretos de espraiaamento. Isso é realizado através da transformação das posições marcadas nas imagens *TimeStack* (em pixels) em valores de cotas (em metros) acima do nível de repouso da água.

Com base nessa série temporal, são calculados os parâmetros estatísticos e gerada uma imagem do *TimeStack* (Figura 4.8) com a projeção da análise estatística da série temporal dos valores de espraiaamento: Ru_{min} (linha tracejada azul), Ru_{max} (linha tracejada vermelha), $Ru_{2\%}$ (linha tracejada preta), Ru_{med} (linha tracejada verde) e Ru_m (linha tracejada rosa). Além disso, são exibidos os pontos relativos a cada espraiaamento, representados por cruces vermelhas.

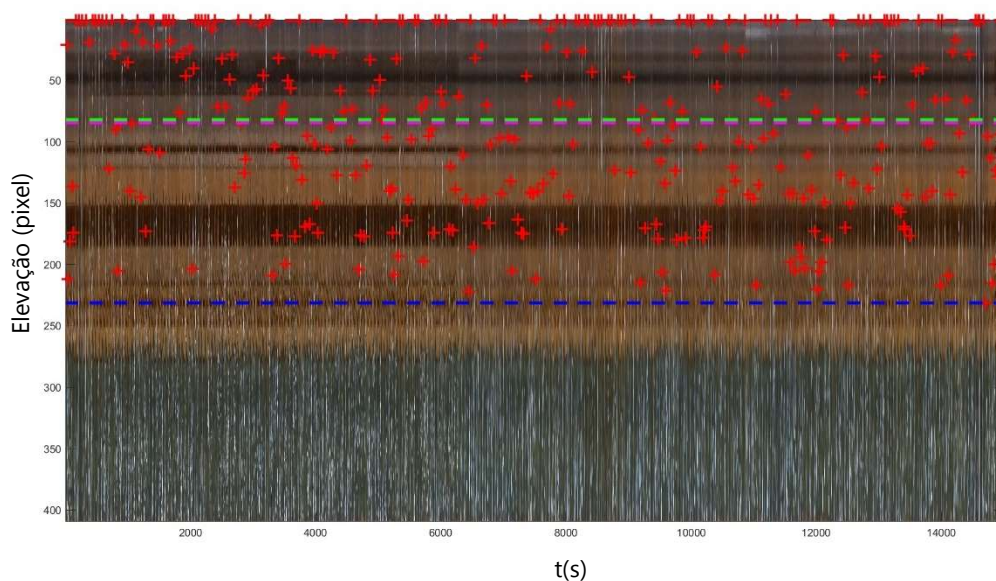


Figura 4.8 – Projeção dos pontos relativos a cada espraio e dos parâmetros estatísticos da série temporal

O 6º módulo realiza a transformação dos valores de pixel para unidades métricas, levando em consideração a definição da geometria do perfil e o nível de maré. Além disso, permite projetar os eventos de espraio ao longo da sonda colocada no talude, assinalando-os na estrutura do talude e identificando os pontos correspondentes a Ru_{max} , Ru_{min} , $Ru_{2\%}$, e Ru_m (Figura 4.9).

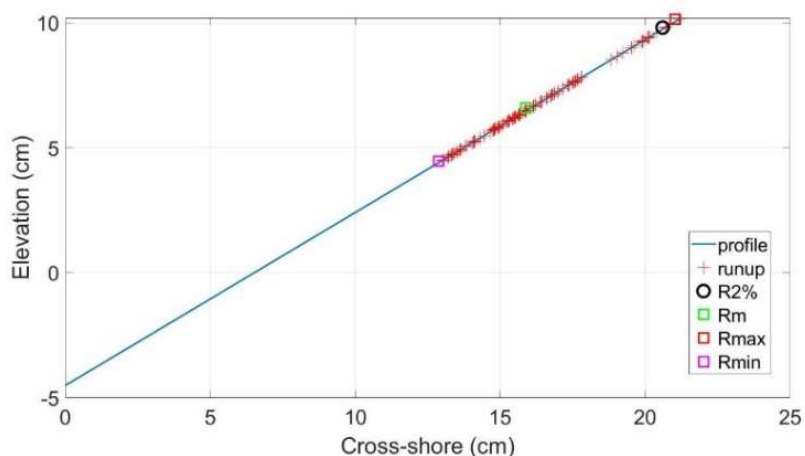


Figura 4.9 – Eventos de espraio ao longo do talude e identificação dos pontos correspondentes a Ru_{max} , Ru_{min} , $Ru_{2\%}$, e Ru_m .

4.2 Análise de Resultados dos Ensaios

4.2.1 Rumo E20N

Para este rumo foram obtidos valores de espriamento para cada ensaio através da metodologia *TimeStack* e das medições realizadas pela sonda, a fim de efetuar uma análise comparativa e avaliar a correlação entre os mesmos. Na Tabela 4.1 é apresentado o resumo dos resultados obtidos com estas duas metodologias.

Na Figura 4.10 são ilustrados os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as técnicas de medição, para os ensaios realizados com o rumo E20N, associado aos níveis BM, PM e PMS.

Tabela 4.1 -. Comparação entre os resultados obtidos com o *TimeStack* e com sonda. Resultados relativos ao estado de agitação com rumo E20N e níveis de maré de BM, PM e PMS

Ensaio	Nível	Tp	Hs	TimeStack			Sonda		
				Ru_{max} [m]	$Ru_{2\%}$ [m]	Ru_m [m]	Ru_{max} [m]	$Ru_{2\%}$ [m]	Ru_m [m]
BMTp16Hs06	BM	16	6	10.95	10.52	4.05	9.49	9.01	4.67
BMTp16Hs08		16	8	10.95	10.95	6.27	11.29	10.15	5.66
BMTp20Hs06		20	6	10.95	10.95	4.79	10.86	9.89	4.89
BMTp20Hs08		20	8	10.95	10.95	5.74	11.35	10.91	5.83
BMTp20Hs10		20	10	10.95	10.95	7.06	11.99	11.51	6.85
PMTp16Hs06	PM	16	6	9.15	9.15	3.90	8.94	7.79	4.19
PMTp16Hs08		16	8	9.15	9.15	5.46	9.32	9.16	5.02
PMTp20Hs06		20	6	9.15	9.15	4.26	8.67	8.04	3.75
PMTp20Hs08		20	8	9.15	9.15	4.95	9.35	9.08	5.02
PMTp20Hs10		20	10	9.15	9.15	5.76	10.66	10.63	6.73
PMSTp16Hs06	PMS	16	6	7.95	7.95	4.52	9.19	8.43	4.45
PMSTp16Hs08		16	8	7.95	7.95	4.94	9.30	8.93	5.28
PMSTp20Hs06		20	6	7.95	7.95	3.95	8.51	8.11	3.88
PMSTp20Hs08		20	8	7.95	7.95	4.86	9.75	9.46	5.76
PMSTp20Hs10		20	10	7.95	7.95	5.59	9.48	9.39	6.37

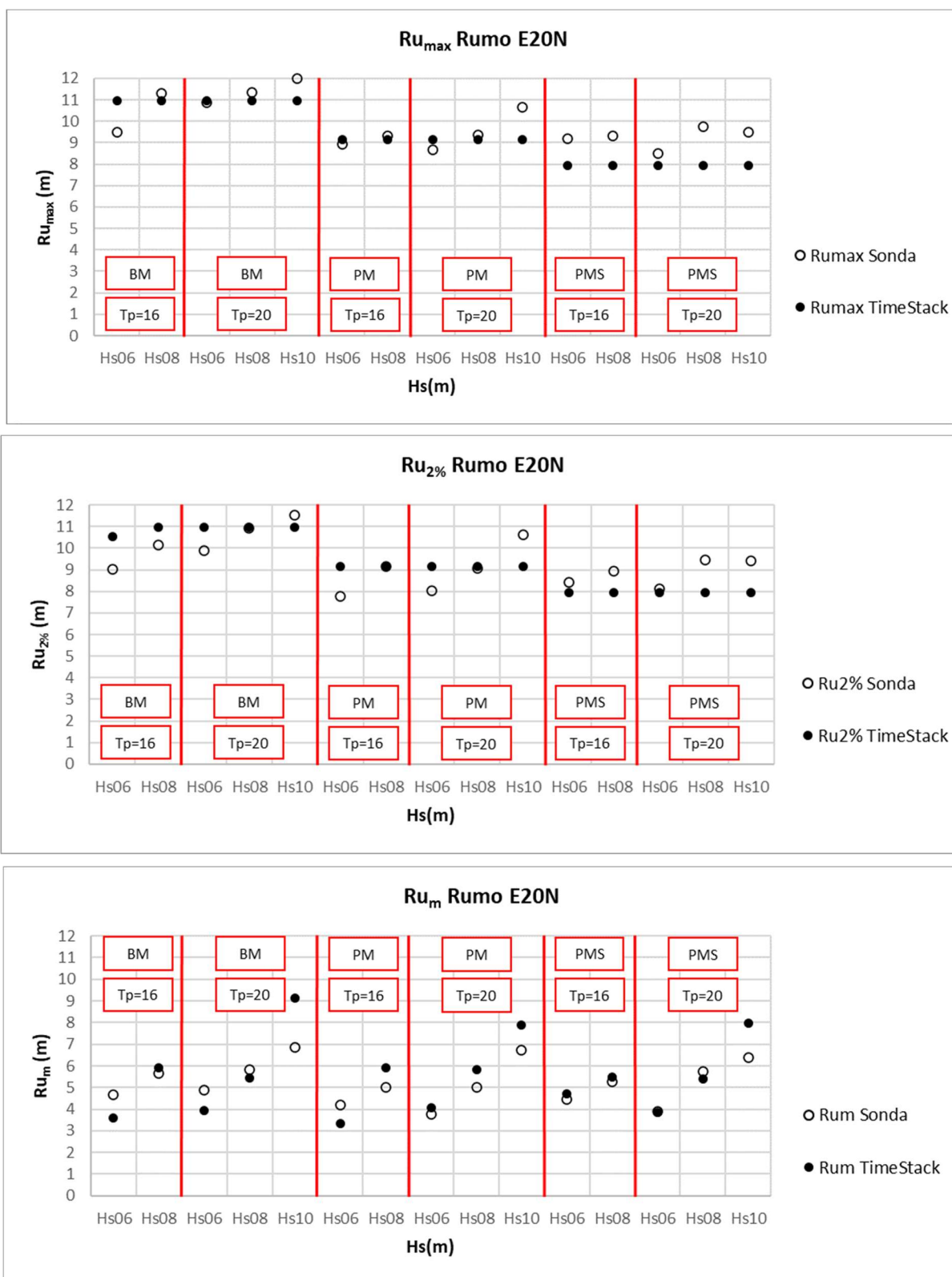


Figura 4.10 - Rumo E20N. BM (em cima), PM (meio) e PMS (em baixo). Valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos através da medição com sonda e com a metodologia *TimeStack*

4.2.1.1 BM

Da Figura 4.11 à Figura 4.12 apresenta-se, para o rumo E20N e para nível de maré de BM, a variação do Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias. Foi tomada como referência para o Ru_{max} possível, a elevação correspondente ao bordo livre (R_c) correspondente ao nível de BM (11.0 m).

Na Tabela 4.2, são representados os valores das diferenças entre os valores dos diferentes parâmetros estatísticos obtidos com as duas metodologias, sendo a diferença relativa feita relativamente ao bordo livre (R_c).

