

AVALIAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E DOS NÍVEIS DE GALGAMENTO NA PRAIA DO FURADOURO

Análise comparativa da situação atual e com a
construção de quebramares destacados

ANA RITA SILVA MARTINS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Coorientador: Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

JULHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

*“Se tiver o hábito de fazer as coisas com alegria,
raramente encontrará situações difíceis.”*

Sir Robert Baden-Powell

Avaliação da hidrodinâmica e dos níveis de galgamento na Praia do Furadouro.
Análise comparativa da situação atual e com a construção de quebramares destacados.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação representa o culminar de um longo percurso académico que não teria sido possível sem o esforço e apoio da minha família, a quem eu agradeço.

Presto também agradecimento ao meu orientador, o Professor Doutor Francisco Taveira Pinto, à minha coorientadora Doutora Eng^a Conceição Juana Fortes e ao Eng^o Pedro Poseiro, que me auxiliaram sempre que necessário na realização desta dissertação e por terem possibilitado a oportunidade única de a realizar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Agradeço também à Doutora Eng^a Teresa Reis a ajuda na aplicação do NN_OVERTOPPING2.

Agradeço à secção de Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente, alunos, professores e funcionários, que me acompanharam neste último ano de curso contribuindo para um ano de grande aprendizagem e amizade no grupo que formou. Em particular, agradeço à Dona Esmeralda Miguel e à Professora Elsa Carvalho pela amizade, preocupação e apoio que sempre demonstraram.

Aos colegas que me acompanharam na estadia no LNEC e que mais de perto conviveram com as minhas frustrações e por vezes mau humor, mas sempre se prestaram disponíveis para ajudar e alegrar e me integraram da melhor forma.

Aos colegas que me acompanharam de forma próxima nos anos de curso, nomeadamente à Joana Ferreira, à Mariana Moreira, à Rita Pina, à Carla Coelho, ao João Nogueira, à Francisca Barreto e ao André Mota, que contribuíram de grande forma para a conclusão deste, ajudando sempre que necessário na superação das dificuldades, incentivando quando mostrava desmotivação.

À Câmara Municipal de Ovar pela disponibilização de dados.

Por fim, gostaria de agradecer ao Agrupamento 854 de Leça do Balio pelos ensinamentos e crescimento que me proporcionaram, contribuindo de grande forma para a pessoa que sou, moldada pelos princípios de companheirismo e procura do crescimento pessoal, em particular, à Sofia Lourenço e ao Filipe Marcos, que me acompanham nestes 14 anos de vida escutista.

RESUMO

A praia do Furadouro, situada no distrito de Ovar, está inserida numa das zonas costeiras portuguesas que suscita maior preocupação, devido à ocorrência de galgamentos e pela elevada erosão e recuo da praia que se tem verificado. Desta forma, é de grande importância tomar medidas de proteção desta zona.

Nesta dissertação pretende-se fazer uma avaliação do grau de risco de galgamentos desta zona de estudo, através de uma metodologia simples desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC, analisando-se os galgamentos para a situação atual e com a construção de uma solução de defesa costeira.

O trabalho iniciou-se pela caracterização do regime de agitação marítima na zona de estudo, tendo sido por isso aplicado o modelo numérico SWAN (Team, 2007). Assim, com base num período de trinta e seis anos (1979 – 2015) de estimativas de agitação marítima e de nível de mar ao largo da zona do Furadouro, foi realizada a transferência dessas características até uma zona próxima da costa, i.e, até vários pontos selecionados, com batimétrica igual a 10m, 20m, 40m e 50m. Foi ainda considerado um ponto coincidente com a bóia ondógrafo de Leixões, para validação dos resultados através da comparação com os dados registados.

Em seguida, para avaliação dos galgamentos para a situação atual, foram utilizadas 3 metodologias diferentes: as fórmulas empíricas de Mase (Mase *et al.*, 2013), a rede neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) e o SWASH (Zijlema *et al.*, 2011).

A estrutura de defesa considerada foi a solução proposta por Castro (2015) de um quebramar destacado. De forma a avaliar os galgamentos ao longo da praia do Furadouro com a presença dessa estrutura foi utilizado apenas o modelo SWASH, uma vez que permite ter em conta as alterações da agitação marítima com a presença de um obstáculo físico ao contrário das outras metodologias.

Para finalizar, uma vez conhecidos os galgamentos, a avaliação do risco passa pela: determinação da probabilidade de ocorrência de galgamentos acima de limiares predefinidos de acordo com as recomendações de Pullen *et al.* (2007) e que dependem das atividades que se desenvolvem na zona em estudo e do tipo de estrutura galgada, e pela avaliação das consequências dessas ocorrências. No âmbito da avaliação de riscos, a análise das consequências é feita de forma qualitativa, segundo a metodologia expedita correntemente utilizada no LNEC. Assim, para cada uma das metodologias, para a situação atual e para a situação com um quebramar destacado, efetuou-se o cálculo do grau de risco e foram realizados os mapas de risco, permitindo uma maior facilidade de leitura do risco de cada zona, bem como facilitando uma comparação dos resultados obtidos por cada método.

