



JOÃO PEDRO BELO ROSA CORREIA

Licenciado em Engenharia Civil

CÁLCULO DO GALGAMENTO NA ESTRUTURA DE DEFESA ADERENTE DA VA-GUEIRA UTILIZANDO MODELAÇÃO NUMÉRICA E FÓRMULAS EMPÍRICAS.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2023

Cálculo do galgamento na estrutura de defesa aderente da Vagueira utilizando modelação numérica e fórmulas empíricas.

JOÃO PEDRO BELO ROSA CORREIA

Licenciado em Engenharia Civil

Orientador: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,
Professora Associada com Agregação, Universidade NOVA de Lisboa
Ana Catarina Zózimo,
Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Júri:

Presidente: Professor Doutor Nuno Manuel Costa Guerra
Professor Associado, FCT-NOVA

Arguentes: Professor Doutor Moisés Brito,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Orientador: Professora Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves,
Professor Associado com Agregação, FCT-NOVA
Doutora Ana Catarina Zózimo,
Doutorada, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2023

Cálculo do galgamento na estrutura de defesa aderente da Vagueira utilizando modelação numérica e fórmulas empíricas.

Copyright © João Pedro Belo Rosa Correia, 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 seja dado crédito ao autor e editor.

Sapientia Vincit Omnia

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar esta secção de agradecimentos destacando que esta dissertação marca o encerramento de um ciclo importante na minha vida académica e pessoal.

Em seguida, gostaria de expressar o meu agradecimento à minha orientadora, Professora Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves, pela sua orientação, sabedoria e paciência ao longo deste processo. Pela disponibilidade, onde de uma forma calma, paciente e organizada, guiou-me nesta dissertação.

À minha coorientadora, Doutora Ana Catarina Zózimo, agradeço pela sua contribuição valiosa e apoio. A sua orientação complementou de maneira crucial o trabalho desenvolvido.

Agradecer ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por abrir as suas portas e proporcionar-me a oportunidade de colaborar e aprender nas suas instalações.

Aos meus avós maternos, mãe e irmã, dedico este trabalho em sinal de profunda gratidão pelo apoio que me deram ao longo desta jornada.

Aos meus amigos, que direta ou indiretamente me apoiaram ao longo do meu percurso académico, o meu especial agradecimento. Obrigado a todos por fazerem parte deste percurso.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo principal analisar e prever o galgamento na estrutura de defesa costeira aderente da Praia da Vagueira. Esta análise surge no contexto da crescente preocupação em relação à segurança de pessoas, bens e ativos ambientais na zona costeira, intensificada pelas alterações climáticas e pelas crescentes pressões nas zonas litorais. Um dos desafios críticos é a minimização do galgamento sobre as estruturas.

Para alcançar este objetivo, utilizou-se o modelo numérico SWASH. Foi realizada uma análise de sensibilidade para identificar os parâmetros-chave de forma a simular, da maneira mais próxima da realidade, o galgamento no SWASH. Posto isto, o modelo foi aplicado à estrutura da Praia da Vagueira, considerando sete grupos de eventos entre 1979 e 2018. O perfil transversal da estrutura utilizado foi o da referente ao da última reabilitação na estrutura.

Os resultados obtidos nas simulações, revelaram que a última reabilitação, em 2015, parece ter solucionado e mitigado o galgamento na estrutura, pois apenas dois dos eventos considerados resultaram em galgamento. As principais causas do galgamento foram os valores elevados de altura significativa das ondas (H_s), período de pico (T_p) e o nível do mar (N_{mar}).

A comparação com fórmulas empíricas mostrou que estas fornecem alertas excessivamente conservadores, visto que estas previram galgamento em todos os eventos, enquanto o modelo SWASH produziu resultados maioritariamente nulos.

Em suma, esta pesquisa contribuiu significativamente para a compreensão e previsão do galgamento costeiro na estrutura de defesa costeira aderente da Praia da Vagueira. O modelo numérico SWASH surge assim, de modo geral, como uma ferramenta valiosa para o apoio à conceção de estruturas de defesa costeira e à criação de sistemas de alerta costeiro. Serão, contudo, necessários testes futuros para aprimorar a sua precisão. Esta pesquisa tem implicações práticas importantes para a segurança de pessoas e bens na zona costeira.

Palavras chave: Galgamento Costeiro, Modelo Numérico SWASH, Defesa Longitudinal Aderente, Praia da Vagueira, Agitação Marítima, Análise de Sensibilidade, Simulações de Ondas.

ABSTRACT

This dissertation aims to analyze and predict coastal overtopping on longitudinal coastal defense structures, focusing on the Vagueira Beach structure. This analysis arises in the context of growing concerns regarding coastal safety, exacerbated by climate change and increasing pressures on coastal zones. One of the critical challenges is addressing the issue of overtopping on such structures.

To accomplish this goal, this research employed the SWASH numerical model. A sensitivity analysis was conducted to identify key parameters for simulating overtopping events in SWASH as realistically as possible. Subsequently, the model was applied to the Vagueira Beach structure, considering seven event groups between 1979 and 2018. For the analysis, the cross-sectional profile of the structure was based on its most recent rehabilitation in 2015.

The results of the simulations indicate that the most recent rehabilitation in 2015 seems to have effectively addressed and reduced overtopping on the structure, with only two incidents resulting in overtopping. The primary causes of overtopping were high significant wave heights (H_s), peak periods (T_p), and sea water levels (N_{mar}).

Differently, when compared to empirical formulas, the SWASH model predominantly yielded null results, underscoring the conservatism of the formulas, which consistently predicted overtopping in all events.

In summary, this research significantly contributed to the understanding and prediction of coastal overtopping on the Vagueira Beach longitudinal coastal defense structure. The SWASH numerical model emerges as a valuable tool for designing coastal defense structures and creating coastal warning systems in general. However, future tests will be necessary to enhance its accuracy. The findings of this research have notable practical relevance in the context of coastal safety.

Keywords: Coastal Overtopping, SWASH Numerical Model, Adherent Longitudinal Defense, Praia da Vagueira, Maritime Agitation, Sensitivity Analysis, Wave Simulations.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento no Tema.....	1
1.2	Objetivos e Metodologia seguida na Dissertação	3
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	ZONA DE ESTUDO.....	7
2.1	Enquadramento	7
2.1.1	Erosão na zona da Vagueira.....	9
2.1.2	Galgamento na zona da Vagueira.....	12
2.1.3	Defesa Costeira da Vagueira.....	13
2.2	Principais fenómenos de transformação da agitação desde o largo até à estrutura de proteção costeira.....	17
2.3	Galgamento	19
2.3.1	Definição e tipos de galgamento	19
2.3.2	Cálculo do Galgamento	21
2.3.3	Cálculo do Galgamento por meio de fórmulas empíricas	22
2.3.3.1	Formulações apresentadas em Eurotop (2018).....	22
2.3.3.2	NN-Overtopping	22
2.3.3.3	Goda (2009).....	24
2.3.3.4	van Gent (1999) modificado por Altomare <i>et al.</i> (2016).....	25
2.3.3.5	Goda (2009) modificado por Altomare <i>et al.</i> (2020)	25
2.3.3.6	Mase <i>et al.</i> (2013) e Masatoshi <i>et al.</i> (2021).....	26
2.3.4	Cálculo do Galgamento utilizando o modelo numérico SWASH	27
3	SIMULAÇÕES COM O MODELO NUMÉRICO SWASH.....	29
3.1	Implementação dos parâmetros no código do modelo numérico	29

3.2	Características da estrutura de defesa	31
3.3	Domínio computacional e batimetria	33
3.4	Análise de Sensibilidade.....	34
3.4.1	Dimensão da malha.....	35
3.4.2	Coeficiente de atrito de Manning.....	45
3.4.3	Número de Ondas	48
3.5	Aplicação do Modelo a eventos de temporal	52
3.5.1	Condições de agitação e nível de água.....	52
4	RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO SWASH PARA EVENTOS DE TEMPORAL.....	57
4.1	Eventos simulados.....	57
4.2	Domínio computacional e parametrização.....	57
4.3	Metodologia adotada para o tratamento de resultados do modelo SWASH	59
4.4	Resultados do modelo SWASH.....	63
4.5	Comparação de resultados do modelo SWASH com as fórmulas empíricas obtidas por Rosa, 2021	66
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTO FUTURO	71
5.1	Conclusões.....	71
5.1.1	Análise de sensibilidade e seus resultados	71
5.1.2	Reflexões sobre os resultados do modelo SWASH.....	72
5.1.3	Comparação com Fórmulas Empíricas.....	73
5.1.4	Validação do modelo SWASH.....	74
5.1.5	Desenvolvimentos futuros	75
5.1.6	Conclusão Final.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Imagem satélite da península Ibérica, com Portugal delimitado (adaptado: NASA, 2016).....	1
Figura 1.2 - Localização da Praia da Vagueira (adaptado: NASA 2016, Bing Maps 2023).	2
Figura 1.3 - Vista aérea da Praia da Vagueira e respetivas estruturas de defesa costeira. (fonte: Rota da Luz, 2023)	3
Figura 2.1 - Fases da formação da laguna de Aveiro. a) Reconstituição do litoral junto da foz do rio Vouga na época proto-histórica; b) Laguna de Aveiro final do século XIV, desenhada através de mapas antigos; c) Configuração atual da laguna de Aveiro (adaptado: Girão, 1960).....	8
Figura 2.2 - Localizações da Barra da laguna de Aveiro ao longo do tempo (adaptado: Lamy, 2001).....	8
Figura 2.3 - Troços de linha de costa em situação de erosão, a vermelho, no período de 1958 a 2021 (adaptado: APA, 2022)	10
Figura 2.4 - Evolução da área de drenagem direta para o mar (adaptado: Veloso-Gomes <i>et al.</i> , 2006).....	10
Figura 2.5 - Evolução da linha de costa com a urbanização da Praia da Vagueira ao longo do tempo. (Anexo A - imagens aéreas usadas para a criação deste mapa).....	11
Figura 2.6 - Obra de reabilitação após o evento de 2008 (afundamento da fundação) (20/05/2009 - Coelho, 2014).....	12
Figura 2.7 - Destruição de infraestrutura de acesso ao areal na praia da Vagueira, devido a eventos de agitação marítima (11/01/2023).	13
Figura 2.8 - Tipologias de estruturas de defesa costeira	14
Figura 2.9 - Exemplos das disposições variadas de estruturas longitudinais aderentes de defesa costeira (adaptado: U.S. Army Corps Of Engineers, 2011)	15
Figura 2.10 - Estruturas de defesa costeira Praia da Vagueira, vista sul (11/01/2023)	16
Figura 2.11 - Estrutura de defesa costeira longitudinal aderente, vista norte (11/01/2023)	17

Figura 2.12 - Exemplificação do fenómeno de empolamento (1- Sentido da propagação; 2- onda em maiores profundidades; 3- Onda em menores profundidades; Profundidade e velocidade da onda (4) > (5)).	18
Figura 2.13 - Tipos de rebentação das ondas (adaptado de Battjes, 1974).	18
Figura 2.14 - Exemplificação do fenómeno de espraçamento. (Legenda: Ru - cota de espraçamento (runup), Rc - cota de coroamento da estrutura).	19
Figura 2.15 - Exemplificação do fenómeno de galgamento. (Legenda: Rc - cota de coroamento da estrutura, Q - caudal médio de galgamento).	20
Figura 2.16 - Galgamento do tipo <i>green water</i> , na estrutura defesa aderente longitudinal, Costa da Caparica, 2014 (fonte: YouTube).	20
Figura 2.17 - Galgamento do tipo <i>splash</i> (na figura ao fundo, lado direito) e galgamento do tipo <i>white water</i> (em foco, lado esquerdo e centro da figura), na estrutura defesa aderente longitudinal, Foz do Douro, 2016 (fonte: Jornal Notícias).	21
Figura 2.18 - Representação dos parâmetros do programa NN_Overtopping (adaptado de Coeveld <i>et al.</i> , 2005).	23
Figura 2.19 - Talude imaginário (adaptado de Mase <i>et al.</i> , 2013).	26
Figura 3.1 - Linhas de código utilizadas na simulação final, para obter valor de caudais de galgamento.	31
Figura 3.2 - Retaguarda da estrutura de defesa costeira da Praia da Vagueira (11/01/2023).	32
Figura 3.3 - Corte transversal da estrutura de defesa costeira da Praia da Vagueira, cujos parâmetros são apresentados na tabela 3.1.	32
Figura 3.4 - Perfil de fundo da zona em estudo, que corresponde ao domínio computacional utilizado nas simulações (Programa COSMO, 2018).	34
Figura 3.5 - Runup máximo, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39685).	36
Figura 3.6 - Runtime (tempo de corrida da simulação), para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39685).	37
Figura 3.7 - Caudais Pé do Talude, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39685).	38
Figura 3.8 - Caudais Meio do Talude, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39685).	38
Figura 3.9 - Altura Significativa de Ondas, nos diferentes pontos de estudo para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39685).	38
Figura 3.10 - Runup máximo, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39683).	40
Figura 3.11 - Runtime (tempo de corrida da simulação), para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39683).	40

Figura 3.12 - Caudais Pé do Talude, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39683).	41
Figura 3.13 - Caudais Meio do Talude, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39683).	41
Figura 3.14 - Caudais Meio do Talude, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39683).	41
Figura 3.15 - Runup máximo, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39684).	42
Figura 3.16 - Runtime (tempo de corrida da simulação), para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39684).	43
Figura 3.17 - Caudais Pé do Talude, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39684).	44
Figura 3.18 - Caudais Meio do Talude, para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39684).	44
Figura 3.19 - Altura Significativa de Ondas, nos diferentes pontos de estudo para as diferentes batimetrias em análise (Caso 39684).	44
Figura 3.20 - Runup máximo, para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).	46
Figura 3.21 - Runtime (tempo de corrida da simulação), para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).	46
Figura 3.22 - Caudais Pé do Talude, para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).	47
Figura 3.23 - Caudais Meio do Talude, para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).	47
Figura 3.24 - Altura Significativa de Onda, para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).	48
Figura 3.25 - Runup máximo, para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).	50
Figura 3.26 - Runtime (tempo de corrida da simulação) para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).	50
Figura 3.27 - Caudais Pé do Talude, para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).	51
Figura 3.28 - Caudais Meio do Talude, para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).	51
Figura 3.29 - Altura Significativa de Onda, para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).	52
Figura 4.1 - Perfil de Fundo zona em estudo (Programa COSMO, 2018), com os pontos utilizados para a extração de resultados do modelo SWASH na zona anterior à estrutura de defesa.	58

Figura 4.2 - Perfil Transversal da estrutura de defesa aderente da zona em estudo (Programa COSMO, 2018), com os pontos utilizados para a extração de resultados do modelo SWASH (seta cor-de-laranja corresponde ao ponto de cálculo do galgamento, ponto 7) na estrutura de defesa.	58
Figura 4.3 - Parte do código escrito no ficheiro de entrada do modelo SWASH, de forma a obter um ficheiro com os valores de TSEC, BOTL, HSIG, DISCH, WATL.....	59
Figura 4.4 - Caso 39685 - Sem galgamento. Gráfico obtido em Python, no momento do espraçamento máximo, com a extensão completa da área em estudo.	61
Figura 4.5 - Caso 39685 - Sem galgamento. Gráfico obtido em Python, no momento do espraçamento máximo, na zona da estrutura de defesa costeira.	61
Figura 4.6 - Caso 39685 - Sem galgamento. Gráfico obtido em Python com a variação da frente do espraçamento ao longo do tempo de simulação.	61
Figura 4.7 - Caso 51265 - Com galgamento. Gráfico obtido em Python, no momento do espraçamento máximo, com a extensão completa da área em estudo.	62
Figura 4.8 - Caso 51265 - Com galgamento. Gráfico obtido em Python, no momento do espraçamento máximo, na zona da estrutura de defesa costeira.	62
Figura 4.9 - Caso 51265 - Com galgamento. Variação da frente de espraçamento ao longo do tempo de simulação.....	63
Figura 4.10 - Evento 46953. Gráfico superior: valores de caudais médios de galgamento(Q), altura significativa das ondas (Hs) e nível do mar (Nmar); Gráfico inferior: período de pico (Tp).	64
Figura 4.11 - Evento 51265. Gráfico superior: valores de caudais médios de galgamento(Q), altura significativa das ondas (Hs) e nível do mar (Nmar); Gráfico inferior: período de pico (Tp).	65
Figura 4.12 – Perfil de fundo, utilizado em Rosa (2021) – Proposta 1.....	66
Figura 4.13 – Caudal médio de galgamento obtido com as fórmulas empíricas e com o modelo SWASH para o Evento 46953.	68
Figura 4.14 – Caudal médio de galgamento obtido com as fórmulas empíricas e com o modelo SWASH para o Evento 51265.	68
Figura 5.1 - Exemplos de modelos de estruturas de defesa costeira, a uma escala reduzida, nas instalações do LNEC (fonte: LNEC).....	72
Figura 5.2 - Vista norte do paredão, da estrutura de defesa costeira Praia da Vagueira (11/01/2023).....	74

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de estrutura de defesa costeira. Principais vantagens e desvantagens.....	16
Tabela 2.2 - Programa NN_Overtopping. Parâmetros e respectivos intervalos de aplicabilidade	24
Tabela 3.1 - Características da estrutura de defesa longitudinal aderente da Praia da Vagueira	33
Tabela 3.2 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39685, obtido pelas diferentes batimetrias em estudo (Tabela completa Anexo B1).....	36
Tabela 3.3 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39685, obtido pelas diferentes batimetrias em estudo (Tabela completa Anexo B1).....	37
Tabela 3.4 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39683, obtido pelas diferentes batimetrias em estudo (Tabela completa Anexo B2).....	39
Tabela 3.5 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39683, obtido pelas diferentes batimetrias em estudo (Tabela completa Anexo B2).....	40
Tabela 3.6 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39684, obtido pelas diferentes batimetrias em estudo (Tabela completa Anexo B3).....	42
Tabela 3.7 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39684, obtido pelas diferentes batimetrias em estudo (Tabela completa Anexo B3).....	43
Tabela 3.8 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39685, obtido pelos diferentes coeficientes de Manning em estudo (Tabela completa Anexo B4).....	46
Tabela 3.9 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39685, para os diferentes coeficientes de Manning (Tabela completa Anexo B4).....	47
Tabela 3.10 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39685, obtido pelos diferentes números de ondas em estudo (Tabela completa Anexo B5).....	50
Tabela 3.11 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39685, para os diferentes números de ondas em análise (Tabela completa Anexo B5).....	51
Tabela 3.12 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 174	53
Tabela 3.13 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 27993	53
Tabela 3.14 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 39685	54

Tabela 3.15 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 46953	54
Tabela 3.16 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 48485	54
Tabela 3.17 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 51265	55
Tabela 3.18 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 51269	55
Tabela 4.1 - Eventos onde ocorreu galgamento da estrutura de defesa, com a utilização do modelo SWASH.....	63
Tabela 4.2 - Resultados de caudal médio de galgamento (Q), caudal máximo de galgamento (Qmax) e RU2% obtidos com o modelo SWASH (ver tabela completa no Anexo D1). .	64
Tabela 4.3 - Valores de Q obtidos com o modelo SWASH e com as fórmulas empíricas para o evento 46953.....	67
Tabela 4.4 - Valores de Q obtidos com o modelo SWASH e com as fórmulas empíricas para o evento 51265.....	67

ABREVIATURAS E SIGLAS

INE	Instituto Nacional de Estatística
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SWASH	Simulating WAVes till SHore
MATLAB	MATrix LABoratory
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CLASH	Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
COSMO	Programa de monitorização da faixa costeira de Portugal continental
PCE	Perfil Central da Estrutura
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa
WAN	Wave Model
ECMWF	Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo
POW	Percentage of Overtopping Waves
ZH	Zero Hidrográfico

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

A_c	Distância entre o nível do mar e a berma	[m]
B	Largura da berma	[m]
B_t	Largura de berma de pé da estrutura	[m]
Δt	Intervalo de tempo	[s]
Δx	Espaçamento da malha de simulação	[m]
G_c	Largura do coroamento da estrutura	[m]
h	Profundidade em frente à estrutura	[m]
h_{berma}	Profundidade da berma	[m]
H_{m0}	Altura de onda significativa em frente à estrutura	[m]
H_s	Altura de onda significativa	[m]
h_t	Profundidade no pé da estrutura	[m]
N_{mar}	Nível do mar	[m]
Q	Caudal médio galgado por metro de largura da estrutura	[m ³ /s/m]
Q_{max}	Caudal máximo galgado por metro de largura da estrutura	[m ³ /s/m]
R_c	Cota de coroamento	[m]
$R_{u2\%}$	Nível de espraçamento excedido por 2% das ondas incidentes	[m]
$T_{m-1,0}$	Período de pico espectral	[s]
T_p	Período de pico da onda	[s]
t_{peak}	Período de pico da onda	[s]

LETRAS GREGAS

α	Ângulo do perfil de praia	[°]
β	Ângulo entre a direção da onda incidente e a direção perpendicular à estrutura	[°]
$\text{Cot } \alpha_d$	Inclinação da estrutura abaixo da berma	[-]
$\text{Cot } \alpha_u$	Inclinação da estrutura acima da berma	[-]
γ_ϕ	Fator de redução devido à permeabilidade e rugosidade do talude da estrutura	[-]
$\tan \alpha_b$	Inclinação da berma	[-]

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento no Tema

Localizado na parte mais ocidental do continente europeu, na península Ibérica, Portugal continental apresenta uma linha de costa que se estende da foz do rio Minho à foz do rio Guadiana ao longo de aproximadamente 987 km (Santos *et al.*, 2014). Esta costa é banhada exclusivamente pelo oceano Atlântico (Figura 1.1).

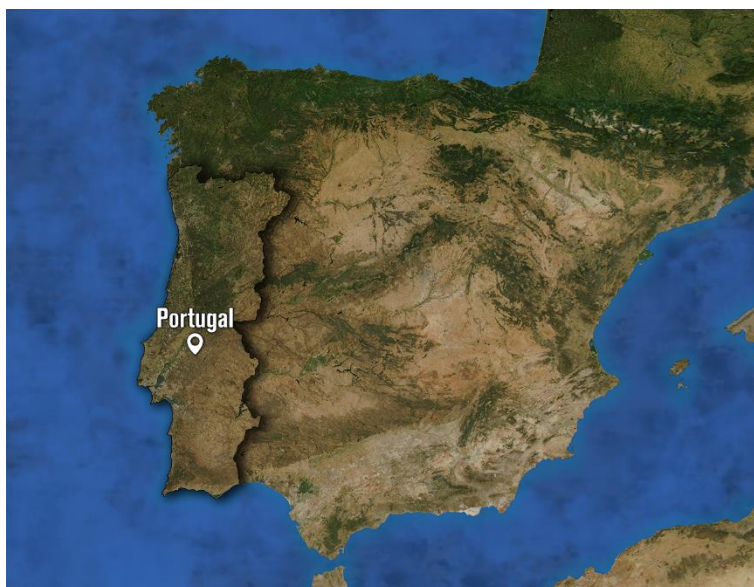


Figura 1.1 - Imagem satélite da península Ibérica, com Portugal delimitado (adaptado: NASA, 2016)

O litoral de Portugal continental é constituído por uma panóplia morfológica, resultante de diversos fatores naturais e antrópicos, onde se incluem as praias, as formações dunares, os estuários e lagunas, as arribas e plataformas de abrasão, tómbolos, restingas e ilhas-barreira.

Embora um em cada nove portugueses viva no litoral (Censos INE, 2021), a sua maioria desconhece os riscos que poderão enfrentar no futuro devido à erosão e à subida do nível do mar.

A costa portuguesa tem sofrido, nas últimas décadas, importantes transformações geofísicas: naturais (erosão e recuo da linha de costa); artificiais (construção de portos, esporões e outras estruturas de defesa costeira); e socioeconómicas (aumento da população, substituição das atividades económicas tradicionais, como a pesca, por novas atividades, como o turismo, o lazer e o imobiliário). O impacto das alterações climáticas irá, assim, somar-se ao processo acelerado da erosão, que já é visível em várias zonas do litoral português. Uma destas zonas é a Praia da Vagueira (Figura 1.2), na região de Aveiro.

A Praia da Vagueira, inicialmente uma vila piscatória, transformou-se nas últimas décadas num destino turístico, tendo-se assistido a um crescimento da frente urbana. No entanto, essa frente urbana enfrenta um grave problema de erosão, sendo no litoral da Vagueira onde se regista o maior recuo da linha de costa em Portugal (Delicado *et al.*, 2012).

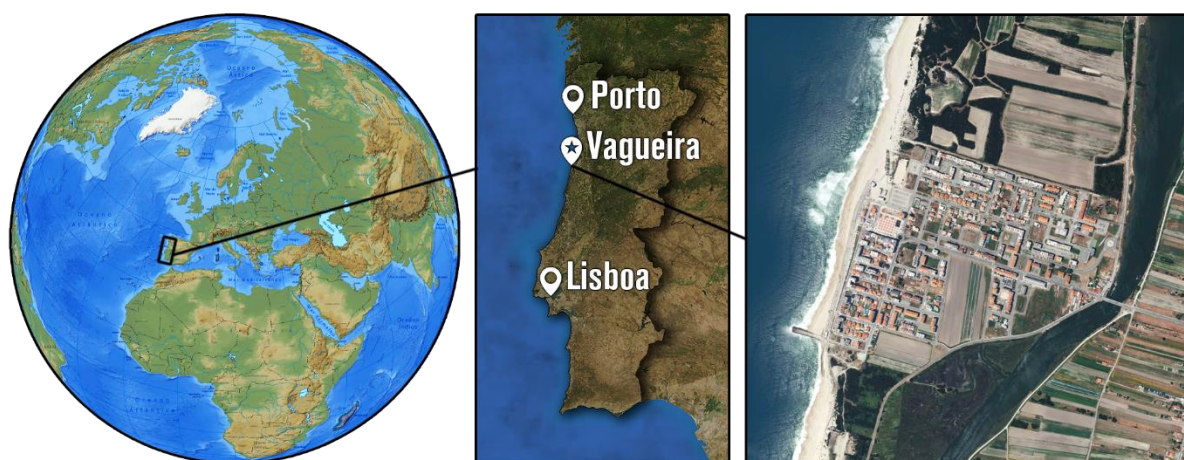


Figura 1.2 - Localização da Praia da Vagueira (adaptado: NASA 2016, Bing Maps 2023).

De forma a defender a frente urbana, foi necessário recorrer à construção de estruturas de defesa costeira: um esporão, estrutura transversal essencialmente para controle da erosão, e uma estrutura longitudinal aderente, para redução do galgamento e, consequentemente, proteção da frente urbana à inundação costeira. De facto, em situações extremas, como em eventos de temporal, podem ocorrer galgamentos quer sobre as dunas quer sobre as estruturas de defesa costeira, dos quais poderão resultar a perda de vidas humanas, ou a destruição de estruturas e outros bens.

De forma a mitigar os impactos desses fenómenos, especialmente em aglomerados populacionais, é importante poder prever o galgamento, de forma a estudar medidas que possam mitigar o efeito da ocorrência destes eventos.

A presente dissertação pretende, assim, contribuir para o estudo do galgamento sobre a estrutura de defesa longitudinal aderente da Praia da Vagueira (Figura 1.3), utilizando a modelação numérica para estimar o galgamento para diferentes temporais ocorridos nesta zona.



Figura 1.3 - Vista aérea da Praia da Vagueira e respetivas estruturas de defesa costeira. (fonte: Rota da Luz, 2023)

1.2 Objetivos e Metodologia seguida na Dissertação

O principal objetivo desta dissertação é estimar o galgamento sobre a estrutura de defesa longitudinal aderente da Praia da Vagueira, utilizando o modelo SWASH (Zijlema *et al.*, 2011). Esta dissertação dá, assim, continuidade ao trabalho desenvolvido anteriormente (Rosa, 2021), no qual foram utilizadas fórmulas empíricas e/ou redes neuronais para estimar o galgamento sobre a estrutura de defesa longitudinal aderente da Praia da Vagueira. As fórmulas utilizadas foram as de Mase *et al.* (2013), a de van Gent (1999) modificada por Altomare *et al.* (2016), a do Eurotop (2018), a de Goda (2009), a de Altomare *et al.* (2020), e a de Masatoshi *et al.* (2021). A rede neuronal utilizada foi a NN_OOVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005).

As formulações empíricas têm vantagens e limitações. Uma das limitações mais relevantes é a necessidade de que as profundidades sejam continuamente decrescentes em direção à

estrutura em estudo, o que em muitos casos não corresponde à realidade. Na Praia da Vagueira, o perfil de fundo medido em 2018 era constituído por uma fossa e uma barra, não se verificando assim a existência de profundidades decrescentes em todo o perfil.

Para ultrapassar esta limitação, em Rosa (2021) foram testados quatro perfis de fundo aproximados ao perfil barra-fossa. Em todas as alternativas, a zona da barra e da fossa foi eliminada de forma a cumprir a limitação das profundidades continuamente decrescentes. Dos resultados obtidos com a aplicação das fórmulas empíricas aos perfis de fundo aproximados testados, Rosa (2021) concluiu que o perfil de fundo tinha uma grande influência no caudal médio de galgamento.

O trabalho apresentado nesta dissertação pretende utilizar o modelo numérico SWASH (Zijlema *et al.*, 2011) para estimar o caudal médio de galgamento, já que este modelo não apresenta limitações relativamente ao perfil de fundo, pelo que a sua utilização deverá permitir a obtenção de valores estimados de caudal mais realistas. O modelo foi aplicado aos diferentes eventos de temporal para os quais foram obtidos os valores mais elevados de galgamento com as fórmulas empíricas em Rosa (2021).

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por este capítulo de introdução e por mais cinco capítulos, além de uma secção de referências bibliográficas.

No capítulo 2 é feito um enquadramento do tema na zona em estudo, onde se apresenta uma pequena descrição do local, sendo apresentadas as fórmulas e os modelos numéricos utilizados para calcular o galgamento, incluindo o modelo SWASH. É ainda abordada a erosão na Praia da Vagueira e as estruturas de defesa costeiras presentes.

No capítulo 3 são apresentadas as condições de cálculo do modelo SWASH utilizadas, incluindo as características da estrutura de defesa e do domínio computacional e batimétrico. São ainda apresentados os parâmetros utilizados no modelo e a análise de sensibilidade efetuada, com a discussão da influência da dimensão da malha e do coeficiente de atrito de Manning nos resultados do modelo. Por fim, são apresentados os eventos de temporal que serão estudados no desenrolar desta dissertação.

No capítulo 4 descreve-se a utilização do modelo SWASH para simular a transformação das ondas ao longo do perfil de fundo em estudo e o galgamento sobre a estrutura de defesa costeira da Praia da Vagueira. Nas simulações com o modelo SWASH do capítulo 4 foram

utilizados os parâmetros definidos após a análise de sensibilidade efetuada no capítulo 3. No capítulo 4 são também apresentados os procedimentos realizados em Matlab e em Python para o processamento dos resultados das simulações. É ainda feita uma comparação entre os resultados obtidos com o modelo numérico SWASH e os resultados obtidos por Rosa (2021).

No quinto e último capítulo, são apresentadas as reflexões e conclusões finais com base em todo o trabalho desenvolvido desde o capítulo 1. É também no capítulo 5 que são apresentadas possíveis direções futuras de estudo relacionadas com o tema abordado.

ZONA DE ESTUDO

2.1 Enquadramento

A Vagueira, situada a 67 km a sul da cidade do Porto e a 46 km a norte da cidade da Figueira da Foz, pertence ao município de Vagos, distrito de Aveiro. O município de Vagos possui uma área total de 165,29 km² e tem uma população de 22 886 habitantes (Censos INE, 2021).