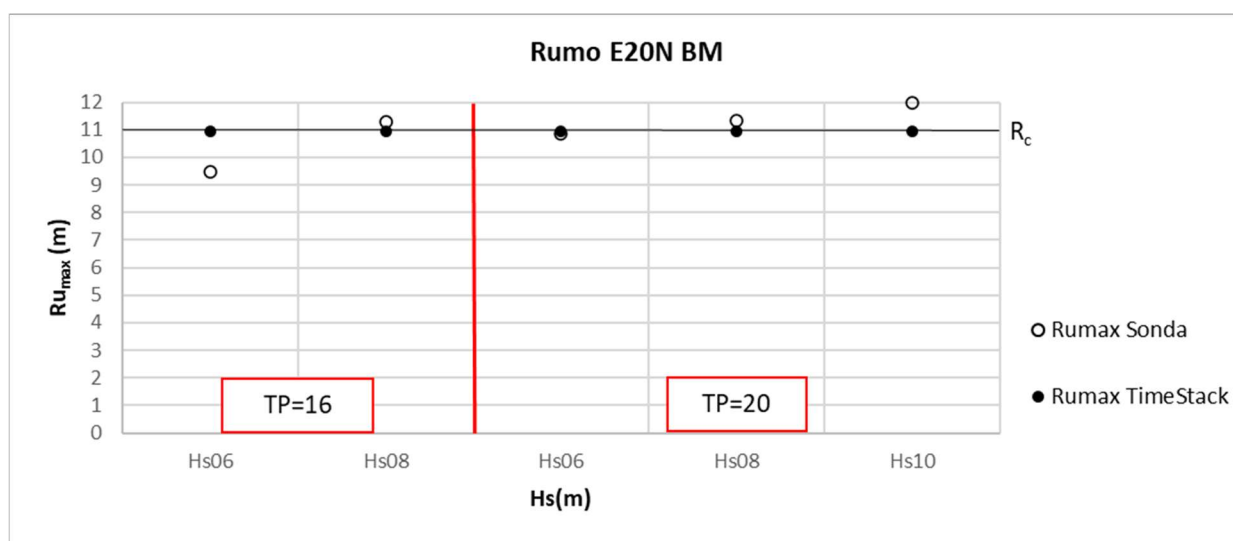


Figura 4.11 – Rumo E20N. BM. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

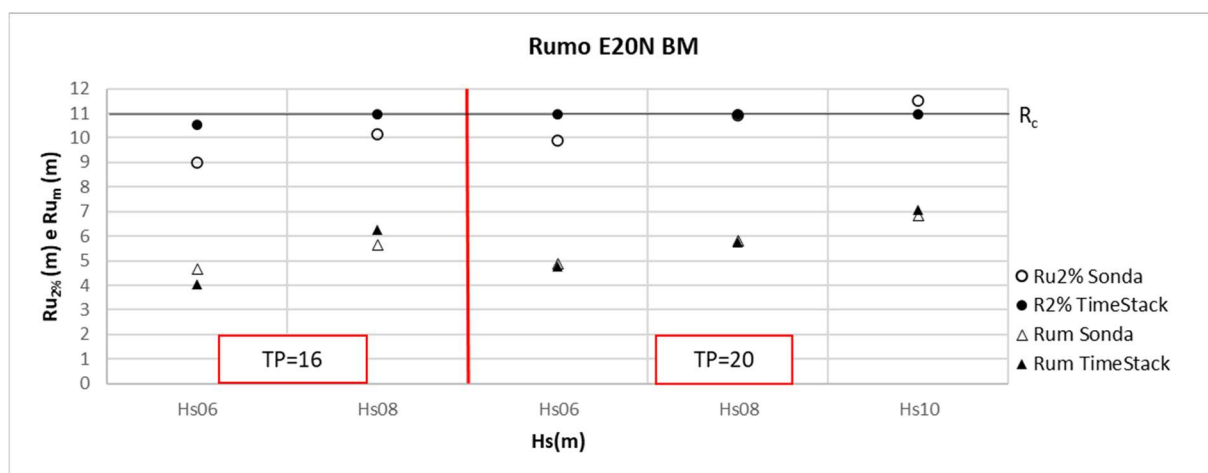


Figura 4.12 – Rumo E20N. BM. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

Ensaio	Diferenças relativas [%]			Diferenças absolutas [m]		
	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}
BMTp16Hs06	5.72	13.84	13.32	0.63	1.52	1.46
BMTp16Hs08	5.56	7.30	3.11	0.61	0.80	0.34
BMTp20Hs06	0.92	9.68	0.89	0.10	1.06	0.10
BMTp20Hs08	0.77	0.41	3.61	0.08	0.04	0.40
BMTp20Hs10	1.93	5.08	9.45	0.21	0.56	1.04

Tabela 4.2 - Rumo E20N. BM. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $Tp=16$ s e com $Tp=20$ s

Para as condições de agitação incidente de E20N, BM, a análise do Ru_{max} permitiu concluir que

- Os valores de Ru_{max} estão compreendidos entre 9.49 m e 11.29 m para $Tp=16$ s e entre 10.86 m e 11.99 m para $Tp=20$ s;
- Os valores de Ru_{max} obtidos pela metodologia com a análise de vídeo são iguais ao bordo livre (10.95 m), uma vez que em todos os ensaios analisados ocorreu pelo menos, um evento de galgamento;
- Os valores Ru_{max} com a medição com a sonda apresentam uma pequena variação entre valores e, em geral, um ligeiro crescimento com o aumento da altura significativa (H_s).

A comparação entre metodologias para Ru_{max} mostrou que os valores de Ru_{max} obtidos com a sonda e com a metodologia *TimeStack* são da mesma ordem de grandeza. Há, no entanto, diferenças mais significativas entre valores da sonda e da metodologia *TimeStack* para os casos de $Tp=16$ s associado a $H_s=6.0$ m e de $Tp=20$ s associado a $H_s=10.0$ m, Tabela 4.2, com valores de 13.32% e 9.45%, respetivamente. Em detalhe, verifica-se:

- Para a condição de agitação de $Tp=16$ s associado a $H_s=6$ m, onde ocorreu galgamento, o Ru_{max} obtido com a sonda é de 9.49 m, é inferior ao valor de 10.95 m do bordo livre e, portanto, ao valor obtido com a metodologia *TimeStack*. Isso sugere que a sonda não identificou nenhum dos espraiaamentos como tendo originado galgamento, ao passo que pela metodologia *TimeStack*, é detetada a ocorrência de dois galgamentos ao longo de todo o ensaio. As causas para esta diferença podem estar relacionadas com:
 - Ocorrência de espraiaamentos correspondentes a lâminas de água que passam entre a sonda e o talude, não sendo detetadas pela zona mais alta da sonda, conduzindo assim a uma subestimação do Ru_{max} . Esta limitação não se aplica à

metodologia *TimeStack*, que, por ser uma metodologia baseada em imagem, não está sujeita a este tipo de limitações;

- Ocorrência de um lapso temporal/espacial entre a medição no transeto definido na metodologia *TimeStack* e a passagem da lâmina de água na sonda. Atendendo a que ambos os locais de medição (sonda e transeto) não estão exatamente sobrepostos, Figura 4.13, a obliquidade da agitação pode ser um fator determinante nas diferenças obtidas. Ou seja, um determinado espraçamento atinge o coroamento na zona do transeto, mas quando chega à sonda (alguns centímetros ao lado) já sofreu alguma perda em altura.
- Para a condição de agitação de E20N, BM, $T_p=20$ s e $H_s=10$ m, o espraçamento máximo medido pela sonda ($Ru_{max}=11.99$ m) ultrapassou o valor do bordo livre, $R_c=10.95$ m, o que apenas é justificável com o facto de o galgamento poder originar salpicos que atingem a sonda em locais ligeiramente acima do coroamento, onde não existe qualquer espraçamento, originando picos na série temporal.

É de salientar que as diferenças de Ru_{max} encontradas em entre ambas as metodologias correspondem a valores máximos absolutos de 1.46 m, o que à escala do modelo corresponde a 2.5 cm.



Figura 4.13 – Exemplo de caso onde a localização da sonda relativamente ao transeto poderá originar um lapso temporal/espacial, influenciando os resultados.

A análise do $Ru_{2\%}$ permitiu concluir que:

- Os valores de $Ru_{2\%}$ variam entre 9.01 m e 10.95 m para $T_p=16$ s e entre 9.89 m e 11.51 m para $T_p=20$ s;
- Os valores de $Ru_{2\%}$ obtidos pela metodologia *TimeStack* são, na sua maioria, iguais ao bordo livre (10.95 m) atendendo a que houve galgamentos muito frequentes. Houve apenas um ensaio, $T_p=16$ s associado a $H_s=6$ m, em que o valor de $Ru_{2\%}$

TimeStack difere do valor do Ru_{max} , pois apenas ocorreram dois galgamentos indicados na Figura 4.14;

- Os valores de $Ru_{2\%}$ com a medição com a sonda apresentam, um ligeiro crescimento com o aumento da altura significativa (H_s), em geral;
- A comparação entre metodologias mostrou que, para $T_p=16$ s, os valores de $Ru_{2\%}$ obtidos com ambas as metodologias são da mesma ordem de grandeza, bem como o seu andamento com o aumento de H_s . Para $T_p=20$ s, nota-se uma diferença no que diz respeito ao andamento dos valores de $Ru_{2\%}$ com o aumento de H_s (no caso de *TimeStack* é constante e no caso da sonda há um crescimento com H_s). Tal como com o Ru_{max} , há, no entanto, diferenças entre os valores da sonda e da metodologia *TimeStack*, Tabela 4.2, nomeadamente a subestimação das medições com sonda para $T_p=16$ s associado a $H_s=6$ m e $T_p=20$ s associado a $H_s=6$ e 8 m e a sobrestimação para $T_p=20$ s associado a $H_s=10$ m, pelas razões apresentadas anteriormente na análise de Ru_{max}
- As diferenças de $Ru_{2\%}$ encontradas entre ambas as metodologias correspondem a valores máximos absolutos de 1.52 m, o que à escala do modelo corresponde a 2.6 cm.

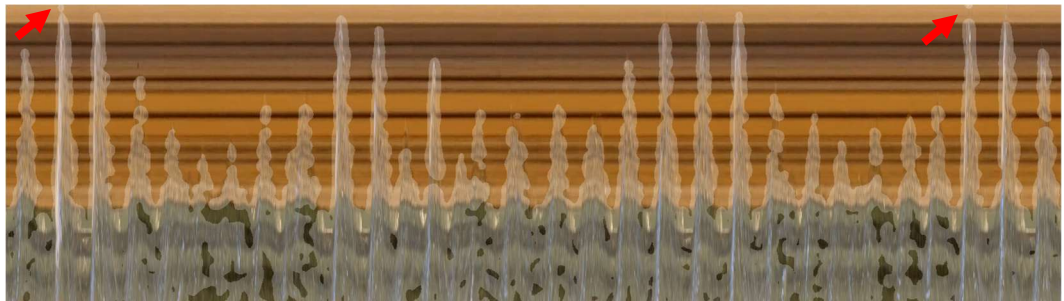


Figura 4.14 – Imagem TSK com ocorrências de galgamentos indicadas pelas setas vermelhas.

A análise do Ru_m permitiu concluir que:

- Os valores de Ru_m variam entre 4.05 m e 6.27 m para $T_p=16$ s e entre 4.79 m e 7.06 m para $T_p=20$ s;
- Os valores Ru_m crescem com o aumento da altura significativa (H_s), qualquer que seja a metodologia;
- A comparação entre metodologias mostrou que os valores obtidos de Ru_m são da mesma ordem de grandeza, bem como o seu andamento com o aumento de H_s , tanto para $T_p=16$ s como para $T_p=20$ s. As diferenças encontradas entre as duas metodologias, são inferiores às observadas para Ru_{max} e $Ru_{2\%}$;

- As diferenças de Ru_m encontradas entre ambas as metodologias correspondem a valores máximos absolutos de 0.63 m, o que à escala do modelo corresponde a 1.1 cm.

4.2.1.2 PM

Da Figura 4.15 à Figura 4.16 apresenta-se, para o rumo E20N e para nível de maré de PM, a variação do Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias. Foi tomada como referência para o Ru_{max} possível, a elevação correspondente ao bordo livre (R_c) correspondente ao nível de PM (9.15 m).

Na Tabela 4.3 são representados os valores das diferenças entre os valores dos diferentes parâmetros estatísticos obtidos com as duas metodologias, sendo a diferença absoluta feita relativamente ao R_c .