Esta dissertação faz inicialmente uma descrição de alguns métodos de defesa costeira, sendo mais incisiva nos quebramares destacados. Posteriormente, é realizada uma descrição das metodologias utilizadas neste trabalho e a caracterização do fenómeno de galgamento e espraçamento. Segue-se a descrição da zona de estudo e a descrição da aplicação das diferentes metodologias à zona de estudo.

A presente dissertação permitiu concluir que as zonas que apresentam um maior risco de galgamento situam-se nas imediações norte e sul do esporão norte, sendo necessária uma proteção acrescida destas localizações, pois as estruturas atualmente existentes não são suficientes. Concluiu-se ainda que a construção de um quebramar destacado traria benefícios essencialmente na proteção da zona a sotamar deste, resultando em menores ocorrências de galgamentos e com menor magnitude, mas com alguns efeitos negativos a barlar do esporão norte e a sul do quebramar destacado.

PALAVRAS-CHAVE: Praia do Furadouro, Avaliação de Risco, Avaliação de Galgamento e Espraçamento, Agitação Marítima, Quebramar Destacado.

ABSTRACT

Furadouro beach, situated in Ovar District, is one of the coastal zones that raises bigger concern due to the frequent occurrence of overtopping and for the high erosion and beach retreat that has been observed, so it is very important to take protection measures in this location.

This dissertation intends to evaluate the risk of overtopping in the study zone with a simple methodology developed in National Laboratory of Civil Engineering, analyzing the overtopping discharge for the current situation and with the construction of a coastal protection solution.

Initially it was necessary to obtain the characterization of the wave regime on the study zone, therefore SWAN (Team, 2007) was applied. So, based on a period of thirty-six years (1979-2015) of wave regime estimations and water levels offshore Furadouro, the propagation of those wave characteristics to near the coast was made, to several selected points, with a depth of 10m, 20m, 40m and 50m. A point coincident with the Leixões wave buoy was also considered to validate the results obtained with the model by comparing it with the wave regime registered.

The evaluation of the overtopping for the current situation, was made with 3 methods: empirical formulas of Mase (Mase *et al.*, 2013), neural network NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) and SWASH (Zijlema *et al.*, 2011).

The coastal protection structure used was the solution proposed by Castro (2015) of a detached breakwater. The evaluation of the overtopping with the presence of the structure was only carried out using the SWASH model, because the other methods couldn't account for the presence of a physical obstacle and make a good approach of the wave propagation.

To finalize, knowing the overtopping discharges, to perform a risk assessment it is necessary to: calculate the probability of the occurrence of overtopping discharges above the limits suggested by Pullen *et al.* (2007) that depends of the activity of the site and the type of the overtopped structure and to evaluate the consequences of the overtopping discharges. This consequence analysis is made in a qualitative way, according to an expedite methodology currently being used at LNEC. Therefore, to every methodology, for the current situation and with a coastal protection structure, the risk assessment was carried out and the risk maps built for each method, allowing an easier analysis of the hazard of every location and assisting the comparison of the results.

In this dissertation, a brief description of some solutions of coastal protection is made, with a deeper approach of the detached breakwaters. Then an explanation of the functionality of the models and characterization of the overtopping and run up is made. Afterwards, the case study is described and explained the application of the models.

This dissertation allowed to conclude that the locations with higher risk of overtopping are situated in the adjacent zones, north and south, of the north groin, leading to the need of protection, since the existent structures are not capable of doing it. It was also concluded that the construction of a detached breakwater would bring benefits to the landward side, protecting this location, diminishing the number of occurrences of overtopping and their magnitude, but, with some negative effects at the seaward side of the north groin and at the south of the detached breakwater.

KEYWORDS: Furadouro Beach, Risk assessment, Overtopping Evaluation, Run Up, Wave Regime, Detached Breakwaters.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 ESTRUTURAS DE DEFESA COSTEIRA	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. SOLUÇÕES DE DEFESA COSTEIRA	5
2.3. QUEBRAMARES DESTACADOS.....	9
2.3.1. PERFIL E MATERIAIS	9
2.3.2. PARÂMETROS FUNCIONAIS	10
2.3.3. FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO.....	11
2.3.4. IMPACTES	12
3 METODOLOGIAS APLICADAS	15
3.1. INTRODUÇÃO	15
3.2. MODELO SWAN	15
3.2.1. EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA.....	16
3.2.2. TERMOS DE PROPAGAÇÃO	17
3.2.3. INTERAÇÃO NÃO LINEAR DAS ONDAS.....	18
3.2.4. DISSIPAÇÃO DE ENERGIA.....	20
3.2.5. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA	22
3.2.6. PROCEDIMENTOS DE PRÉ E PÓS PROCESSAMENTO	23
3.3. CÁLCULO DO GALGAMENTO.....	25
3.3.1. INTRODUÇÃO.....	25
3.3.2. CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO DE GALGAMENTO E ESPRAIAMENTO	26
3.4. FÓRMULAS EMPÍRICAS.....	27
3.4.1. FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DO GALGAMENTO	27