A Praia da Vagueira está inserida no cordão dunar da laguna de Aveiro, estando limitada a oeste pelo oceano atlântico e a este pela laguna, nomeadamente pelo canal de Mira.

A laguna de Aveiro (também conhecida por ria de Aveiro) é um acidente geográfico relativamente recente (Figura 2.1). Estudos indicam que a sua formação se tenha iniciado entre 5000 e 7000 anos atrás, e a configuração atual da laguna possua menos de 500 anos (Girão, 1960). O desenvolvimento da laguna ter-se-á iniciado quando 2 cordões litorais se desenvolveram, um começando a norte, perto de Espinho, e o outro começando a sul, próximo do Cabo Mondego. Ao longo dos anos, a localização da barra da laguna foi variando entre a localidade da Torreira (norte da laguna) e Mira (sul da laguna), como ilustrado na Figura 2.2. A barra da laguna de Aveiro já esteve localizada onde hoje se situa o povoado da Vagueira.

Com esta migração da localização da barra, que outrora se encontrava junto da cidade de Aveiro, o que permitia amplas trocas hídricas entre o sistema lagunar e o oceano, as sucessivas novas barras foram ocupando progressivamente uma posição mais excêntrica no sistema lagunar, resultando na diminuição da sua eficácia hidráulica.

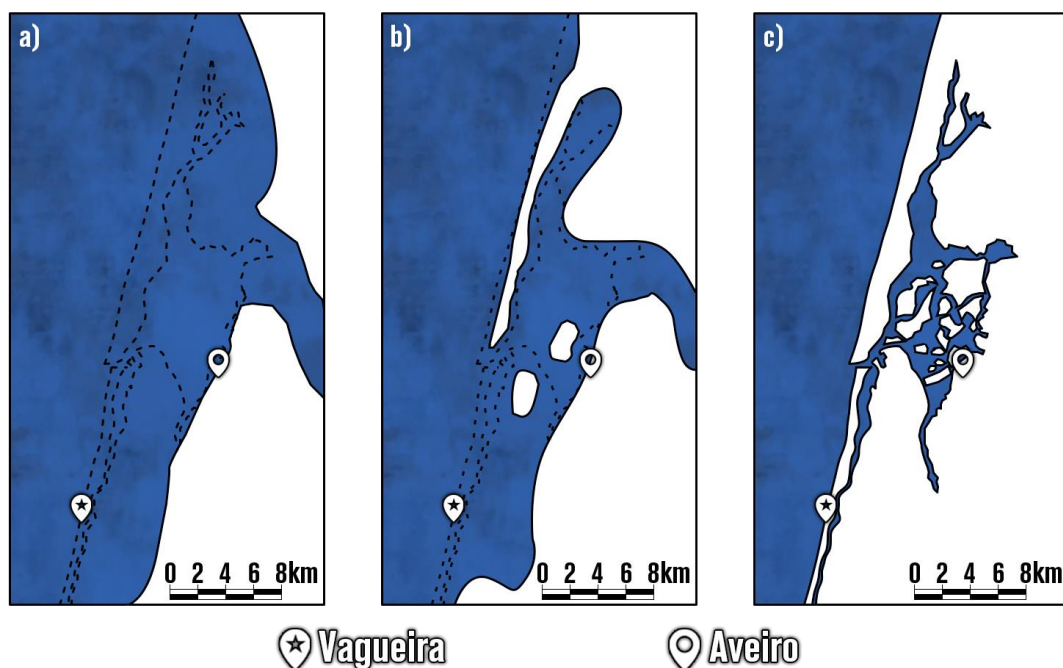


Figura 2.1 - Fases da formação da laguna de Aveiro. a) Reconstituição do litoral junto da foz do rio Vouga na época proto-histórica; b) Laguna de Aveiro final do século XIV, desenhada através de mapas antigos; c) Configuração atual da laguna de Aveiro (adaptado: Girão, 1960)

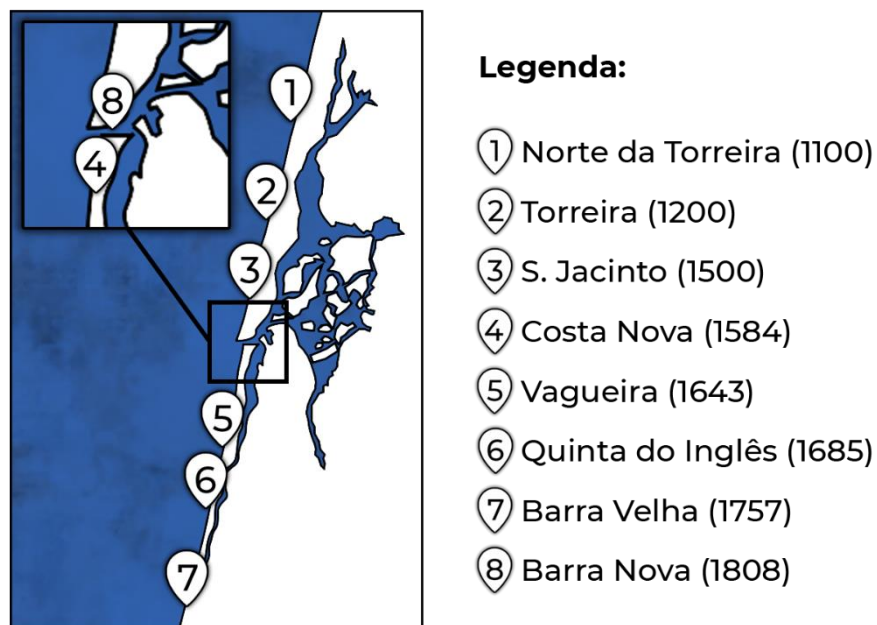


Figura 2.2 - Localizações da Barra da laguna de Aveiro ao longo do tempo (adaptado: Lamy, 2001)

Devido ao isolamento sistemático da laguna relativamente ao oceano, todas as atividades que se desenvolviam na região e beneficiavam do meio lagunar começaram a entrar em

crise, uma vez que os sucessivos assoreamentos foram provocando a insalubridade da laguna, assim como a impossibilidade de aceder ao oceano.

Para evitar esta situação, em 1808 foi construída uma barra artificial fixada por dois molhes (Dias *et al.*, 2012), no local onde ainda se encontra atualmente. Estes molhes influenciaram toda a morfodinâmica na sua zona de influência, incluindo a costa da Vagueira.

2.1.1 Erosão na zona da Vagueira

A Praia da Vagueira é uma das zonas de Portugal Continental onde o problema da erosão costeira tem sido especialmente evidente, com a diminuição significativa da largura da praia emersa ao longo dos anos. O seu areal, que era amplo, tem desaparecido e os galgamentos tornaram-se cada vez maiores e mais frequentes.

Esta praia está localizada na costa noroeste de Portugal, costa esta que é muito frágil devido à sua geomorfologia, pois é composta por sistemas de dunas de baixa altitude e por estruturas geológicas sedimentares sensíveis. De facto, cerca de um quinto da costa portuguesa (Figura 2.3) tem sido afetada pela erosão ao longo dos últimos 63 anos (1958-2021), segundo dados da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2022). Durante esse período, perderam-se para o mar cerca de 13 km² (1313 hectares) de território, sendo que na última década (2010-2021) essa perda foi de 1,3 km² (130 hectares). A título de exemplo, num troço de 8 km entre as praias de Cortegaça e Furadouro, na zona norte da laguna de Aveiro, foi observado um recuo médio de 96 metros, que em algumas áreas chegou aos 160 metros, num período temporal de 20 anos (2001-2021). Este recuo corresponde a uma taxa de erosão de 4,8 metros por ano.

Além das causas naturais, a intervenção humana também desempenha um papel importante na erosão costeira. As ações naturais como as ondas, as marés, as correntes e o vento têm a capacidade de transportar os sedimentos ao longo do litoral, depositando-os em novas zonas. No entanto, a intervenção humana, através da construção de estruturas, nomeadamente barragens nas bacias hidrográficas (Figura 2.4) e obras marítimas (como estruturas portuárias e de defesa costeira), interferem com os fluxos de sedimentos, que ficam retidos nas barragens ou se acumulam a barlamar das estruturas de defesa marítima (agravando ou antecipando o agravamento da situação no lado oposto, sotamar).



Figura 2.3 - Troços de linha de costa em situação de erosão, a vermelho, no período de 1958 a 2021 (adaptado: APA, 2022)

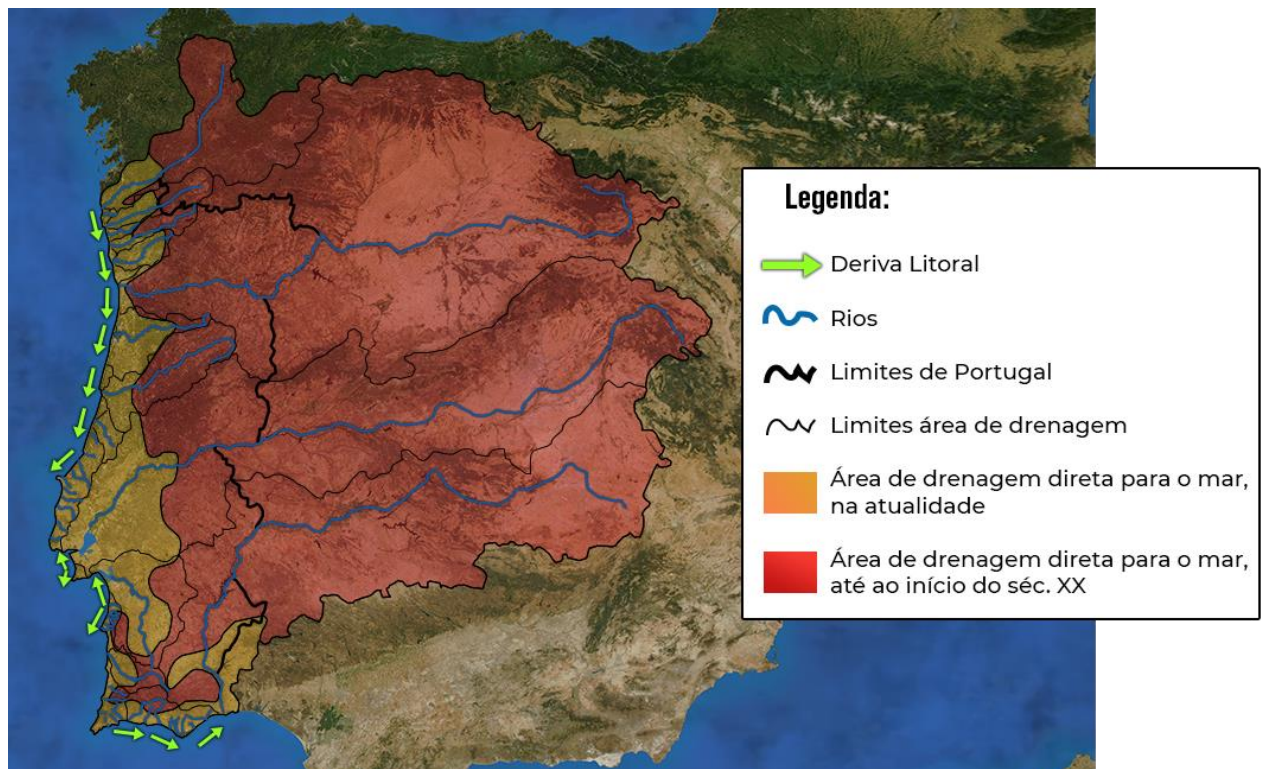


Figura 2.4 - Evolução da área de drenagem direta para o mar (adaptado: Veloso-Gomes *et al.*, 2006)

No litoral adjacente à laguna de Aveiro, os fenómenos de erosão costeira têm-se vindo a agravar desde a década de 70 devido, sobretudo, à retenção dos sedimentos transportados pela deriva litoral nos molhes de acesso ao porto de Aveiro, bem como da extração de areias das praias durante vários anos (Romão, 2014).

Os trabalhos de extensão dos molhes da barra de Aveiro (2011-2012) agravaram ainda mais esta situação, pois condicionaram ainda mais a alimentação natural da praia, resultando num recuo significativo da linha de costa.

Acresce que o crescimento urbanístico na área da praia da Vagueira, uma referência turística no distrito de Aveiro, ocorreu ao mesmo tempo em que a área de uso balnear diminuiu (Figura 2.5).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), a subida do nível do mar causada pelas alterações climáticas resultará num aumento da erosão costeira em todo o mundo, modificando significativamente as costas e as zonas costeiras baixas (Wong, 2014). A zona em estudo não será uma exceção, prevendo-se que os problemas de erosão se possam vir a agravar, assim como os problemas de inundação de zonas urbanas costeiras.

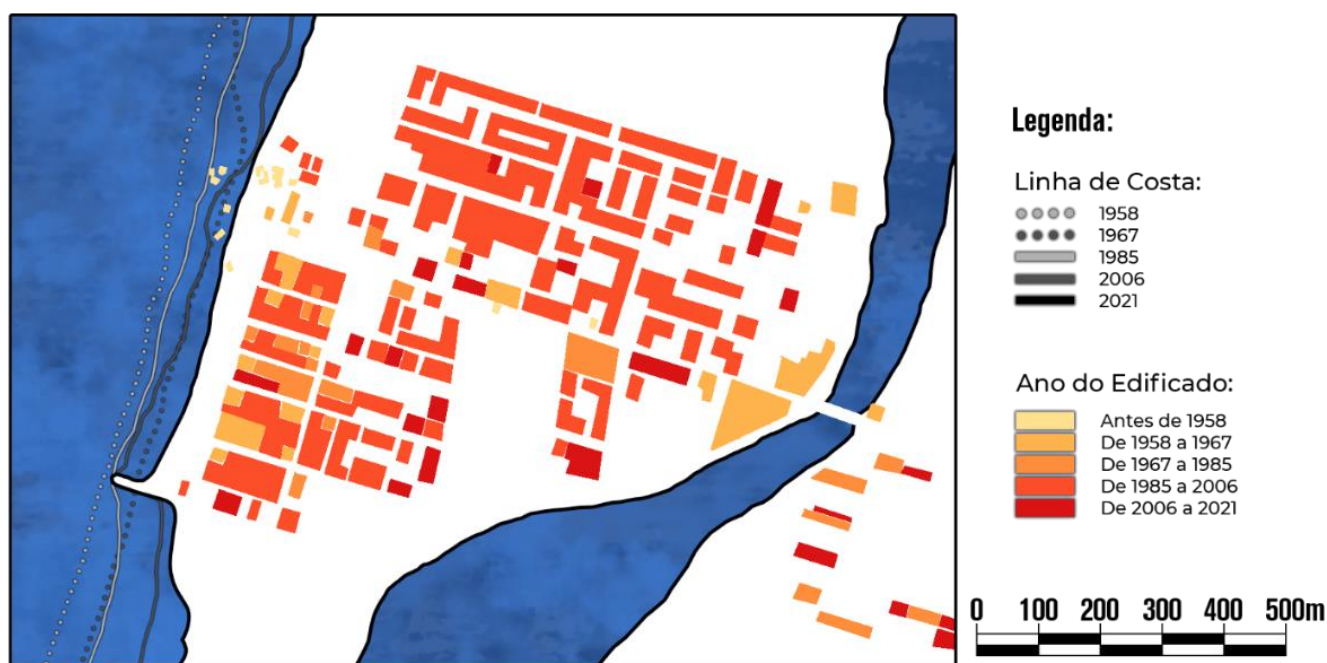


Figura 2.5 - Evolução da linha de costa com a urbanização da Praia da Vagueira ao longo do tempo. (Anexo A - imagens aéreas usadas para a criação deste mapa)

2.1.2 Galgamento na zona da Vagueira

A Praia da Vagueira tem sido palco de diversos eventos de galgamento ao longo dos anos, resultando em danos significativos às propriedades e estruturas costeiras.

Nos últimos anos, é de referir o evento de galgamento de 2008, que conduziu a obras de reabilitação na estrutura longitudinal aderente (Figura 2.6), nomeadamente ao nível das suas fundações, assim como a tempestade Hércules ocorrida em 2014.

A tempestade Hércules foi uma das ocorrências mais graves que atingiu a Praia da Vagueira, e a costa portuguesa no geral, destruindo parte da estrutura de proteção costeira e inundando a área circundante. Este evento foi o que originou a última grande intervenção na estrutura de defesa longitudinal aderente, com o aumento da cota do coroamento da estrutura para 10 m acima do nível médio do mar. As autoridades intensificaram também a monitorização da costa e implementaram medidas de proteção adicionais.

Atualmente, a Praia da Vagueira possui uma área de implantação de estruturas de defesa costeira de aproximadamente 26100 m², o que representa cerca de 5% da sua área de implantação urbana. As estruturas de defesa costeira presentes na localidade incluem uma estrutura longitudinal aderente e uma estrutura transversal, projetadas para proteger a zona contra os efeitos do galgamento e do aumento do nível do mar.



Figura 2.6 - Obra de reabilitação após o evento de 2008 (afundamento da fundação) (20/05/2009 - Coelho, 2014)

Antes de 2014, os eventos de galgamento na Praia da Vagueira eram recorrentes, causando danos significativos na estrutura costeira e nas estruturas em redor, devido às inundações no povoado. No entanto, o alteamento da estrutura de defesa longitudinal aderente, realizada em 2015, na última grande intervenção na estrutura, tem sido eficaz na redução destes

eventos, mostrando que a gestão costeira e o uso de medidas de proteção são essenciais para minimizar os impactos da erosão costeira e do galgamento.

Um estudo realizado por Silva (2019) destacou a eficácia da estrutura de defesa na redução do galgamento na Praia da Vagueira. Além disso, o mesmo estudo também mostrou que o alteamento da estrutura de defesa foi responsável por diminuir a energia das ondas e, consequentemente, reduzir a erosão costeira.

Embora o alteamento da estrutura de defesa tenha sido eficaz na redução dos eventos de galgamento e consequente inundação da frente urbana, a agitação marítima continua a provocar estragos pontuais, dos quais são exemplo a destruição das infraestruturas de acesso ao areal da praia da Vagueira (Figura 2.7). Consequentemente, é importante continuar a monitorizar a área e a implementar medidas de gestão costeira para garantir a proteção da Praia da Vagueira e da infraestrutura costeira a longo prazo.

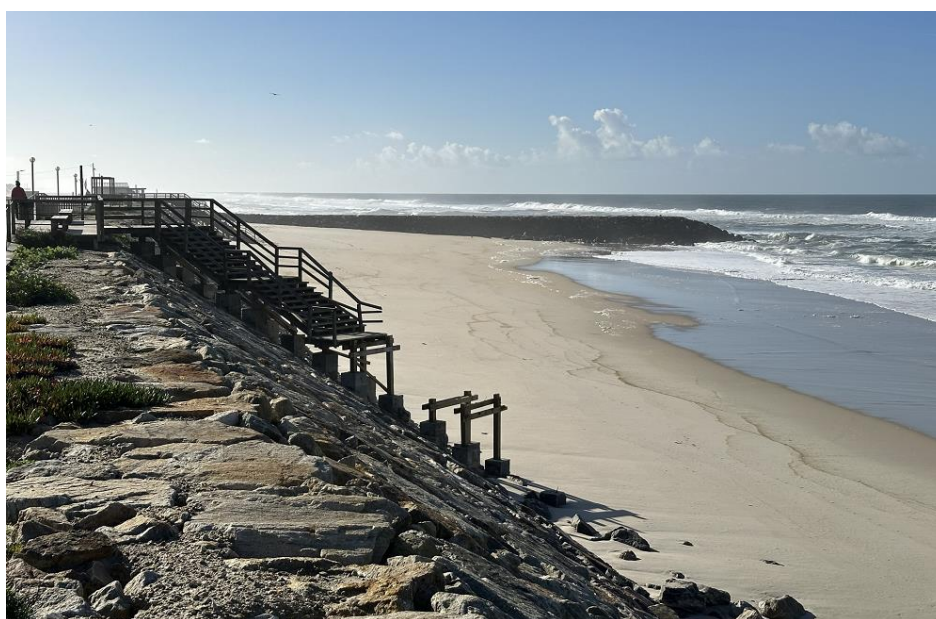


Figura 2.7 - Destruição de infraestrutura de acesso ao areal na praia da Vagueira, devido a eventos de agitação marítima (11/01/2023).

É ainda de referir que a subida do nível do mar coloca esta parte da costa portuguesa entre as mais vulneráveis aos galgamentos (Barros, 2019).

2.1.3 Defesa Costeira da Vagueira

Como referido anteriormente, a Praia da Vagueira é uma das áreas que tem sofrido com graves problemas de erosão costeira e de eventos de galgamento. Toda a sua zona urbana

apresenta cotas topográficas muito baixas, fazendo parte do cordão dunar da laguna de Aveiro, o que torna esta localidade suscetível a galgamentos e inundações durante condições de temporal. Estes fatores tornam esta faixa costeira vulnerável e suscetível a inundações.

Para mitigar os problemas de erosão e de inundações costeiras em zonas urbanas, recorre-se frequentemente a obras de engenharia "pesada" de defesa costeira. As zonas costeiras são sistemas extremamente sensíveis e vulneráveis devido às suas complexidades. Prevenir a erosão e mitigar o galgamento, é assim, uma tarefa complexa, pois nem sempre é possível prever com precisão os impactos a longo prazo da intervenção humana neste processo natural. As medidas tradicionais de engenharia "pesada", têm um alto custo de manutenção e nem sempre são eficazes na prevenção da erosão costeira (Comissão Europeia, 2001).

As estruturas de defesa costeira mais comuns na costa portuguesa são de natureza rígida e estática e, embora possam ser eficazes na proteção de edifícios próximos à linha da costa ou imediatamente a barlamar, tendem a ampliar a erosão costeira diretamente a sotamar (Dias *et al.*, 1994). Na Figura 2.8 são ilustradas as tipologias de estruturas de defesa costeira, que podem ser transversais (perpendiculares ou oblíquas à linha de costa, Figura 2.8 - [b]) ou longitudinais (paralelas à linha de costa, Figura 2.8 - [a], [c]).

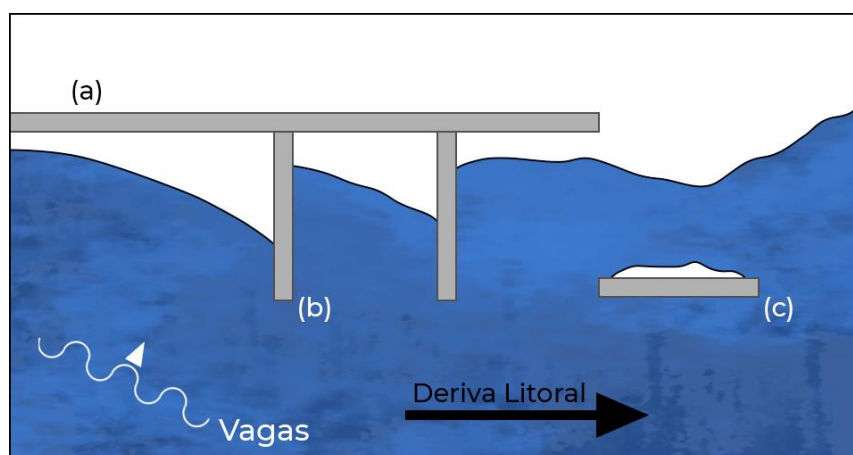


Figura 2.8 - Tipologias de estruturas de defesa costeira

As estruturas transversais, que se estendem desde a costa até ao mar, funcionam bloqueando parcialmente o movimento de deriva litoral, minimizando os problemas de erosão a barlamar, uma vez que irá formar uma acumulação de sedimentos. A sua eficácia pode ser correlacionada com a sua extensão transversal, pois bloqueará assim uma maior quantidade de sedimentos provenientes da deriva litoral (Nordstrom, 2014).

As estruturas longitudinais aderentes são construídas paralelamente ao longo da linha de costa, em terra, para a proteger contra a erosão e das inundações causadas pela agitação

marítima. Estas podem ser impermeáveis, em forma de escada ou curvilíneas, ou de enrocamento (Figura 2.9). As estruturas de defesa longitudinal são empregues em áreas com costas expostas, incluindo áreas fortemente urbanizadas, bem como em áreas menos habitadas, que requerem a proteção do mar. A sua principal função é a proteção contra a inundação das zonas por elas protegidas, sendo frequentemente utilizadas em conjunto com outras medidas de proteção costeira, tais como alimentação artificial e recuperação de dunas, de forma a proporcionar uma abordagem abrangente à erosão e de controlo das inundações.

Estas estruturas podem ter impactos negativos no meio-ambiente envolvente, incluindo a perda de habitat para plantas e animais costeiros, e podem alterar os processos naturais das praias. Como resultado, a decisão de construir estas estruturas deve ser cuidadosamente considerada e ponderada em relação às potenciais consequências. Em alguns casos, medidas alternativas como o recuo planeado da população e bens, ou a alimentação artificial, podem ser mais apropriadas (Gomes *et al.*, 1991).

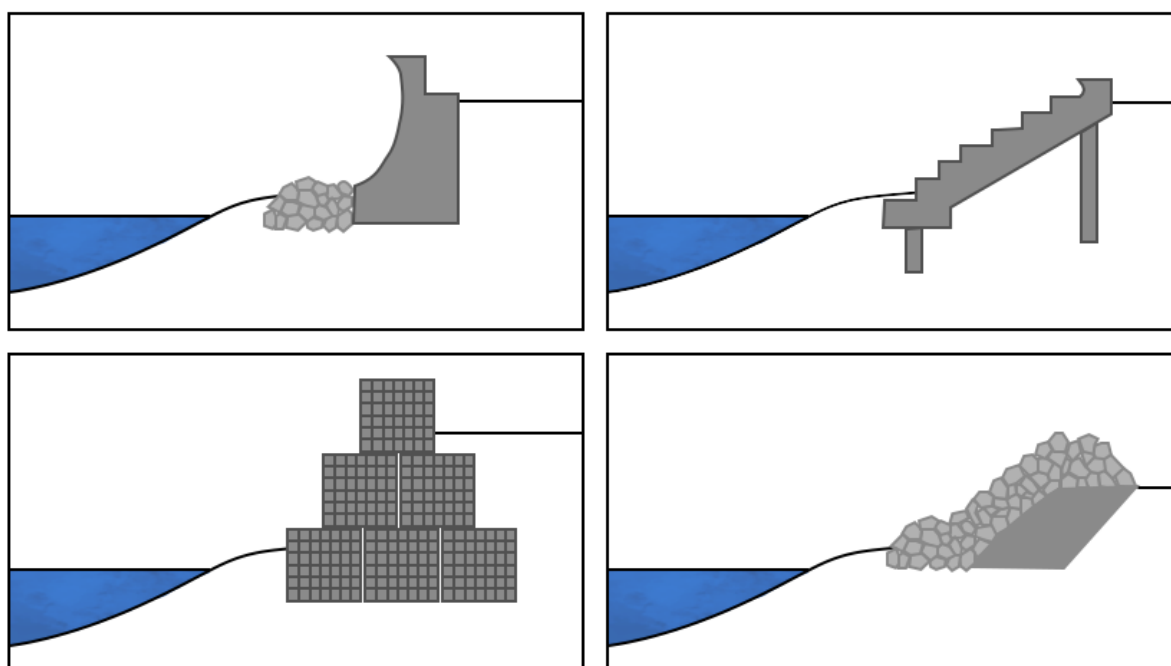


Figura 2.9 - Exemplos das disposições variadas de estruturas longitudinais aderentes de defesa costeira (adaptado: U.S. Army Corps Of Engineers, 2011)

A Tabela 2.1 resume as principais características, assim como as vantagens e desvantagens, de cada tipo de estrutura de defesa costeira.

Tabela 2.1 - Tipos de estrutura de defesa costeira. Principais vantagens e desvantagens.

Tipo de Estrutura	Nome	Características	Vantagens	Desvantagens
Estrutura Transversal	Esporão	Construção perpendicular ou oblíqua à linha de costa	Forte acumulação de sedimentos a barlamar da estrutura	Forte erosão a sotamar da estrutura
	Molhe	Construção perpendicular ou oblíqua à linha de costa, na foz de um rio ou barra	Mantém navegável e livre de assoreamento a foz do rio ou barra. Cria zonas de abrigo para embarcações	Erosão a sotamar da estrutura
Estrutura Longitudinal Aderente	Paredão ou defesa longitudinal aderente	Construção paralela à linha de costa, em terra	Mitigação do galgamento	Diminuição da largura de praia adjacente à estrutura
Estrutura Longitudinal Destacada	Quebra-mar destacado	Construção paralela à linha de costa, no mar	Redução da energia das ondas. Acumulação de sedimentos na praia (formação de saliente ou tombolo), na zona protegida pelo quebra-mar	Erosão a barlamar e sotamar da praia protegida pela estrutura

Para dar resposta aos problemas de erosão e de galgamentos na Praia da Vagueira, foram construídas obras de defesa costeira na Praia da Vagueira (Figura 2.10 e Figura 2.11), concretamente uma estrutura longitudinal aderente de 620 metros e uma estrutura transversal, um esporão, com 130 metros.



Figura 2.10 - Estruturas de defesa costeira Praia da Vagueira, vista sul (11/01/2023)



Figura 2.11 - Estrutura de defesa costeira longitudinal aderente, vista norte (11/01/2023)

2.2 Principais fenómenos de transformação da agitação desde o largo até à estrutura de proteção costeira

A propagação da agitação marítima desde o largo até à costa é um processo complexo e envolve vários fenómenos relevantes.

Ao se propagarem em direção ao litoral, as ondas sofrem processos de transformação que terão impactos importantes na linha de costa. O conhecimento da agitação marítima é um fator crítico de estudo para a disposição e dimensão das estruturas de defesa costeira, uma vez que as suas características, juntamente com a amplitude da maré, irão influenciar diretamente a eficiência e durabilidade destas estruturas.

As características das ondas ao largo são relativamente idênticas numa grande extensão, enquanto junto à costa, estas são próprias de cada local em estudo, devido à influência dos fundos e da topografia costeira (Coelho, 2005). Os principais fenómenos que ocorrem na propagação das ondas são o empolamento (Figura 2.12) e a rebentação, que serão descritos de seguida, e ainda a refração e difração, que não serão aqui referidos, já que a dissertação se foca na análise do galgamento.

Ao interagir com a costa ou com estruturas costeiras as ondas alteram-se, podendo ser refletidas, transmitidas ou dissipadas. O galgamento será abordado de uma forma mais extensa num subcapítulo próprio, visto ser o fenómeno no qual se foca esta dissertação. Por estar relacionado com este, o espraimento também é aqui apresentado.

Quando a agitação alcança pequenas profundidades, ocorre o empolamento das ondas. O empolamento é o aumento da altura das ondas em função da redução da profundidade. A altura máxima é alcançada no momento precedente à rebentação. Este fenómeno ocorre porque há uma diminuição da velocidade de propagação da onda, que é dependente do período de onda e da profundidade. Para que a quantidade de energia transportada seja mantida, a uma diminuição da velocidade de propagação da onda terá de corresponder um aumento da altura de onda.

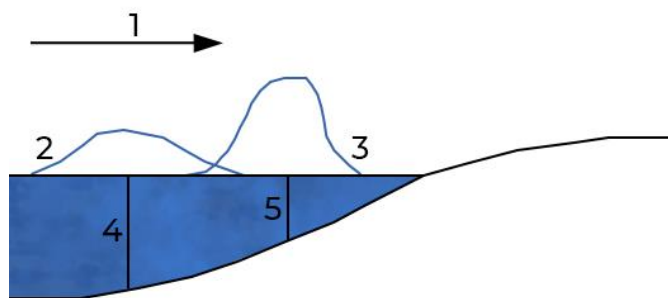


Figura 2.12 - Exemplificação do fenómeno de empolamento (1- Sentido da propagação; 2- onda em maiores profundidades; 3- Onda em menores profundidades; Profundidade e velocidade da onda (4) > (5)).