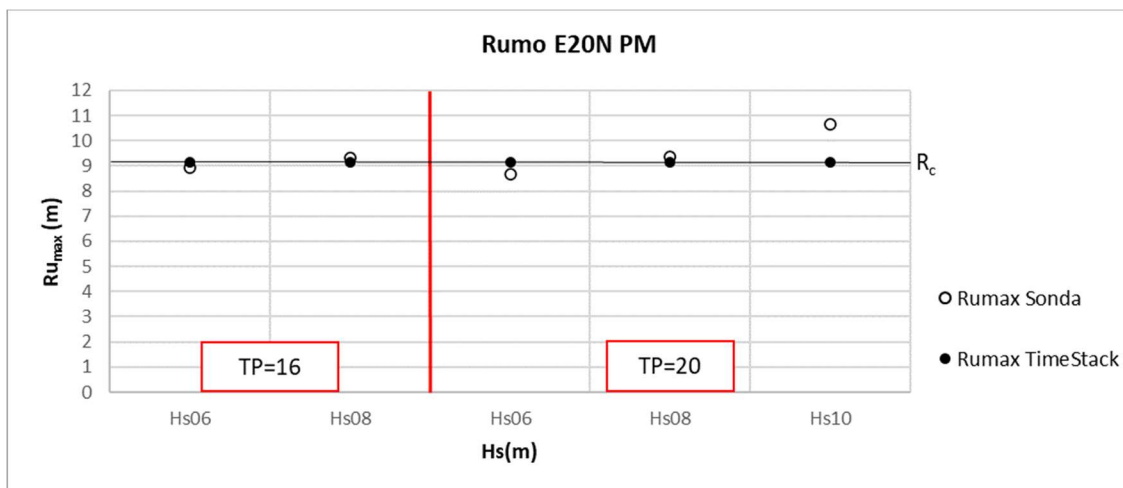


Figura 4.15 – Rumo E20N. PM. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $Tp=16$ s e com $Tp=20$ s

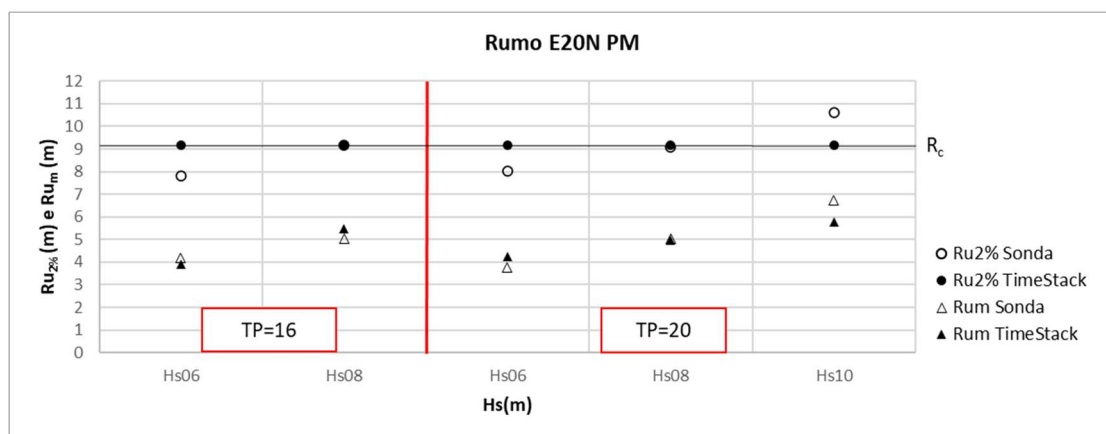


Figura 4.16 – Rumo E20N. PM. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $Tp=16$ s e com $Tp=20$ s

Tabela 4.3 - Rumo E20N. PM. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

Ensaio	Diferenças relativas [%]			Diferenças absolutas [m]		
	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}
PMTp16Hs06	3.17	14.88	2.32	0.29	1.36	0.21
PMTp16Hs08	4.81	0.09	1.82	0.44	0.01	0.17
PMTp20Hs06	5.62	12.13	5.29	0.51	1.11	0.48
PMTp20Hs08	0.70	0.82	2.13	0.06	0.08	0.20
PMTp20Hs10	10.53	16.13	16.51	0.96	1.48	1.51

Para as condições de agitação incidente de E20N associadas a PM, a análise do Ru_{max} permitiu concluir que

- Os valores de Ru_{max} estão compreendidos entre 8.94 m e 9.32 m para $T_p=16$ s e entre 8.67 m e 10.66 m para $T_p=20$ s;
- Os valores de Ru_{max} obtidos pela metodologia com a análise de vídeo são iguais ao bordo livre (9.15 m), uma vez que em todos os ensaios analisados ocorreu pelo menos, um galgamento;
- Os valores Ru_{max} com a medição com a sonda apresentam uma pequena variação entre valores e, em geral, um ligeiro crescimento com o aumento da altura significativa (H_s).

A comparação entre metodologias para Ru_{max} mostrou que os valores obtidos com a sonda e com a metodologia *TimeStack* são da mesma ordem de grandeza. Há, no entanto, diferenças mais significativas entre valores da sonda e da metodologia *TimeStack* para os casos de $T_p=20$ s associado a $H_s=6.0$ m e de $T_p=20$ s associado a $H_s=10.0$ m, Tabela 4.3, com valores de 5.29% e 16.51%, respetivamente. Em detalhe, verifica-se:

- para a condição de agitação de $T_p=20$ s associado a $H_s=6$ m, onde ocorreu galgamento, o Ru_{max} obtido com a sonda é de 8.67 m, é inferior ao valor de 9.15 m do bordo livre e, portanto, ao valor obtido com a metodologia *TimeStack*, justificando-se pelas mesmas razões apresentadas nos ensaios de BM, onde a lâmina de água não é detetada pela sonda e os locais de medição, sonda e transeto, não estarem exatamente sobrepostos (ver 4.2.1.1);
- para a condição de agitação de $T_p=20$ s associado a $H_s=10$ m, o espriamento máximo medido pela sonda ($Ru_{max}=10.66$ m) ultrapassou o valor do bordo livre, $R_c=9.15$ m, justificado com o facto de o galgamento poder originar salpicos que atingem a

sonda em locais ligeiramente acima do coroamento, onde não existe qualquer espriamento, originando picos na série temporal.

A análise do $Ru_{2\%}$ permitiu concluir que:

- Os valores de $Ru_{2\%}$ variam entre os valores de 7.79 m e 9.16 m para $T_p=16$ s e 8.04 m e 10.63 m para o $T_p=20$ s;
- Os valores $Ru_{2\%}$ obtidos pela metodologia *TimeStack* são iguais a Ru_{max} e ao bordo livre (9.15 m) atendendo a que houve galgamentos muito frequentes;
- Os valores $Ru_{2\%}$ com a medição com a sonda apresentam um aumento com o aumento da altura significativa (H_s).

A comparação entre metodologias mostrou que os valores obtidos de $Ru_{2\%}$ são semelhantes, mas enquanto na sonda se verifica um crescimento de $Ru_{2\%}$ com H_s no caso da *TimeStack* esse valor é constante, qualquer que seja H_s . Tal como com o Ru_{max} , há, no entanto, diferenças entre os valores da sonda e da metodologia *TimeStack*, Tabela 4.3, nomeadamente a subestimação das medições com sonda para $T_p=16$ s e 20 s e $H_s=6$ m, e a sobrestimação para $T_p=20$ s e $H_s=10$ m, pelas razões já mencionadas anteriormente.

É de salientar que, para Ru_{max} e para $Ru_{2\%}$, as diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 1.36 m, o que à escala do modelo corresponde a 2.3 cm.

A análise do Ru_m permitiu concluir que

- Os valores de Ru_m variam entre 3.9 m e 5.46 m para $T_p=16$ s e entre 3.75 m e 6.73 m para $T_p=20$ s;
- Os valores Ru_m crescem com o aumento da altura significativa (H_s), qualquer que seja a metodologia utilizada;
- A comparação entre metodologias mostrou que os valores obtidos de Ru_m são semelhantes bem como o seu andamento com H_s , tanto para $T_p=16$ s como para $T_p=20$ s. As diferenças encontradas entre as duas metodologias são inferiores às observadas para Ru_{max} e $Ru_{2\%}$, com exceção do ensaio $T_p=16$ s $H_s=8$ m.
- A diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 0.96 m, o que à escala do modelo corresponde a 1.6 cm.

4.2.1.3 PMS

Na Figura 4.17 e na Figura 4.18 apresenta-se, para o rumo E20N e para nível de maré de PMS, a variação do Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias. Foi tomada como

referência para o Ru_{max} possível, a elevação correspondente ao bordo livre (R_c) correspondente ao nível de PMS (7.95 m).

Na Tabela 4.2, são representados os valores das diferenças entre os valores dos diferentes parâmetros estatísticos obtidos com as duas metodologias, sendo a diferença absoluta feita relativamente ao R_c .

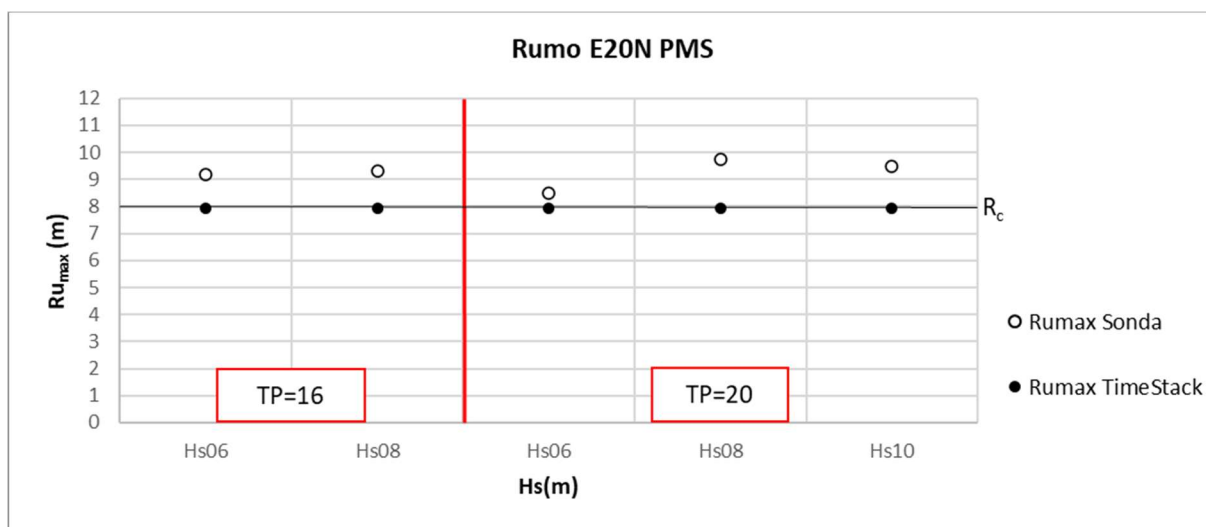


Figura 4.17 – Rumo E20N. PMS. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $Tp=16$ s e com $Tp=20$ s

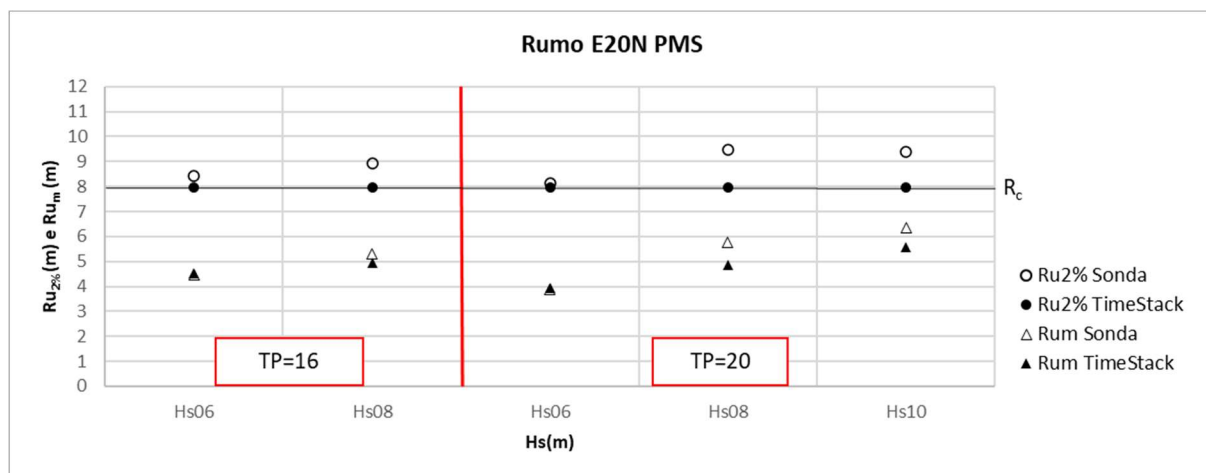


Figura 4.18 – Rumo E20N. PMS. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $Tp=16$ s e com $Tp=20$ s

Tabela 4.4 - Rumo E20N. PMS. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

Ensaio	Diferenças relativas [%]			Diferenças absolutas [m]		
	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}
PMSTp16Hs06	0.92	5.99	15.50	0.07	0.48	1.23
PMSTp16Hs08	4.31	12.27	16.96	0.34	0.98	1.35
PMSTp20Hs06	0.86	2.04	7.05	0.07	0.16	0.56
PMSTp20Hs08	11.23	18.96	22.62	0.89	1.51	1.80
PMSTp20Hs10	9.78	18.12	19.25	0.78	1.44	1.53

Para as condições de agitação incidente de E20N, PMS, a análise do Ru_{max} permitiu concluir que:

- Os valores de Ru_{max} estão compreendidos entre 7.95 m e 9.30 m para $T_p=16$ s e entre 7.95 m e 9.75 m para $T_p=20$ s;
- Os valores de Ru_{max} obtidos pela metodologia com a análise de vídeo são iguais ao bordo livre (7.95 m), uma vez que em todos os ensaios analisados ocorreu pelo menos, um galgamento;
- Os valores Ru_{max} com a medição com a sonda apresentam, em geral, um ligeiro crescimento com o aumento da altura significativa (H_s) para $T_p=16$ s. No caso de $T_p=20$ s, verificou-se a diminuição dos valores de 9.75 m para 9.48 m do ensaio $T_p=20$ s $H_s=8$ m para $T_p=20$ s $H_s=10$ m, justificando-se com a existência de alguma rebentação passível de diminuir a H_s junto à obra e, consequentemente, o espraioamento.
- Para todos os ensaios verificou-se que os espraioamentos máximos medidos pela sonda ultrapassaram o valor do bordo livre, $R_c=7.95$ m, o que apenas é justificável com o facto de o galgamento poder originar salpicos que atingem a sonda em locais ligeiramente acima do coroamento, onde não existe qualquer espraioamento, originando picos na série temporal. Nota-se que este fenómeno (que também acontecia em BM e PM) é observado em todos os ensaios de PMS.
- Os valores obtidos com a sonda são consistentemente superiores aos da metodologia *TimeStack*, e apresentam variação com o aumento de H_s , o que não acontece com os valores obtidos pela metodologia *TimeStack*. As diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 1.53 m, o que à escala do modelo corresponde a 2.6 cm, valor esse que é consistente com a

possibilidade de ocorrência de salpicos em zonas da sonda ligeiramente acima do coroamento.