3.4.2. PROPOSTA DE MASE ET AL.	28
3.5. MODELO SWASH.....	31
3.5.1. EQUAÇÕES BASE	32
3.5.2. INTEGRAÇÃO EM PROFUNDIDADE	33
3.5.3. FENÓMENOS FÍSICOS	34
3.5.4. CONDIÇÕES INICIAIS E DE FRONTEIRA	34
3.5.5. TEMPO COMPUTACIONAL, DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL	35
3.5.6. CONSERVAÇÃO DO MOMENTO.....	37
3.5.7. PARÂMETROS FÍSICOS	37
3.5.8. FICHEIROS DE INPUT E OUTPUT	37
3.6. FERRAMENTA NN_OVERTOPPING2	38
3.6.1. REDES NEURONAIS	38
3.6.2. NN_OVERTOPPING2	39
3.7. VALORES LIMITES DE GALGAMENTO, AVALIAÇÃO DO RISCO E ELABORAÇÃO DE MAPAS DE RISCO.....	40
3.7.1. VALORES DE GALGAMENTO ADESSÍVEIS	40
3.7.2. AVALIAÇÃO DO RISCO.....	42
4 CASO DE ESTUDO – PRAIA DO FURADOURO.....	45
4.1. INTRODUÇÃO	45
4.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	46
4.3. PROBLEMAS REGISTRADOS	48
4.4. MARGINAL.....	51
4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS MARÍTIMAS.....	57
4.5.1. ESTRUTURA LONGITUDINAL ADERENTE NORTE	57
4.5.2. ESPORÃO NORTE	61
4.5.3. ESTRUTURA LONGITUDINAL ADERENTE ENTRE ESPORÕES.....	64
4.5.4. ESPORÃO SUL.....	68
4.5.5. ESTRUTURA LONGITUDINAL ADERENTE SUL	70
4.6. APLICAÇÃO DO MODELO SWAN	72
4.6.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	72
4.6.2. BATIMETRIA E MALHA COMPUTACIONAL.....	76
4.6.3. PONTOS OUTPUT E FICHEIROS INPUT	80
4.6.4. CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS SIMULAÇÕES	81

4.6.5. ANÁLISE DE RESULTADOS	81
4.6.6. COMPARAÇÃO DOS DADOS DA BÓIA COM O PONTO S5	84
4.7. APLICAÇÃO DE FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA CÁLCULO DO GALGAMENTO.....	86
4.7.1. PROGRAMA FORTRAN	86
4.7.2. APLICAÇÃO DO PROGRAMA	88
4.7.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DA APLICAÇÃO DAS FÓRMULAS DE MASE	90
4.8. APLICAÇÃO DA REDE NEURONAL NN_OVERTOPPING2	93
4.8.1. DADOS DE INPUT	93
4.8.2. EXECUÇÃO DA REDE NEURONAL.....	95
4.8.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA REDE NEURONAL NN_OVERTOPPING2	95
4.9. APLICAÇÃO DO MODELO SWASH	97
4.9.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA	97
4.9.2. BATIMETRIA E MALHA COMPUTACIONAL	98
4.9.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA SIMULAÇÃO E FICHEIRO INPUT.....	99
4.9.4. OUTPUTS	100
4.9.5. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A SITUAÇÃO ATUAL	100
4.10. APLICAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO DE QUEBRAMAR DESTACADO	102
4.10.1. LOCALIZAÇÃO E GEOMETRIA DO QUEBRAMAR	102
4.10.2. APLICAÇÃO DO MODELO SWASH	103
4.10.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DE GALGAMENTOS COM A CONSTRUÇÃO DE UM QUEBRAMAR DESTACADO ..	104
4.11. CÁLCULO DO RISCO E CRIAÇÃO DE MAPAS DE RISCO	106
4.11.1. VALORES ADMISSÍVEIS DE GALGAMENTO E PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA	106
4.11.2. AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS.....	110
4.11.3. CÁLCULO DO GRAU DE RISCO E OBTENÇÃO DE MAPAS DE RISCO.....	110
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	117
5.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS	117
5.2. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
ANEXO A - EXEMPLO DE UM FICHEIRO INPUT DO SWAN PARA A MAIN GRID.....	129
ANEXO B – GRÁFICOS DA APLICAÇÃO DAS FÓRMULAS EMPÍRICAS DE MASE	131
ANEXO C - FICHEIRO INPUT DO SWASH.....	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Metodologia Utilizada	2
Figura 2.1 - Campo de esporões da Quarteira [1].	6
Figura 2.2 - Estrutura Aderente da Costa da Caparica [2].	7
Figura 2.3 - Estrutura Aderente com forma de “meia laranja” da Granja [3].	7
Figura 2.4 - Alimentação Artificial da praia Dona Ana, Algarve [4].	8
Figura 2.5 - Perfil transversal-tipo de um quebramar destacado (adaptado de Engineers (2002))	9
Figura 2.6 - Parâmetros físicos a dimensionar em perfil (Duarte, 2012).	10
Figura 2.7 - Parâmetros Físicos a dimensionar em planta.	11
Figura 2.8 - Esquema de difração das ondas num obstáculo (ilha, estrutura artificial, etc.) (Silvester e Hsu, 1997)	12
Figura 2.9 - Esquema da morfologia modificada de uma praia com a construção de quebra-mares destacados. ...	12
Figura 3.1 - Ilustração das várias grelhas que se podem usar no SWAN (Reis <i>et al.</i> , 2013).	16
Figura 3.2 - Termo fonte devido à interação não linear de três ondas, calculado para um espectro JONSWAP (adaptado de Holthuijsen 2007)	19
Figura 3.3 - Termo fonte devido à interação não linear de quatro ondas, calculado para um espectro JONSWAP (adaptado de Holthuijsen, 2007)	19
Figura 3.4 - Termo fonte devido à ação do atrito de fundo, calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen, 2007).	22
Figura 3.5 - Interface gráfica SOPRO.	24
Figura 3.6 - Espraçamento numa estrutura (Adaptado de Bay, 2005).	26
Figura 3.7 - Esquema da reformulação do declive imaginário (Mase <i>et al.</i> , 2013).	29
Figura 3.8 - Diagrama que relaciona a altura de rebentação com a declividade da onda ao largo (Mase <i>et al.</i> , 2013).	30
Figura 3.9 - Definição da malha vertical com K layers.	36
Figura 3.10 - Estrutura de uma rede neuronal (Cortez e Neves, 2000).	38
Figura 3.11 - Variáveis de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2 (Coeveld <i>et al.</i> , 2005)	39
Figura 4.1 – Visão Geral da praia do Furadouro [5].	45
Figura 4.2 - Estruturas da praia do Furadouro (adaptado do Google Maps)	46
Figura 4.3 - Palheiros na praia do Furadouro (1964) [6].	47
Figura 4.4 – Barco - Símbolo da comunidade piscatória [7].	47
Figura 4.5 - Praia a norte do esporão norte do Furadouro em 2006 e em Março de 2010 (indicação aproximada da arriba de erosão) (Veloso-Gomes, 2010).	49
Figura 4.6 - Praia do Furadouro, após ripagem das areias (Google Earth) (Ramos, 2012).	49
Figura 4.7 - Estragos na marginal da praia do Furadouro. [8] [9]	50