Quando a profundidade se reduz para além de um determinado valor, a onda torna-se instável e rebenta. Como observável pela Figura 2.13, dependendo da inclinação do fundo e do comprimento de onda, podem distinguir-se quatro tipos diferentes de rebentação: progressiva, mergulhante, colapsante e de fundo (Battjes, 1974).

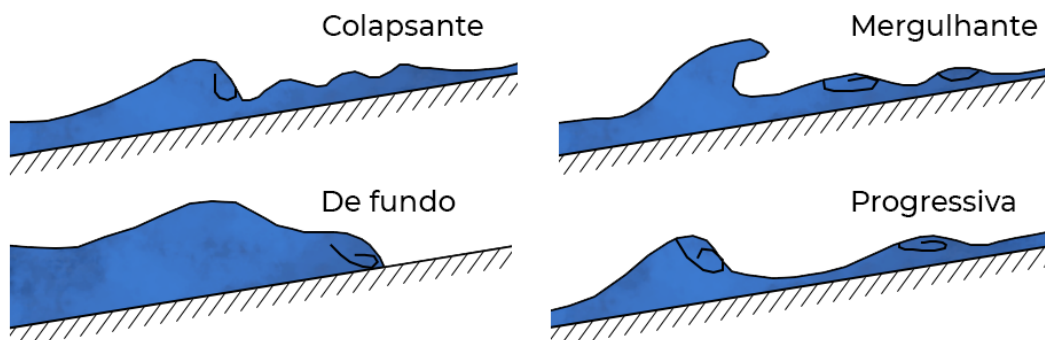


Figura 2.13 - Tipos de rebentação das ondas (adaptado de Battjes, 1974).

Após a rebentação da onda, dá-se o fenómeno de espraçamento (em inglês, *run-up*). O espraçamento é entendido como a cota máxima atingida pela água, medida na vertical em relação ao nível de repouso (Figura 2.14). Os fenómenos de espraçamento vão-se intercalando com os fenómenos de refluxo, que correspondem à cota mais baixa atingida. O espraçamento é influenciado pela reflexão da onda na costa e pelos efeitos tridimensionais da batimetria, além de fatores como porosidade, rugosidade, permeabilidade e nível freático (Coelho, 2005).

O estudo do fenómeno de espraçamento é crucial para a projeção de obras de defesa costeira, pois, caso a cota máxima de espraçamento ultrapasse a cota do coroamento da estrutura, ocorre o fenómeno de galgamento.

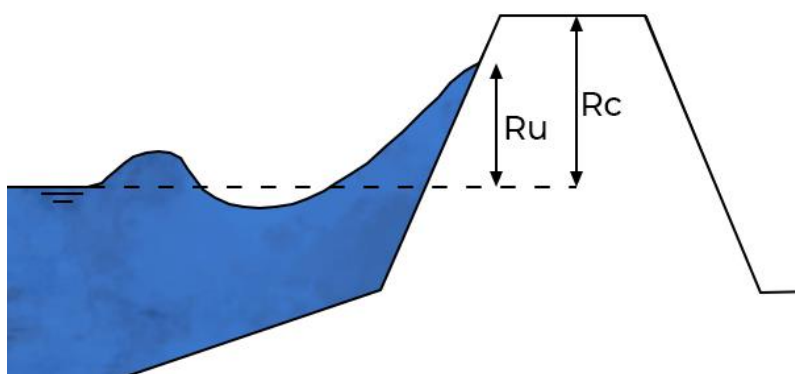


Figura 2.14 - Exemplificação do fenómeno de espraçamento. (Legenda: Ru - cota de espraçamento (runup), Rc - cota de coroamento da estrutura).

2.3 Galgamento

2.3.1 Definição e tipos de galgamento

O galgamento (em inglês, *overtopping*), é caracterizado pela transposição de uma massa de água sobre o coroamento de uma estrutura (Figura 2.15). Após a incidência de uma onda numa estrutura, parte da sua energia cinética é dissipada pela rebentação (caso se verifique), parte é refletida, outra parte é dissipada por atrito e por percolação, e, a energia que não é totalmente dissipada ou refletida, será transmitida por galgamento sobre a estrutura. Por outras palavras, quando a altura de espraçamento é superior à cota do coroamento da estrutura, existirá galgamento. O galgamento pode ser medido através do caudal médio (q) que galga o coroamento da estrutura marítima, por metro linear do seu comprimento.

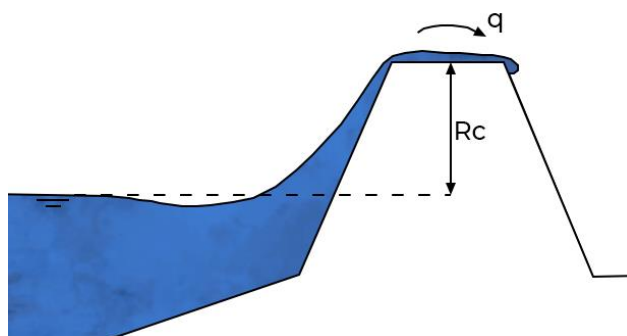


Figura 2.15 - Exemplificação do fenómeno de galgamento. (Legenda: R_c - cota de coroamento da estrutura, Q - caudal médio de galgamento).

Como este fenómeno ocorre em situações de agitação marítima energética e/ou por níveis elevados de maré, numa ótica de custo-benefício, é usualmente aceite no dimensionamento de estruturas de defesa costeira que uma percentagem das ondas incidentes irá causar galgamento sobre a estrutura.

Segundo o Eurotop (2018), existem três tipos de galgamento. A forma mais relevante de galgamento é a chamada lâmina de água (em inglês, *green water*), onde a massa de água passa continuamente sobre o coroamento da estrutura; esta é a forma mais relevante no dimensionamento de estruturas de defesa costeira (Figura 2.16). Não menos importante, uma forma mais reduzida de galgamento são os salpicos (em inglês, *splash*), onde existe a rebentação da onda no lado exterior da estrutura de defesa, que origina um grande volume de salpicos que passam sobre a estrutura (Figura 2.17). Por último, temos os borrifos (em inglês, *white water*), em que sob a forte ação do vento na crista das ondas, pode levar ao transporte de borrifos sobre a estrutura (Figura 2.17).



Figura 2.16 - Galgamento do tipo *green water*, na estrutura defesa aderente longitudinal, Costa da Caparica, 2014 (fonte: YouTube).



Figura 2.17 - Galgamento do tipo *splash* (na figura ao fundo, lado direito) e galgamento do tipo *white water* (em foco, lado esquerdo e centro da figura), na estrutura defesa aderente longitudinal, Foz do Douro, 2016 (fonte: Jornal Notícias)

2.3.2 Cálculo do Galgamento

O cálculo do galgamento de estruturas de defesa costeira é um processo fundamental para garantir a estabilidade e eficiência destas ao longo do seu tempo de vida útil.

Para o cálculo do galgamento existem na literatura diversas ferramentas disponíveis, incluindo expressões empíricas, redes neurais, modelação física e modelação numérica. Cada uma destas ferramentas tem vantagens e desvantagens, e a escolha da melhor opção depende da complexidade do caso em estudo e dos dados disponíveis.

De modo geral, as expressões empíricas são fundamentadas nas observações e experiências realizadas para determinadas condições, nem sempre semelhantes às do caso em estudo, fornecendo resultados precisos para os casos específicos para os quais foram desenvolvidas. Por outro lado, os modelos físicos representam o comportamento do sistema em análise à escala reduzida, exigindo equipamento e instalações para o efeito. Já a modelação numérica utiliza formulações matemáticas e métodos numéricos para simular o comportamento do sistema em estudo, sendo uma importante ferramenta na resolução e compreensão de problemas que são de difícil resolução através dos cálculos analíticos convencionais. No entanto, a modelação numérica requer mais meios computacionais, que serão tanto maiores quanto maior a exatidão dos modelos utilizados.

Nesta dissertação, o cálculo do galgamento será efetuado com o modelo numérico SWASH. Os resultados são comparados com diferentes fórmulas para o cálculo do espraio e galgamento em estruturas de defesa costeira e aplicáveis ao caso de estudo presente, que corresponde a uma estrutura de proteção costeira em baixa profundidade ou mesmo emersa. Essas fórmulas foram descritas e aplicadas às características do caso em questão em Rosa (2021), e serão aqui apresentadas sucintamente.

2.3.3 Cálculo do Galgamento por meio de fórmulas empíricas

2.3.3.1 Formulações apresentadas em Eurotop (2018)

O Eurotop (2018) é um manual europeu que apresenta uma abordagem para a avaliação do galgamento sobre estruturas de defesa costeira. Especifica os parâmetros necessários para os diferentes tipos de estruturas e fornece as fórmulas adequadas para o cálculo do espraio e do caudal médio de galgamento, Q . O manual também inclui recomendações para a interpretação dos resultados obtidos, assim como exemplos de aplicação. São propostos dois métodos para a estimativa dos valores de Q , o "*Mean Value Approach*" e o "*Design Approach*", que diferem no coeficiente de segurança integrado na estimativa média do valor obtido. O manual também prevê a aplicação de fatores de redução que dependem das características das estruturas em questão e da agitação incidente.

As fórmulas do Eurotop fornecem a altura de espraio que é excedida em 2% das ondas incidentes, assim como o caudal médio de galgamento.

2.3.3.2 NN-Overtopping

O programa NN_Overtopping é uma ferramenta que utiliza uma rede neural com o objetivo de fazer uma previsão do caudal de galgamento em estruturas de defesa costeiras. Foi desenvolvido pela "DELFT HYDRAULICS" com financiamento da Comissão Europeia através do projeto "CLASH" (Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping). A previsão é baseada em 15 parâmetros que fazem a caracterização da agitação marítima e da estrutura (Figura 2.18). Os autores deste programa sugerem que os resultados obtidos devem ser confirmados com ensaios em modelo físico, numa fase final do projeto da obra marítima.

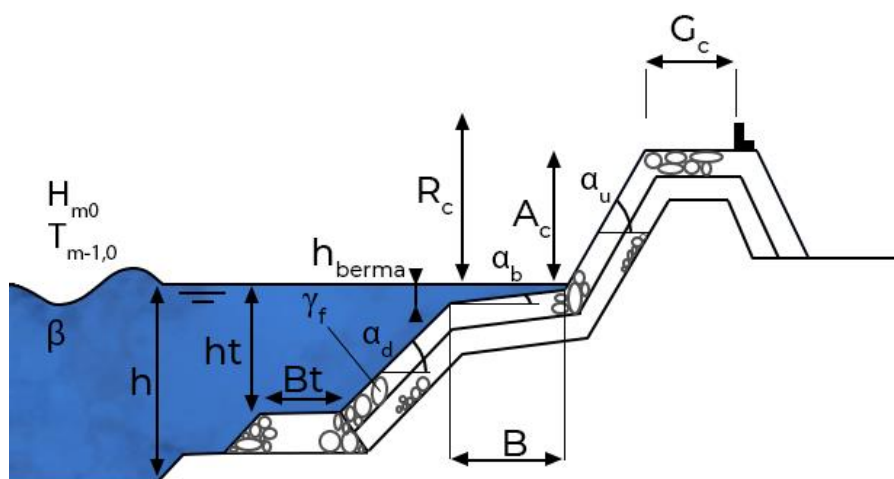


Figura 2.18 - Representação dos parâmetros do programa NN_Overtopping (adaptado de Coeveld *et al.*, 2005)

Os parâmetros apresentados na Figura 2.18 são definidos por:

β	Ângulo entre a direção da onda incidente e a direção perpendicular à estrutura [°];
h	Profundidade em frente à estrutura [m];
H_{m0}	Altura de onda significativa em frente à estrutura [m];
$T_{m-1,0}$	Período de pico espectral [s];
h_t	Profundidade no pé da estrutura [m];
B_t	Largura de berma de pé da estrutura [m];
γ_f	Fator de redução devido à permeabilidade e rugosidade do talude da estrutura [-];
$\cot \alpha_d$	Inclinação da estrutura abaixo da berma [-];
$\cot \alpha_u$	Inclinação da estrutura acima da berma [-];
R_c	Cota de coroamento [m];
B	Largura da berma [m];
h_{berma}	Profundidade da berma [m];
$\tan \alpha_b$	Inclinação da berma [-];
A_c	Distância entre o nível do mar e a berma [m];
G_c	Largura do coroamento da estrutura [m].

Os intervalos de aplicabilidade do programa NN_Overtopping são apresentados na Tabela 2.2.:

Tabela 2.2 - Programa NN_Overtopping. Parâmetros e respectivos intervalos de aplicabilidade

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo	Unidade
β	0.00	80.00	[°]
h	0.90	20.00	[m]
H_{m0}	1.00	1.0	[m]
$S_{m-1,0}$	0.005	0.07	[-]
h_t	0.50	20.00	[m]
B_t	0.00	10.00	[m]
γ_t	0.30	1.00	[-]
$\text{Cot } \alpha_d$	0.00	10.00	[-]
$\text{Cot } \alpha_u$	-1.00	10.00	[-]
R_c	0.50	5.00	[m]
B	0.00	15.00	[m]
h_{berma}	-1.00	5.00	[m]
$\tan h_b$	0.00	0.10	[-]
A_c	0.00	5.00	[m]
G_c	0.00	10.00	[m]

2.3.3.3 Goda (2009)

Para estruturas de defesa costeira lisas e impermeáveis, tanto inclinadas como verticais, Goda (2009) propôs uma abordagem para a previsão do caudal médio de galgamento utilizando dados do projeto "CLASH" e ensaios realizados na Universidade de Kansai, no Japão, de modo a aperfeiçoar as fórmulas exponenciais que tendem a sobrestimar os maiores valores de caudal galgado e a subestimar os menores.

Para isso, Goda redefiniu os coeficientes A e B da fórmula abaixo, como funções da inclinação do fundo, inclinação da estrutura e profundidade no pé do talude:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0,0}^3}} = \exp \left[- \left(A + B \frac{R_c}{H_{m0,0}} \right) \right] \quad (1)$$

À medida que os valores de profundidade no pé do talude vão aumentando, os valores destas funções vão aumentando até convergirem. No entanto, como todos os dados utilizados

apresentavam profundidades moderadas a elevadas, não foram contempladas situações de profundidades extremamente baixas ou de pé do talude emerso.

2.3.3.4 van Gent (1999) modificado por Altomare *et al.* (2016)

Altomare *et al.* (2016) propuseram uma fórmula para a previsão de galgamentos em estruturas de defesa costeiras, baseado na proposta original de van Gent (1999). A fórmula inclui o conceito de inclinação característica em águas pouco profundas, considerando a profundidade no pé do talude, a inclinação do fundo e a inclinação da estrutura de proteção costeira.

A inclinação característica deve ser utilizada sempre que a profundidade no pé do talude seja menor que 1,5 vezes a altura da onda incidente; caso contrário, a inclinação da praia é considerada.

O modelo foi validado com dados do projeto "CLASH". O caudal médio galgado é determinado pela seguinte fórmula:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0,0}^3}} = 10^c \cdot \exp \left[- \left(\frac{R_c}{H_{m0,0} \cdot (0,33 + 0,022 \cdot \xi_{m-1,0})} \right) \right] \quad (2)$$

considerando o expoente c como uma distribuição normal, com média igual a -0,791 e desvio padrão igual a 0,294.

2.3.3.5 Goda (2009) modificado por Altomare *et al.* (2020)

O estudo realizado por Altomare *et al.*, em 2020, aborda a influência da dispersão direcional da onda no galgamento de estruturas de defesa costeira, em águas pouco profundas. Para obter uma previsão mais precisa do galgamento, os autores partem das fórmulas propostas anteriormente por Goda em 2009 e por van Gent em 1999 modificado por Altomare *et al.* (2016), modificando-as para incluir um fator de redução, γ_σ , nas equações (3) e (4), relacionado com a dispersão direcional da onda. Este fator é calculado por meio de equações específicas. Portanto, para estimar o galgamento, é necessário acrescentar este fator de redução às fórmulas já existentes de Goda (2009) e van Gent (1999) modificado por Altomare *et al.* (2016) originando uma previsão mais precisa do caudal médio galgado.

Para Goda (2009):

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0,0}^3}} = \gamma_\sigma \cdot \exp \left[- \left(A + B \frac{R_c}{H_{m0,0}} \right) \right] \quad (3)$$

van Gent (1999) modificado por Altomare *et al.* (2016):

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0,0}^3}} = \gamma_\sigma \cdot 10^c \cdot \exp \left[- \left(\frac{R_c}{H_{m0,0} \cdot (0,33 + 0,022 \cdot \xi_{m-1,0})} \right) \right] \quad (4)$$

2.3.3.6 Mase *et al.* (2013) e Masatoshi *et al.* (2021)

A fórmula apresentada por Mase *et al.* em 2013, permite estimar o espreamento e o galgamento em estruturas de defesa aderente em profundidades baixas ou emersas. Ao contrário de outras fórmulas, que utilizam as características da onda incidente no pé do talude, a proposta de Mase *et al.* (2013) baseia-se nas características da onda em águas profundas, tendo como base uma inclinação imaginária do talude, facilitando assim a aplicação da fórmula em situações em que o pé do talude está emerso.

Inicialmente concebido por Saville em 1958, o conceito do talude imaginário foi aperfeiçoado por Mase *et al.* em 2013, tendo por base dois conjuntos de dados experimentais. A fórmula é baseada em coeficientes empíricos obtidos a partir de ensaios de agitação num tanque de ondas à escala de 1:50 e de ensaios realizados por Mase em 2004 numa estrutura de defesa aderente à escala de 1:45, permitindo assim a determinação da fórmula aplicável ao cálculo do caudal galgado em estruturas costeiras, localizadas em águas pouco profundas ou na costa (Figura 2.19).

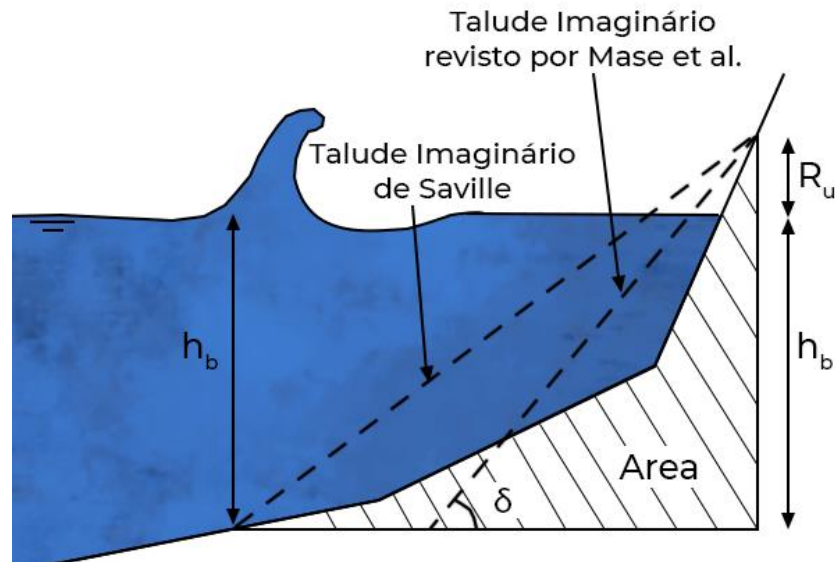


Figura 2.19 - Talude imaginário (adaptado de Mase *et al.*, 2013)

A fórmula proposta por Mase *et al.* (2013) requer um cálculo iterativo entre o espraio e o declive imaginário para estimar corretamente o espraio. Quando o nível máximo de espraio é superior ao coroamento da estrutura, ocorre galgamento e o caudal galgado é calculado. Para alargar a aplicabilidade desta fórmula a uma variedade de condições de galgamento, os coeficientes usados por Mase *et al.* (2013) foram corrigidos por Masatoshi *et al.* (2021).

2.3.4 Cálculo do Galgamento utilizando o modelo numérico SWASH

SWASH (Simulating WAVes till SHore) é um modelo numérico que simula escoamentos não hidrostáticos, de superfície livre, rotacionais e fenómenos de transporte em uma, duas ou três dimensões. O SWASH é um modelo baseado nas equações não lineares de águas pouco profundas, incluindo pressão não hidrostática e algumas equações de transporte, permitindo simular a propagação das ondas em regiões costeiras e até à costa, assim como variações complexas e rápidas do escoamento (como as que ocorrem em inundações costeiras resultantes de condições de agitação e de tsunamis), escoamentos resultantes de diferenças de densidade (em zonas costeiras, estuários, lagos, rios), e ainda a circulação oceânica, as marés e a sobrelevação de origem meteorológica.

O SWASH foi concebido para ser um modelo eficiente e robusto, permitindo a sua aplicação a uma vasta gama de escalas temporais e espaciais e a escoamentos em águas pouco profundas em ambientes complexos. Tal inclui aplicações costeiras de pequena escala, como ondas que se aproximam de uma praia, a penetração de ondas em portos, ondas de cheia num rio, intrusão salina num estuário, e sistemas de grande escala (oceânicos e costeiros) impulsionados pelas forças de Coriolis e por forças meteorológicas para simular ondas de maré e inundações induzidas pela sobrelevação meteorológica.

O modelo numérico funciona dividindo a zona costeira numa malha de células e resolvendo as equações de pequenas profundidades para cada célula. O modelo tem em conta, na propagação das ondas, os efeitos da rebentação das ondas, o atrito do fundo e a presença de estruturas. Através da simulação de uma gama de condições de ondas e configurações estruturais, é possível obter uma visão detalhada de como a estrutura se comporta sob diferentes cenários, contribuindo para a avaliação da conceção e segurança da estrutura.

O SWASH é um modelo em código aberto, que está continuamente a ser desenvolvido pela Universidade de Tecnologia de Delft, nos Países Baixos. O código baseia-se no trabalho de vários investigadores, nomeadamente Stelling e Zijlema (em 2003), Stelling e Duinmeijer

(em 2003), Zijlema e Stelling (em 2005 e 2008), Zijlema et al.(em 2011), Smit et al. (em 2013) e Zijlema (em 2020). Baseia-se num método explícito de diferenças finitas de segunda ordem para malhas. A pressão é dividida nas partes hidrostática e não hidrostática, por razões de precisão, e as equações da continuidade e da quantidade de movimento são integradas no tempo utilizando um esquema de segunda ordem, que mantém a amplitude da onda constante com uma dispersão numérica favorável. O domínio físico pode ser discretizado pela subdivisão do domínio de cálculo em células de forma e tamanho arbitrários, com distinção entre a definição da malha em x e y (The SWASH Team, 2023).

Globalmente, o SWASH é uma ferramenta numérica poderosa, podendo simular uma vasta gama de fenómenos associados à deformação de ondas marítimas e escoamentos, sendo também um instrumento capaz de analisar a interação onda-estrutura. O conhecimento e análise da interação onda-estrutura fornece informação valiosa para a conceção e segurança das estruturas costeiras.

Para executar o modelo numérico SWASH é necessário especificar um conjunto de parâmetros que irão determinar como as diferentes forças e processos físicos serão simulados.

De modo geral, os parâmetros podem ser agrupados nos respeitantes:

- Ao tamanho da malha;
- Ao intervalo de tempo de simulação;
- Ao tipo de onda a simular (altura, comprimento e período);
- Às correntes (velocidade e direção);
- Aos processos sedimentares (processos de erosão e deposição de sedimentos, associando a estes, o tamanho e a densidade das partículas);
- Às condições de fronteira;
- Às fontes externas que podem influenciar a simulação, como a temperatura da água e a pressão atmosférica.

A definição correta dos parâmetros na configuração do modelo SWASH é essencial para que seja garantida a máxima precisão na simulação dos processos físicos em estudo.

SIMULAÇÕES COM O MODELO NUMÉRICO SWASH

3.1 Implementação dos parâmetros no código do modelo numérico

Nesta dissertação foi utilizada a versão 7.01 do modelo SWASH para estimar o espraio e o galgamento na praia da Vagueira. Assim, descreve-se neste capítulo a metodologia utilizada para simular o galgamento sobre a estrutura de defesa costeira da Vagueira. Para tal, são apresentados os parâmetros utilizados na simulação, bem como o código final utilizado.

Inicialmente, foram definidos os parâmetros gerais do modelo, como o nome do projeto, a data e hora de início da simulação e o número da corrida. Posteriormente, foram definidos os parâmetros de resolução espacial, como o nível de repouso (SET LEVEL) e a espessura mínima da lâmina de água (SET DEPMIN). Foi definido o tipo de modo a utilizar, neste caso o modo não estacionário unidimensional (MODE NONST ONED), ou seja, onde as propriedades mudam ao longo do tempo, sendo simuladas apenas numa única dimensão.

Seguidamente, foram especificados os parâmetros de entrada do modelo, nomeadamente o comprimento total do domínio (CGRID, que define as dimensões da malha computacional, neste caso, 1524 m, assim como o número total de pontos da malha, neste caso 7620) e a esquematização da malha vertical (VERT 1, unidimensional, que irá representar como as variáveis irão mudar na vertical, como a temperatura, a pressão e a velocidade do fluido).

Foi definida a batimetria e o atrito de fundo, dados estes lidos a partir de ficheiros externos. Relativo ao coeficiente de atrito da simulação, utilizou-se o modelo de atrito de Manning (FRICTION MANNING).

Finalmente, apresentam-se as condições iniciais da simulação, sendo que, neste caso, todas as variáveis serão iniciadas com valor zero (INIT ZERO).

A agitação gerada foi definida por um espectro de *Jonswap* com um valor de γ de 3,3, valor comumente utilizado no estudo da agitação em regiões costeiras portuguesas. O valor de γ é normalmente escolhido entre 1 e 6, dependendo do tipo de agitação a simular. Quanto maior o valor de γ , mais estreita e concentrada é a distribuição de energia em torno da frequência de pico.

Definiram-se também as condições de fronteira laterais da malha. Junto do ponto 0 m, correspondente à lateral este (SIDE E), definiu-se uma condição de fronteira que absorve as ondas que cheguem a esta fronteira do modelo, evitando reflexões das fronteiras para o interior do domínio (BTYP *SOMMERFELD*). Junto ao ponto correspondente aos 1524 m, junto da estrutura de defesa costeira, lateral oeste (SIDE W), temos uma condição de fronteira (BTYP *WEAK*) que permite que as ondas passem através dela. Definiram-se ainda os parâmetros característicos da agitação a simular, nomeadamente, os valores da altura significativa e o respetivo período do pico. O parâmetro *BREAK* indica que a rebentação das ondas será considerada.

Na definição das características da simulação não hidrostática que será realizada, será utilizado o método de precisão ILU (NONHYDROSTATIC BOX PREC ILU). Na discretização numérica utilizada, escolheu-se o esquema numérico “upwind” (DISCRET UPW MOM), pois é o indicado pelo manual do modelo *SWASH* para os casos em que existe rebentação, de forma a assegurar a conservação da quantidade de movimento. O intervalo considerado para os números de Courant a utilizar na simulação (TIMEI 0.1 0.5) variou entre o valor mínimo de 0,1 e o valor máximo de 0,5 (Manz *et al.*, 2022).

Já nas últimas linhas do código, foram definidos os parâmetros de saída do modelo, como os pontos onde serão registados os valores das grandezas simuladas e dos dados de entrada (profundidade, altura significativa de onda, caudal galgado e elevação da superfície livre em relação ao nível de repouso), bem como as tabelas e ficheiros onde serão armazenados os resultados da simulação.

Por fim, a linha “STOP” é usada para dar como encerrada a simulação.

Estas linhas de código foram desenvolvidas para configurar e modelar um cenário específico de agitação em ambiente costeiro. Cada comando e parâmetro foi selecionado para garantir que os resultados sejam precisos e reflitam de forma realista as condições propostas para a simulação.

Na Figura 3.1 apresenta-se, a título de exemplo, as linhas de código utilizadas numa determinada simulação, onde se definem os parâmetros necessários à simulação.

```

1| PROJ 'Vagueira' 'no1'
2| '1 Janeiro 2023, 12:00'
3| SET LEVEL 3.72
4| SET DEPMIN 0.001
5| MODE NONST ONED
6| CGRID 0. 0. 0. 1524 0. 7620 0
7| VERT 1
8| $_Parametros_Entrada
9| INPGRID BOTTOM 0. 0. 0. 7620 0 0.2 0.
10| READINP BOTTOM -1. 'batimetria_0.200.bot' 1 0 FREE
11| INPGRID FRIC 0. 0. 0. 7620 0 0.2 0.
12| READINP FRIC 1. 'friction_0.200.dat' 1 0 FREE
13| INIT ZERO
14| BOU SHAP JON 3.3 SIG PEAK
15| BOU SIDE W BTYPE WEAK CON SPECTRUM 3.74 16.50
16| BOU SIDE E BTYPE SOMMERFELD
17| FRICTION MANNING
18| BREAK
19| NONHYDROSTATIC BOX PREC ILU
20| DISCRET UPW MOM
21| BOTCEL SHIFT
22| TIMEI 0.1 0.5
23| $_Parametros_Saida
24| POINTS 'Valores1' FILE 'pontos.wvg'
25| QUANTITY HSIG SETUP dur 8556 SEC
26| QUANTITY DISCH hexp=0.000000001
27| TABLE 'Valores1' HEAD 'output_batimetria.tbl' TSEC BOTL HSIG DISCH
WATL OUTPUT 003712.000 0.1 SEC
28| GROUP 'COMPGRD' 1 7620 1 1
29| BLOCK 'COMPGRD' NOHEAD 'output.mat' LAY 3 XP YP WATLEV BOTLEV DEPTH
OUTPUT 000000.000 1.0 SEC
30| TEST 1 0
31| COMPUTE 000000.000 0.300 SEC 044512.000
32| STOP

```

Figura 3.1 - Linhas de código utilizadas na simulação final, para obter valor de caudais de galgamento

3.2 Características da estrutura de defesa

A estrutura em estudo é uma estrutura de defesa longitudinal aderente que tem como principal objetivo proteger uma determinada área ao longo da costa, reduzindo os impactos causados pelo galgamento, assegurando assim a proteção de bens e pessoas na sua retaguarda (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Retaguarda da estrutura de defesa costeira da Praia da Vagueira (11/01/2023).

A estrutura da Praia da Vagueira (Figura 3.3), é uma estrutura de enrocamento em talude, com secção transversal trapezoidal, que impede a normal propagação da agitação marítima e permite a dissipação da energia da onda na estrutura. O processo de dissipação de energia, neste caso, está associado à rebentação na própria estrutura e, em menor medida, à percolação da agitação no interior da estrutura (Pinto e Neves, 2003).

A Figura 3.3 e a Tabela 3.1 contêm um resumo das principais características da estrutura, e que foram respeitadas nas simulações numéricas.