A análise do $Ru_{2\%}$ permitiu concluir que

- Os valores de $Ru_{2\%}$ variam entre 7.95 m e 8.93 m para $T_p=16$ s e 7.95 m e entre 9.46 m para $T_p=20$ s;
- Os valores $Ru_{2\%}$ obtidos pela metodologia *TimeStack* são iguais a Ru_{max} e ao bordo livre (7.95 m) atendendo a que houve galgamentos muito frequentes;
- Os valores $Ru_{2\%}$ obtidos com a medição com a sonda crescem, de um modo geral, com o aumento da altura significativa (H_s);
- Tal como com o Ru_{max} , os valores de $Ru_{2\%}$ obtidos com sonda são consistentemente superiores aos valores obtidos com a metodologia *TimeStack*, Tabela 4.3, atendendo a possíveis salpicos em zonas da sonda localizadas a cotas superiores ao coroamento da obra.
- Para $Ru_{2\%}$, as diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 1.51 m, os quais correspondem no modelo a 2.6 cm.

A análise do Ru_m permitiu concluir que:

- Os valores de Ru_m variam entre 4.45 m e 5.28 m para $T_p=16$ s e entre 3.88 m e 6.37 m para o $T_p=20$ s;
- Os valores Ru_m crescem com o aumento da altura significativa (H_s), qualquer que seja a metodologia utilizada;
- A comparação entre metodologias mostrou que os valores obtidos de Ru_m são da mesma ordem de grandeza bem como o seu andamento com H_s , tanto para $T_p=16$ s como para $T_p=20$ s. As diferenças encontradas entre as duas metodologias são inferiores às observadas para Ru_{max} e $Ru_{2\%}$;
- As diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 0.89 m, os quais correspondem no modelo a 1.5 cm.

4.2.2 Rumo S35E

Para este rumo foram obtidos valores de espreamento para cada ensaio através da metodologia *TimeStack* e da sonda, a fim de efetuar uma análise comparativa e avaliar a correlação entre os mesmos. Na Tabela 4.5 é apresentado o resumo dos resultados obtidos com estas duas metodologias.

Na Figura 4.10 são ilustrados os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as técnicas de medição, para os ensaios realizados com o rumo S35E, associado aos níveis BM, PM e PMS.

Tabela 4.5 - Rumo S35E. Comparação entre os resultados obtidos com o *TimeStack* e com sonda. Resultados relativos ao estado de agitação e níveis de maré de BM, PM e PMS

Ensaio	Nível	Tp	Hs	TimeStack			Sonda		
				Ru_{max} [m]	$Ru_{2\%}$ [m]	Ru_m [m]	Ru_{max} [m]	$Ru_{2\%}$ [m]	Ru_m [m]
BMTp16Hs06	BM	16	6	10.95	10.95	4.97	10.43	9.63	4.10
BMTp16Hs08		16	8	10.95	10.95	6.99	10.86	10.50	5.83
BMTp20Hs06		20	6	10.95	10.95	5.31	9.29	9.21	4.55
BMTp20Hs08		20	8	10.95	10.95	6.10	9.68	9.45	5.46
BMTp20Hs10		20	10	10.95	10.95	7.83	10.48	10.32	8.34
PMTp16Hs06	PM	16	6	9.15	9.15	3.04	7.90	7.21	3.42
PMTp16Hs08		16	8	9.15	9.15	4.86	7.92	7.69	4.21
PMTp20Hs06		20	6	9.15	9.15	4.99	8.18	8.01	4.56
PMTp20Hs08		20	8	9.15	9.15	6.05	9.44	9.20	5.92
PMTp20Hs10		20	10	9.15	9.15	6.60	9.03	8.92	6.65
PMSTp16Hs06	PMS	16	6	7.95	7.95	4.31	8.01	7.65	3.74
PMSTp16Hs08		16	8	7.95	7.95	5.08	8.28	8.07	4.78
PMSTp20Hs06		20	6	7.95	7.95	4.69	7.03	6.25	3.48
PMSTp20Hs08		20	8	7.95	7.95	5.98	9.14	8.02	5.02
PMSTp20Hs10		20	10	7.95	7.95	6.35	9.25	8.17	4.98

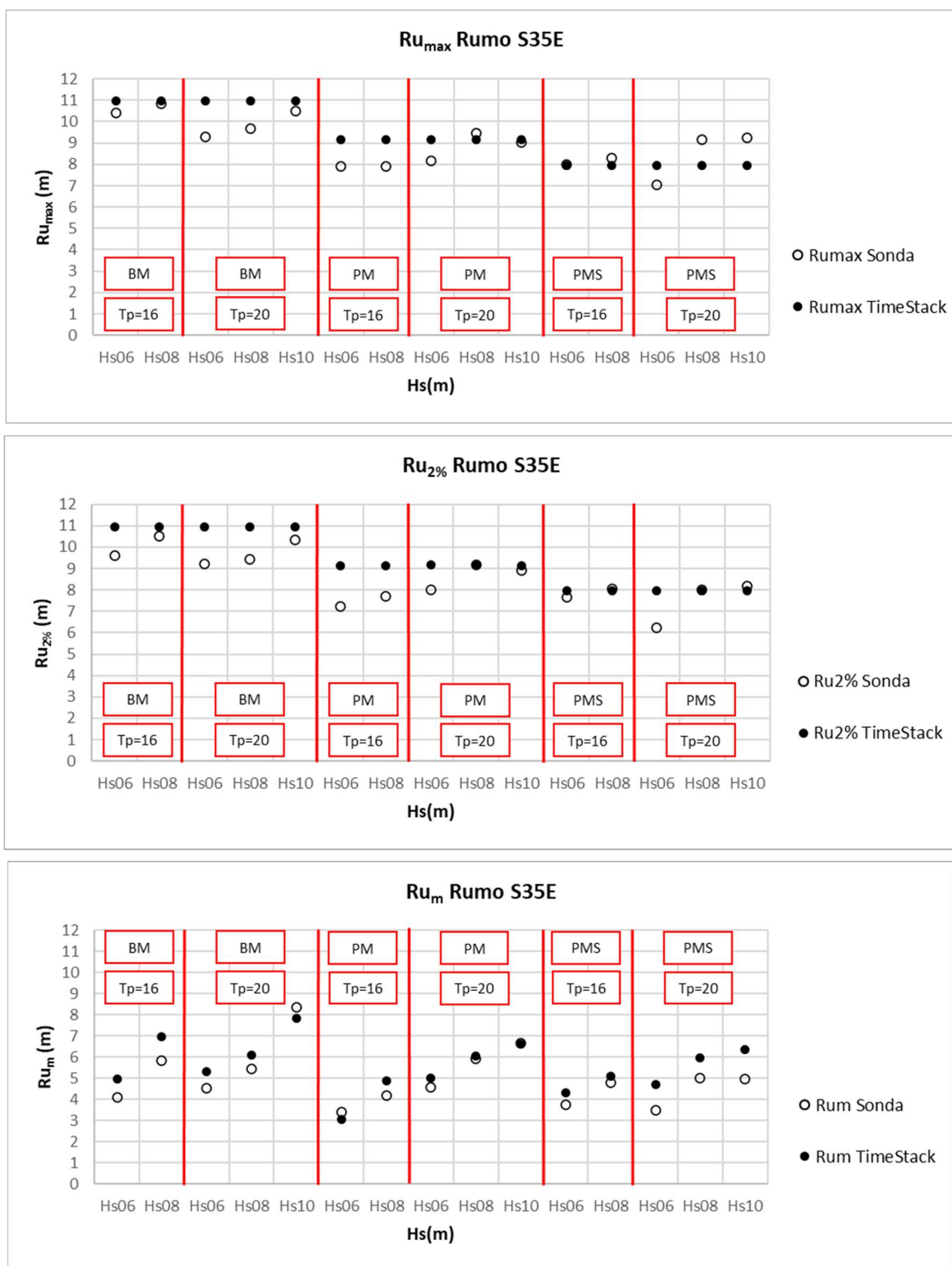


Figura 4.19 - S35E. BM, PM e PMS. Valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos através da medição com sonda e com a metodologia *TimeStack*

4.2.2.1 BM

Da Figura 4.11 à Figura 4.12 apresenta-se, para o rumo S35E e para nível de maré de BM, a variação do Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias. Foi tomada como referência para o Ru_{max} possível, a elevação correspondente ao bordo livre (R_c) correspondente ao nível de BM (10.95 m).

Na Tabela 4.2, são representados os valores das diferenças entre os valores dos diferentes parâmetros estatísticos obtidos com as duas metodologias, sendo a diferença absoluta feita relativamente ao R_c .

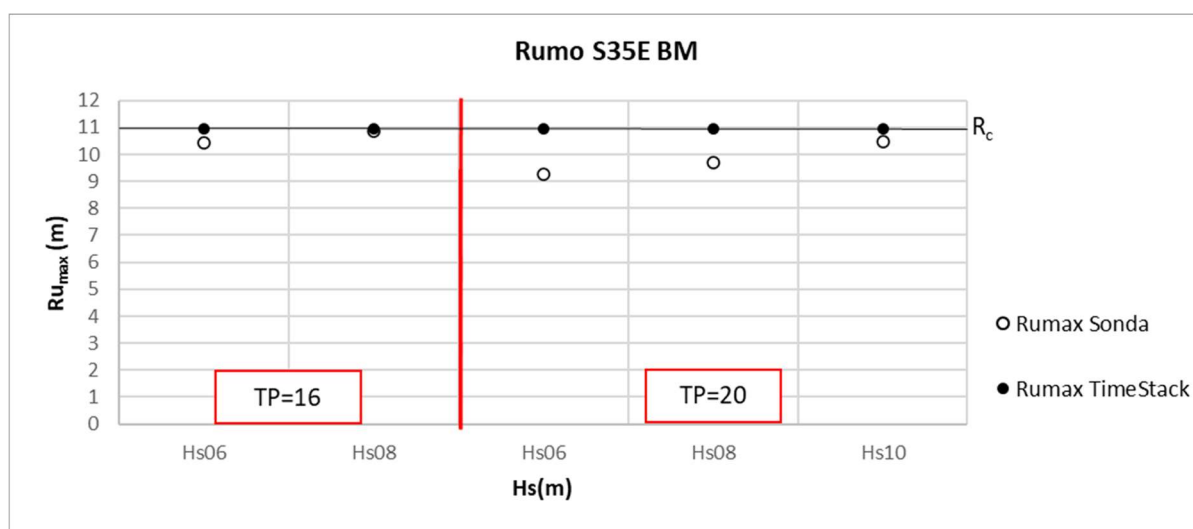


Figura 4.20 – Rumo S35E. BM. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