Figura 4.8 - Zonas de Inundação dos temporais de 2014 (Cedido pela Câmara de Ovar).	50
Figura 4.9 - Dunas e passadiços a norte.	51
Figura 4.10 – Largo invadido por areia.	52
Figura 4.11 - Estruturas de apoio a banhistas.	52
Figura 4.12 - Bar destruído.	53
Figura 4.13 - Muro norte.	53
Figura 4.14 - Largo Central.	54
Figura 4.15 - Posto de Turismo e Hotel (Google Maps).	54
Figura 4.16 – Habitações.	55
Figura 4.17 - Cafés e Restaurantes.	55
Figura 4.18 - Muro sul.	56
Figura 4.19 - Condomínio Fechado.	56
Figura 4.20 - Projeto zona sul (ARH Centro, 2009).	57
Figura 4.21 - Zona sul da praia do Furadouro.	57
Figura 4.22 - Coroamento da estrutura aderente norte.	58
Figura 4.23 - Enrocamento da estrutura aderente norte.	58
Figura 4.24 - Perfil da estrutura aderente norte (Adaptado Consulmar, 2010).	59
Figura 4.25 - Parte da estrutura aderente norte destruída.	59
Figura 4.26 - Talude da estrutura aderente norte.	60
Figura 4.27 - Erosão a sotamar do esporão norte.	60
Figura 4.28 - Maior acumulação de sedimentos a norte.	61
Figura 4.29 - Esporão norte.	61
Figura 4.30 - Coroamento do esporão norte.	62
Figura 4.31 - Pedras soltas na base do esporão norte.	62
Figura 4.32 - Rampa de acesso à praia.	63
Figura 4.33 - Planta do esporão norte (Levantamento Topográfico realizado pela ICSA em novembro de 2014).	63
Figura 4.34 - Coroamento da estrutura aderente central.	64
Figura 4.35 - Enrocamento da estrutura aderente central.	65
Figura 4.36 – Blocos no coroamento.	65
Figura 4.37 - Perfil transversal da estrutura aderente central (cedido pela Câmara de Ovar).	66
Figura 4.38 - Planta da estrutura aderente central (levantamento topográfico realizado pela ICSA em novembro de 2014).	66
Figura 4.39 - Visão geral da estrutura aderente central.	67