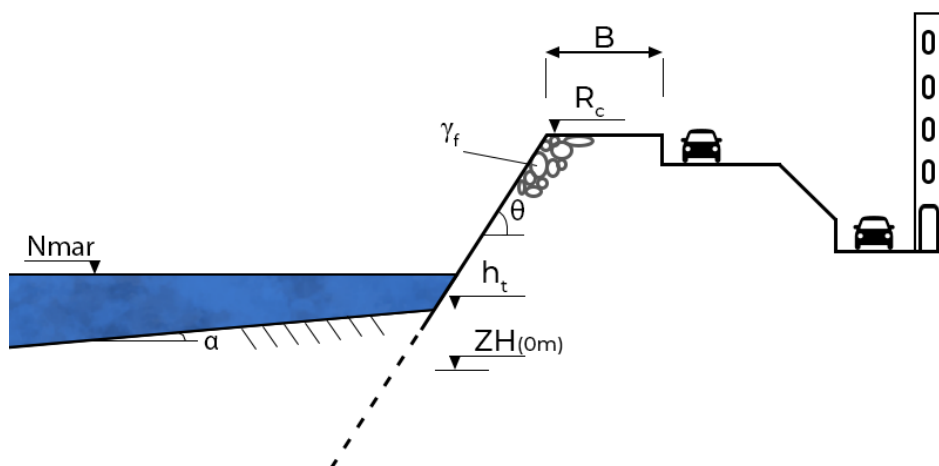


Figura 3.3 - Corte transversal da estrutura de defesa costeira da Praia da Vagueira, cujos parâmetros são apresentados na tabela 3.1

Tabela 3.1 - Características da estrutura de defesa longitudinal aderente da Praia da Vagueira

Variável	Valor	Unidade
Ângulo do perfil de praia (α)	4.67	[°]
Fator de rugosidade da estrutura (γ_f)	0.80	-
Largura da berma de coroamento (B)	7.19	[m]
Cota de coroamento (R_c)	10.93	[m]
Profundidade do pé de talude, positivo acima do ZH (h_t)	2.89	[m]
Profundidade na zona de medição da agitação	-9.87	[m]
Profundidade mais baixa na zona do perfil	-12.00	[m]
Ângulo da estrutura marginal (θ)	55.76	[°]
Ângulo do perfil de fundo	0.11	[°]
Ângulo que a perpendicular à estrutura faz com o Norte	252.50	[°]

3.3 Domínio computacional e batimetria

A zona em estudo não se restringe apenas à estrutura de defesa, mas abrange toda a zona submersa pela qual as ondas se propagam antes de atingirem a estrutura. É fundamental incluir a zona submersa na sua totalidade já que uma má definição desta área, pode afetar a exatidão dos resultados obtidos.

O perfil transversal da zona em estudo (Figura 3.4), foi obtido através dos levantamentos efetuados em julho de 2018 como parte do programa COSMO, sendo utilizado o perfil PCE (Perfil Central da Estrutura) (Rosa, 2021). O perfil apresentava uma diminuição constante da profundidade nos primeiros 800 metros de extensão (Figura 3.4), após os quais se observava uma variação acentuada no declive do perfil transversal da zona submersa em estudo, com o aparecimento de uma barra e subsequente fossa (localizadas entre os 800 e os 1300 metros de extensão). Esta é uma configuração de fundo frequente na costa portuguesa. Os restantes metros de extensão até à estrutura correspondiam, de maneira geral, a um declive com inclinação positiva.

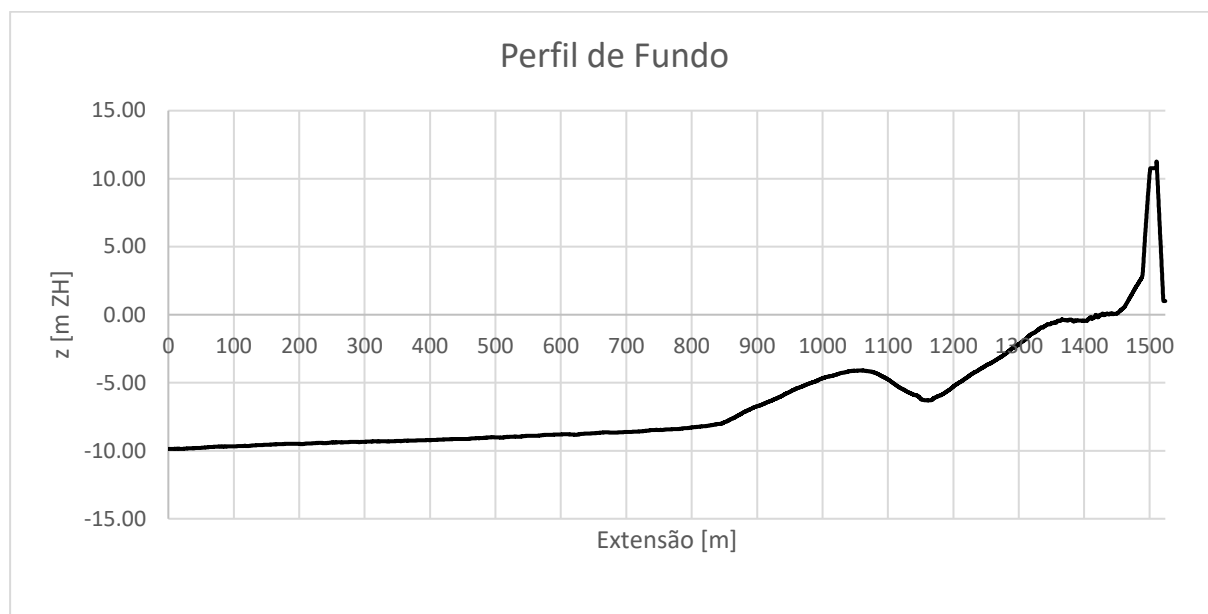


Figura 3.4 - Perfil de fundo da zona em estudo, que corresponde ao domínio computacional utilizado nas simulações (Programa COSMO, 2018).

Os dados referentes à agitação marítima foram introduzidos no ponto de abscissa nula, que se encontra localizado a uma profundidade de 10 metros.

3.4 Análise de Sensibilidade

O objetivo principal das simulações com o modelo SWASH é avaliar a eficácia da estrutura de defesa aderente da Praia da Vagueira para mitigar o galgamento com diferentes condições de agitação e nível de mar, nomeadamente, através do cálculo do caudal médio de galgamento.

Contudo, antes de se proceder à simulação dos casos em estudo, é essencial realizar uma análise de sensibilidade de forma a determinar a influência que alguns parâmetros de entrada do modelo têm no valor do galgamento, concretamente a dimensão da malha, o coeficiente de atrito da estrutura e o número de ondas necessárias simular para a obtenção de resultados satisfatórios.

A análise de sensibilidade ajuda a garantir que o modelo numérico é executado com uma malha que é um compromisso entre a precisão de resultados e o tempo de cálculo e a saber qual a influência da alteração do valor do coeficiente de Manning no caudal galgado resultante.

3.4.1 Dimensão da malha

Na análise de sensibilidade realizada com o modelo numérico SWASH, um dos fatores importantes estudados foi a dimensão da malha a utilizar, de forma a obter resultados precisos com o menor tempo de cálculo possível. Com o intuito de investigar a influência da dimensão da malha nos resultados do modelo numérico, foram conduzidas simulações utilizando o caso 39685 ($H_s = 2,61$ m, $T_p = 14,88$ s e $N_{mar} = 3,79$ m) como base, tendo-se mantido os parâmetros constantes entre corridas, exceto a dimensão da malha. O caso 39685 corresponde à condição para a qual Rosa (2021) obteve os valores de galgamento mais elevados com a aplicação das fórmulas empíricas para o cálculo do galgamento. Na fase inicial da análise de sensibilidade, optou-se por efetuar simulações com 850 ondas. Esta escolha foi fundamentada na análise do manual do SWASH e na consulta de variadas fontes académicas, revelando-se uma abordagem fundamentada e apropriada.

Os valores de espaçamento, Δx , considerados na análise de sensibilidade à dimensão da malha foram: 0,005; 0,010; 0,020; 0,040; 0,050; 0,075; 0,080; 0,100; 0,200; 0,300; 0,400; 0,500; 0,750; 1,000; 1,500; 2,000 e 3,000 metros (17 casos).

Observou-se que para os valores mais pequenos da dimensão da malha, nomeadamente os valores 0,005; 0,010; 0,020; 0,040 e 0,050 metros, ocorreu um erro de "*stack overflow*" do modelo numérico SWASH. A possível razão para esta ocorrência deve-se a que, para malhas muito finas, o modelo numérico exceda a capacidade de memória disponível, obtendo-se então um erro de "*stack overflow*". Malhas inferiores a 0,200 têm um crescimento exponencial do tempo de simulação, tornando assim importante também a relação tempo de simulação com a qualidade dos valores obtidos.

Por outro lado, no polo oposto das dimensões das malhas, as malhas com 1,000; 1,500; 2,000 e 3,000 metros foram consideradas pouco refinadas. Estas malhas conduziram a resultados imprecisos, pois não foram capazes de capturar com precisão os efeitos das variações da agitação na zona de espraiamento, levando a valores significativamente inferiores dos caudais.

Nas seguintes tabelas e gráficos, apresentam-se os resultados obtidos na análise de sensibilidade para a dimensão da malha. As corridas foram feitas num computador Sistema Operativo Microsoft Windows 11 Pro (Versão SO 10.0.22000, Compilação 22000), com processador Intel(R) Core(TM) i9-9900K CPU @ 3.60GHz, 3600 Mhz, com 8 Núcleos e 16 Processadores Lógicos e memória RAM de 32,0 GB.

Tabela 3.2 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39685, obtido pelas diferentes dimensões da malha em estudo (Tabela completa Anexo B1).

Caso 39685		
deltaX [m]	Runup Máximo [m]	Runtime [h]
0.075	4.485	15.77
0.100	5.090	9.35
0.200	5.447	2.20
0.300	5.295	1.17
0.400	5.196	0.75
0.500	5.172	0.63
0.750	5.071	0.32
1.000	3.136	0.17
1.500	4.699	0.17
2.000	4.367	0.12
3.000	4.672	0.07

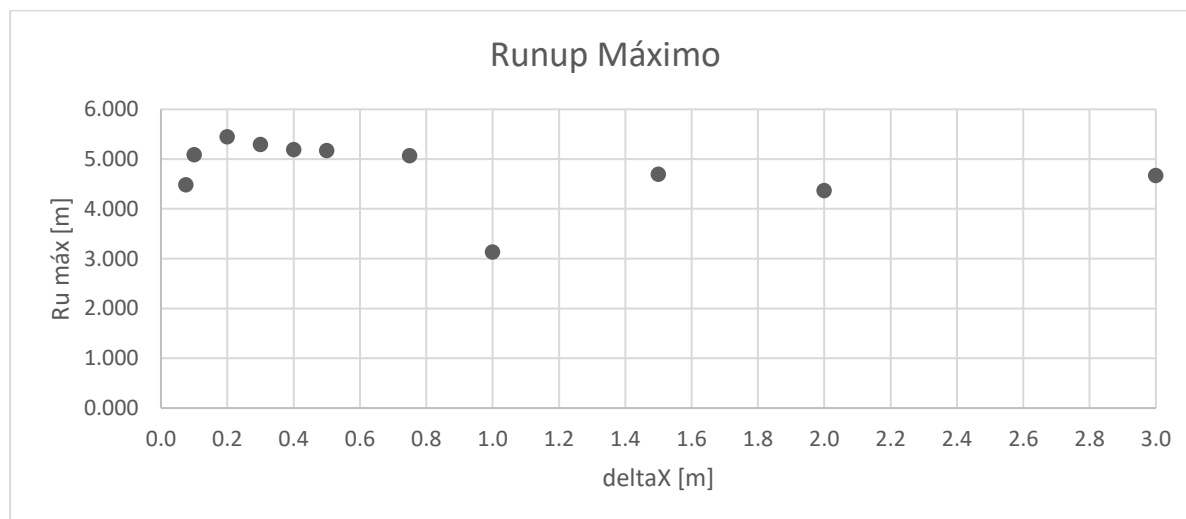


Figura 3.5 - Runup máximo, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39685).

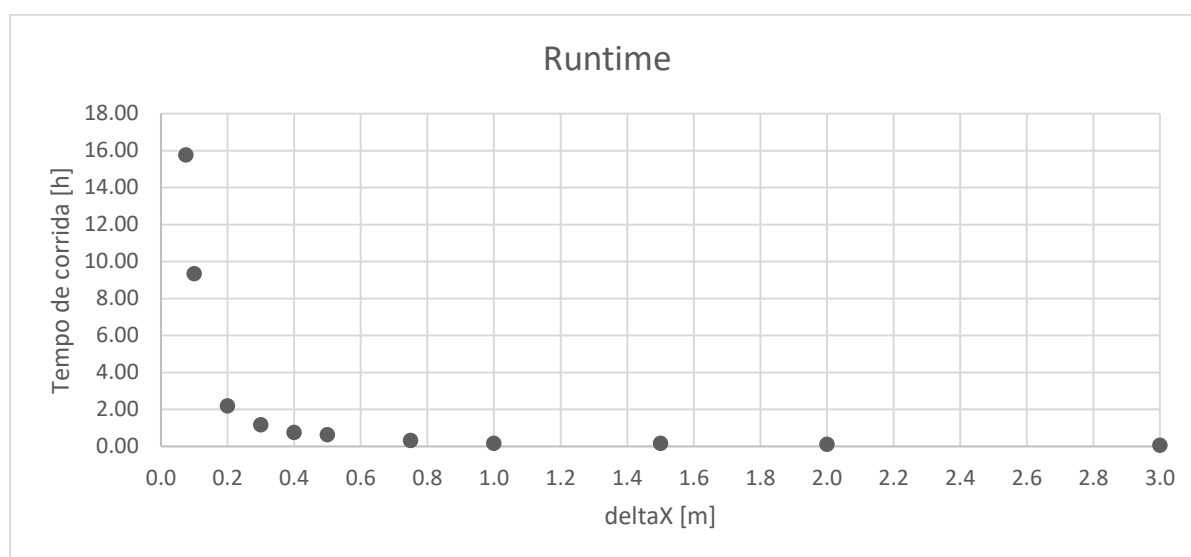


Figura 3.6 - Runtime (tempo de corrida da simulação), para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39685).

Tabela 3.3 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39685, obtido pelas diferentes dimensões da malha em estudo (Tabela completa Anexo B1).

deltaX [m]	Ponto 5		Ponto 6		Hs [m]			
	Q [m³/s/m]	Qmax [m³/s/m]	Q [m³/s/m]	Qmax [m³/s/m]	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0.075	0.394	10.972	0.000	0.761	3.0154	2.9514	2.8610	2.7900
0.100	0.427	11.345	0.001	2.031	3.3005	3.1435	3.0494	2.9556
0.200	0.450	13.684	0.001	3.269	3.1639	3.2130	3.0631	3.0477
0.300	0.458	14.239	0.001	2.926	2.7129	2.7240	3.0420	2.8624
0.400	0.443	14.009	0.001	2.957	2.7020	2.7267	3.0477	2.8624
0.500	0.441	13.614	0.001	3.717	2.7133	2.7295	3.0450	2.8529
0.750	0.387	12.397	0.000	2.372	2.7119	2.7225	3.0550	2.8757
1.000	0.360	13.996	0.000	2.270	2.7088	2.7335	3.0663	2.9023
1.500	0.241	12.965	0.000	0.392	2.6871	2.7004	3.0539	2.8601
2.000	0.121	10.690	0.000	0.000	2.7011	2.7018	3.0364	2.8199
3.000	0.015	8.328	0.000	0.000	2.7027	2.7371	3.0709	2.8981

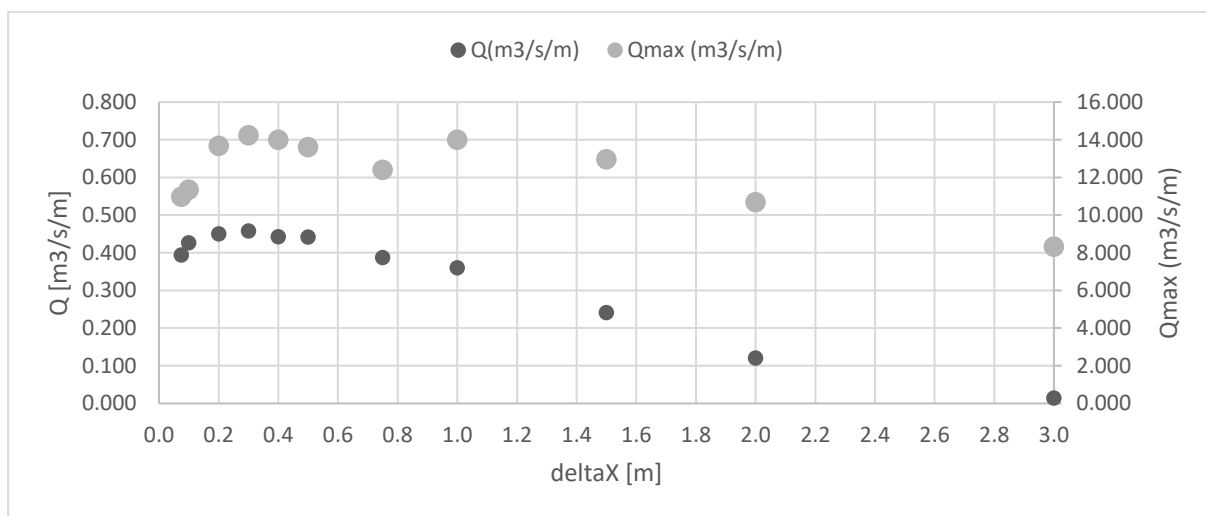


Figura 3.7 - Caudais Pé do Talude, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39685).

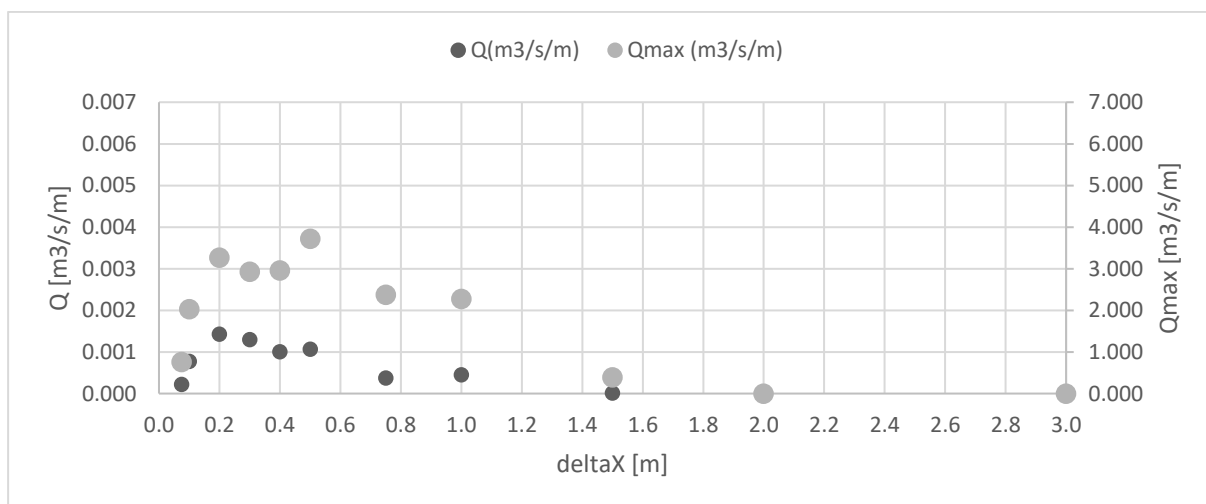


Figura 3.8 - Caudais Meio do Talude, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39685).

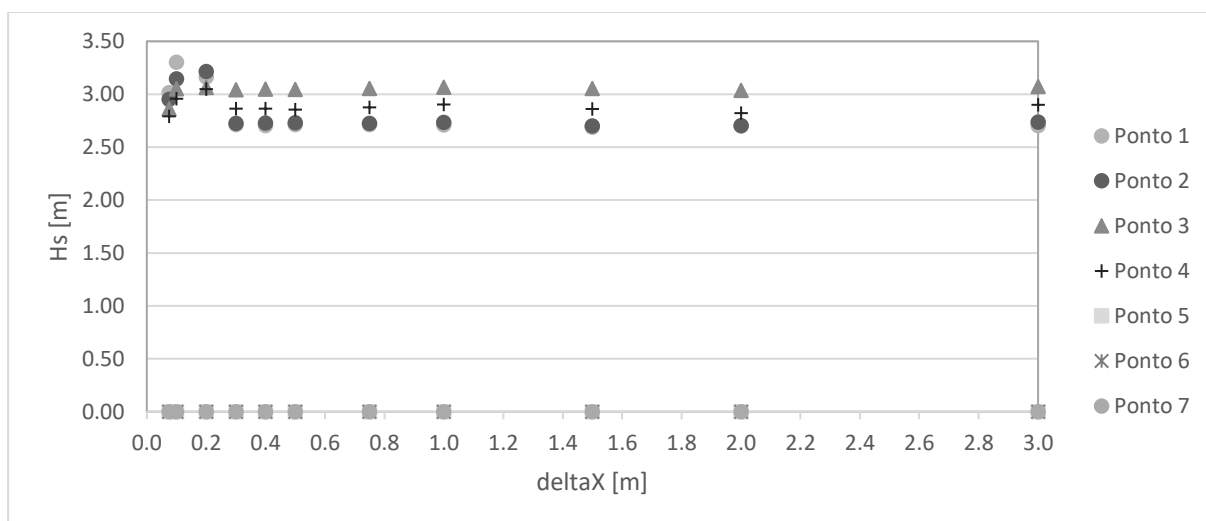


Figura 3.9 - Altura Significativa de Ondas, nos diferentes pontos de estudo para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39685).

Da análise dos resultados apresentados, foi escolhida a malha com um espaçamento de 0,200 metros, por ser a que permite reproduzir resultados com uma variação do valor de espraiamento (Runup) na casa dos $\pm 4.5\%$ entre as batimetrias de 0,100 a 0,750 metros e variação do valor de caudais $\pm 2\%$ entre as batimetrias de 0,200 a 0,500 metros. Uma vez mais, após a execução das simulações de análise de sensibilidade, destacaram-se os resultados desta malha em termos de Altura Significativa de Onda, mantendo simultaneamente um tempo de simulação aceitável, aproximadamente de 2 horas. Esta combinação de exatidão e eficiência no tempo de simulação torna a malha de 0,200 metros a escolha mais adequada para este estudo e para futuras análises.

De forma a confirmar se estes resultados se mantinham para eventos com características diferentes, foram realizadas simulações com os mesmos parâmetros, desta vez com o espaçamento da malha a variar entre 0,075 e 3,000 metros, para os casos 39683 ($H_s = 1,68\text{m}$, $T_p = 13,41\text{s}$ e $N_{mar} = 3,46\text{m}$) e 39684 ($H_s = 2,14\text{m}$, $T_p = 14,88\text{s}$ e $N_{mar} = 3,70\text{m}$).

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para o caso 39683 nas tabelas e gráficos subsequentes.

Tabela 3.4 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39683, obtido pelas diferentes dimensões da malha em estudo (Tabela completa Anexo B2).

Caso 39683		
deltaX [m]	Runup Máximo [m]	Runtime [h]
0.075	3.248	7.98
0.100	3.678	5.70
0.200	3.797	1.55
0.300	3.433	0.83
0.400	3.558	0.53
0.500	3.382	0.55
0.750	3.171	0.30
1.000	3.136	0.18
1.500	3.098	0.12
2.000	3.101	0.10
3.000	3.022	0.05

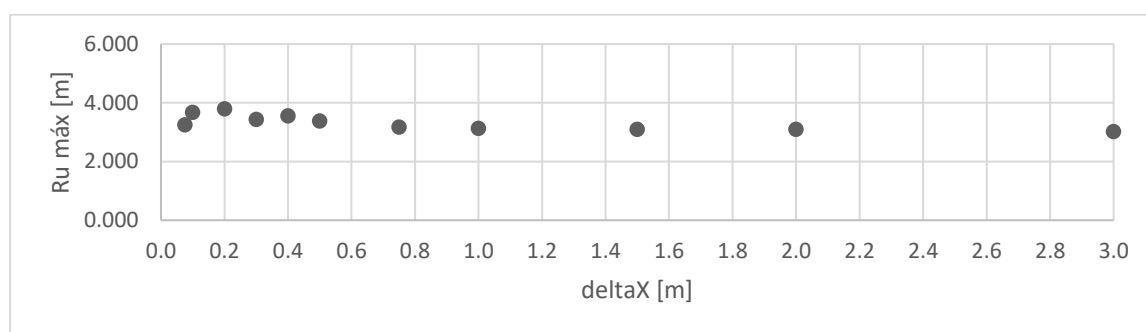


Figura 3.10 - Runup máximo, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39683).

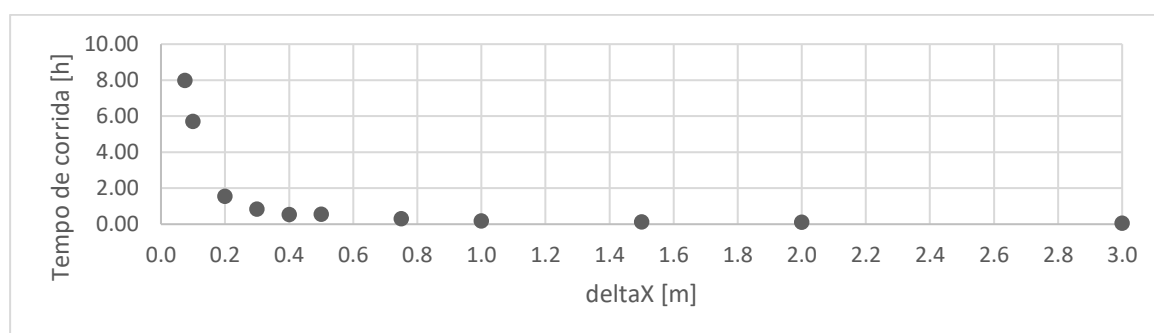


Figura 3.11 - Runtime (tempo de corrida da simulação), para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39683).

Tabela 3.5 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39683, obtido pelas diferentes dimensões da malha em estudo (Tabela completa Anexo B2).

deltaX [m]	Ponto 5		Ponto 6		Hs [m]			
	Q [m³/s/m]	Qmax [m³/s/m]	Q [m³/s/m]	Qmax [m³/s/m]	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0.075	0.264	6.765	0.000	0.000	2.7623	2.5532	2.0878	2.1621
0.100	0.282	8.063	0.000	0.000	2.5132	2.1214	1.9770	1.9596
0.200	0.289	9.960	0.000	0.026	1.7665	1.8391	1.9425	1.8657
0.300	0.271	9.332	0.000	0.000	1.7646	1.8211	1.9363	1.8662
0.400	0.267	9.856	0.000	0.000	1.7649	1.8167	1.9412	1.8675
0.500	0.263	10.348	0.000	0.000	1.7567	1.8041	1.9365	1.8635
0.750	0.198	9.374	0.000	0.000	1.7374	1.8011	1.9307	1.8562
1.000	0.197	8.540	0.000	0.000	1.7349	1.8048	1.9380	1.8535
1.500	0.100	6.790	0.000	0.000	1.7303	1.7894	1.9262	1.8656
2.000	0.022	5.015	0.000	0.000	1.7325	1.7815	1.9444	1.8641
3.000	0.000	1.993	0.000	0.000	1.7178	1.7584	1.9364	1.8919

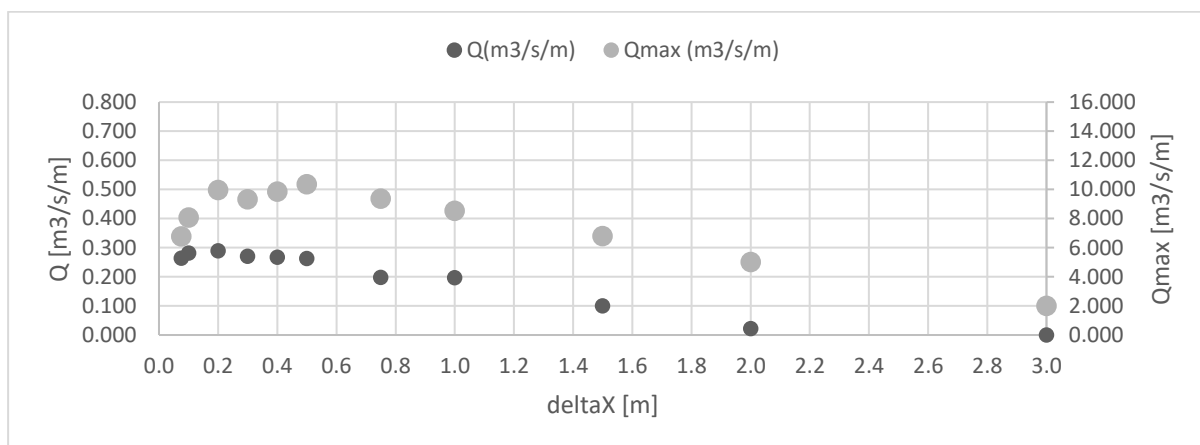


Figura 3.12 - Caudais Pé do Talude, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39683).

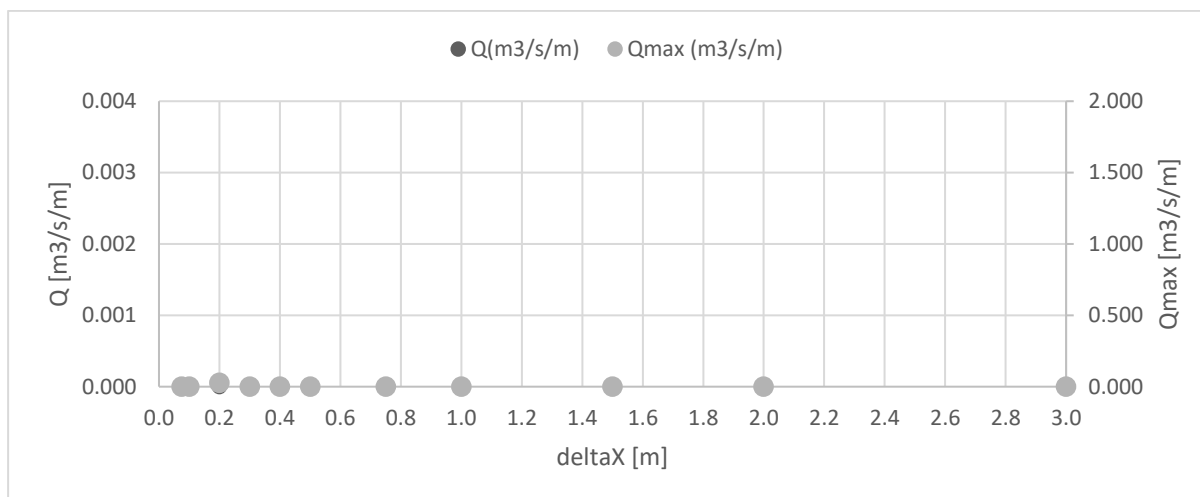


Figura 3.13 - Caudais Meio do Talude, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39683).