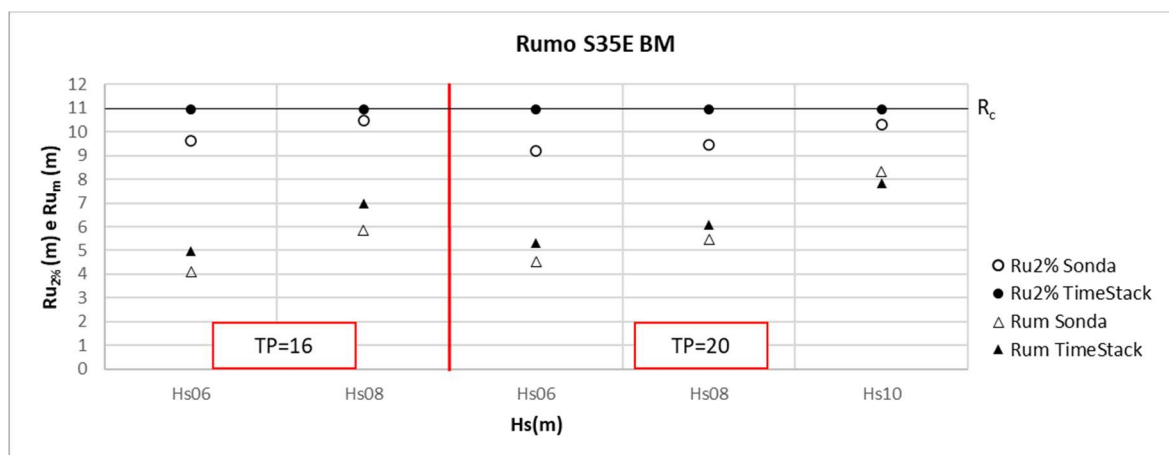


Figura 4.21 – Rumo S35E. BM. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e $T_p=20$ s

Tabela 4.6 - Rumo S35E, BM. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

Ensaio	Diferenças relativas [%]			Diferenças absolutas [m]		
	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}
BMTp16Hs06	7.94	12.12	4.83	0.87	1.33	0.53
BMTp16Hs08	10.52	4.16	0.90	1.15	0.46	0.10
BMTp20Hs06	6.91	16.03	15.34	0.76	1.76	1.68
BMTp20Hs08	5.79	13.86	11.77	0.64	1.52	1.29
BMTp20Hs10	4.69	5.74	4.27	0.51	0.63	0.47

Para as condições de agitação incidente de S35E, BM, a análise do Ru_{max} permitiu concluir que

- Os valores de Ru_{max} estão compreendidos entre 10.43 m e 10.95 m para $T_p=16$ s e entre 9.29 m e 10.95 m para $T_p=20$ s;
- Os valores de Ru_{max} obtidos pela metodologia com a análise de vídeo são iguais ao bordo livre (10.95 m), uma vez que em todos os ensaios analisados ocorreu pelo menos, um galgamento;
- Os valores Ru_{max} com a medição com a sonda apresentam uma pequena variação entre valores e, em geral, um ligeiro crescimento com o aumento da altura significativa (H_s).

A comparação entre metodologias para Ru_{max} mostrou que os valores de Ru_{max} obtidos com a sonda e com a metodologia *TimeStack* são da mesma ordem de grandeza. Há, no entanto, diferenças mais significativas entre valores da sonda e da metodologia *TimeStack* para os casos $T_p=20$ para $H_s=6$ e $H_s=8$, Tabela 4.2, associadas a valores de 15.35% e 11.77%, respectivamente.

É de salientar que as diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 1.68 m, o que à escala do modelo corresponde a 2.9 cm.

A análise do $Ru_{2\%}$ permitiu concluir que

- Os valores de $Ru_{2\%}$ variam entre 9.63 m e 10.95 m para $T_p=16$ s e entre 9.21 m e 10.95 m para o $T_p=20$ s;
- Os valores $Ru_{2\%}$ obtidos pela metodologia *TimeStack* são iguais ao valor do bordo livre (10.95 m) atendendo a que houve galgamentos muito frequentes.

- Os valores $Ru_{2\%}$ com a medição com a sonda apresentam, um ligeiro crescimento com o aumento da altura significativa (H_s), em geral;
- A comparação entre metodologias mostrou que os valores de $Ru_{2\%}$ obtidos são da mesma ordem de grandeza bem como o seu andamento com H_s , para $T_p=16$ s. Para $T_p=20$ s, já se nota uma diferença no que diz respeito ao andamento dos valores de $Ru_{2\%}$ (no caso de *TimeStack* é constante e no caso da sonda há um crescimento com H_s) Tal como com o Ru_{max} , há, no entanto, diferenças entre os valores da sonda e da metodologia *TimeStack*, Tabela 4.2, nomeadamente a subestimação das medições com sonda para $T_p=20$ s com $H_s=6$ m e $H_s=8$ m.
- É de salientar que as diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 1.76 m, o que à escala do modelo corresponde a 3.0 cm.

A análise do Ru_m permitiu concluir que:

- Os valores de Ru_m variam entre 4.10 m e 6.99 m para $T_p=16$ s e 4.55 m e entre 8.34 m para $T_p=20$ s;
- Os valores Ru_m crescem com o aumento da altura significativa (H_s), qualquer que seja a metodologia;
- A comparação entre metodologias mostrou que os valores obtidos de Ru_m são da mesma ordem de grandeza bem como o seu andamento com H_s , tanto para $T_p=16$ s como para $T_p=20$ s. As diferenças encontradas entre as duas metodologias, são inferiores às observadas para Ru_{max} e $Ru_{2\%}$.

4.2.2.2 PM

Da Figura 4.15 à Figura 4.16 apresenta-se, para o rumo S35E e para nível de maré de PM, a variação do Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias. Foi tomada como referência para o Ru_{max} possível, a elevação correspondente ao bordo livre (R_c) correspondente ao nível de PM (9.15 m).

Na Tabela 4.3 são representados os valores das diferenças entre os valores dos diferentes parâmetros estatísticos obtidos com as duas metodologias, sendo a diferença absoluta feita relativamente ao R_c .

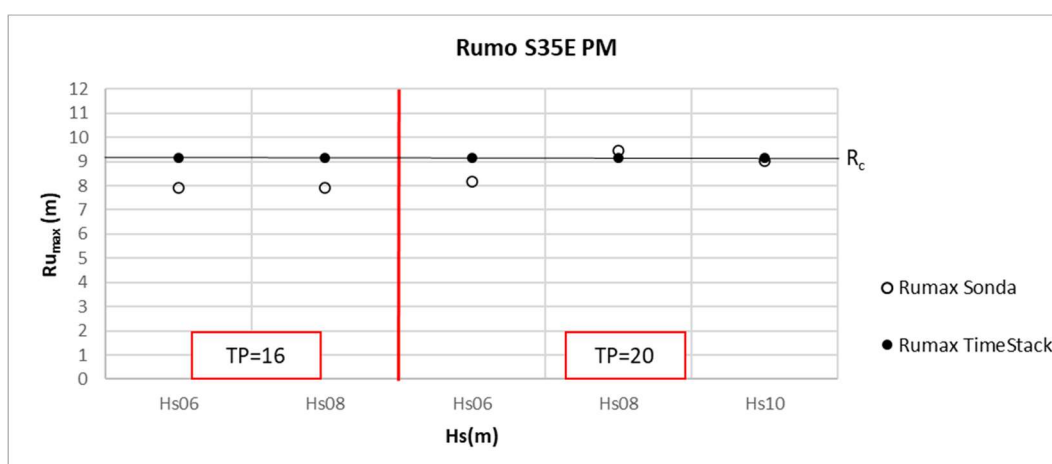


Figura 4.22 – Rumo S35E. PM. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

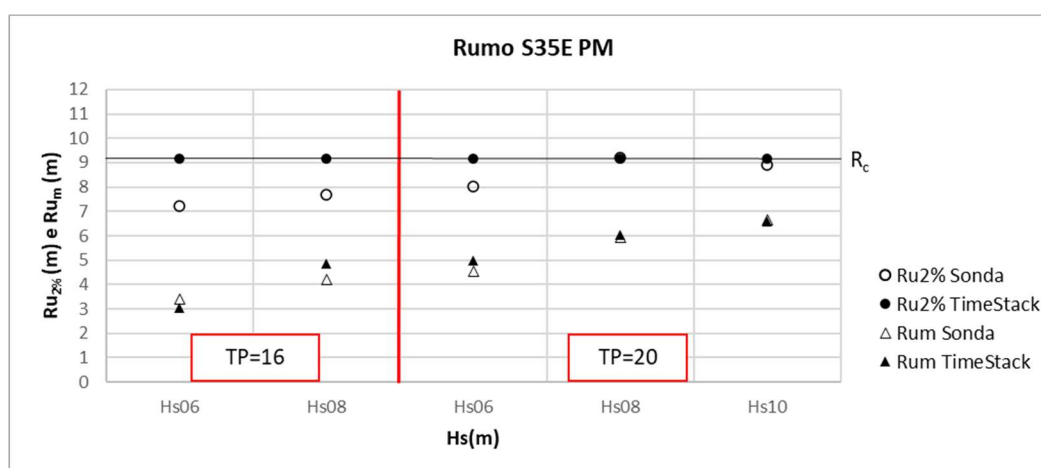


Figura 4.23 – Rumo S35E. PM. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

Tabela 4.7 - S35E. PM. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

Ensaio	Diferenças relativas [%]			Diferenças absolutas [m]		
	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}
PMTp16Hs06	4.12	21.15	13.68	0.38	1.94	1.25
PMTp16Hs08	7.19	15.91	13.47	0.66	1.46	1.23
PMTp20Hs06	4.72	12.48	10.64	0.43	1.14	0.97
PMTp20Hs08	1.42	0.46	3.11	0.13	0.04	0.29
PMTp20Hs10	0.49	2.47	1.32	0.04	0.23	0.12

Para as condições de agitação incidente de S35E, PM, a análise do Ru_{max} permitiu concluir que:

- Os valores de Ru_{max} estão compreendidos entre 7.90 m e 9.15 m para $T_p=16$ s e entre 8.18 m e 9.44 m para $T_p=20$ s;
- Os valores de Ru_{max} obtidos pela metodologia com a análise de vídeo são iguais ao bordo livre (9.15 m), uma vez que em todos os ensaios analisados ocorreu pelo menos, um galgamento;
- Os valores Ru_{max} com a medição com a sonda apresentam uma pequena variação entre valores e, em geral, um ligeiro crescimento com o aumento da altura significativa (H_s), com exceção da transição do ensaio correspondente a $H_s=8$ m para o ensaio $H_s=10$ m para $T_p=20$ s onde o valor de $Ru_{2\%}$ decresce, apresentando o mesmo comportamento de Ru_{max} .

A comparação entre metodologias para Ru_{max} mostrou que os valores obtidos com a sonda e com a metodologia *TimeStack* são da mesma ordem de grandeza. Há, no entanto, diferenças mais significativas entre valores da sonda e da metodologia *TimeStack* para os casos de $T_p=16$ s associado a $H_s=6.0$ m e a $H_s=8.0$ m, Tabela 4.3, com valores de 13.68% e 13.47%, respetivamente. Em detalhe, verifica-se que:

- Para as condições de agitação de S35E, PM, com $T_p=16$ s associada $H_s=6.0$ m e a $H_s=8.0$ m, onde ocorreu galgamento, o Ru_{max} obtido com a sonda é de 8.67 m, sendo inferior ao valor de 9.15 m do bordo livre e ao valor obtido com a metodologia *TimeStack*, justificando-se pelas mesmas razões apresentadas em 4.2.1.1 (algumas lâminas de água não terem sido detetadas pela sonda e os locais de medição, sonda e transeito, não serem exatamente coincidentes).
- Para a condição de agitação de S35E, BM, $T_p=20$ s e $H_s=8$ m, o espraçamento máximo medido pela sonda ($Ru_{max}=10.66$ m) ultrapassou o valor do bordo livre, $R_c=9.15$ m, justificado, mais uma vez, com o facto de o galgamento poder originar salpicos que atingem a sonda em locais ligeiramente acima do coroamento, onde não existe qualquer espraçamento.

É de salientar que as diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 1.25 m, o que à escala do modelo corresponde a 2.1 cm.

A análise do $Ru_{2\%}$ permitiu concluir que:

- Os valores de $Ru_{2\%}$ variam entre 7.21 m e 9.15 m para $T_p=16$ s e entre 8.01 m e 9.20 m para $T_p=20$ s;

- Os valores $Ru_{2\%}$ obtidos pela metodologia *TimeStack* são iguais a Ru_{max} e ao bordo livre (9.15 m) atendendo a que houve galgamentos muito frequentes;
- Os valores $Ru_{2\%}$ com a medição com a sonda apresentam, um crescimento com o aumento da altura significativa (H_s), exceto entre o ensaio para $T_p=20$ o $H_s=8$ para $H_s=10$ onde se verifica uma ligeira diminuição desse valor;
- A comparação entre metodologias mostrou que os valores obtidos de $Ru_{2\%}$ são semelhantes, mas enquanto na sonda se verifica um crescimento de $Ru_{2\%}$ com o aumento de H_s no caso da metodologia *TimeStack* esse valor é constante, qualquer que seja H_s . Tal como com o Ru_{max} , verificam-se diferenças entre os valores obtidos através da sonda e os obtidos pela metodologia *TimeStack*, Tabela 4.3, nomeadamente a subestimação das medições com sonda nos ensaios com $T_p=16$ s associado a $H_s=6.0$ m e a $H_s=8$ m bem como com $T_p=20$ s associado a $H_s=6.0$ m, pelas razões já mencionadas anteriormente.