Figura 4.40 - Erosão a norte e presença de pedras soltas na base.....	67
Figura 4.41 - Acumulação de sedimentos a sul e enraizamento do esporão parcialmente soterrado.	68
Figura 4.42 - Coroamento do esporão sul.....	68
Figura 4.43 - Vista geral do esporão sul e estrutura aderente (Piqueiro, 2015).	69
Figura 4.44 - Enrocamento do esporão sul.	69
Figura 4.45 - Bom estado de conservação do esporão sul.	70
Figura 4.46 - Planta do esporão sul (levantamento topográfico realizado pela ICSA em novembro de 2014).	70
Figura 4.47 - Coroamento da estrutura aderente sul.....	71
Figura 4.48 - Vista geral da estrutura aderente sul.	71
Figura 4.49 - Planta da estrutura aderente sul (levantamento topográfico realizado pela ICSA em novembro de 2014).....	72
Figura 4.50 - Direção da agitação ao largo da praia do Furadouro.....	73
Figura 4.51 - Altura de onda significativa ao largo da praia do Furadouro.	73
Figura 4.52 - Período médio ao largo.	74
Figura 4.53 – Matriz das ocorrências das alturas de onda significativas e do período médio ao largo.	75
Figura 4.54 - Sistema de coordenadas militares [11].....	77
Figura 4.55 - Batimetria da zona em estudo.	78
Figura 4.56 - Malhas consideradas.	79
Figura 4.57 - Localização dos pontos output para a aplicação do SWAN.....	80
Figura 4.58 - Direção média ao largo (esquerda) e no ponto S1 (direita).....	82
Figura 4.59 - Comparação dos resultados da altura de onda significativa nos 4 pontos de <i>output</i>	83
Figura 4.60 - Comparação dos resultados do período médio nos 4 pontos de <i>output</i>	84
Figura 4.61 - Esquema de aplicação do programa FORTRAN	87
Figura 4.62 - Localização das estruturas consideradas (ArcMap 10).	89
Figura 4.63 - Caudal médio galgado, q (L/s/m), na estrutura 2, obtido pela aplicação das fórmulas de Mase.....	92
Figura 4.64 - Espraçamento máximo (m), para a estrutura 2 obtido pela aplicação das fórmulas de Mase.....	92
Figura 4.65 - Partes de uma estrutura costeira (adaptado de Coeveld <i>et al.</i> (2005)).	94
Figura 4.66 - Batimetria utilizada na aplicação do SWASH.	98
Figura 4.67 - Localização dos galgamentos para a situação atual.	101
Figura 4.68 - Localização do quebramar destacado considerado.	103
Figura 4.69 - Localização das ocorrências dos galgamentos para a situação com a construção de um quebramar destacado.	105
Figura 4.70 - Zonas de influência de cada estrutura para o cálculo do risco (ArcMap 10).	108
Figura 4.71 - Mapa de Risco para a aplicação das fórmulas de Mase (ArcMap 10).	111

Figura 4.72 - Mapa de Risco para a aplicação da rede neuronal NN_OVERTOPPING2 (ArcMap 10).....	112
Figura 4.73 - Mapa de Risco para a aplicação do SWASH para ambas as situações (ArcMap 10).....	114

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Condições dos ensaios físicos considerados.....	28
Tabela 3.2 - Fórmulas empíricas para o cálculo do espraiamento e galgamento (Mase <i>et al.</i> , 2013).....	31
Tabela 3.3 - Número de <i>layers</i> a utilizar em função de <i>kd</i> e erro associado (Team, 2016).	36
Tabela 3.4 - Valores admissíveis de caudal de galgamento para pessoas (adaptado de Pullen <i>et al.</i> (2007)) (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014).	40
Tabela 3.5 - Valores admissíveis de caudal médio de galgamento para navios, equipamento e edifícios (adaptado de Pullen <i>et al.</i> (2007)) (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014).	41
Tabela 3.6 - Valores admissíveis de caudal de galgamento para veículos (adaptado de Pullen <i>et al.</i> (2007)) (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014).	41
Tabela 3.7 - Valores admissíveis de caudal médio de <i>galgamento</i> para a estrutura (adaptado de Pullen <i>et al.</i> (2007)) (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014).	42
Tabela 3.8 - Graus de probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis (Poseiro <i>et al.</i> , 2013).....	42
Tabela 3.9 - Graus de Consequências (Santos <i>et al.</i> , 2011).....	43
Tabela 3.10 - Graus de risco: matriz de cruzamento do grau atribuído à Probabilidade de Ocorrência de um evento adverso e do grau atribuído às Consequências da ocorrência desse evento (Poseiro <i>et al.</i> , 2013)	44
Tabela 3.11 - Avaliação de aceitabilidade do grau de risco (Poseiro <i>et al.</i> , 2013).....	44
Tabela 4.1 - Análise estatística dos dados de agitação marítima ao largo.	75
Tabela 4.2 - Definição da batimetria.	77
Tabela 4.3 - Definições das Malhas.....	79
Tabela 4.4 - Pontos selecionados para obtenção dos resultados do modelo SWAN.	80
Tabela 4.5 - Análise estatística dos resultados obtidos nos pontos S1, S2, S3 e S4.	82
Tabela 4.6 - Comparação estatística dos registos da bóia de Leixões e dos resultados do ponto S5.	85
Tabela 4.7 - Parâmetros estatísticos para comparação dos registos da bóia com os resultados do ponto S5.	85
Tabela 4.8 - Coordenadas do coroamento das estruturas consideradas.	88
Tabela 4.9 - Dados de input do ficheiro “dados_condicoeslargo”.	89
Tabela 4.10 - Dados de input do ficheiro "estrutura".	90
Tabela 4.11 - Análise estatística do caudal galgado médio, q (L/s/m), obtido através das fórmulas empíricas de Mase.	90
Tabela 4.12 - Maiores registos de Galgamentos na aplicação das fórmulas de Mase	91
Tabela 4.13 - Parâmetros de <i>input</i> do NN_OVERTOPPING2 de cada estrutura.	95
Tabela 4.14 - Distribuição dos avisos da aplicação do NN_OVERTOPPING2.....	96
Tabela 4.15 - Análise estatística do caudal de galgamento, q (L/s/m), obtidos pela aplicação do NN_OVERTOPPING2.....	96
Tabela 4.16 - Análise estatística dos galgamentos, q (L/s/m), para a situação atual pela aplicação do SWASH.	100