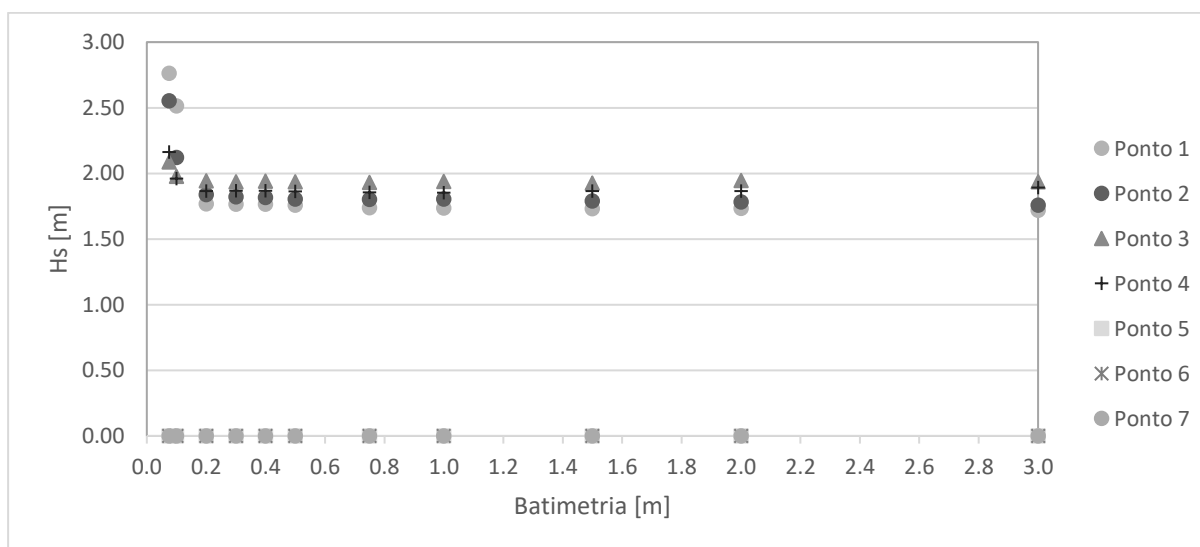


Figura 3.14 - Caudais Meio do Talude, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39683).

Apresentam-se de seguida os resultados obtidos para o caso 39684 nas tabelas e figuras subsequentes.

Tabela 3.6 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39684, obtido pelas diferentes dimensões da malha em estudo (Tabela completa Anexo B3).

Caso 39684		
deltaX [m]	Runup Máximo [m]	Runtime [h]
0.075	4.060	11.57
0.100	4.485	7.10
0.200	4.884	2.13
0.300	4.854	1.10
0.400	4.874	0.63
0.500	4.647	0.45
0.750	4.733	0.28
1.000	4.359	0.25
1.500	4.189	0.15
2.000	4.125	0.10
3.000	3.770	0.07

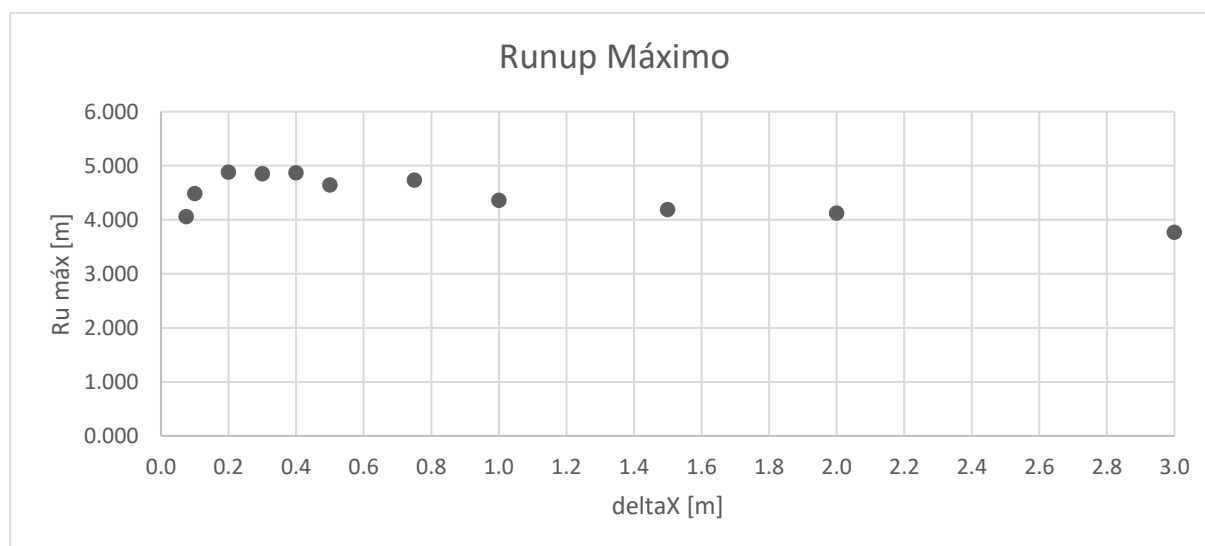


Figura 3.15 - Runup máximo, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39684).

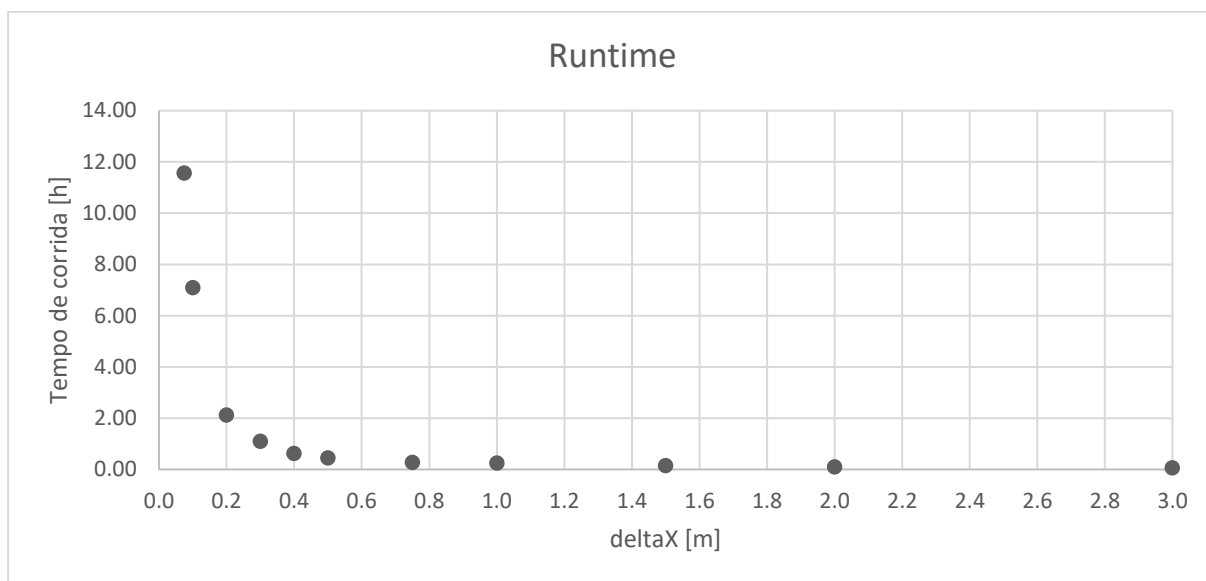


Figura 3.16 - Runtime (tempo de corrida da simulação), para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39684).

Tabela 3.7 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39684, obtido pelas diferentes dimensões da malha em estudo (Tabela completa Anexo B3).

deltaX [m]	Ponto 5		Ponto 6		Hs [m]			
	Q [m³/s/m]	Qmax [m³/s/m]	Q [m³/s/m]	Qmax [m³/s/m]	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0.075	0.351	9.685	0.000	0.416	2.9076	2.8076	2.4810	2.4701
0.100	0.377	10.846	0.000	1.309	3.0205	2.7740	2.5367	2.5853
0.200	0.402	11.854	0.000	2.387	2.4301	2.3284	2.5185	2.4320
0.300	0.398	11.981	0.000	2.554	2.2747	2.2951	2.5125	2.3831
0.400	0.389	11.840	0.000	2.111	2.2710	2.2792	2.5131	2.3753
0.500	0.379	12.057	0.000	1.495	2.2666	2.2754	2.5073	2.3818
0.750	0.316	11.249	0.000	1.390	2.2609	2.2554	2.5113	2.3756
1.000	0.300	11.379	0.000	0.991	2.2472	2.2390	2.5003	2.3683
1.500	0.187	11.870	0.000	0.000	2.2261	2.2405	2.5016	2.3831
2.000	0.081	8.890	0.000	0.000	2.2056	2.2249	2.4940	2.3559
3.000	0.005	7.070	0.000	0.000	2.2444	2.2523	2.5371	2.4396

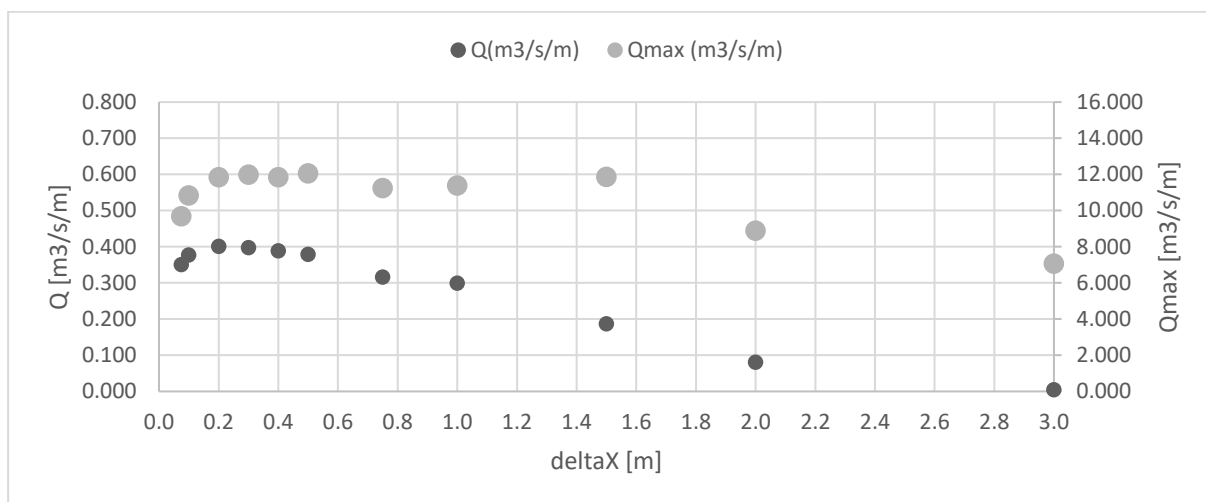


Figura 3.17 - Caudais Pé do Talude, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39684).

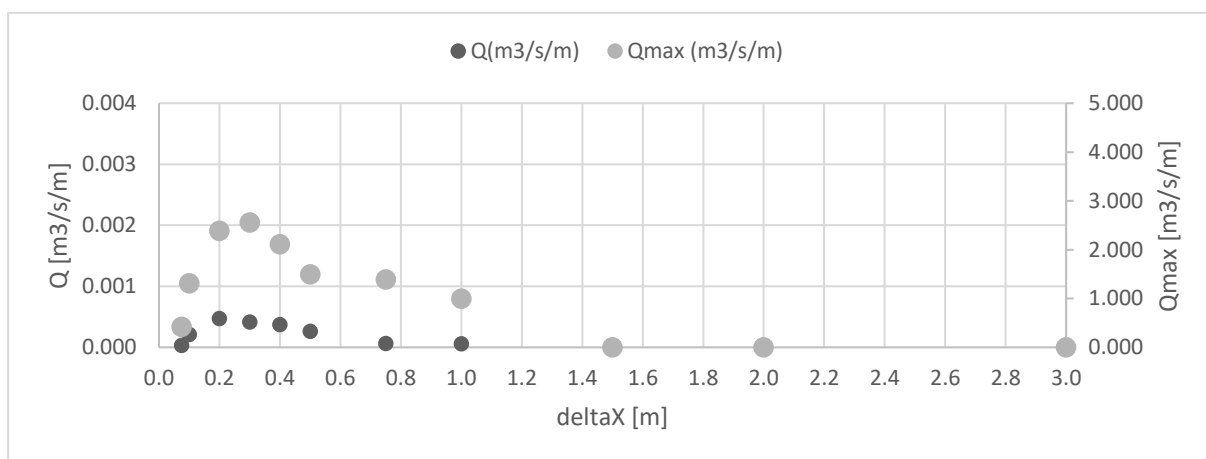


Figura 3.18 - Caudais Meio do Talude, para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39684).

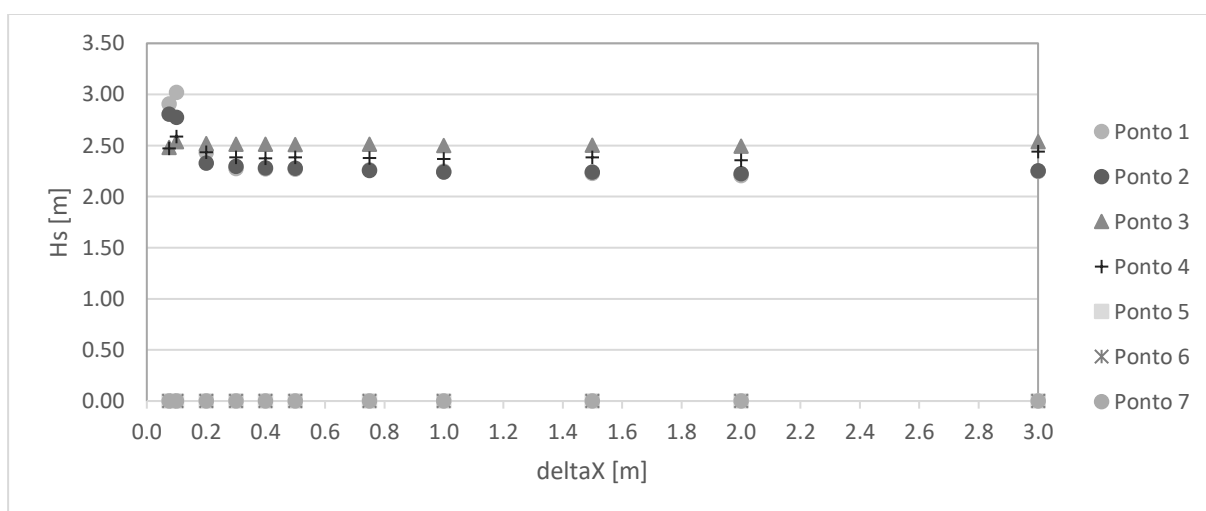


Figura 3.19 - Altura Significativa de Ondas, nos diferentes pontos de estudo para as diferentes dimensões da malha em análise (Caso 39684).

Como se pode observar dos resultados obtidos, também para estes casos a malha com um espaçamento igual a 0,200 metros é a que apresenta um melhor compromisso entre precisão e tempo de simulação.

A análise de sensibilidade realizada à influência do espaçamento da malha a utilizar no modelo numérico é extremamente importante para a escolha do valor mais adequado, pois esta dimensão deve ser escolhida de forma a evitar problemas de instabilidade numérica e a garantir a precisão dos resultados obtidos pelo modelo.

3.4.2 Coeficiente de atrito de Manning

Na análise de sensibilidade realizada ao modelo numérico, o segundo parâmetro estudado foi o coeficiente de atrito de Manning. Este coeficiente representa a resistência ao escoamento de um fluido em contacto com uma superfície sólida, como o fundo ou uma estrutura de defesa costeira.

A variação do coeficiente de atrito de Manning pode ter um impacto considerável no comportamento e intensidade dos fenómenos hidrodinâmicos que estão a ser simulados. Denota-se, por isso, a importância de seleccionar os valores mais corretos para o coeficiente de atrito de Manning ao longo da extensão em estudo.

Para a análise de sensibilidade ao coeficiente de atrito de Manning, simularam-se 850 ondas com as características de agitação e nível de mar do caso 39685, para uma malha com um espaçamento de 0,200 metros. O valor do coeficiente de atrito de Manning foi definido como igual a $0,019 \text{ s}/(\text{m}^{1/3})$ ao longo de todo o domínio, exceto para a zona da estrutura de defesa aderente, onde foram adotados os seguintes valores: $0,04 \text{ s}/(\text{m}^{1/3})$, $0,05 \text{ s}/(\text{m}^{1/3})$, $0,06 \text{ s}/(\text{m}^{1/3})$ e $0,07 \text{ s}/(\text{m}^{1/3})$. Estes valores são os valores recomendados por Altomare, para este tipo de estruturas.

Os resultados obtidos foram comparados de forma a analisar a influência da variação do coeficiente de atrito de Manning no galgamento, já que não se dispõe de dados de campo que permitam avaliar o valor a utilizar.

Nas seguintes tabelas e gráficos, apresentam-se os resultados obtidos na análise de sensibilidade para o coeficiente de atrito de Manning.

Tabela 3.8 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39685, obtido pelos diferentes coeficientes de Manning em estudo (Tabela completa Anexo B4).

Caso 39685		
Manning [m]	Runup Máximo [m]	Runtime [h]
0.040	5.149	10.98
0.050	5.045	11.02
0.060	5.046	10.98
0.070	5.042	10.98

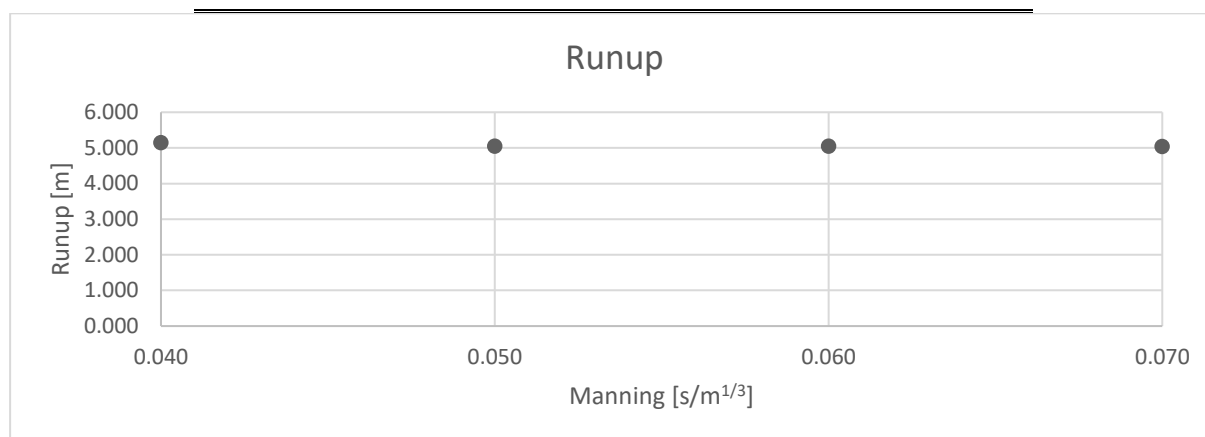


Figura 3.20 - Runup máximo, para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).

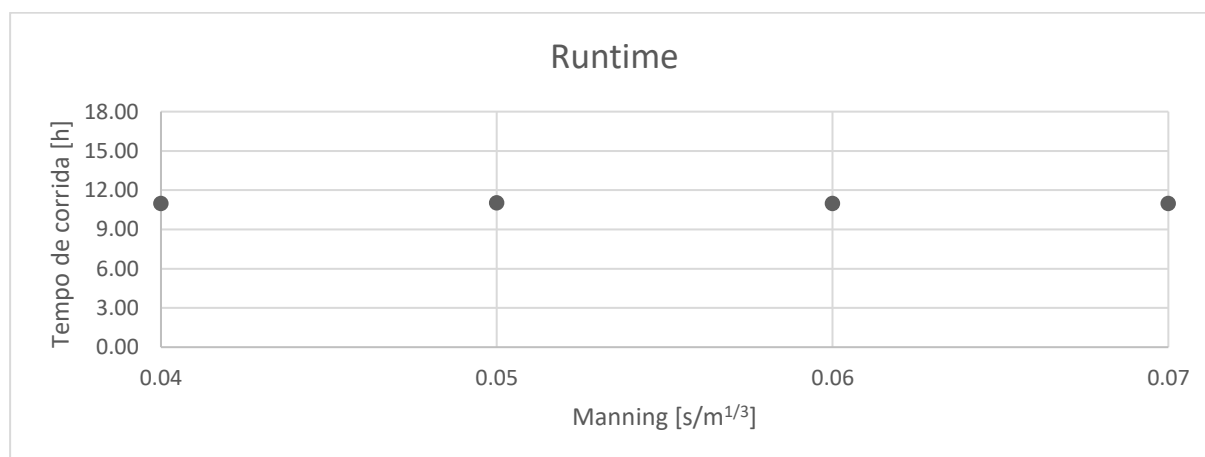


Figura 3.21 - Runtime (tempo de corrida da simulação), para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).

Tabela 3.9 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39685, para os diferentes coeficientes de Manning (Tabela completa Anexo B4).

Manning [m]	Ponto 5		Ponto 6		Hs [m]			
	Q [m ³ /s/m]	Qmax [m ³ /s/m]	Q [m ³ /s/m]	Qmax [m ³ /s/m]	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0.040	0.4467	12.8402	0.0011	3.1842	3.108	3.153	3.035	2.956
0.050	0.4612	11.9273	0.0012	2.5360	2.699	2.724	2.965	2.827
0.060	0.4562	13.5348	0.0011	2.8236	3.081	2.986	3.021	2.903
0.070	0.4603	12.1730	0.0012	3.3206	2.688	2.704	2.975	2.828

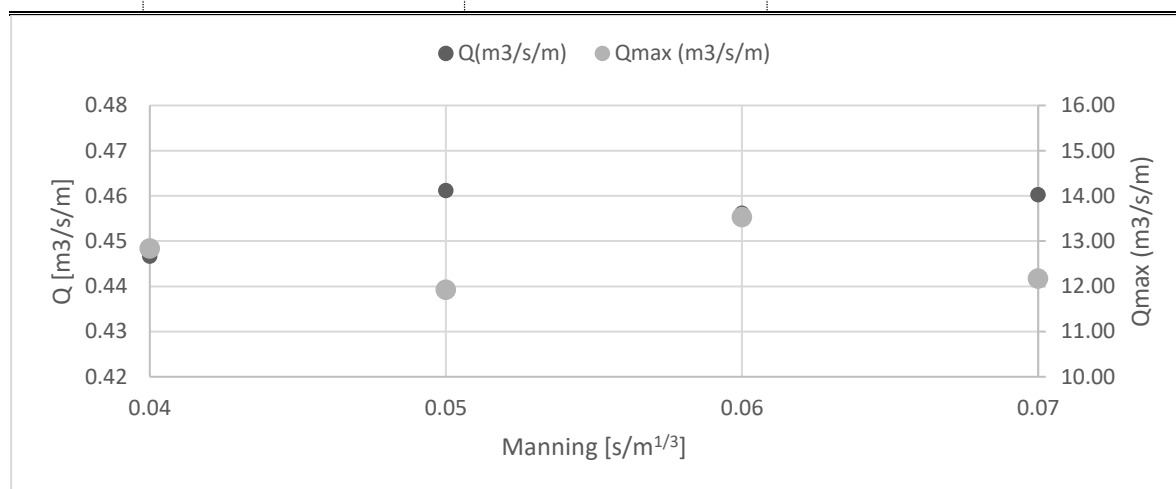


Figura 3.22 - Caudais Pé do Talude, para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).

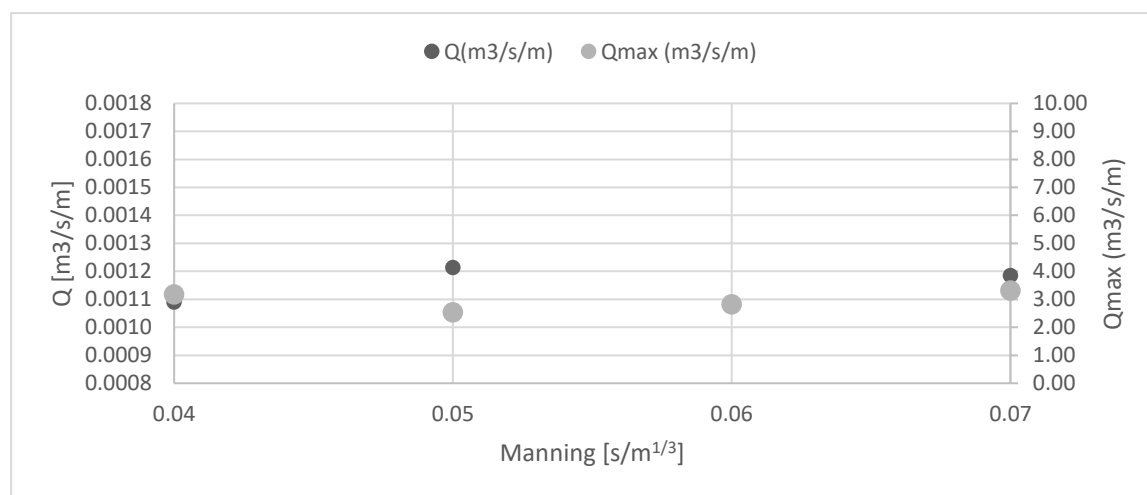


Figura 3.23 - Caudais Meio do Talude, para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).

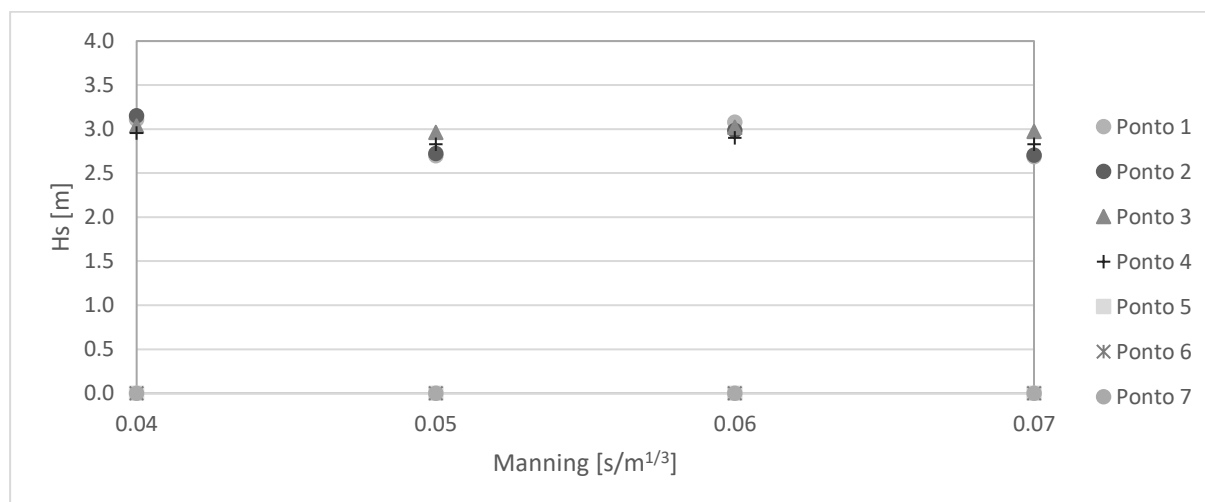


Figura 3.24 - Altura Significativa de Onda, para os diferentes coeficientes de Manning em análise (Caso 39685).

Da análise dos resultados, constatou-se que o tempo necessário para efetuar as simulações não varia significativamente entre os diferentes valores do coeficiente de atrito utilizados. Podemos assumir assim que o fator tempo, nesta situação, não é um elemento determinante na escolha do coeficiente.

No que diz respeito ao valor de runup máximo resultante das simulações, o valor mais discrepante em relação aos demais, foi o coeficiente de Manning igual a 0,04 s/(m^{1/3}), os restantes são em todo semelhantes, pelo que o valor mencionado foi descartado.

Após uma análise mais cuidadosa dos dados, os coeficientes de Manning 0,05 s/(m^{1/3}) e 0,06 s/(m^{1/3}), produziram resultados consistentes e dentro das expectativas. A decisão final fica, portanto, ao critério de cada um, mas após pesquisa académica da literatura especializada, o valor escolhido recai sobre o valor de coeficiente de Manning igual a 0,05 s/(m^{1/3}). Esta escolha visa garantir que os resultados sejam sólidos e estejam em conformidade com os padrões estabelecidos na literatura científica.

3.4.3 Número de Ondas

Para concluir o subcapítulo da análise de sensibilidade, foram realizadas simulações com uma malha de espaçamento de 0,200 metros e diferentes valores do coeficiente de atrito de Manning: 0,04 s/(m^{1/3}), 0,05 s/(m^{1/3}), 0,06 s/(m^{1/3}) e 0,07 s/(m^{1/3}). No estudo anterior, foi selecionado o coeficiente de atrito de Manning com o valor de 0,05 s/(m^{1/3}) para as simulações. No entanto, nesta fase, a fim de determinar a quantidade ótima de ondas para obter resultados satisfatórios nas simulações, minimizando ao máximo o tempo de cálculo, procedeu-se à simulação para os quatro valores de coeficiente estudados anteriormente. Esta abordagem visa

proporcionar uma avaliação mais precisa para identificar qual dos valores se revela mais adequado para uso posterior na pesquisa.

Foram testadas as seguintes quantidades de ondas: 500, 750, 850, 1000, 1500 e 2000. Seguindo a recomendação do manual do modelo SWASH (the SWASH team, versão 7.01), os primeiros 15% das ondas simuladas não foram considerados, uma vez que as condições marítimas ainda não estão estabilizadas. Portanto, para cada quantidade de ondas mencionada anteriormente, foram consideradas de facto $[quantidade\ de\ ondas] + [15\% da\ quantidade\ de\ ondas]$ (por exemplo, para o caso de 1000 ondas, foram simuladas: $1000 + 150 = 1150$ ondas).

No modelo numérico SWASH, durante a configuração da simulação, não é possível definir explicitamente o número exato de ondas a serem simuladas. Em vez disso, é necessário calcular o tempo necessário para simular um determinado número de ondas, com base no período de onda selecionado para a simulação. Para o exemplo de 1000 ondas, é necessário calcular quanto tempo demora a serem simuladas 150 ondas (15% de 1000 ondas) e 1150 ondas (115% de 1000 ondas), de forma a saber o tempo inicial e final do estudo, após o início da simulação. Para o caso em que o período é 14.88s, temos os seguintes tempos de simulação:

$$Tempo\ Inicial\ (1000\ Ondas) = Período \times 15\% \text{ ondas} = 00:37:12$$

$$Tempo\ Final\ (1000\ Ondas) = Período \times 115\% \text{ ondas} = 04:45:12$$

Tal como ilustrado na Figura 3.1, nas linhas de código referentes à simulação, define-se o momento de início para a escrita dos valores obtidos na simulação, o qual foi, neste exemplo, '003712.000', conforme indicado na linha 27. Além disso, na linha 31, especifica-se a duração total da simulação, a qual foi estabelecida como '044512.000'

Conforme observado nos resultados, abaixo de 1000 ondas, estes apresentaram-se instáveis, sem nenhum padrão consistente. No entanto, a partir de 1000 ondas, os resultados começaram a estabilizar. Levando em consideração a importância do tempo de simulação, optou-se por utilizar 1000 ondas como ponto de partida para as simulações finais, devido à diferença substancial no tempo de execução em relação a um número maior de ondas, resultando em pouca ou nenhuma melhoria nos resultados obtidos.

Nas seguintes tabelas e gráficos, apresentam-se os resultados obtidos na análise de sensibilidade para o número de ondas a utilizar, para o coeficiente de atrito de Manning com o valor de $0,05\ s/(m^{1/3})$.

Tabela 3.10 - Valores de Runup Máximo e Runtime (tempo de simulação) para o Caso 39685, obtido pelos diferentes números de ondas em estudo (Tabela completa Anexo B5).