A análise do Ru_m permitiu concluir que:

- Os valores de Ru_m variam entre 3.04 m e 4.86 m para $T_p=16$ s e entre 4.56 m e 6.65 m para $T_p=20$ s;
- Os valores Ru_m crescem com o aumento da altura significativa (H_s), qualquer que seja a metodologia utilizada;
- A comparação entre metodologias mostrou que os valores obtidos de Ru_m são da mesma ordem de grandeza bem como o seu andamento com H_s , tanto para $T_p=16$ s como para $T_p=20$ s. As diferenças encontradas entre as duas metodologias são inferiores às observadas para Ru_{max} e $Ru_{2\%}$.

4.2.2.3 PMS

Na Figura 4.17 e na Figura 4.18 apresenta-se, para o rumo S35E e para o nível de maré de PMS, a variação do Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias. Foi tomada como referência para o Ru_{max} possível, a elevação correspondente ao bordo livre (R_c) correspondente ao nível de PMS (7.95 m).

Na Tabela 4.2, são representados os valores das diferenças entre os valores dos diferentes parâmetros estatísticos obtidos com as duas metodologias, sendo a diferença absoluta feita relativamente ao R_c .

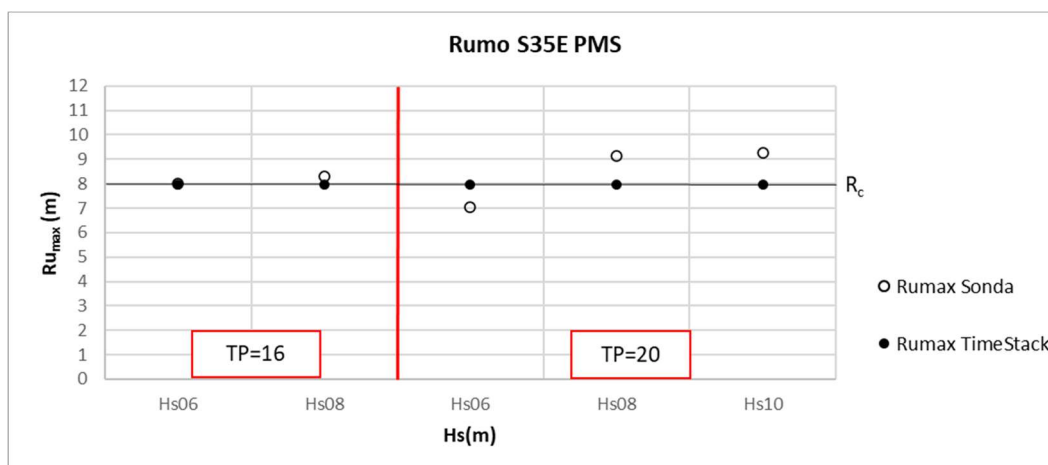


Figura 4.24 – Rumo S35E. PMS. Variação dos valores de Ru_{max} obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

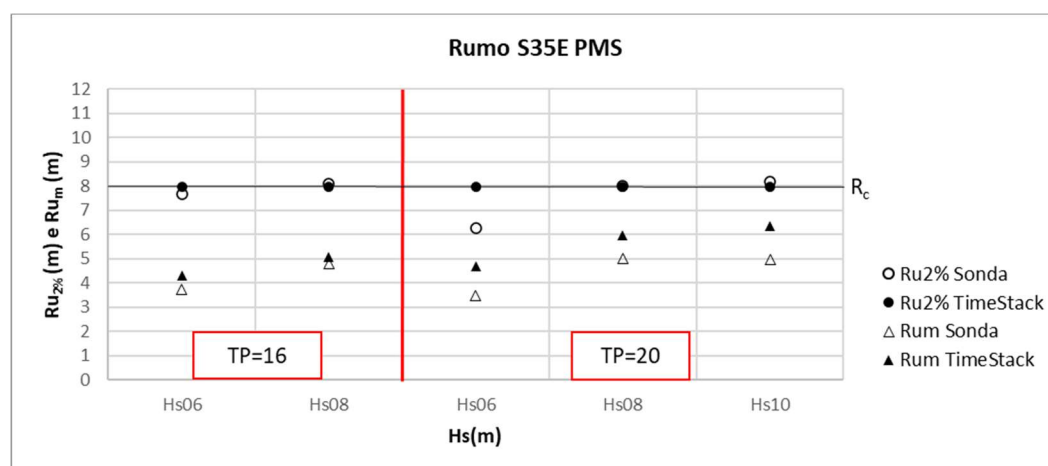


Figura 4.25 – Rumo S35E. PMS. Variação dos valores de $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

Tabela 4.8 - Rumo S35E. PMS. Diferenças entre os valores de Ru_{max} , $Ru_{2\%}$ e Ru_m obtidos com ambas as metodologias durante os ensaios realizados com $T_p=16$ s e com $T_p=20$ s

Ensaio	Diferenças relativas [%]			Diferenças absolutas [m]		
	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}	Ru_m	$Ru_{2\%}$	Ru_{max}
PMSTp16Hs06	7.23	3.81	0.70	0.58	0.30	0.06
PMSTp16Hs08	3.80	1.48	4.16	0.30	0.12	0.33
PMSTp20Hs06	15.23	21.50	11.80	1.21	1.71	0.94
PMSTp20Hs08	12.07	0.64	14.67	0.96	0.05	1.17
PMSTp20Hs10	17.15	2.60	16.09	1.37	0.21	1.28

Para as condições de agitação incidente de S35E, PMS, a análise do Ru_{max} permitiu concluir que:

- Os valores de Ru_{max} estão compreendidos entre 7.95 m e 8.28 m para $T_p=16$ s e entre 7.03 m e 9.25 m para $T_p=20$ s;
- Os valores de Ru_{max} obtidos pela metodologia com a análise de vídeo são iguais ao bordo livre (7.95 m), uma vez que em todos os ensaios analisados ocorreu pelo menos, um galgamento;
- Os valores Ru_{max} com a medição com a sonda apresentam, em geral, um ligeiro crescimento com o aumento da altura significativa (H_s) para $T_p=16$ s.
- Para todos os ensaios, exceto para o ensaio de $T_p=20$ s associado a $H_s=6.0$ m, verificou-se que os espraamentos máximos medidos pela sonda ultrapassaram o valor do bordo livre, $R_c=7.95$ m, o que apenas é justificável com o facto de o galgamento poder originar salpicos que atingem a sonda em locais ligeiramente acima do coroamento, onde não existe qualquer espraimento, originando picos na série temporal. Nota-se que este fenómeno (que também acontecia em BM e PM) é observado este fenómeno ocorre com mais frequência em ensaios de PMS.
- Os valores obtidos com a sonda são próximos dos obtidos pela metodologia *TimeStack*, mas variam com o aumento de H_s , ao contrário do que acontece com os valores obtidos pela metodologia *TimeStack*. As diferenças encontradas entre ambas as metodologias, correspondem a valores máximos absolutos de 1.17 m, o que à escala do modelo corresponde a 2.0 cm, valor esse que é consistente com a possibilidade de ocorrência de salpicos em zonas da sonda ligeiramente acima do coroamento.

A análise do $Ru_{2\%}$ permitiu concluir que:

- Os valores de $Ru_{2\%}$ variam entre 7.65 m e 8.07 m para $T_p=16$ s e entre 6.25 m e 8.17 m para $T_p=20$ s;
- Os valores $Ru_{2\%}$ obtidos pela metodologia *TimeStack* são iguais a Ru_{max} e ao bordo livre (7.95 m) atendendo a que houve galgamentos muito frequentes;
- Os valores $Ru_{2\%}$ obtidos com a medição com a sonda crescem com o aumento da altura significativa (H_s);
- Tal como com o Ru_{max} , os valores de $Ru_{2\%}$ obtidos com sonda são próximos aos valores obtidos com a metodologia *TimeStack*, Tabela 4.3.

A análise do Ru_m permitiu concluir que:

- Os valores de Ru_m variam entre 3.74 m e 5.08 m para $T_p=16$ s e entre 3.48 m e 6.35 m para $T_p=20$ s;
- Em todas as séries de ensaio, as diferenças entre as duas metodologias são inferiores às observadas para Ru_{max} e $Ru_{2\%}$. A exceção foram os ensaios realizados com $T_p=20$ s associado a $H_s=8.0$ m e a $H_s=10.0$ m, onde os valores de Ru_m obtidos entre as duas apresentam diferenças relevantes.
- Os valores Ru_m crescem com o aumento da altura significativa (H_s), qualquer que seja a metodologia utilizada;
- A comparação entre metodologias mostrou que os valores obtidos de Ru_m são da mesma ordem de grandeza bem como o seu andamento com H_s , para $T_p=16$ s.
- Os ensaios com $T_p=20$ s associado a $H_s=6.0$ m e a $H_s=10.0$ m apresentam diferenças significativas entre as duas metodologias, correspondentes a valores absolutos de 1.21 m e 1.37 m, respetivamente, o que, à escala do modelo corresponde a 2.1 cm e a 2.3 cm, respetivamente.

Apenas nestes dois ensaios se observaram diferenças tão relevantes no parâmetro Ru_m , podendo-se justificar estes resultados, com o facto do aumento do espaçamento entre blocos ao longo do ensaio, levando a que o *TimeStack* em vez de detetar a superfície dos blocos deteta, por vezes, fluxo de água ainda retida entre a primeira e a segunda camada de cubos (Figura 4.26).

Um outro fator que também contribui para estas diferenças é a existência de uma berma de coroamento onde, por vezes, fica retida alguma água que só reflui pela superfície do talude depois do espraçamento acontecer, simulando uma lâmina de galgamento (Figura 4.27). Este fenómeno é mais frequente em ensaios com grande intensidade de galgamentos.

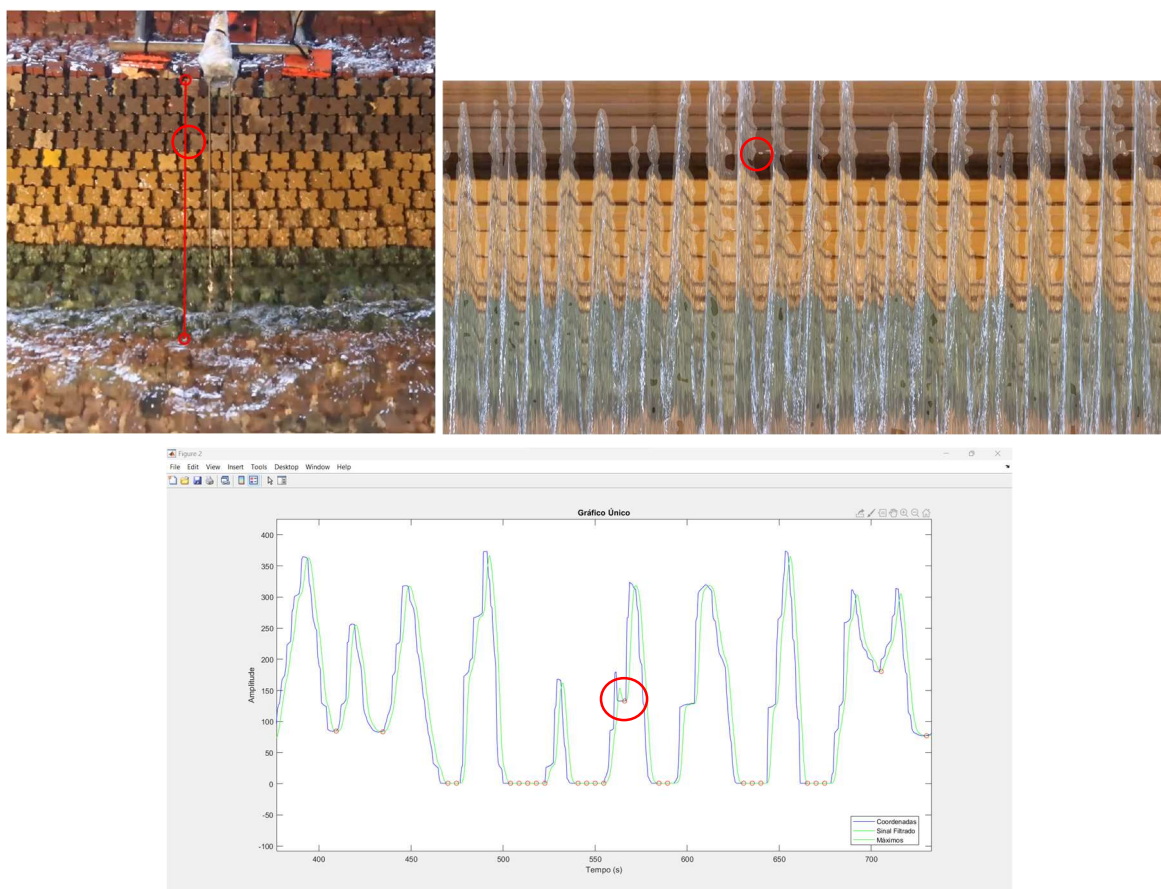


Figura 4.26 – Rumo S35E. Visualização espaçamento entre os cubos no talude (imagem à esquerda) visualização do efeito na imagem TSK (imagem à direita) visualização dos efeitos de retenção da água no espaçamento entre os cubos no sinal (imagem a baixo)



Figura 4.27 – Rumo S35E. fenómeno de retenção de água na berma de coroamento (à esquerda) e respetivos efeitos na imagem TSK (à direita)

4.3 Análise Comparativa com a Formulação Empírica do EurOtop

Neste subcapítulo, comparam-se os resultados de espraçamento obtidos a partir das sondas resistivas e da metodologia *TimeStack*, com as fórmulas do EurOtop (ver capítulo 2).