Tabela 4.17 - Análise estatística dos galgamentos, q (L/s/m), para a situação com a construção de um quebra-mar destacado pela aplicação do SWASH.	104
Tabela 4.18 - Valores de caudal de galgamento admissível para as estruturas, q (L/s/m).	107
Tabela 4.19 - Probabilidade de ocorrência de galgamentos aplicando as fórmulas de Mase.	107
Tabela 4.20 - Probabilidade de Ocorrência de galgamentos aplicando a rede neuronal NN_OVERTOPPING2.	107
Tabela 4.21 - Probabilidade de ocorrência de galgamentos para a aplicação do SWASH para a situação atual.	109
Tabela 4.22 - Probabilidade de Ocorrência de galgamentos para a aplicação do SWASH com a construção de um quebra-mar destacado.	109
Tabela 4.23 - Grau de Consequências na praia do Furadouro.	110
Tabela 4.24 - Grau de Risco e aceitabilidade para a aplicação das fórmulas de Mase.	111
Tabela 4.25 - Grau de Risco e aceitabilidade com aplicação da rede neuronal NN_OVERTOPPING2.	112
Tabela 4.26 - Grau de Risco e aceitabilidade com a aplicação do SWAH para a situação atual.	113
Tabela 4.27 - Grau de Risco e aceitabilidade com a aplicação do SWAH com a construção de um quebra-mar destacado.	113

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c - Distância entre o nível médio da água e a cota da berma de coroamento da estrutura

B - Largura da berma da estrutura

B_r - Coeficiente relacionado com a rebentação

B_t - Largura da risberma da estrutura

c - Celeridade da onda

C_b - Coeficiente de atrito do fundo

C_{ds} - Coeficiente ajustável para o cálculo do coeficiente de declividade

C_g - Velocidade de grupo

C_r - Coeficiente de correção do galgamento; Número de Courant

c_x, c_y - Velocidades de propagação da onda no espaço

c_θ, c_σ - Velocidades de propagação da onda no espectro

d - Profundidade

D_{tot} - Taxa de dissipação total da onda

E - Energia de uma onda;

g - Aceleração da gravidade

G_c - Largura do coroamento da estrutura

h, ds - Altura de água no pé da estrutura

H_0 - Altura de onda significativa ao largo

h_b - Altura de rebentação da onda; profundidade na berma da estrutura

h_c - Altura de um quebra-mar destacado

h_k - Espessura das *layers*

$H_{m0,Toe}$ - Altura de onda significativa espectral no pé da estrutura

$H_{m\acute{a}x}$ - Altura máxima da onda

H_s - Altura da onda significativa

h_t - Profundidade na risberma da estrutura

k - Número de onda

k_m - Número de onda médio

L - Comprimento longitudinal de um quebra-mar destacado; Comprimento de onda

L_X - Afastamento dos quebra-mares num campo que quebra-mares

n - Coeficiente de Manning

N - Direção espectral da ação da onda

N_{PMAV} - Nível de maré correspondente à preia-mar de águas vivas

- q - Caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura
- Q^* - Caudal galgado adimensional
- Q_b - Parcela de ondas sujeita à rebentação
- Q_f - Caudal final corrigido
- $q_{n\%}$ - Quantil de ordem $n\%$ do caudal médio galgado
- R - Espraçamento medido na vertical
- R^* - Altura da estrutura submersa
- $R_{1/10}$ - Média do décimo mais alto dos Espraçamentos
- $R_{1/3}$ - Média do terço mais alto dos Espraçamentos
- R_c - Altura do bordo livre da estrutura
- $R_{máx}$ - Espraçamento máximo
- $R_{máx37\%,100}$ - Espraçamento máximo com maior probabilidade de ocorrência na incidência de 100 ondas
- $R_{máx99\%,100}$ - Espraçamento máximo não excedido em 99% dos casos na incidência de 100 ondas
- $R_{n\%}$ - Espraçamento excedido por $n\%$ de todos os espraçamentos
- S_{diss} - Representa os fenómenos físicos de dissipação da energia da onda
- $S_{ds,b}$ - Representa a dissipação da energia das ondas por atrito de fundo
- $S_{ds,w}$ - Representa a dissipação de energia das ondas por rebentação parcial
- S_{in} - Representa os fenómenos físicos de geração da energia da onda
- S_{nl} - Representa os fenómenos físicos de redistribuição da energia da onda
- T_0 - Período da onda ao largo
- $T_{m-1,0,T0e}$ - Período médio de onda espectral no pé do talude da estrutura, definido por $m-1/m_0$
- T_m - Período médio da onda
- T_{m01} - Período médio de onda espectral definido por m_0/m_1
- T_{m02} - Período médio de onda espectral definido por $(m_0/m_2)^{1/2}$
- T_p - Período de pico do espectro de períodos das ondas
- w_b - Velocidade na direcção z no fundo
- w_s - Velocidade na direcção z da superfície livre
- X - Distância de um quebramar destacado à costa
- Z_c - Cota de Coroamento de um quebramar destacado
- Z_F - Cota de Fundação de um quebramar destacado
- α_B - Ângulo que a berma faz com a horizontal
- α_d - Ângulo que o talude imediatamente abaixo da berma faz com a horizontal
- α_u - Ângulo que o talude imediatamente acima da berma faz com a horizontal

β - Ângulo do declive imaginário; direção da propagação da agitação em relação à normal da estrutura