Caso 39685		
Nº de Ondas	Runup Máximo [m]	Runtime [h]
1500	5.568	16.43
1250	5.375	11.32
1000	5.480	8.83
850	5.045	8.02
750	5.570	6.43
500	5.188	5.63

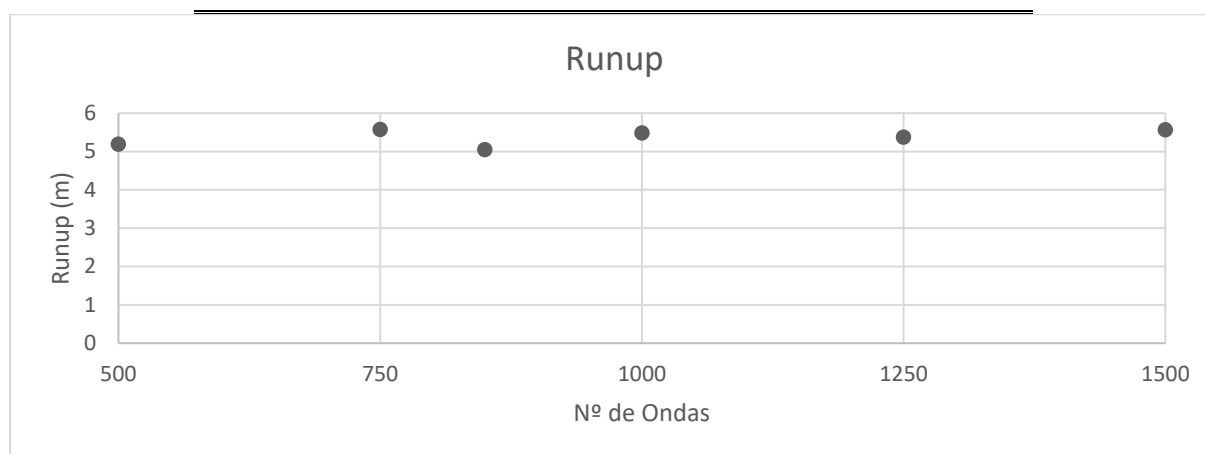


Figura 3.25 - Runup máximo, para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).

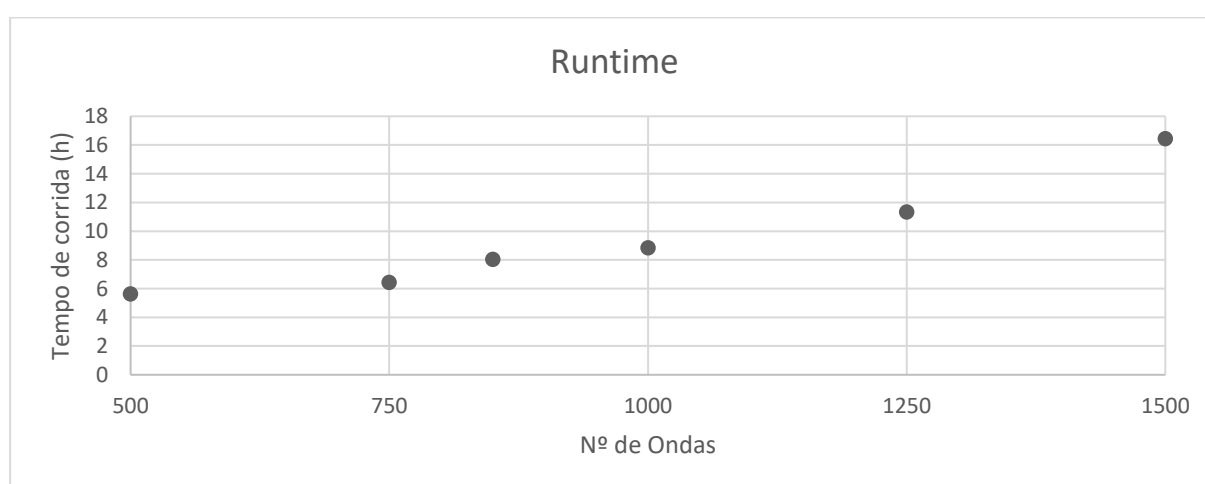


Figura 3.26 - Runtime (tempo de corrida da simulação) para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).

Tabela 3.11 - Valores de Caudais (Q e Qmax) e Altura Significativa de Onda (Hs) para o Caso 39685, para os diferentes números de ondas em análise (Tabela completa Anexo B5).

Nº de Ondas	Ponto 5		Ponto 6		Hs [m]			
	Q [m³/s/m]	Qmax [m³/s/m]	Q [m³/s/m]	Qmax [m³/s/m]	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
1500	0.445	14.945	0.001	4.137	3.1169	3.2267	3.0525	3.0587
1250	0.462	15.040	0.001	3.373	2.7698	2.8003	2.9887	2.8422
1000	0.466	13.905	0.002	4.422	2.7323	2.7389	3.0410	2.8747
850	0.461	11.927	0.001	2.536	2.6993	2.7237	2.9646	2.8274
750	0.467	12.609	0.001	6.065	2.7167	2.7217	2.9892	2.8292
500	0.450	13.071	0.001	3.306	3.0812	2.9470	2.9217	2.8842

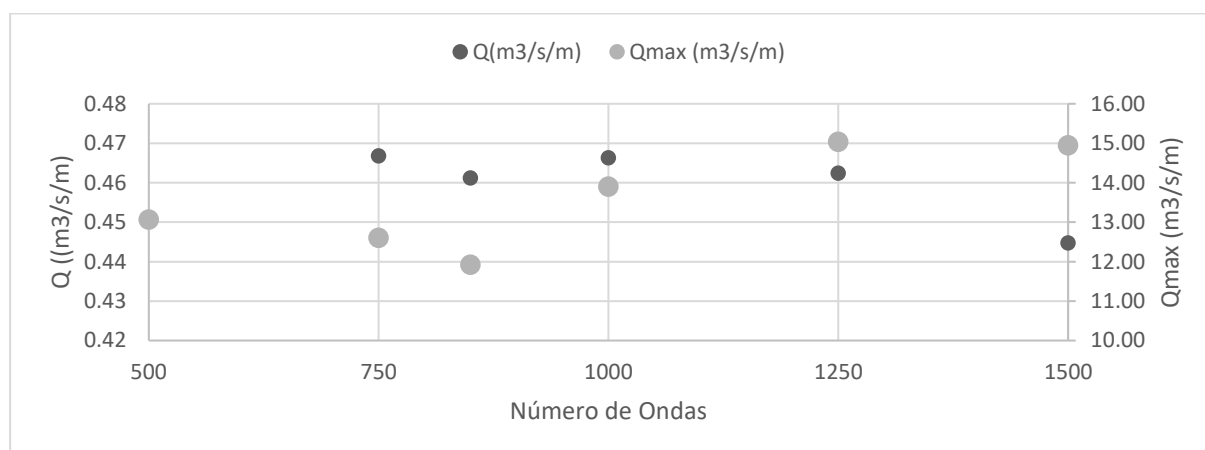


Figura 3.27 - Caudais Pé do Talude, para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).

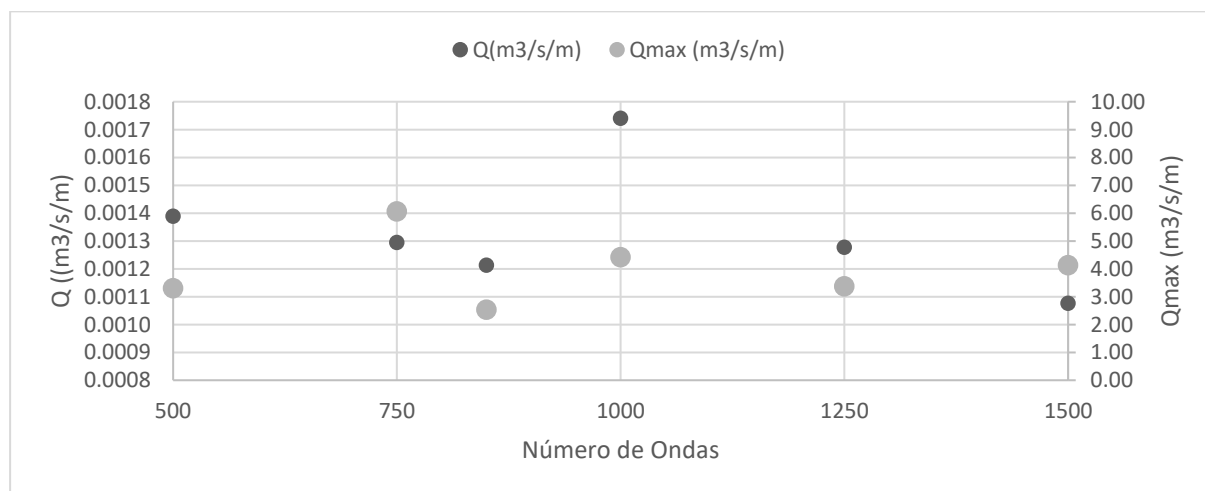


Figura 3.28 - Caudais Meio do Talude, para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).

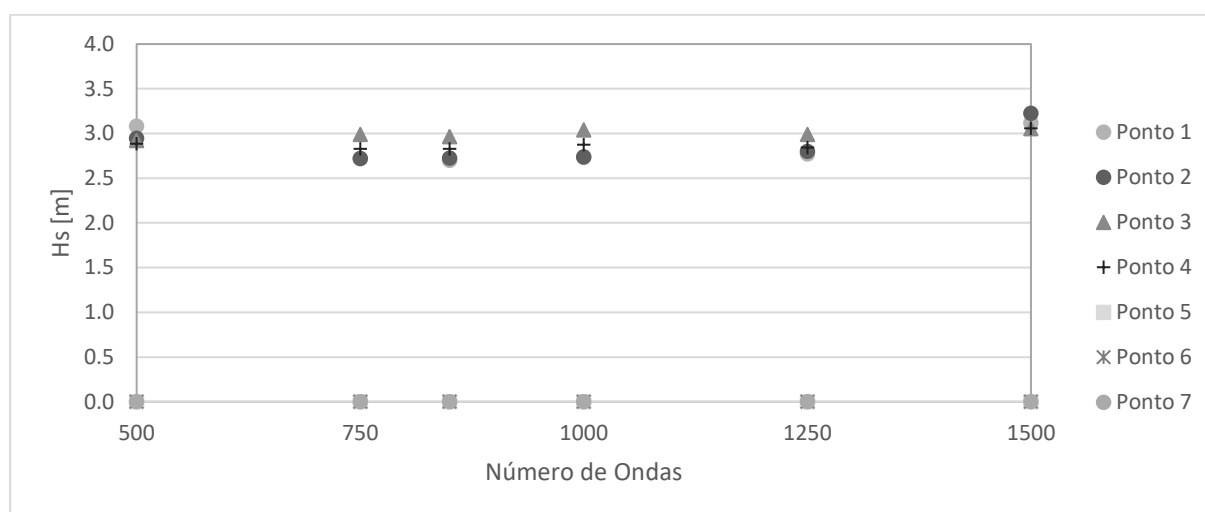


Figura 3.29 - Altura Significativa de Onda, para os diferentes números de ondas em análise (Caso 39685).

Em anexo (Anexo B6 a B8) apresentam-se os resultados obtidos na análise de sensibilidade para os restantes valores para o coeficiente de atrito de Manning com os valores de 0,04 s/(m^{1/3}), 0,06 s/(m^{1/3}) e 0,07 s/(m^{1/3}), tendo sido feita a análise para 500 ondas, 750 ondas, 850 ondas, 1000 ondas, 1250 ondas e 1500 ondas.

3.5 Aplicação do Modelo a eventos de temporal

3.5.1 Condições de agitação e nível de água

Para o cumprimento do objetivo desta dissertação, que consiste na avaliação do desempenho de uma estrutura de defesa costeira perante eventos de agitação marítima, foram selecionados sete eventos de temporal. Esses eventos representam condições extremas de agitação marítima e nível de água na zona em estudo, e deram origem aos maiores valores de caudal médio galgado através das fórmulas apresentadas em 2.3.2 (Rosa, 2021).

Os dados de agitação (altura significativa de onda e período de pico) e nível de mar desses temporais são provenientes de um ponto localizado na batimétrica -12 m (ZH) (coordenadas 40°34'03.2"N, 8°47'45.9"W), com base na transferência de dados de 1979 a 2018, do modelo de previsão WAM, do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo, ECMWF (Fortes *et al.*, 2020). Os dados de agitação foram obtidos de 6 em 6 horas, totalizando 58.076 casos.

As características dos eventos de temporal utilizados para este estudo são apresentadas da Tabela 3.12 à Tabela 3.18. Estes eventos incluem, além das condições de agitação para as quais se estimou com alguma das fórmulas apresentadas no *Subcapítulo 2.2.2* o maior caudal

médio de galgamento, também as condições de agitação imediatamente anteriores e posteriores a esta. A título de exemplo, quando é referenciado o evento 174, Tabela 3.12, simularam-se os casos 171 (18 horas antes), 172 (12 horas antes), 173 (6 horas antes), 174 (nome do evento), 175 (6 horas depois), 176 (12 horas depois) e 177 (18 horas depois). Os casos para os quais foram obtidos os maiores valores com as fórmulas empíricas são assinalados a cinzento da Tabela 3.12 à Tabela 3.18.

Tabela 3.12 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 174

Evento 174			
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Nmar (m)
171	5.08	13.41	3.18
172	6.30	14.88	3.27
173	6.64	18.31	3.36
174	6.90	18.31	3.01
175	6.58	18.31	3.14
176	6.35	16.50	3.00
177	5.27	14.88	3.31

Tabela 3.13 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 27993

Evento 27993			
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Nmar (m)
27990	0.88	10.89	3.28
27991	1.16	10.89	3.35
27992	1.93	16.50	3.41
27993	2.71	18.31	3.62
27994	2.88	16.50	3.05
27995	3.20	16.50	3.42
27996	3.23	16.50	3.03

Tabela 3.14 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 39685

Evento 39685			
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Nmar (m)
39682	1.60	13.41	3.47
39683	1.68	13.41	3.46
39684	2.14	14.88	3.70
39685	2.61	14.88	3.79
39686	2.78	14.88	3.25
39687	2.72	14.88	3.54
39688	2.50	13.41	3.32

Tabela 3.15 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 46953

Evento 46953			
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Nmar (m)
46950	2.26	12.09	3.37
46951	2.84	14.88	3.51
46952	3.48	16.50	3.47
46953	3.74	16.50	3.72
46954	3.50	14.88	2.99
46955	3.46	14.88	3.41
46956	3.54	14.88	2.91

Tabela 3.16 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 48485

Evento 48485			
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Nmar (m)
48482	2.49	16.50	3.25
48483	3.23	16.50	3.25
48484	4.09	18.31	3.45
48485	4.40	18.31	3.44
48486	4.20	18.31	3.24
48487	4.13	18.31	3.33
48488	3.33	16.50	3.26

Tabela 3.17 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 51265

Evento 51265			
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Nmar (m)
51262	3.76	12.09	3.21
51263	5.51	14.88	3.47
51264	6.26	16.50	3.19
51265	6.17	18.31	3.62
51266	6.54	18.31	2.63
51267	5.81	18.31	3.38
51268	5.18	16.50	2.63

Tabela 3.18 - Condições de agitação marítima e de nível do mar referentes ao evento 51269

Evento 51269			
Caso	Hs (m)	Tp (s)	Nmar (m)
51266	6.54	18.31	2.63
51267	5.81	18.31	3.38
51268	5.18	16.50	2.63
51269	4.67	16.50	3.65
51270	4.32	14.88	2.20
51271	4.42	12.09	3.31
51272	4.18	12.09	2.07

RESULTADOS OBTIDOS COM O MODELO SWASH PARA EVENTOS DE TEMPORAL

4.1 Eventos simulados

Para as simulações efetuadas com o modelo SWASH, selecionaram-se os eventos de galgamento mencionados no capítulo 3: 174, 27993, 39685, 46953, 48485, 51265 e 51269 (eventos para os quais foram estimados os maiores valores de caudais através das fórmulas calculadas em Rosa, 2021).

Com o intuito de entender a evolução do caudal de galgamento e as características locais da agitação antes e depois do momento para o qual foram obtidos os valores máximos de caudal por Rosa (2021), foram analisados os três instantes anteriores e posteriores ao caso em que o galgamento máximo foi estimado, totalizando, para cada evento, sete casos para análise.

4.2 Domínio computacional e parametrização

O domínio computacional considerado para as simulações com o modelo SWASH está apresentado na Figura 3.4. Os resultados do modelo foram extraídos em oito pontos do domínio computacional, para cada TSEC (Figura 4.1 e Figura 4.2). Os pontos escolhidos foram os seguintes: 400 m e 800 m (anteriores ao pé da barra) para analisar o desenvolvimento da ondulação com um declive constante, 1000 m (topo da barra) e 1200 m (zona da fossa), 1489 m (pé do talude da estrutura), 1495 m (meio do talude da estrutura), 1501 m (início do coroamento da estrutura) e 1510 m (fim do coroamento da estrutura). As seguintes figuras detalham os pontos escolhidos do domínio computacional:

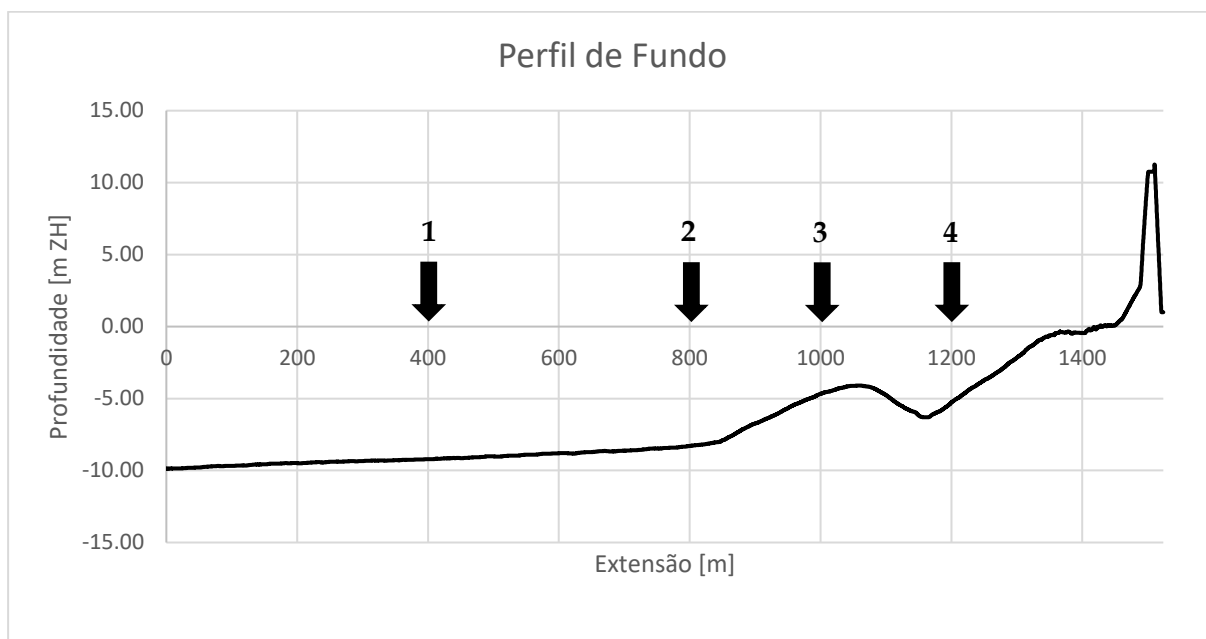


Figura 4.1 - Perfil de Fundo zona em estudo (Programa COSMO, 2018), com os pontos utilizados para a extração de resultados do modelo SWASH na zona anterior à estrutura de defesa.

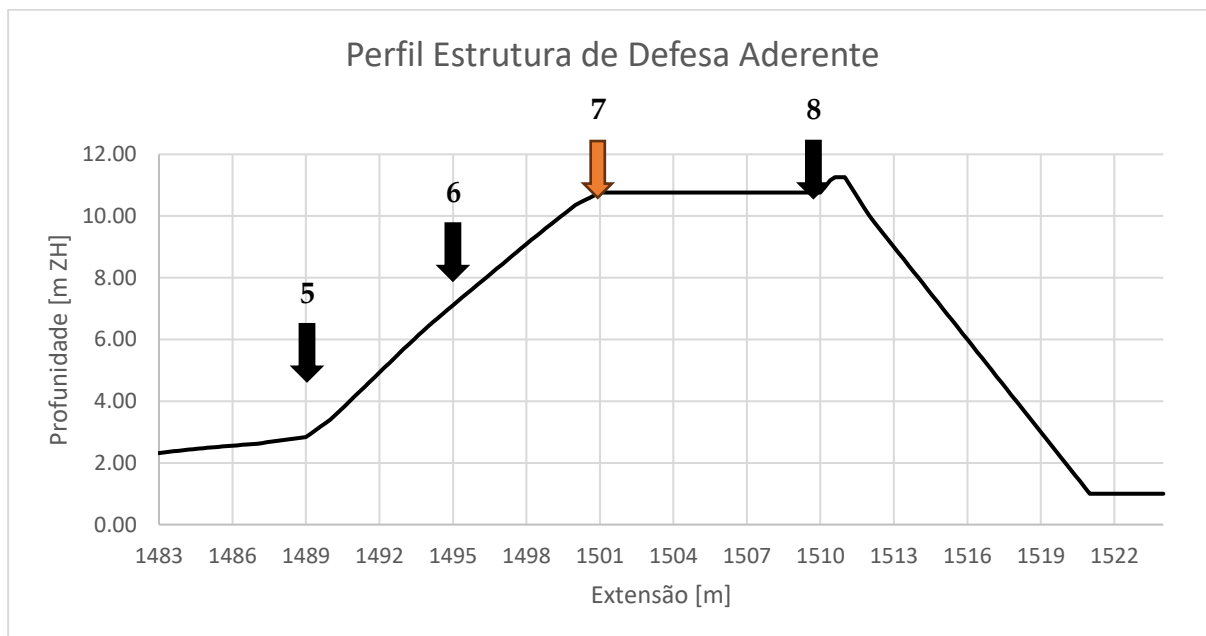


Figura 4.2 - Perfil Transversal da estrutura de defesa aderente da zona em estudo (Programa COSMO, 2018), com os pontos utilizados para a extração de resultados do modelo SWASH (seta cor-de-laranja corresponde ao ponto de cálculo do galgamento, ponto 7) na estrutura de defesa.

Os parâmetros (espaçamento da malha e coeficiente de atrito de Manning) e o número de ondas utilizados nestas simulações com o modelo SWASH, corresponderam aos selecionados após a análise de sensibilidade (capítulo 3): espaçamento da malha com 0,200 metros, coeficiente de atrito de Manning de 0,05 s/(m^{1/3}) na estrutura e de 0,019 s/(m^{1/3}) ao longo da restante extensão em estudo, para a simulação de 1000 ondas.

Os restantes parâmetros considerados nas simulações foram os especificados no Capítulo 3 (Figura 3.1).

4.3 Metodologia adotada para o tratamento de resultados do modelo SWASH

Os resultados das simulações com o modelo SWASH consistem num ficheiro com "dados em bruto", denominado "*output_batimetria.tbl*". Na linha 27 da Figura 4.3 apresenta-se a especificação das características desse ficheiro nos dados de entrada do modelo SWASH.

```
(...)  
27| TABLE 'Valores1' HEAD 'output_batimetria.tbl' TSEC BOTL HSIG DISCH  
WATL OUTPUT 003712.000 0.1 SEC  
(...)
```

Figura 4.3 - Parte do código escrito no ficheiro de entrada do modelo SWASH, de forma a obter um ficheiro com os valores de TSEC, BOTL, HSIG, DISCH, WATL

Esse ficheiro contém uma tabela de resultados, onde estão discriminados os parâmetros BOTL (profundidade da água, em m), HSIG (altura significativa das ondas, em m), DISCH (descarga por unidade de largura, ou caudal de galgamento, em m²/s), WATL (elevação da superfície em relação ao nível de repouso, em m), alinhados no tempo com o parâmetro TSEC (tempo em segundos em relação a um tempo de referência).

Foi utilizado o programa Matlab para a leitura e o processamento dos resultados das simulações. O Matlab oferece uma ampla gama de funções e recursos que permitem a análise e a manipulação eficiente de dados. O Matlab oferece ainda recursos avançados para a visualização e a criação de gráficos, assim como para a realização de cálculos complexos, que, neste caso, permitiram a realização de análises mais avançadas aos resultados obtidos.

A utilização do Matlab focou-se no cálculo das várias métricas relacionadas com o galgamento e pode ser descrito em 4 fases:

- **Definição de Variáveis:** foram definidas as variáveis necessárias ao processamento dos cálculos, tais como o número de sondas, o período de onda, o ponto inicial para a análise, e uma matriz que contém a batimetria da área em análise;
- **Ciclo de Cálculos:** criou-se um ciclo que percorre cada ponto da batimetria na matriz e realiza os cálculos específicos nesse ponto. Estes cálculos permitem determinar o caudal médio galgado e a altura significativa de onda em cada ponto;
- **Escrita de Resultados:** os resultados dos cálculos são escritos num ficheiro de texto. Este ficheiro contém as métricas calculadas para os pontos selecionados;
- **Criação de Gráficos:** para além dos resultados obtidos e escritos, utilizou-se também o Matlab para gerar gráficos com a elevação da superfície livre no pé do talude, a elevação da superfície livre no topo da estrutura, o caudal instantâneo e a POW (Percentage of Overtopping Waves). Os gráficos são úteis para a compreensão do comportamento das ondas e da sua interação com a estrutura costeira.

Foi gerado um ficheiro em formato de matriz com o Matlab, contendo informações sobre a batimetria e a altura significativa de onda para cada ponto do domínio de cálculo. Este ficheiro, em formato *.mat*, foi posteriormente utilizado em conjunto com a linguagem de programação Python para a leitura e interpretação dos resultados obtidos no Matlab.

O código em Python carrega o ficheiro em formato *.mat* (que contém as informações em forma de matriz) e calcula a altura significativa de onda e o espraçamento para cada segundo da simulação. O ficheiro de saída do código Python contém as informações detalhadas sobre a ocorrência e valor do espraçamento máximo ao longo do tempo de simulação. Com o código Python foram ainda geradas figuras que são fundamentais para a visualização e compreensão dos resultados obtidos (Figura 4.4 a Figura 4.9). Estas figuras permitem uma análise mais aprofundada dos padrões do espraçamento e fornecem uma representação gráfica do instante exato em que ocorre o espraçamento máximo na simulação realizada.

De seguida, apresenta-se um exemplo dos gráficos obtidos em Python, para um caso no qual não ocorreu galgamento:

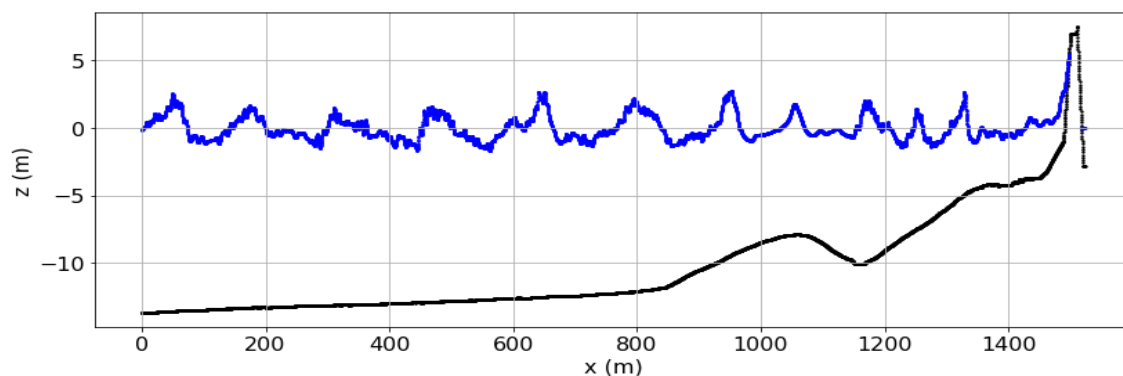


Figura 4.4 - Caso 39685 - Sem galgamento. Gráfico obtido em Python, no momento do espraio máximo, com a extensão completa da área em estudo.

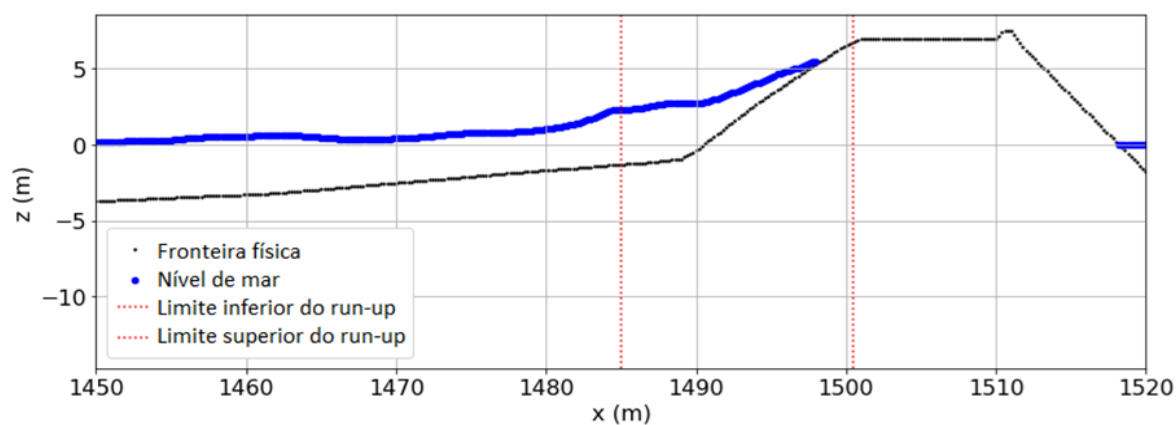


Figura 4.5 - Caso 39685 - Sem galgamento. Gráfico obtido em Python, no momento do espraio máximo, na zona da estrutura de defesa costeira.

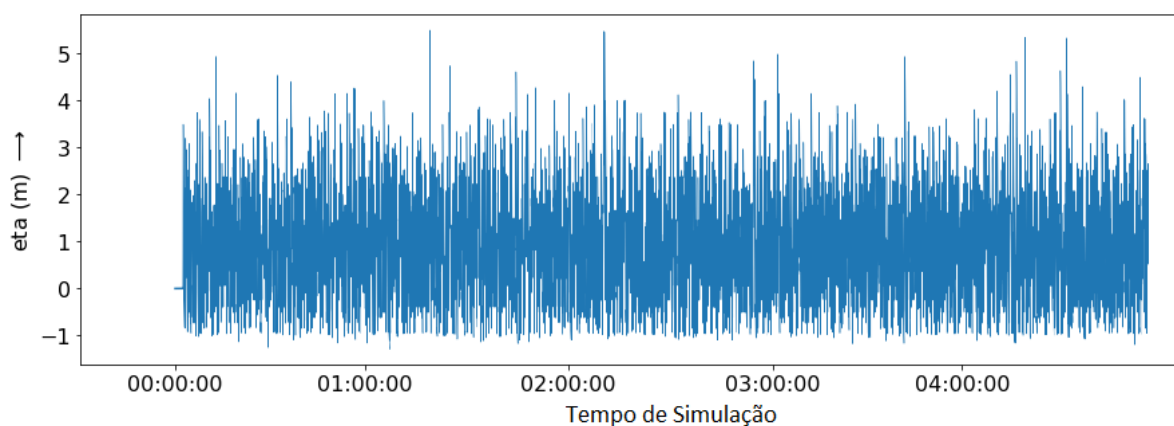


Figura 4.6 - Caso 39685 - Sem galgamento. Gráfico obtido em Python com a variação da frente do espraio ao longo do tempo de simulação.

Na Figura 4.6, é possível visualizar a evolução da frente de espraçamento. Através desta representação gráfica, podemos notar uma oscilação constante na altura da área molhada ao longo do período de simulação. É importante ressaltar que, neste cenário, não se registou qualquer ocorrência de galgamento.

Por outro lado, na Figura 4.9, observamos o cenário oposto, onde não se verifica variação na área molhada. A ausência de flutuações indica, sem informações adicionais, a presença de galgamento na estrutura em questão. Com base nos dados obtidos, é possível confirmar a ocorrência de galgamento no topo da referida estrutura de proteção.