Na Tabela 4.9 e na Tabela 4.10 apresentam-se valores de espraçamento, $Ru_{2\%}$, e de espraçamento relativo ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) para os três níveis de maré, para períodos de pico de 16 s e 20 s e altura significativa de 6 m, 8 m e 10 m e para direções de S35E e E20N. É denotar que para estas direções S35E e E20N, o ângulo de incidência da onda relativo à perpendicular com o talude do quebra-mar é de 2° e 72°, respetivamente. Mais concretamente, nas tabelas indicam-se os valores de espraçamento, $Ru_{2\%}$, e de espraçamento relativo ($Ru_{2\%}/H_{m0}$):

- Estimados através da Eq 2.1 e da Eq 2.4, que constitui o limite superior dos valores de espraçamento;
- Obtidos a partir do processamento dos dados obtidos através da sonda e da metodologia *TimeStack*.

Tabela 4.9 - Rumo S35E. Comparação entre os resultados de espraçamento ($Ru_{2\%}$) e de espraçamento relativo ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir da sonda e da metodologia *TimeStack* com os valores estimados do EurOtop

Ensaio	H_{m0} (S17) [m]	Sonda		Vídeo		EurOtop	
		$Ru_{2\%}$ [m]	$Ru_{2\%}/H_{m0}$	$Ru_{2\%}$ [m]	$Ru_{2\%}/H_{m0}$	$Ru_{2\%}$ [m]	$Ru_{2\%}/H_{m0}$
BMTp16Hs6	7.79	9.63	1.24	10.95	1.41	12.68	1.63
BMTp16Hs8	10.15	10.50	1.03	10.95	1.08	16.27	1.60
BMTp20Hs6	7.81	9.21	1.18	10.97	1.40	12.95	1.66
BMTp20Hs8	9.95	9.45	0.95	10.97	1.10	16.31	1.64
BMTp20Hs10	11.74	10.3	0.88	10.95	0.93	19.07	1.62
PMTp16Hs6	7.13	7.21	1.01	9.15	1.28	11.65	1.63
PMTp16Hs8	9.28	7.69	0.83	9.15	0.99	14.95	1.61
PMTp20Hs6	8.62	8.01	0.93	9.15	1.06	14.19	1.65
PMTp20Hs8	9.42	9.20	0.98	9.15	0.97	15.47	1.64
PMTp20Hs10	11.47	8.92	0.78	9.15	0.80	18.58	1.62
PMSTp16Hs6	8.16	7.65	0.94	7.95	0.97	13.18	1.62
PMSTp16Hs8	10.33	8.07	0.78	7.95	0.77	16.54	1.60
PMSTp20Hs6	7.81	6.25	0.80	7.97	1.02	12.92	1.65
PMSTp20Hs8	9.90	8.02	0.81	7.97	0.81	16.11	1.63
PMSTp20Hs10	12.14	8.17	0.67	7.97	0.66	19.55	1.61

Tabela 4.10 - Rumo E20N. Comparação entre os resultados de espraçamento ($Ru_{2\%}$) e de espraçamento relativo ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir da sonda e da metodologia *TimeStack* com os valores estimados do EurOtop

Ensaio	H_{m0} (S17) [m]	Sonda		Vídeo		EurOtop	
		$Ru_{2\%}$ [m]	$Ru_{2\%}/H_{m0}$	$Ru_{2\%}$ [m]	$Ru_{2\%}/H_{m0}$	$Ru_{2\%}$ [m]	$Ru_{2\%}/H_{m0}$
BMTp16Hs6	6.11	9.01	1.47	10.52	1.72	5.47	0.90
BMTp16Hs8	7.58	10.15	1.34	10.95	1.44	6.71	0.89
BMTp20Hs6	6.03	9.89	1.64	10.95	1.82	5.53	0.92
BMTp20Hs8	7.62	10.91	1.43	10.95	1.44	6.92	0.91
BMTp20Hs10	9.33	11.51	1.23	10.95	1.17	8.41	0.90
PMTp16Hs6	5.95	7.79	1.31	9.15	1.54	5.33	0.90
PMTp16Hs8	7.39	9.16	1.24	9.15	1.24	6.54	0.88
PMTp20Hs6	6.23	8.04	1.29	9.15	1.47	5.69	0.91
PMTp20Hs8	7.85	9.08	1.16	9.15	1.17	7.07	0.90
PMTp20Hs10	9.31	10.63	1.14	9.15	0.98	8.37	0.90
PMSTp16Hs6	6.30	8.43	1.34	7.95	1.26	5.61	0.89
PMSTp16Hs8	7.74	8.93	1.15	7.95	1.03	6.82	0.88
PMSTp20Hs6	5.86	8.11	1.38	7.95	1.36	5.35	0.91
PMSTp20Hs8	7.58	9.46	1.25	7.95	1.05	6.84	0.90
PMSTp20Hs10	9.42	9.39	1.00	7.95	0.84	8.41	0.89

Da Figura 4.28 à Figura 4.29 apresentam-se apenas os resultados do espraçamento relativo ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir das sondas, da metodologia *TimeStack* e das fórmulas empíricas em função do parâmetro de rebentação $\xi_m-1,0$.

No caso do rumo S35N, verifica-se que todos os resultados obtidos a partir da sonda e da metodologia *TimeStack* são inferiores ao limite superior estimado pela formulação empírica do EurOtop (2018), Eq 2.4. É importante notar que a formulação empírica admite sempre a existência de um talude infinito na estrutura, limitado apenas pelo parâmetro de rebentação (parâmetro de Iribarren). Atendendo a que, o cálculo deste parâmetro não entrou em consideração com a batimetria de inclinação algo acentuada junto ao pé do talude, esta poderá ser uma justificação para a não convergência dos valores medidos no modelo com os valores previstos pela formulação.

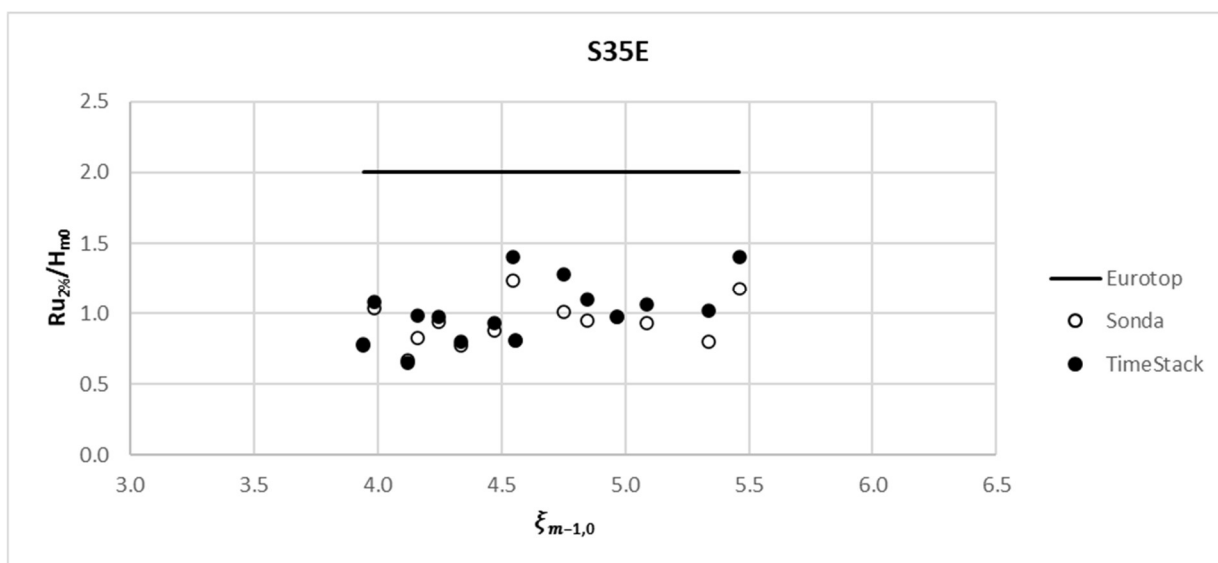


Figura 4.28 – S35E. Comparação entre os resultados ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir da sonda e da metodologia *TimeStack* com os valores estimados pela formulação do EurOtop

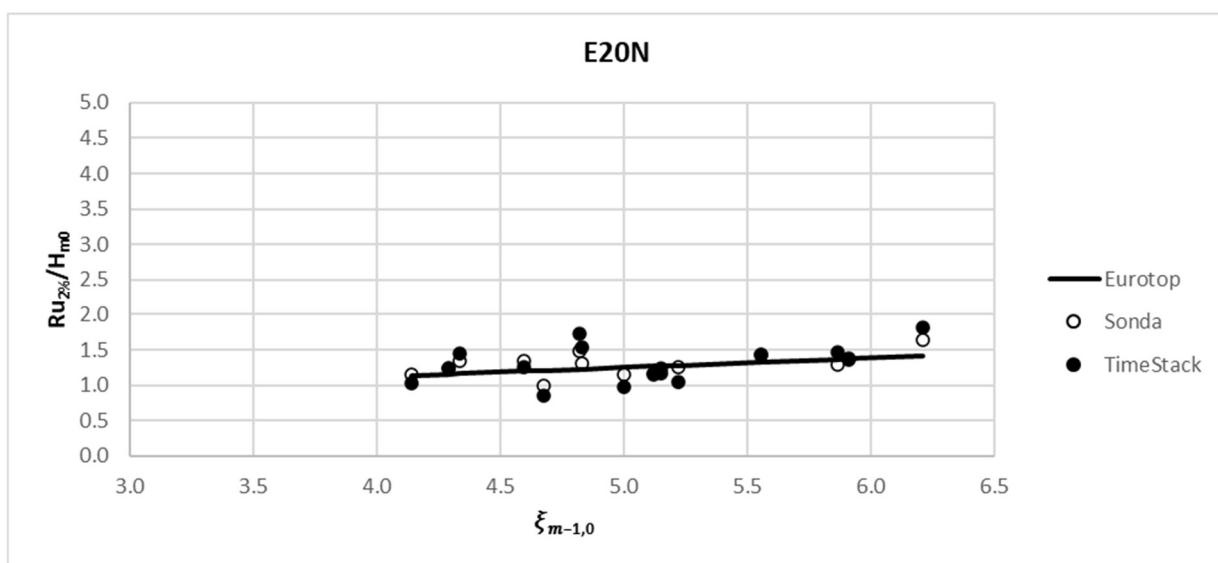


Figura 4.29 – E20N. Comparação entre os resultados ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) obtidos a partir da sonda e da metodologia *TimeStack* com os valores estimados pela formulação do EurOtop

Já no caso de E20N, verifica-se que os resultados obtidos a partir da sonda e da metodologia *TimeStack* convergem relativamente bem com os valores previstos pela formulação do EurOtop (2018), Eq 2.4.