Γ - Coeficiente de declividade

γ - Parâmetro de rebentação

γ_f - Parâmetro indicativo da rugosidade e permeabilidade da estrutura

σ_m - Frequência média

ω - Frequência angular da onda

ζ - Elevação da superfície da água

θ - Direção da agitação

θ_m - Direção média de propagação das ondas

θ_p - Direção de pico do espectro de direções de propagação das ondas

σ - Frequência relativa

τ - Termo relativo à turbulência

LISTA DE ABREVIATURAS

ARH-Centro – Administração da Região Hidrográfica do Centro (atualmente englobado na Agência Portuguesa do Ambiente)

BDF – Backward Differentiation Formula

BSBT – Backward Space, Backward Time

CFL – Courant-Fredrichs-Levy

DIA – Discrete Interaction Approximation

DTA – Discrete Triad Aproximation

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FORTTRAN – IBM Mathematical FORMula TRANslation System

ICSA – Irmãos Cavaco S.A.

JONSWAP – Joint North Sea Wave Project

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LTA - Lumped Triad Aproximation

ME – Mean error ou valor médio do erro

NN_OVERTOPPING2 – Overtopping Neural Network

RMA – Mean Absolute Error ou Erro Médio Absoluto

RMSE – Root Mean Square Error ou Raiz do Erro Médio Quadrático

SI – Scatter Index ou Índice de Dispersão

SOPRO – Sistema Operacional de Previsão da Ondulação em Portos

SORDUP – Second ORDER Upwind

SWAN – Simulating Waves Nearshore

SWASH – Simulating Waves till Shore

T.O.T. – Material de Todo o Tamanho

TAW – Technical Advisory Committee on Flood Defence

TUDELft – Delft University of Technology

TVD – Total Variation Diminishing

WRT – Webb-Resio-Tracy

Z.H. – Zero Hidrográfico

1 INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

O litoral apresenta um grande interesse do ponto de vista económico, turístico, de lazer, comercial, entre outros. Isto trouxe um desenvolvimento muito significativo nas zonas costeiras aumentando a ocupação humana através da construção de habitações e comércio cada vez mais próximas da linha de costa, provocando uma elevada pressão urbana.

Portugal apresenta um regime de agitação marítima muito energético e tem-se verificado um avanço do mar em direção à terra e um avanço urbano em sentido contrário, levando a uma situação crítica. Devido à grande pressão social para o aproveitamento destas zonas, a retirada populacional é uma solução que não se considera possível de aplicar em muitos casos, tornando-se então necessária a defesa das zonas costeiras através de obras de engenharia. Surgem então as obras de defesa costeira como os esporões, as defesas aderentes e os quebra-mares, necessários para garantir a segurança de bens e populações. No entanto, a construção destas estruturas pode trazer problemas para as zonas adjacentes através da redução crescente do caudal sedimentar transportado, levando à necessidade de construção de mais estruturas o que leva a uma artificialização cada vez maior da costa.

As obras de proteção são dimensionadas considerando a possibilidade de ocorrerem galgamentos, i.e., a passagem de água sobre o coroamento, mas apenas com valores admissíveis que não materializem estragos e perigo nas zonas protegidas. Mas, tem-se verificado em diversas zonas da costa que algumas estruturas não são eficazes na proteção contra galgamentos e tal pode acontecer por diferentes motivos, nomeadamente devido a um dimensionamento que não foi bem efetuado ou uma subavaliação das condições de agitação incidente. Também a subida do nível médio da água do mar traz problemas acrescidos à eficácia das estruturas na defesa das populações. Os galgamentos podem trazer estragos elevados sendo por isso de grande interesse a sua redução e previsão.

Na praia do Furadouro há registos de galgamentos desde o século XIX, pelo que devido também à erosão foram construídos esporões e estruturas de defesa aderente. As estruturas sofreram diversas alterações ao longo dos anos, sendo necessária por diversas vezes a sua reconstrução devido aos elevados estragos provocados pela agitação marítima. As estruturas atuais, 2 esporões e 3 estruturas de defesa aderente, mostram-se insuficientes na proteção da zona, tendo-se verificado na última década uma crescente ocorrência de galgamentos com elevada magnitude, provocando elevados estragos no edificado e nas próprias estruturas, sendo necessárias soluções que tragam maior segurança e fiabilidade.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Esta dissertação tem como objetivo avaliar o risco de galgamentos na zona da praia do Furadouro, estudando-se a ocorrência de galgamentos nessa praia com as atuais estruturas de defesa (situação atual) e depois considerando a construção de uma solução de um quebramar destacado. Esta dissertação é complementar da dissertação “Estudo de uma Obra de Proteção Costeira Destacada para a Frente Urbana do Furadouro” realizada em 2015 pela Joana Amélia Pires Almeida e Castro da FEUP, pelo que a solução utilizada será uma das propostas aplicadas nesta dissertação.