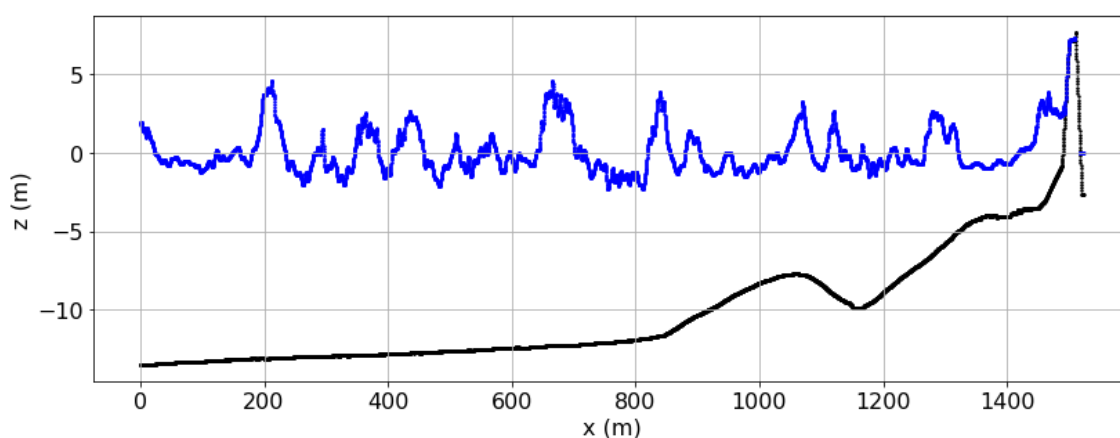


Figura 4.7 - Caso 51265 - Com galgamento. Gráfico obtido em Python, no momento do espraçamento máximo, com a extensão completa da área em estudo.

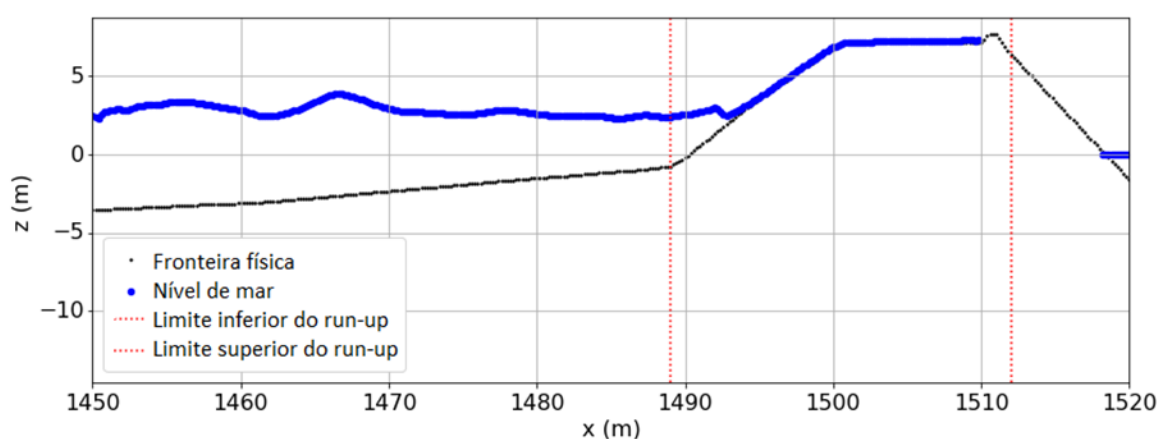


Figura 4.8 - Caso 51265 - Com galgamento. Gráfico obtido em Python, no momento do espraçamento máximo, na zona da estrutura de defesa costeira.

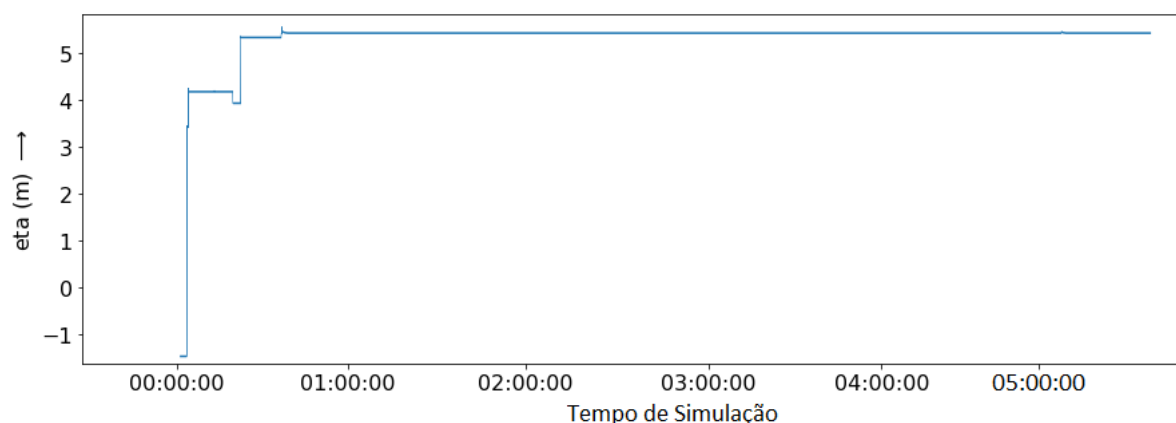


Figura 4.9 - Caso 51265 - Com galgamento. Variação da frente de espraçamento ao longo do tempo de simulação.

O Matlab foi posteriormente utilizado para concluir a análise do espraçamento máximo, permitindo assim uma abordagem mais aprofundada e precisa na caracterização do fenómeno em estudo. Os dados utilizados nesta análise final são a altura significativa de onda (obtida nas simulações realizadas com o SWASH) e os dados do espraçamento calculado anteriormente com o código Python. O código Matlab utiliza ainda as variáveis “intervalo de tempo entre as amostras” (deltat) e “período de pico da onda” (tpeak). É efetuado o tratamento dos valores nulos e são calculados os valores de espraçamento que são excedidos por apenas 2% e 1% das ondas.

4.4 Resultados do modelo SWASH

Foram efetuadas simulações com o modelo SWASH para os eventos referidos em 4.1: 174, 27993, 39685, 46953, 48485, 51265 e 51269. Das simulações efetuadas, apenas os eventos 46953 e 51265 conduziram a galgamento. As condições de agitação associadas são recordadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Eventos onde ocorreu galgamento da estrutura de defesa, com a utilização do modelo SWASH.

Evento	Caso	Hs (m)	Tp (s)	Nmar (m)
46953	46953	3.74	16.50	3.72
51265	51265	6.17	18.31	3.62
	51267	5.81	18.31	3.38

Para cada simulação em que ocorreu galgamento, foram obtidos o valor de caudal médio de galgamento, Q , o valor de caudal máximo de galgamento, $Q_{\max}$, assim como o valor de runup excedido por 2% das ondas, $RU_{2\%}$ (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Resultados de caudal médio de galgamento (Q), caudal máximo de galgamento ($Q_{\max}$) e $RU_{2\%}$ obtidos com o modelo SWASH (ver tabela completa no Anexo D1).

Evento	Caso	Q (l/s/m)	$Q_{\max}$ (l/s/m)	$RU_{2\%}$ (m)
46953	46953	0.0002	8.3073	5.31
51265	51265	0.0122	468.2087	5.43
	51267	0.0016	89.6847	5.07

Para o Evento 46953 (Figura 4.10), a condição de ondas que resultou em galgamento foi o Caso 46953 que apresentava os valores mais elevados de H_s e N_{mar} da tempestade (Tabela 3.15), com um valor de $Q_{\max}$ bastante elevado, superior a 8 l/s/m.

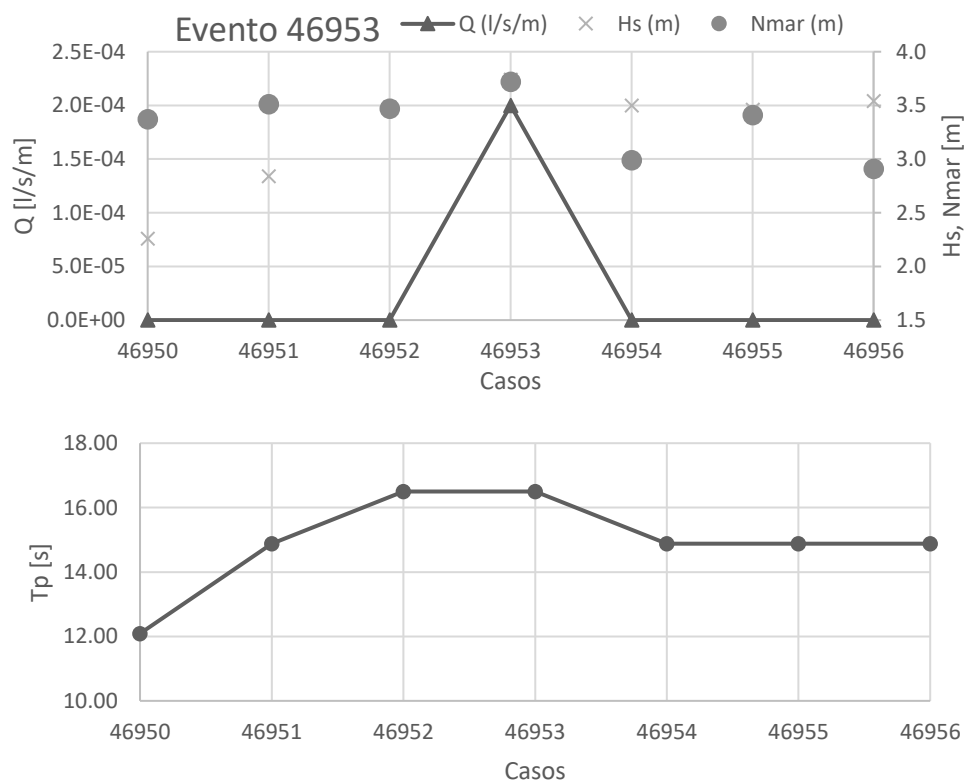


Figura 4.10 - Evento 46953. Gráfico superior: valores de caudais médios de galgamento(Q), altura significativa das ondas (H_s) e nível do mar (N_{mar}); Gráfico inferior: período de pico (T_p).

Por outro lado, no Evento 51265 (Figura 4.11), para o Caso 51265, observou-se que o caso com o valor maior de Hs não resultou em galgamento, mas sim o caso em que o valor de Nmar é o mais elevado. O outro caso do Evento 51265, sem Q nulo, corresponde ao caso 51267, com valores elevados de Hs e Nmar, embora não sejam os mais altos, mas associados ao Tp mais elevado. Neste segundo Evento, os valores de Qmax são consideravelmente superiores aos de Qmax do primeiro Evento. O Nmar em ambos os Eventos é semelhante, mas o Evento 51265 apresenta valores muito mais elevados de Hs e Tp.

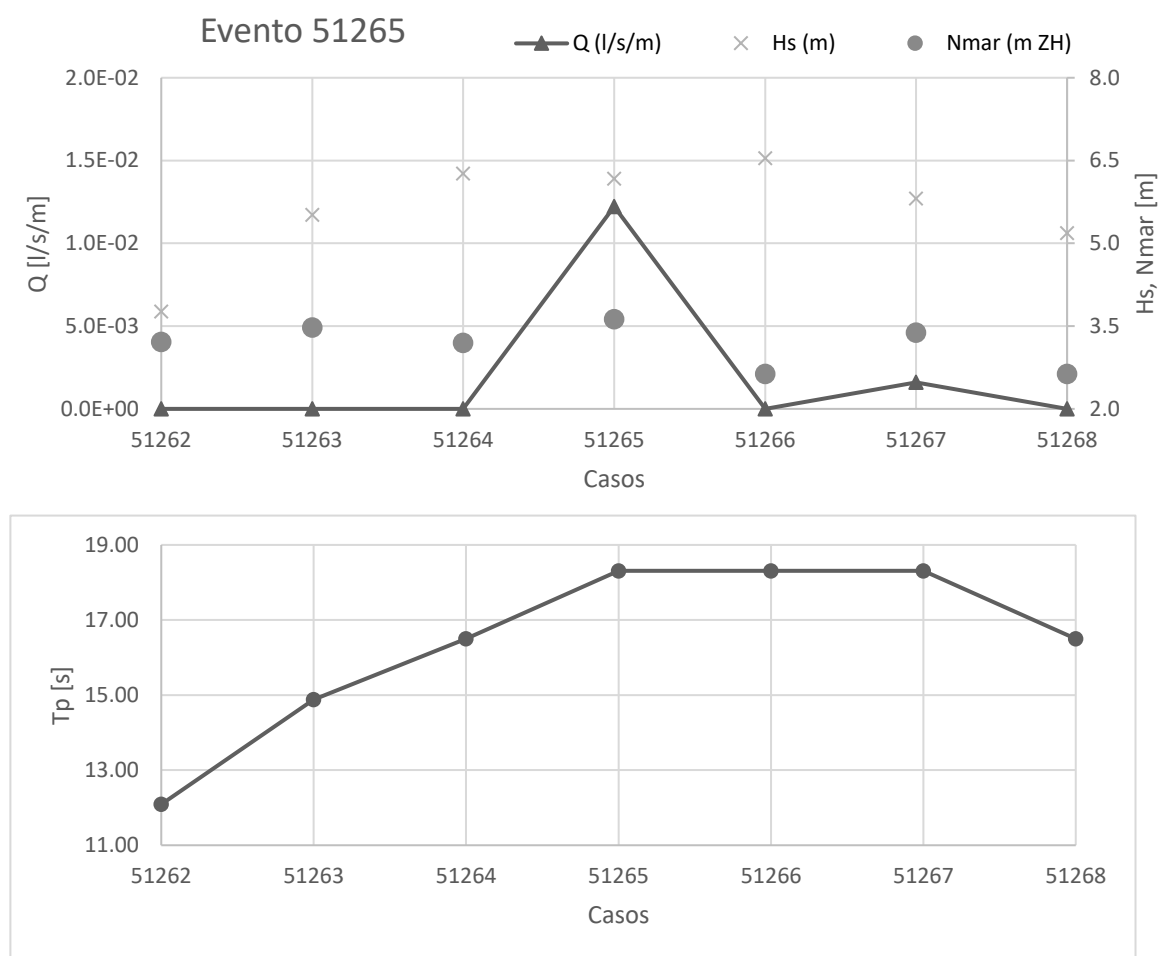


Figura 4.11 - Evento 51265. Gráfico superior: valores de caudais médios de galgamento(Q), altura significativa das ondas (Hs) e nível do mar (Nmar); Gráfico inferior: período de pico (Tp).

4.5 Comparação de resultados do modelo SWASH com as fórmulas empíricas obtidas por Rosa (2021)

O caudal médio de galgamento conseguido via modelo SWASH foi comparado com os caudais calculados utilizando as seguintes fórmulas empíricas: Eurotop (2018), Goda (2009), van Gent (1999), Goda (2009) modificada por Altomare *et al.* (2020) e van Gent (1999) modificada por Altomare *et al.* (2020). Não foram consideradas as metodologias de Mase *et al.* (2013) e Masatoshi *et al.* (2019), uma vez que estas forneceram caudais médios de galgamento nulos para todos os eventos analisados. É importante destacar que as duas últimas fórmulas mencionadas calculam o caudal médio de galgamento apenas quando o runup máximo, calculado pela fórmula, supera a altura do coroamento da estrutura em questão, enquanto as restantes fórmulas mencionadas calculam diretamente o valor de Q , que será sempre superior a zero, mesmo nos casos em que não se espera galgamento. Os resultados para os eventos 46263 e 51265 estão apresentados nas Tabela 4.3 e Tabela 4.4, respetivamente, destacando-se os valores máximos com a cor cinzenta.

É importante referir que, conforme mencionado previamente, as fórmulas foram aplicadas considerando um perfil costeiro simplificado, no qual a barra foi excluída (ver Figura 4.12), enquanto o modelo SWASH utilizou um perfil costeiro devidamente definido.

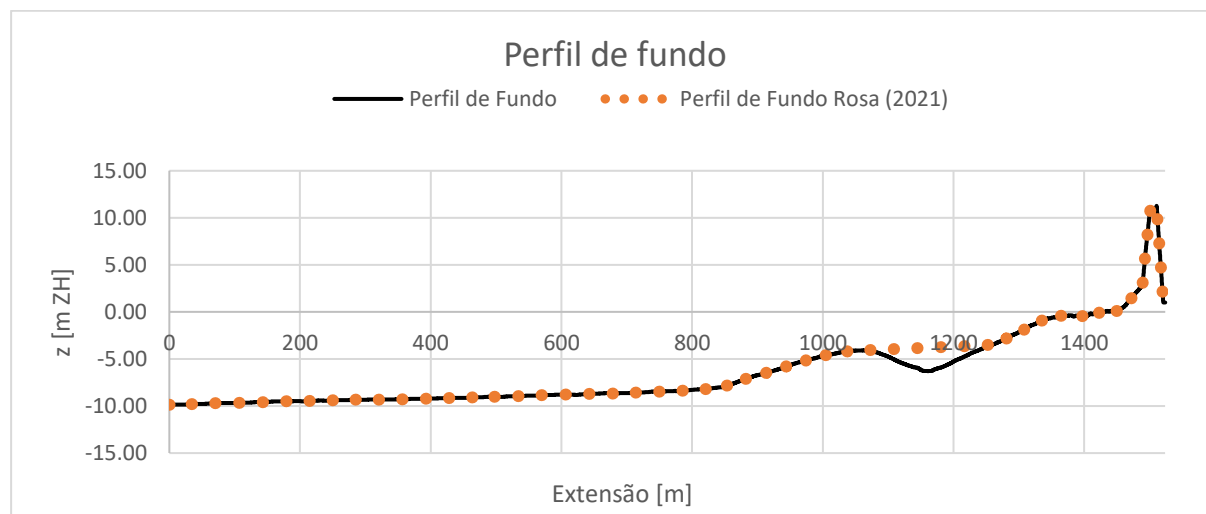


Figura 4.12 – Perfil de fundo, utilizado em Rosa (2021) – Proposta 1.

Uma das principais discrepâncias entre os resultados obtidos com o SWASH e os obtidos pelas fórmulas é que estas últimas nunca apresentam valores nulos de galgamento, ao contrário do modelo SWASH, que sempre que o runup máximo é inferior ao coroamento da estrutura de defesa, dará origem a caudal de galgamento nulo.

Tabela 4.3 - Valores de Q obtidos com o modelo SWASH e com as fórmulas empíricas para o evento 46953.

Evento 46953 - Q [m ³ /s/m]						
Caso	SWASH	Eurotop (2018)	Goda (2009)	Van Gent (1999)	Goda (2009) modificado por Altomare <i>et al.</i> (2020)	Van Gent (1999) modificado por Altomare <i>et al.</i> (2020)
46950	0.00E+00	2.43E-14	2.66E-06	4.32E-11	2.50E-06	5.78E-11
46951	0.00E+00	2.66E-13	9.23E-05	1.12E-08	8.65E-05	9.92E-09
46952	0.00E+00	4.73E-11	4.22E-04	7.99E-08	3.96E-04	7.74E-08
46953	2.00E-07	1.44E-09	1.13E-03	1.61E-06	1.06E-03	9.78E-07
46954	0.00E+00	2.52E-16	1.26E-04	6.41E-12	1.18E-04	2.86E-11
46955	0.00E+00	2.78E-13	1.81E-04	1.22E-08	1.70E-04	1.37E-08
46956	0.00E+00	6.46E-17	1.84E-04	9.72E-13	1.72E-04	6.24E-12

Tabela 4.4 - Valores de Q obtidos com o modelo SWASH e com as fórmulas empíricas para o evento 51265.

Evento 51265 - Q [m ³ /s/m]						
Caso	SWASH	Eurotop (2018)	Goda (2009)	Van Gent (1999)	Goda (2009) modificada por Altomare <i>et al.</i> (2020)	Van Gent (1999) modificada por Altomare <i>et al.</i> (2020)
51262	0.00E+00	1.14E-19	3.75E-05	6.56E-11	3.52E-05	1.39E-10
51623	0.00E+00	9.36E-08	2.04E-03	7.71E-07	1.91E-03	7.44E-07
51624	0.00E+00	1.34E-10	5.45E-03	4.00E-07	5.11E-03	6.57E-07
51625	1.22E-05	1.80E-07	1.11E-02	2.54E-05	1.04E-02	1.95E-05
51626	0.00E+00	2.54E-19	----	----	----	----
51627	1.55E-06	2.75E-08	7.17E-03	3.37E-06	6.72E-03	3.76E-06
51628	0.00E+00	7.41E-14	----	----	----	----

Após uma análise da Tabela 4.3 e Tabela 4.4, observa-se que o caso para o qual foram obtidos os valores mais elevados de Q se manteve, independentemente do método utilizado para o calcular (modelo SWASH ou fórmulas empíricas). No entanto, os valores calculados para Q variaram significativamente entre os diferentes métodos.

Para o Evento 46953 (Figura 4.13), as fórmulas de Goda (2009) e Goda (2009) modificadas por Altomare *et al.* (2020) produziram valores de Q praticamente idênticos e corresponderam aos valores mais elevados. De facto, estes valores foram significativamente mais altos do que aqueles obtidos com o modelo SWASH e com as outras fórmulas. A única exceção foi a fórmula do Eurotop (2018) que forneceu valores de Q mais baixos do que o modelo SWASH, enquanto a fórmula de van Gent (1999) e a fórmula de van Gent (1999) modificada por Altomare *et al.* (2020) estimaram valores de Q semelhantes ao modelo SWASH.

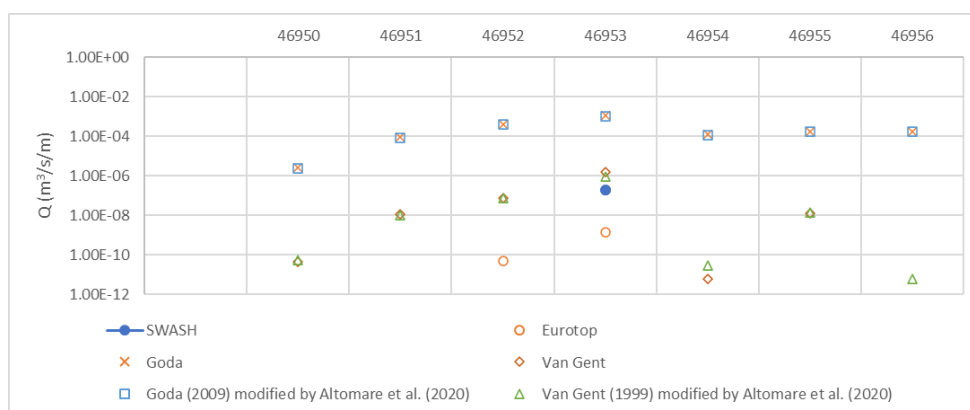


Figura 4.13 – Caudal médio de galgamento obtido com as fórmulas empíricas e com o modelo SWASH para o Evento 46953.

No Evento 51265 (Figura 4.14), em algumas situações, o nível do mar não alcançou a base da estrutura, impossibilitando a aplicação das fórmulas empíricas (à exceção da fórmula do Eurotop (2018)). As fórmulas de Goda (2009) e de Goda (2009) modificadas por Altomare *et al.* (2020) forneceram os valores mais elevados de Q , que se revelaram significativamente superiores aos obtidos com o modelo SWASH e restantes fórmulas, como ocorreu no Evento 46953.

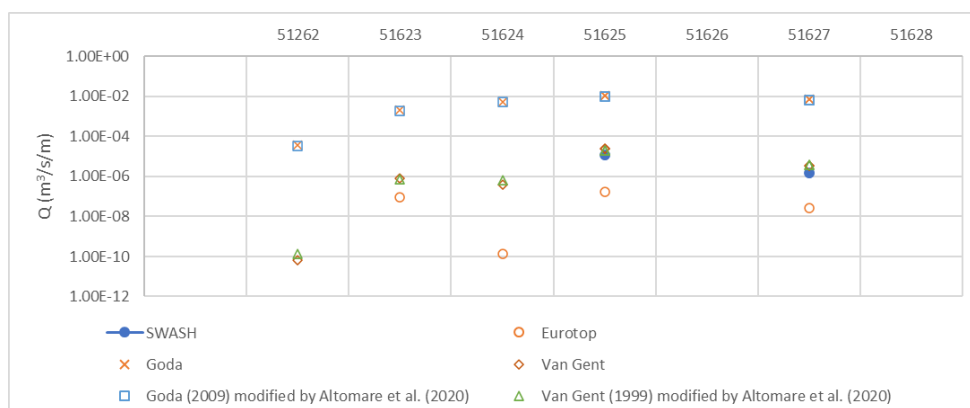


Figura 4.14 – Caudal médio de galgamento obtido com as fórmulas empíricas e com o modelo SWASH para o Evento 51265.

Em resumo, os valores de Q obtidos com as fórmulas empíricas, quando comparados com os obtidos com o modelo SWASH foram:

- Inferiores: Eurotop (2018);
- Semelhantes: van Gent (1999), van Gent (1999) modificado por Altomare *et al.* (2020);
- Superiores: Goda (2009), Goda (2009) modificado por Altomare *et al.* (2020).

No entanto, é importante notar que, mesmo proporcionando diferentes valores de Q , as fórmulas empíricas nunca previram cenários com caudais médios de galgamento nulos, para os casos em que puderam ser aplicadas.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTO FUTURO

5.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo principal analisar e prever o galgamento na estrutura de defesa costeira aderente da Praia da Vagueira. Esta análise surge no contexto da crescente preocupação em relação à segurança de pessoas, bens e ativos ambientais na zona costeira, intensificada pelas alterações climáticas e pelas crescentes pressões nas zonas litorais. Um dos desafios críticos é a minimização do galgamento sobre as estruturas.

Para alcançar este objetivo, utilizou-se o modelo numérico SWASH. Foi realizada uma análise de sensibilidade para identificar os parâmetros-chave de forma a simular, da maneira mais próxima da realidade, o galgamento no SWASH. O modelo foi aplicado à estrutura da Praia da Vagueira, considerando sete grupos de eventos entre 1979 e 2018. O perfil transversal da estrutura utilizado foi o da referente ao da última reabilitação na estrutura.

As principais conclusões deste trabalho são aqui apresentadas, juntamente com a sugestão de trabalhos futuros.

5.1.1 Análise de sensibilidade e seus resultados

O estudo da análise de sensibilidade do modelo numérico SWASH concentrou-se na análise do impacto das variações da dimensão da malha, do número de ondas a simular e do coeficiente de atrito de Manning a utilizar ao longo da extensão em estudo. Os objetivos principais desta análise consistiram na análise da influência destes parâmetros nos resultados do modelo e na identificação dos valores mais apropriados para estes parâmetros, com a finalidade de obter resultados precisos, com um tempo de cálculo aceitável.

Para efeitos desta dissertação, apenas foram considerados dois valores do coeficiente de atrito de Manning, um para a zona do domínio de cálculo correspondente à parte natural do perfil e um para o material da estrutura de defesa. Além disso, este trabalho baseou-se na aplicação de um modelo numérico para o cálculo do galgamento, o que permitiu explorar os resultados de maneira abrangente, embora este modelo deveria ser validado com resultados de ensaios em modelo físico à escala reduzida (Figura 5.1) ou dados de campo. No entanto, convém também realçar que os ensaios em modelo físico podem também apresentar imprecisões associadas, como, por exemplo, os efeitos de escala.



Figura 5.1 - Exemplos de modelos de estruturas de defesa costeira, a uma escala reduzida, nas instalações do LNEC (fonte: LNEC)

Apesar das simplificações inerentes à modelação numérica, os resultados obtidos demonstraram tendências semelhantes às obtidas com as fórmulas empíricas (que também têm simplificações inerentes, nomeadamente a necessidade de simplificação do perfil de fundo para que possam ser aplicadas). É reconhecido que existe margem para aprofundar ainda mais a investigação, principalmente quando comparada com dados de campo que permitam validar os resultados obtidos.

5.1.2 Reflexões sobre os resultados do modelo SWASH

No âmbito desta dissertação de mestrado, foi conduzida uma análise utilizando o modelo SWASH na estrutura de defesa longitudinal da praia da Vagueira. As condições de agitação e de nível de mar foram caracterizadas pela altura significativa das ondas (H_s), pelo período de pico (T_p) e pelo nível do mar (N_{mar}). Ao longo do período em estudo, que abrangeu eventos ocorridos entre 1979 e 2018, observou-se um histórico de reabilitações na estrutura de defesa longitudinal. A última dessas reabilitações ocorreu em 2015, durante a qual a altura

do coroamento foi aumentada para +10 metros (ZH), com o objetivo de mitigar o fenómeno de galgamento na estrutura.

Foram considerados 7 grupos de eventos nesta dissertação, dos quais apenas 2 eventos conduziram a estados de mar com ocorrência de galgamento sobre o coroamento da estrutura: no evento 46953, em um estado de mar, e no evento 51265, em dois estados de mar. Esta identificação de galgamento na estrutura em apenas três casos pode ser atribuída à eficácia da nova configuração da estrutura, após a última reabilitação de 2015. Esta configuração parece ter cumprido com êxito o seu propósito de reduzir a ocorrência de galgamentos de ondas.

Da análise dos resultados obtidos, concluiu-se que as variáveis com maior influência na ocorrência de galgamento nos eventos que apresentaram caudal galgado, Q , não nulo, foram o período de pico, T_p e o nível de mar, N_{mar} .

Embora os valores de caudal médio galgado obtidos tenham sido bastante baixos, os valores máximos de caudal no estado de mar foram consideravelmente elevados. Isto mostra que deve existir cautela ao projetar uma estrutura de defesa costeira, pois o galgamento individual pode colocar pessoas em risco ou causar danos graves, mesmo que os valores médios não sejam tão elevados. Este modelo tem como vantagem permitir obter os valores de caudal máximo galgado.

5.1.3 Comparação com Fórmulas Empíricas

Uma das contribuições deste trabalho foi a comparação dos resultados do modelo SWASH com a várias fórmulas empíricas para o cálculo de caudais médios de galgamento.

Dada a configuração específica da praia da Vagueira, caracterizada por um perfil de barra e fossa, tornou-se necessário aplicar perfis aproximados nas fórmulas empíricas. Estas fórmulas não permitem considerar variações de declive ao longo do perfil em estudo, apresentando assim desafios na representação precisa das condições batimétricas locais. Em contrapartida, o modelo SWASH permite a utilização do perfil do fundo específico da zona em estudo, contribuindo para uma melhor representação da realidade.

Nos sete eventos simulados, as fórmulas empíricas resultaram sempre em caudais de galgamento não nulos, enquanto o modelo SWASH produziu na sua maioria resultados nulos. Isto tem implicações práticas, uma vez que o uso das fórmulas empíricas, por exemplo, em sistemas de alerta, pode resultar em alertas excessivamente conservadores, especialmente para atividades como o uso pedestre da estrutura (Figura 5.2), e que podem não refletir a realidade. Fica em destaque a utilidade e a vantagem do modelo SWASH na previsão de galgamento

com maior precisão e detalhe, pois permite analisar variáveis que não são possíveis de obter com as fórmulas empíricas, nomeadamente o caudal individual de galgamento de cada onda, assim como a extensão do galgamento.

Efetivamente, como já mencionado anteriormente, associado a um caudal médio de galgamento relativamente baixo, poderá estar um caudal máximo bastante elevado, pelo que a análise do caudal de galgamento associado a cada onda é de extrema importância no dimensionamento de obras marítimas e no desenvolvimento de sistemas de alerta precoce.



Figura 5.2 - Vista norte do paredão, da estrutura de defesa costeira Praia da Vagueira (11/01/2023).