A divergência de comportamento entre os valores obtidos com as fórmulas empíricas do EurOtop e os medidos nos ensaios (qualquer que seja a metodologia sonda ou metodologia *TimeStack*) é, pois, superior no caso do rumo com incidência frontal (S35E), onde um eventual empolamento causado pela batimetria não se encontra considerado na formulação. No caso

do rumo E20N, este efeito da batimetria encontra-se parcialmente amenizado pela incidência mais oblíqua da agitação, contribuindo para uma melhor convergência.

A comparação entre valores estimados pelas fórmulas empíricas de $Ru_{2\%}/H_{m0}$ para S35E e E20N, mostrou que a relação $Ru_{2\%}/H_{m0}$ é superior no caso da incidência frontal (S35E), face à incidência oblíqua (E20N), estando, contudo, limitado ao valor máximo de $Ru_{2\%}/H_{m0}=2.0$, atendendo a que se trata de uma estrutura com um núcleo permeável (EurOtop, 2018). O facto de o coeficiente de redução devido à obliquidade ser inferior no 1º caso (E20N), 0.54, do que no 2º caso (S35E), 0.99 também contribui para esta diferença.

No caso dos valores medidos de $Ru_{2\%}/H_{m0}$ em modelo físico, os valores de $Ru_{2\%}/H_{m0}$ associados a S35N (incidência frontal) são inferiores aos valores de $Ru_{2\%}/H_{m0}$ associados a E20N (incidência oblíqua), qualquer que seja a metodologia. Este facto justifica-se pelo facto de os valores de H_{m0} obtido com o rumo S35N serem consideravelmente superiores aos obtidos com o rumo E20N (ver Tabela 4.9 e Tabela 4.10), eventualmente devido à batimetria. Daí a relação $Ru_{2\%}/H_{m0}$ ser superior para E20N do que para S35E.

Esta aplicação mostra a importância de realizar ensaios em modelo físico para caracterizar convenientemente todos os processos envolvidos na transformação das ondas em fundo variável e a sua interação com estruturas marítimas.

Complementarmente, verifica-se que os valores do parâmetro do Iribarren variam entre 3.94 e 5.46 para S35E e 4.13 e 6.21 para E20N, o que corresponde a uma rebentação de fundo.

CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

A presente dissertação teve como objetivo principal o aperfeiçoamento, aplicação e validação da metodologia de determinação do espraçamento em modelos físicos de quebra-mares de talude, baseada na análise de imagens de vídeo com recurso à técnica *TimeStack*. De modo a identificar as vantagens e limitações desta metodologia, foi feito um estudo comparativo entre os valores de espraçamento obtidos com esta metodologia e os obtidos com recurso a sonda resistiva (metodologia convencional) e fórmulas empíricas.

O aperfeiçoamento da metodologia *TimeStack existente*, consistiu na aplicação de diferentes filtros e métodos de análise de imagem com vista a automatizar o processo de seleção das cristas de espraçamento de imagem *TimeStack*, que era anteriormente efetuado manualmente. Por outro lado, desenvolveu-se um procedimento para criar uma imagem *TimeStack* correspondente à duração integral do vídeo, viabilizando o prosseguimento do processamento do vídeo de uma forma integral, com menor exigência computacional e tempo de processamento.

Para a aplicação e validação da nova metodologia *TimeStack*, efetuou-se um conjunto de ensaios em modelo físico tridimensional utilizando o modelo físico utilizado no estudo da reconstrução do quebra-mar de proteção das Lajes das Flores, Açores, para determinação do espraçamento na zona do cais. O modelo tridimensional foi construído e explorado com a representação de batimetria no modelo e a estrutura à escala 1:58.9. Foram realizados 30 ensaios, para diferentes condições de agitação, três níveis de maré e dois rumos de incidência da agitação S35E (incidência frontal) e E20N (incidência oblíqua).

Com recurso a uma sonda resistiva colocada sobre do talude do quebra-mar na zona do cais, foi medida a elevação da superfície livre ao longo da duração de ensaios. De igual modo,

instalou-se uma câmara de vídeo em frente à zona de estudo, abrangendo a zona da sonda e efetuaram-se filmagens durante os ensaios.

Da aplicação da análise temporal aos valores obtidos com a sonda e da metodologia *TimeStack* aos vídeos obtidos com a câmara, resultaram os valores dos parâmetros Ru_{max} , Ru_m e $Ru_{2\%}$. para diferentes condições de agitação marítima, os quais foram comparados e analisados. No caso de $Ru_{2\%}$ efetuou-se também a análise comparativa dos resultados obtidos com as duas metodologias e com as estimativas obtidas com as fórmulas empíricas EurOtop (2018).

No que diz respeito à comparação entre as medições com sonda e com a metodologia *TimeStack*, a análise mostrou que:

- a metodologia *TimeStack* apresenta um andamento dos valores de Ru_m , $Ru_{2\%}$ e Ru_{max} próximo dos correspondentes obtidos com a sonda resistiva, quer para a incidência frontal quer para a incidência oblíqua das ondas face ao quebra-mar em estudo. Em geral, a metodologia *TimeStack* apresenta valores superiores aos obtidos pela sonda;
- As menores diferenças ocorreram para Ru_m , com um erro relativo médio da ordem de 5.5%. No caso de $Ru_{2\%}$ e Ru_{max} , o valor médio do erro é ligeiramente superior e da ordem dos 9.0%.

As razões para as diferenças encontradas poderão estar relacionadas com limitações quer da sonda quer da metodologia *TimeStack*, nomeadamente:

- o posicionamento da sonda que permite a ocorrência de espraiaamentos correspondentes a uma lâmina de água, que passa entre a sonda e o talude, não sendo detetadas pela zona mais alta da sonda, conduzindo a uma subestimação do espraiaamento;
- a possíveis falsos eventos de galgamento originados por salpicos em zonas da sonda localizadas a cotas superiores ao coroamento da obra;
- a ocorrência de um lapso temporal/espacial entre a medição no transeto definido na metodologia *TimeStack* e a passagem da lâmina de água na sonda;
- a identificação errónea, por parte do *TimeStack*, do movimento da água que fica retida entre a primeira e a segunda camada de cubos (e não da superfície), devido às grandes dimensões do espaçamento entre os mesmos;
- a duplicação da identificação de galgamentos por parte do *TimeStack* quando a água retida nos intervalos dos cubos da berma é posteriormente libertada;

No que diz respeito à comparação dos resultados do espraçamento relativo ($Ru_{2\%}/H_{m0}$) com os previstos pela fórmula empírica do EurOtop, verificou-se uma relativamente boa convergência no caso dos ensaios realizados com o rumo mais oblíquo (E20N) e uma maior divergência nos ensaios realizados com o rumo frontal (S35E), eventualmente devido aos efeitos de um eventual empolamento causado pela batimetria, o qual não se encontra considerado na formulação. No caso do rumo mais oblíquo, (E20N), este fenómeno encontra-se parcialmente amenizado pela incidência mais oblíqua da agitação, contribuindo para uma melhor convergência entre os valores obtidos no modelo e os previstos na formulação.

Este facto vem demonstrar a importância de realizar ensaios em modelo físico para caracterizar convenientemente todos os processos envolvidos na transformação das ondas em fundo variável e a sua interação com estruturas marítimas.

Do exposto e da aplicação efetuada, conclui-se que a nova metodologia, associada a uma maior automatização dos procedimentos e otimização dos recursos computacionais, é uma ferramenta eficiente, fiável e de fácil utilização na determinação do espraçamento em ensaios em modelos tridimensionais. Mas para a garantia de bons resultados com a metodologia *TimeStack* deverá garantir-se que:

- não ocorram movimentos da câmara durante todo o ensaio;
- seja feita uma calibração prévia dos parâmetros dos filtros, recorrendo à imagem *TimeStack* resultante da sobreposição da imagem filtrada (preto-branco) com a imagem original.

Como trabalho futuro, sugere-se:

- a implementação de procedimentos com vista a tornar a metodologia independente dos parâmetros que ainda tem de ser calibrados, de forma manual, nomeadamente, os parâmetros associados aos filtros e o parâmetro "margem" associado à identificação de falsos galgamentos;
- a aplicação sistemática da metodologia ao longo do quebra-mar para avaliar a variação espacial do espraçamento em modelos físicos tridimensionais, tirando proveito da principal vantagem da metodologia *TimeStack*, que permite analisar um grande número de transetos, os quais funcionam como sondas "virtuais";
- a aplicação da metodologia para a determinação de eventos de galgamento ao longo do coroamento do quebra-mar;

- a aplicação da metodologia para a determinação da elevação da superfície livre em pontos do modelo físico, de forma a obter as características de agitação marítima (H_s , T_p).

BIBLIOGRAFIA

- 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. Lisbon, 21-23 de june. 478-480pp. ISBN 978-989-705-097-8.
- Andriolo, U. (2019a). MATLAB programs for the video analysis of wave run-up measurements on a breakwater in a laboratory flume, Bsafe4sea project report.
- Andriolo, U. (2019b). Nearshore wave transformation domains from video imagery. Journal of Marine Science and Engineering, 7(6), 186.
- Andriolo, U. (2022). MATLAB programs for the video analysis of wave run-up measurements on a breakwater in a laboratory flume, Bsafe4sea project report.
- 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. Lisbon, 21-23 de june. 478-480pp. ISBN 978-989-705-097-8.
- Antunes do Carmo, J.S., (2016). Processos físicos e modelos computacionais. Coimbra, Portugal. ISBN 978 -989 -26 -1152-5.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Neves, M.G., Silva, L.G., Capitão, R., Lemos, R., (2014). A modelação física no apoio ao projeto de obras marítimas. LNEC- Construção Magazine nº62 (pp 26–30).
- Gal, Y., Browne, M., Lane, C. (2011). Automatic estimation of nearshore wave height from video timestacks. International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (pp. 364-369). IEEE.
- Lemos, R., (2019). MATLAB routines for runup analysis. Março, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Lemos, R.; Fonte, R., Fortes, C.J.E.M., Andriolo, U., Rito, R. (2023a). Determination of wave run-up through the *Timestack* methodology and through a resistive wave gauge. A comparative analysis. Revista de Engenharia Técnica, 2023, 22.1: 25-31.

- Lemos, R., Fortes, C.J.E.M, Mendonça, A., Andriolo, U. (2023b). Análise vídeo para a determinação do espraçamento e do galgamento em modelos físicos de quebra-mares – A metodologia *Timestack*. 11as Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária. Leixões, 3 e 4 de outubro de 2023.
- Lemos, R., Santos, J.A., Fortes, C.J.E.M., Mendonça, A. (2022), Damage evolution in physical scale model tests of a stretch of the breakwater of Peniche harbour. TEST&E 2022, Caparica, Portugal.
- Lemos, R., Silva, L.G., (2013). LNEC experience in maritime hydraulics studies, scale models tests and recent damage assessment techniques., MedDays of coastal and port Engineering. Marselha, França, 22-24 de Maio.
- MSW (2022). Construção do novo Porto das Lajes das Flores no âmbito dos prejuízos decorrentes do Furacão Lorenzo. Reconstrução do molhe-cais ensaios de agitação, estabilidade e galgamento. Especificações.
- Ozer, M. (2019). Prediction of overtopping volume of waves approaching a crest using a sequence of frames. Master Thesis in Computer Science, Leiden University.
- Pedro, F.G.D.L. (2015). Utilização de técnicas de análise fotogramétricas em quebra-mares de taludes (Doctoral dissertation, Instituto Superior de engenharia de Lisboa).
- Poseiro, P. (2019). "Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port Areas: Development of a Model and Risk Assessment". PhD Thesis, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, p552.
- Pinheiro, L.V. (2019). "MATLAB routines for temporal and spectral analysis". Janeiro, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Rodrigues, E.J. (2011). "Galgamento de Estruturas Marítimas: Comparação de Ferramentas de Cálculo". Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Setúbal, Setúbal, Portugal
- Silva, D.M.F., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Antunes do Carmo, J.S, Simões, A., Rodrigues, C., (2012). Avaliação do galgamento de estruturas portuárias: porto de Ponta Delgada. Revista de Recursos Hídricos, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Vol. 33, (pp 37–51)
- USACE (2011). Costal Engineering Manual, (CEM), Engineering Manual 1110-2- 1100 (Part VI-5), US Army Corps of Engineering, Washington D.C.

- Van der Meer, J. W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B., (2018). EurOtop Manual on wave overtopping of sea defenses and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but worldwide application, Joint FCERM research programme, United Kingdom, Environment Agency, Netherlands
- Yoo, J., Kim, S. I., Lee, D. Y., Park, K. S., Shim, J. S., Jun, K. C. (2011). Evolution of the Surf Zone on a Macro-tidal Beach Observed using X-band Radar. *Journal of Coastal Research*, 1676-1680.