5.1.4 Validação do modelo SWASH

É imperativo reconhecer que, embora tenhamos obtido observações promissoras do modelo SWASH nos estudos realizados até ao momento, é fundamental realizar testes adicionais em modelo à escala reduzida, considerando condições de agitação e de nível de mar obtidas de eventos de galgamento reais, e ainda testes à escala de protótipo com dados de campo.

Uma maior validação do modelo é essencial, devido à complexidade das interações hidrodinâmicas e batimétricas que afetam os fenómenos de galgamento.

A validação exaustiva permitirá a utilização, com confiança, do modelo SWASH em aplicações práticas de engenharia costeira.

5.1.5 Desenvolvimentos futuros

Foram identificadas diversas oportunidades de desenvolvimento e aprofundamento das investigações futuras na área do galgamento costeiro e na utilização do modelo numérico SWASH. Estas possibilidades incluem a consideração da implementação do modelo hidrodinâmico 2DH do SWASH, o que permitiria uma análise mais detalhada e precisa das condições costeiras. Além disso, seria relevante realizar comparações entre os resultados obtidos com o modelo SWASH e outros modelos numéricos amplamente utilizados na engenharia costeira, visando a validação cruzada e a identificação de eventuais discrepâncias.

Outra linha de desenvolvimento interessante seria a realização de simulações considerando as configurações pré-reabilitação de 2015 da estrutura costeira, a fim de avaliar se o galgamento previsto pelo SWASH anteriormente era significativamente superior. Isto proporcionaria informações valiosas sobre os impactos das intervenções de engenharia na redução do galgamento costeiro ao longo do tempo na Praia da Vagueira.

Em adição, a investigação poderia ser expandida para abordar questões relacionadas à influência das alterações climáticas nas condições costeiras e no galgamento. A inclusão de cenários futuros de aumento do nível do mar e variações nas características das ondas permitiria uma compreensão mais abrangente das tendências e desafios futuros na gestão costeira.

5.1.6 Conclusão Final

Em síntese, este estudo permitiu efetuar a previsão do galgamento da estrutura costeira de defesa aderente da Praia da Vagueira, utilizando o modelo SWASH em cenários reais. Não obstante as limitações e desafios identificados, é relevante realçar os principais resultados alcançados durante o desenvolvimento desta dissertação.

Os resultados obtidos com o SWASH indicam a possibilidade de significativas melhorias no conhecimento do galgamento. Uma vez verificada a confiabilidade do modelo SWASH nas simulações do galgamento costeiro, este fornece uma base sólida para abordagens futuras na mitigação de riscos costeiros e na concepção de estruturas de defesa costeira mais eficazes.

BIBLIOGRAFIA

APA, Agência Portuguesa do Ambiente (2022). Disponível em: <https://rea.apambiente.pt/content/linha-de-costa-em-situa%C3%A7%C3%A3o-de-eros%C3%A3o>. Acesso em: 15 setembro de 2022.

Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T., & Kortenhaus, A. (2016). Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 116, 236–257. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.07.002>

Altomare, Corrado, Suzuki, T., & Verwaest, T. (2020). Influence of directional spreading on wave overtopping of sea dikes with gentle and shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 157(May 2019), 103654. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103654>

Barros, J. E. C. (2019). "Avaliação do risco de galgamentos na praia de Vagueira". Trabalho de conclusão de curso, UFRGN, Brasil,

Battjes, J. A. (1974). "Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves". PhD-thesis Delft University of Technology

Bing Maps (2023). Disponível em: <https://www.bing.com/maps?cp=40.56279%7E-8.766861&lvl=15.5&style=a>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2023.

Censos INE (2021). Disponível em: <https://www.pordata.pt/censos/resultados/emdestaque-vagos-471>. Acesso em: 27 de setembro de 2022.

Coelho, C. (2005). "Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira". Universidade de Aveiro. Secção Autónoma de Engenharia Civil.

Coelho, C. (2014). "As Intervenções de Defesa Costeira na Mitigação do Problema da Erosão". Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.

Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. A., & Pozueta, B. (2005). "Neural network manual for NN_Overtopping program. Clash Wp8". <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Abf81b442-f3ed-4a6f-9b62-0c1dbb1e4c6c>.

Comissão Europeia (2001). "A União Europeia e as Zonas Costeiras. Inverter as tendências nas zonas costeiras europeias". p.12-13 ISBN 92-894-1155-4.

Delicado, A., Schmidt, L., Guerreiro, S. & Gomes, C. (2012). "Pescadores, conhecimento local e mudanças costeiras no litoral Português". RGCI - Revista de Gestão Costeira Integrada . 2012, Vol. 12, Issue 4, p. 437-451.

Dias, J. A., Bastos, M. R., Bernardes, C., Freitas, J. G. & Martins, V.(2012). "Interações Homem - Meio em Zonas Costeiras: O Caso de Aveiro, Portugal."

Dias, J. A., Ferreira, Ó. C. & Pereira, A. R. (1994). "Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré".Relatório final.

EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., www.overtopping-manual.com

Fortes, C.J.E., Neves, M.G., Capitão, R., Pinheiro, L. (2020). "Avaliação do galgamento costeiro sem e com um quebra-mar destacado na frente da Praia da Vagueira", in Atas. 6 as Jorn. de Engenharia Hidrográfica/1 as Jorn. Luso-Espanholas de Hidrografia, Lisboa, 3 a 5 de novembro, pp- 187-190.

Girão, A. A. (1960). "Geografia de Portugal". Porto: Portucalense Editora, S.A.R.L., 1960, 3ª Edição, p. 95-114.

Goda, Y. (2009). Derivation of unified wave overtopping formulas for seawalls with smooth, impermeable surfaces based on selected CLASH datasets. Coastal Engineering, 56(4), 385–399. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.09.007>

Gomes, V., Cardoso, A. & Pinho, P. (1991). "2º Simpósio sobre protecção e revalorização da faixa costeira do minho ao luz". Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Edição do IHRH.

Lamy (2001). "Monografia de Ovar. Freguesias de S. Cristóvão e de S. João de Ovar (922 – 1865)". 2.^a Edição, revista, actualizada e aumentada, Vol. 1 (922-1865), Vol. 2 (1865-1916), Vol. 3 (1919-1959), Ovar, Edição da Câmara Municipal de Ovar.

Manz, A., Zózimo, A. C., Garzon, J. L. (2022). "Application of SWASH to Compute Wave Overtopping in Ericeira Harbour for Operational Purposes". Journal of Marine Science and Engineering.

Masatoshi, Y., Mase, H., Sooyoul, K., Masahide, T., Shinya, U., Kawasaki, K., Tetsuya, H., Matsushita, H. (2021). "Wave overtopping and overflow transition modeling and its incorporation into a wave-surge coupling simulation".

Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S., & Reis, M. T. (2013). Wave Runup and Overtopping at Seawalls Built on Land and in Very Shallow Water. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 139(5), 346–357. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000199](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000199)

NASA (2016). Disponível em: <https://www.visibleearth.nasa.gov/images/137643/the-iberian-peninsula/137644l>. Acesso em: 12 de dezembro de 2022.

Nordstrom, K. F. (2014). "Estuarine, Coastal and Shelf Science. Living with shore protection structures: A review". Institute of Marine and Coastal Sciences, Rutgers University.

Pinto, F., Neves, A. (2003). "A Importância da Consideração do Carácter Irregular da Agitação Marítima no Dimensionamento de Quebramares de Taludes". Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Programa COSMO (2018). Disponível em: <https://cosmo.apambiente.pt/>. Acesso em: 13 de outubro de 2023.

Romão, S. M. (2014). - "Balanço sedimentar costeiro no troço litoral entre a praia da Barra e a praia de Mira".

Rosa, G. (2021). "Cálculo do galgamento em estruturas de defesa aderente. O caso da Vagueira.". Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologias.

Rota da Luz (2023). Disponível em: <https://www.rotadaluz.pt/vagos/praias/praiia-da-vagueira-vagos/>. Acesso em: 7 de março de 2023.

Santos, F. D., Lopes, A. M., Moniz, G., Ramos, L. & Taborda, R. (2014). "Gestão da Zona Costeira. O Desafio da Mudança".

Silva, P. (2019). "Cálculo de galgamento em estruturas marginais. O caso de Cova Gala". Universidade Nova de Lisboa.

The SWASH Team (2023). "Swash User Manual, Version 9.01". Environmental Fluid Mechanics Section, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology. Países Baixos.

U.S. Army Corps Of Engineers (2011). "Civil Works - Construction".

Van Gent, M. R. A. (1999). "Physical model investigations on coastal structures with shallow foreshores". Delft Hydraulics.

Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Neves, L., e Pais-Barbosa, J. (2006). EUrosion - A European Initiative for Sustainable Coastal Erosion. Pilot Site of River Douro - Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale do Lobo and Azores, Porto, Portugal, 317 p.

Wong, P.P., I.J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K.L. McInnes, Y. Saito, A. Sallenger, (2014). "Coastal systems and low-lying areas. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 361-409.

Zijlema, M., Stelling, G.S., & Smit, P. (2011). "SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters". Coastal Engineering, 58(10), 992–1012.

| A

PRAIA DA VAGUEIRA AO LONGO DOS ANOS

A.1 Imagem aérea Praia da Vagueira 1958



(fonte: Projeto "Change", 2014)

A.2 Imagem aérea Praia da Vagueira 1967



(fonte: Projeto "Change", 2014)

A.3 Imagem aérea Praia da Vagueira 2006



(fonte: Projeto "Change", 2014)

| **B**

DADOS ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

B.1 Análise de Sensibilidade - Dimensão de Malha AS39685

DeltaX [m]	Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7		Runup Máximo (m)
	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	
0.075	0.394415	10.972243	0.000217	0.760629	0.000000	0.000000	4.485
0.100	0.426775	11.344896	0.000775	2.031167	0.000000	0.000000	5.090
0.200	0.450443	13.684186	0.001425	3.269435	0.000000	0.000000	5.447
0.300	0.457999	14.239136	0.001298	2.925565	0.000000	0.000000	5.295
0.400	0.442772	14.009190	0.001002	2.956918	0.000000	0.000000	5.196
0.500	0.441466	13.613873	0.001067	3.716783	0.000000	0.000000	5.172
0.750	0.387124	12.397168	0.000376	2.372352	0.000000	0.000000	5.071
1.000	0.360322	13.995664	0.000453	2.270367	0.000000	0.000000	3.136
1.500	0.241156	12.965359	0.000015	0.392011	0.000000	0.000000	4.699
2.000	0.120822	10.690097	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.367
3.000	0.014521	8.328183	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.672

DeltaX [m]	Hs (m)							Runtime (h)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
0.075	3.0154	2.9514	2.8610	2.7900	0.0000	0.0000	0.0000	15.77
0.100	3.3005	3.1435	3.0494	2.9556	0.0000	0.0000	0.0000	9.35
0.200	3.1639	3.2130	3.0631	3.0477	0.0000	0.0000	0.0000	2.20
0.300	2.7129	2.7240	3.0420	2.8624	0.0000	0.0000	0.0000	1.17
0.400	2.7020	2.7267	3.0477	2.8624	0.0000	0.0000	0.0000	0.75
0.500	2.7133	2.7295	3.0450	2.8529	0.0000	0.0000	0.0000	0.63
0.750	2.7119	2.7225	3.0550	2.8757	0.0000	0.0000	0.0000	0.32
1.000	2.7088	2.7335	3.0663	2.9023	0.0000	0.0000	0.0000	0.17
1.500	2.6871	2.7004	3.0539	2.8601	0.0000	0.0000	0.0000	0.17
2.000	2.7011	2.7018	3.0364	2.8199	0.0000	0.0000	0.0000	0.12
3.000	2.7027	2.7371	3.0709	2.8981	0.0000	0.0000	0.0000	0.07

B.2 Análise de Sensibilidade - Dimensão de Malha AS39683

DeltaX [m]	Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7		Runup Máximo (m)
	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	
0.075	0.351004	9.684739	0.000029	0.415973	0.000000	0.000000	4.060
0.100	0.377100	10.846354	0.000210	1.309024	0.000000	0.000000	4.485
0.200	0.401538	11.854232	0.000468	2.387205	0.000000	0.000000	4.884
0.300	0.398046	11.980845	0.000413	2.553684	0.000000	0.000000	4.854
0.400	0.388538	11.839887	0.000368	2.110919	0.000000	0.000000	4.874
0.500	0.378983	12.056843	0.000261	1.495318	0.000000	0.000000	4.647
0.750	0.316223	11.248765	0.000060	1.389604	0.000000	0.000000	4.733
1.000	0.299751	11.378527	0.000057	0.991378	0.000000	0.000000	4.359
1.500	0.187052	11.870071	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.189
2.000	0.081205	8.890153	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.125
3.000	0.004932	7.070055	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.770

DeltaX [m]	Hs (m)							Runtime (h)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
0.075	2.9076	2.8076	2.4810	2.4701	0.0000	0.0000	0.0000	11.57
0.100	3.0205	2.7740	2.5367	2.5853	0.0000	0.0000	0.0000	7.10
0.200	2.4301	2.3284	2.5185	2.4320	0.0000	0.0000	0.0000	2.13
0.300	2.2747	2.2951	2.5125	2.3831	0.0000	0.0000	0.0000	1.10
0.400	2.2710	2.2792	2.5131	2.3753	0.0000	0.0000	0.0000	0.63
0.500	2.2666	2.2754	2.5073	2.3818	0.0000	0.0000	0.0000	0.45
0.750	2.2609	2.2554	2.5113	2.3756	0.0000	0.0000	0.0000	0.28
1.000	2.2472	2.2390	2.5003	2.3683	0.0000	0.0000	0.0000	0.25
1.500	2.2261	2.2405	2.5016	2.3831	0.0000	0.0000	0.0000	0.15
2.000	2.2056	2.2249	2.4940	2.3559	0.0000	0.0000	0.0000	0.10
3.000	2.2444	2.2523	2.5371	2.4396	0.0000	0.0000	0.0000	0.07

B.3 Análise de Sensibilidade - Dimensão de Malha AS39684

DeltaX [m]	Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7		Runup Máximo (m)
	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	Q(m³/s/m)	Qmax (m³/s/m)	
0.075	0.263930	6.765348	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.248
0.100	0.282007	8.063006	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.678
0.200	0.288997	9.960008	0.000001	0.026073	0.000000	0.000000	3.797
0.300	0.270547	9.332489	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.433
0.400	0.267055	9.856041	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.558
0.500	0.262878	10.348258	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.382
0.750	0.197802	9.373708	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.171
1.000	0.196581	8.539604	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.136
1.500	0.099699	6.790371	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.098
2.000	0.021523	5.015074	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.101
3.000	0.000040	1.992633	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	3.022

DeltaX [m]	Hs (m)							Runtime (h)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
0.075	2.7623	2.5532	2.0878	2.1621	0.0000	0.0000	0.0000	7.98
0.100	2.5132	2.1214	1.9770	1.9596	0.0000	0.0000	0.0000	5.70
0.200	1.7665	1.8391	1.9425	1.8657	0.0000	0.0000	0.0000	1.55
0.300	1.7646	1.8211	1.9363	1.8662	0.0000	0.0000	0.0000	0.83
0.400	1.7649	1.8167	1.9412	1.8675	0.0000	0.0000	0.0000	0.53
0.500	1.7567	1.8041	1.9365	1.8635	0.0000	0.0000	0.0000	0.55
0.750	1.7374	1.8011	1.9307	1.8562	0.0000	0.0000	0.0000	0.30
1.000	1.7349	1.8048	1.9380	1.8535	0.0000	0.0000	0.0000	0.18
1.500	1.7303	1.7894	1.9262	1.8656	0.0000	0.0000	0.0000	0.12
2.000	1.7325	1.7815	1.9444	1.8641	0.0000	0.0000	0.0000	0.10
3.000	1.7178	1.7584	1.9364	1.8919	0.0000	0.0000	0.0000	0.05

B.4 Análise de Sensibilidade - Coeficiente de atrito de Manning AS39685 (850 Ondas)

Coeficiente Atrito Manning [s/(m ^{1/3})]	Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7		Runup Máximo (m)
	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	
0.040	0.446686	12.840249	0.001090	3.184190	0.000000	0.000000	5.149
0.050	0.461225	11.927253	0.001214	2.536006	0.000000	0.000000	5.045
0.060	0.456167	13.534810	0.001079	2.823620	0.000000	0.000000	5.046
0.070	0.460320	12.173045	0.001185	3.320633	0.000000	0.000000	5.042

Coeficiente Atrito Manning [s/(m ^{1/3})]	Hs (m)							Runtime (h)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
0.040	3.108	3.153	3.035	2.956	0.0000	0.0000	0.0000	10.98
0.050	2.699	2.724	2.965	2.827	0.0000	0.0000	0.0000	11.02
0.060	3.081	2.986	3.021	2.903	0.0000	0.0000	0.0000	10.98
0.070	2.688	2.704	2.975	2.828	0.0000	0.0000	0.0000	10.98

B.5 Análise de Sensibilidade – Número de Ondas AS39685

(Coeficiente de atrito de Manning 0,05 s/(m^{1/3}))

Número de Ondas	Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7		Runup Máximo (m)
	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	
1500	0.444724	14.945403	0.001077	4.136633	0.000000	0.000000	5.568
1250	0.462461	15.040492	0.001278	3.373256	0.000000	0.000000	5.375
1000	0.466313	13.905042	0.001741	4.421762	0.000000	0.000000	5.480
850	0.461225	11.927253	0.001214	2.536006	0.000000	0.000000	5.045
750	0.466783	12.609143	0.001295	6.064818	0.000000	0.000000	5.570
500	0.450435	13.071301	0.001390	3.306147	0.000000	0.000000	5.188

Número de Ondas	Hs (m)							Runtime (h)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
1500	3.1169	3.2267	3.0525	3.0587	0.0000	0.0000	0.0000	16.43
1250	2.7698	2.8003	2.9887	2.8422	0.0000	0.0000	0.0000	11.32
1000	2.7323	2.7389	3.0410	2.8747	0.0000	0.0000	0.0000	8.83
850	2.6993	2.7237	2.9646	2.8274	0.0000	0.0000	0.0000	8.02
750	2.7167	2.7217	2.9892	2.8292	0.0000	0.0000	0.0000	6.43
500	3.0812	2.9470	2.9217	2.8842	0.0000	0.0000	0.0000	5.63

B.6 Análise de Sensibilidade – Número de Ondas AS39685

(Coeficiente de atrito de Manning 0,04 s/(m^{1/3}))

Número de Ondas	Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7		Runup Máximo (m)
	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	
1500	0.447388	13.773495	0.001136	5.076729	0.000000	0.000000	5.6977
1250	0.447055	14.542492	0.001005	2.700650	0.000000	0.000000	4.9370
1000	0.449242	11.838310	0.001272	3.754360	0.000000	0.000000	5.1859
850	0.446686	12.840249	0.001090	3.184190	0.000000	0.000000	5.1485
750	0.451990	12.502786	0.000880	2.561276	0.000000	0.000000	4.8347
500	0.451126	12.527544	0.001722	3.662243	0.000000	0.000000	5.1824

Número de Ondas	Hs (m)							Runtime (h)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
1500	3.0940	3.2186	3.0617	3.0452	0.0000	0.0000	0.0000	16.40
1250	3.1288	3.2053	3.0365	3.0003	0.0000	0.0000	0.0000	11.32
1000	3.1486	3.2358	3.0873	3.0536	0.0000	0.0000	0.0000	8.77
850	3.1076	3.1528	3.0349	2.9559	0.0000	0.0000	0.0000	7.98
750	3.0481	3.1253	3.0042	2.9654	0.0000	0.0000	0.0000	6.42
500	3.0679	3.0456	2.9107	2.9766	0.0000	0.0000	0.0000	5.62

B.7 Análise de Sensibilidade – Número de Ondas AS39685

(Coeficiente de atrito de Manning 0,06 s/(m^{1/3}))

Número de Ondas	Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7		Runup Máximo (m)
	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	
1500	0.447235	12.915047	0.001101	4.484564	0.000000	0.000000	5.184
1250	0.449321	13.174273	0.001281	2.438244	0.000000	0.000000	5.176
1000	0.459972	14.345870	0.001693	4.360423	0.000000	0.000000	5.752
850	0.456167	13.534810	0.001079	2.823620	0.000000	0.000000	5.046
750	0.456167	13.534810	0.001079	2.823620	0.000000	0.000000	5.046
500	0.450670	13.939336	0.001588	2.511401	0.000000	0.000000	5.056

Número de Ondas	Hs (m)							Runtime (h)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
1500	3.1226	3.1777	3.0670	3.0145	0.0000	0.0000	0.0000	16.45
1250	3.1314	3.2043	3.0156	3.0168	0.0000	0.0000	0.0000	11.23
1000	2.8062	2.7748	3.0663	2.9058	0.0000	0.0000	0.0000	8.80
850	3.0810	2.9858	3.0210	2.9027	0.0000	0.0000	0.0000	7.98
750	3.0810	2.9858	3.0210	2.9027	0.0000	0.0000	0.0000	6.43
500	3.0194	3.0777	2.9212	2.9207	0.0000	0.0000	0.0000	5.60

B.8 Análise de Sensibilidade – Número de Ondas AS39685

(Coeficiente de atrito de Manning 0,07 s/(m^{1/3}))

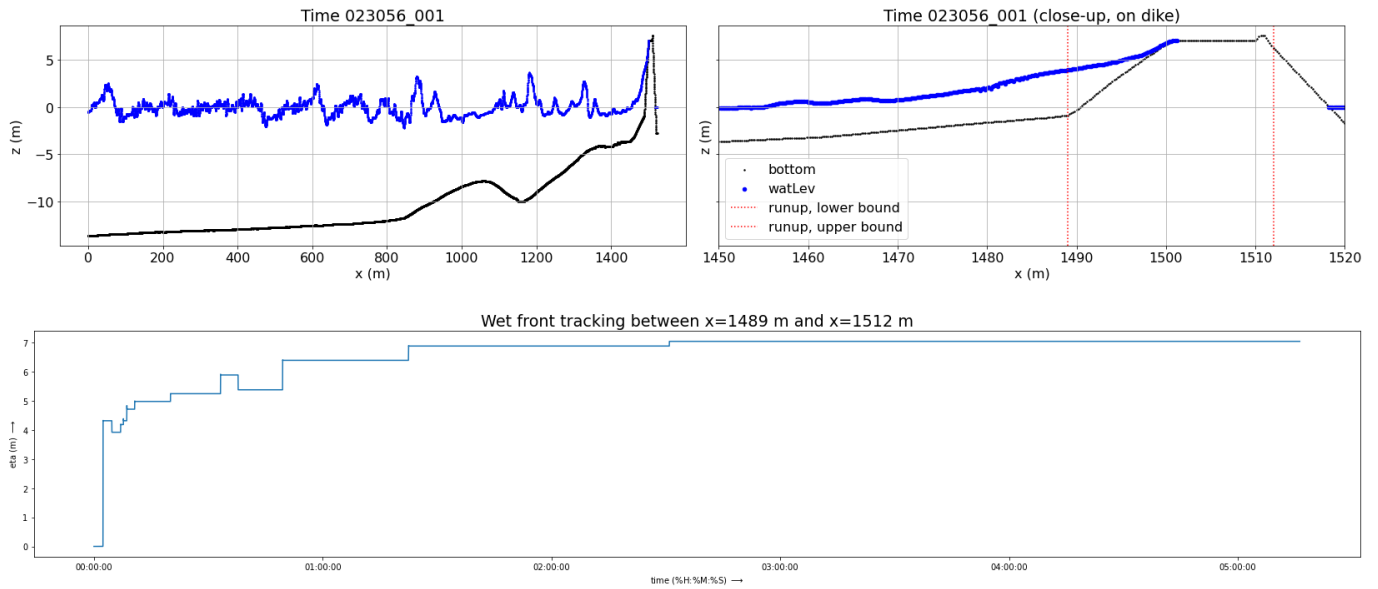
Número de Ondas	Ponto 5		Ponto 6		Ponto 7		Runup Máximo (m)
	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	Q(m ³ /s/m)	Qmax (m ³ /s/m)	
1500	0.459202	14.460411	0.001355	4.605646	0.000000	0.000000	5.754
1250	0.458432	14.598758	0.001348	4.080590	0.000000	0.000000	5.564
1000	0.457290	14.211552	0.001553	4.736026	0.000000	0.000000	5.462
850	0.460320	12.173045	0.001185	3.320633	0.000000	0.000000	5.042
750	0.466137	13.298342	0.001387	4.918674	0.000000	0.000000	5.450
500	0.460429	11.374810	0.001634	3.938018	0.000000	0.000000	5.090

Número de Ondas	Hs (m)							Runtime (h)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	
1500	2.7162	2.7885	3.0118	2.8832	0.0000	0.0000	0.0000	16.37
1250	2.8062	2.8165	2.9891	2.8760	0.0000	0.0000	0.0000	11.25
1000	3.0670	2.9505	3.0395	2.9480	0.0000	0.0000	0.0000	8.82
850	2.6883	2.7037	2.9745	2.8281	0.0000	0.0000	0.0000	7.98
750	2.7293	2.7330	2.9750	2.8356	0.0000	0.0000	0.0000	6.42
500	2.6536	2.6134	2.8770	2.7599	0.0000	0.0000	0.0000	5.63

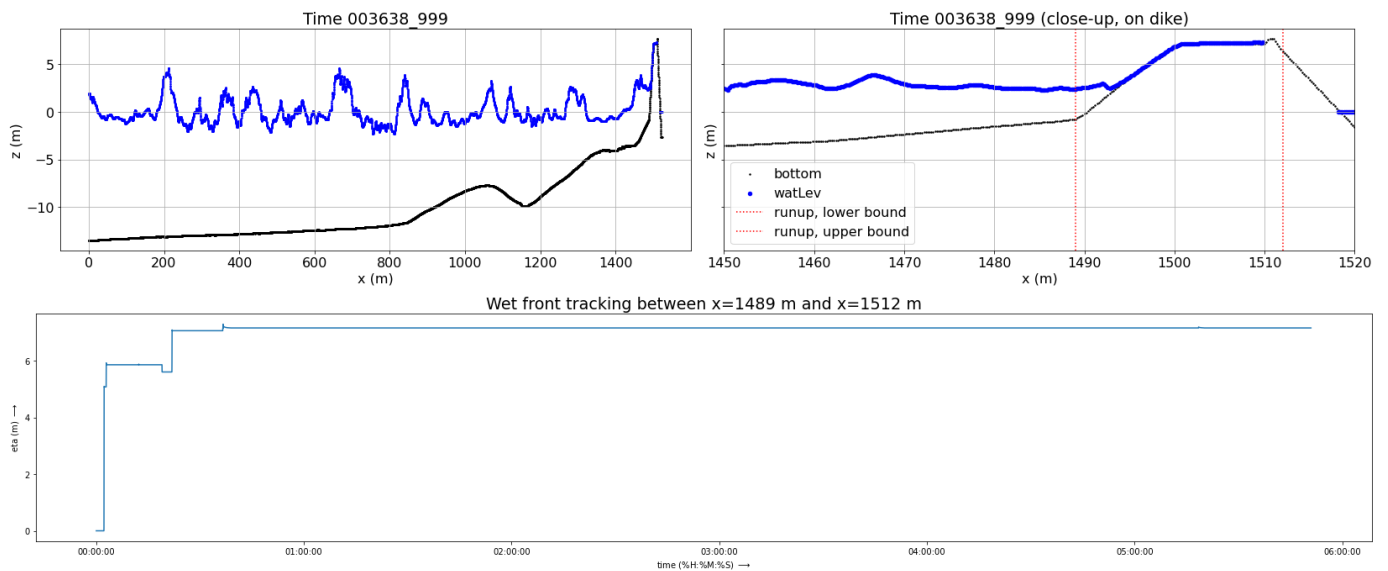
|c

**RUNUP MÁXIMO OBTIDOS COM O
SWASH PARA EVENTOS COM GALGA-
MENTO**

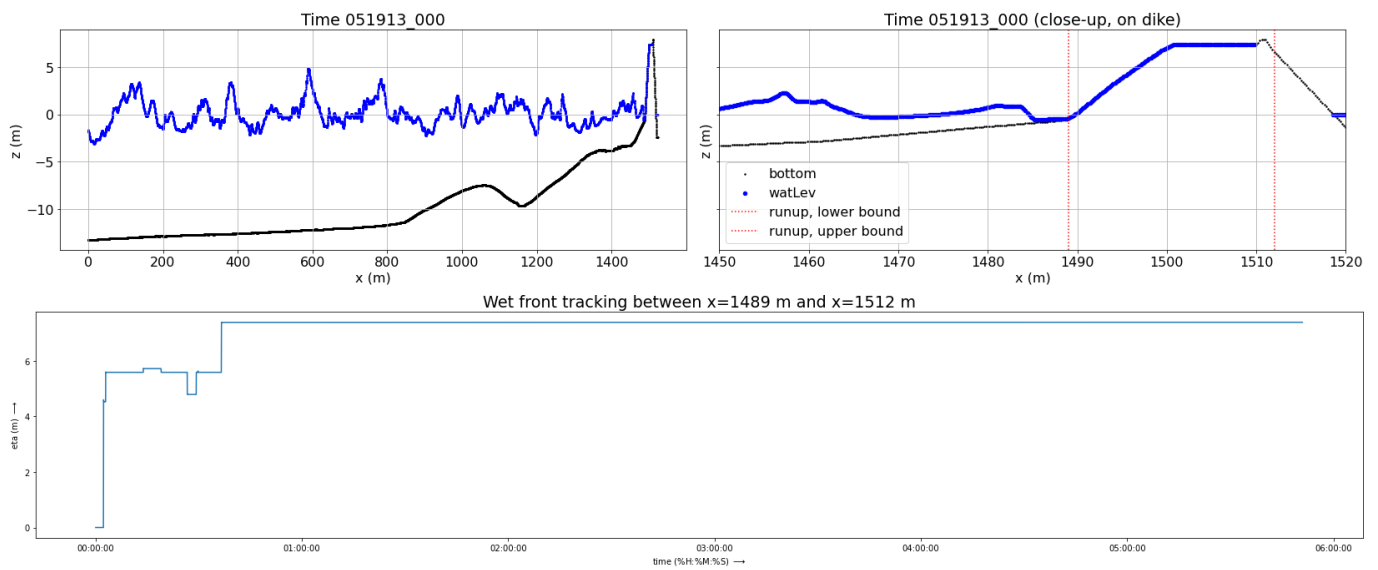
C.1 Caso 46953:



C.2 Caso 51265:



C.3 Caso 51267:



| D

**GALGAMENTO OBTIDOS COM O
SWACH PARA OS EVENTOS 46953
E 51265**

D.1 Resultados com galgamento para o evento 46953

Evento 46953			
Caso	Q (l/s/m)	Q _{max} (l/s/m)	Ru _{max} (m)
46950	0.0000	0.0000	4.5378
46951	0.0000	0.0000	5.3211
46952	0.0000	0.0000	5.6586
46953	0.0002	8.3073	6.3996
46954	0.0000	0.0000	5.0924
46955	0.0000	0.0000	5.5557
46956	0.0000	0.0000	4.9569

D.2 Resultados com galgamento para o evento 51265

Evento 51265			
Caso	Q (l/s/m)	Q _{max} (l/s/m)	Ru _{max} (m)
51262	0.0000	0.0000	4.8992
51263	0.0000	0.0000	6.4001
51264	0.0000	0.0000	6.1868
51265	0.0122	468.2189	5.9988
51266	0.0000	0.0000	5.2911
51267	0.0016	89.6800	6.1392
51268	0.0000	0.0000	5.3032