Nesse sentido, a aplicação da metodologia de avaliação de risco de galgamento à praia do Furadouro foi efetuada e consistiu basicamente em, Figura 1.1:

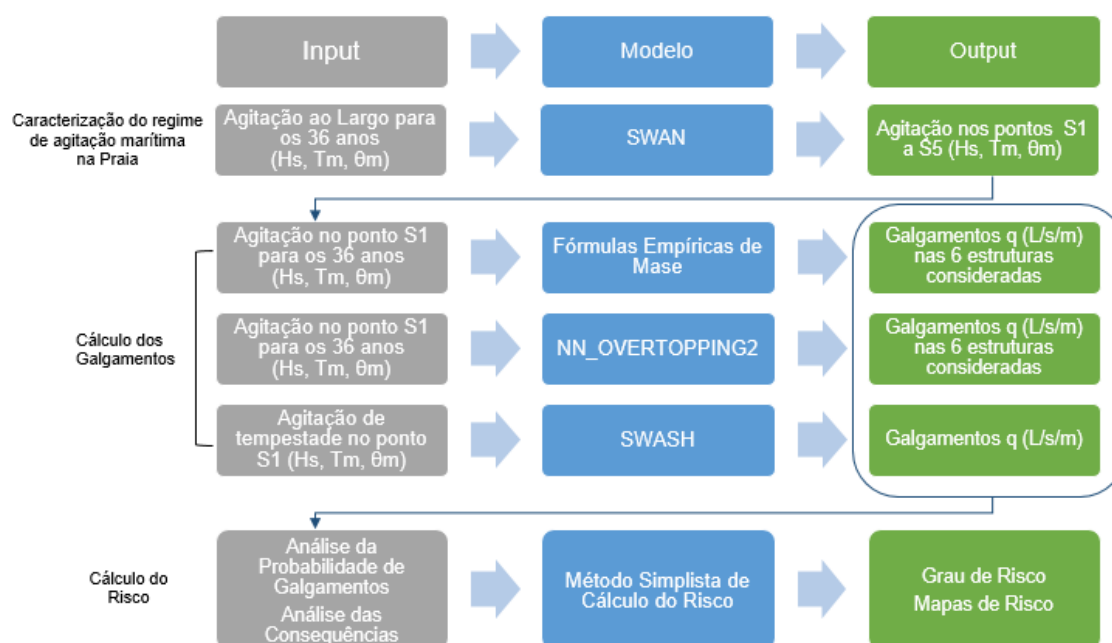


Figura 1.1 - Metodologia Utilizada

- Caracterização da agitação marítima em frente à praia do Furadouro - de forma a realizar o estudo dos galgamentos no caso de estudo, foi inicialmente realizada a propagação dos dados de agitação marítima ao largo para uma zona mais próxima da costa, tendo esta sido realizada através do modelo SWAN (Team, 2007). Efetuou-se a transferência de estimativas da agitação marítima ao Largo, correspondentes ao período de 1 de outubro de 1979 até 31 de agosto de 2015 (36 anos de dados), com intervalo de 6 em 6 horas (perfazendo 52476 condições de agitação marítima), para junto à costa, i.e., para 4 pontos, a -10 m, -20 m, -40 m e -50 m Z.H. (S1 a S4) e ainda um ponto coincidente com a bóia ondógrafo de Leixões (S5). Este último ponto serviu para se efetuar a comparação dos valores de agitação marítima obtidos com o modelo e os registados na bóia;
- Avaliação dos galgamentos - a avaliação dos galgamentos foi realizada com 3 metodologias: fórmulas empíricas (Mase *et al.*, 2013), a rede neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) e o modelo numérico SWASH (Zijlema *et al.*, 2011), para a situação atual e unicamente com o modelo SWASH para a situação com uma estrutura de defesa costeira. Para

aplicação das metodologias, foram consideradas 6 estruturas ao longo da zona de estudo, duas a barlar do esporão norte, três na zona central entre os esporões e uma a sotamar do esporão sul, como representativas do local de estudo:

- Para a situação atual e com as duas primeiras metodologias, foram utilizados os valores da agitação marítima obtidos pelo SWAN para os 36 anos, e as características das 6 estruturas selecionadas ao longo da praia do Furadouro. Obtiveram-se, assim, os valores de galgamento em cada uma dessas estruturas para os 36 anos de valores de agitação marítima obtidos em S1. Para aplicação do SWASH, tendo este um elevado tempo computacional em comparação com os outros métodos, foi necessário selecionar uma condição de agitação de tempestade em S1, e somente para essa condição foram efetuados os cálculos numéricos para obtenção dos galgamentos nas estruturas marítimas selecionadas;
- Para a situação com uma estrutura de defesa costeira, apenas se aplicou o modelo numérico SWASH, pois permite ter em conta as alterações das condições de agitação marítima pela presença de um quebra-mar destacado, o que não é possível pelas fórmulas empíricas e pela rede neuronal. Tal como para o estudo da situação atual com o SWASH, também para esta situação foi apenas considerada uma condição de tempestade em S1.
- Avaliação do risco - foi realizada a avaliação e a elaboração de mapas de risco através de um método simplista desenvolvido no LNEC (Reis *et al.*, 2011, Santos *et al.*, 2011, Poseiro, 2013), permitindo assim uma melhor avaliação das zonas mais críticas e ainda uma comparação dos resultados obtidos com cada metodologia utilizada. Para o cálculo do risco foi necessário definir os valores de galgamento admissíveis (de acordo com as recomendações de Pullen *et al.* (2007)) para cada estrutura com base nas atividades que se desenvolvem na zona em estudo e do tipo de estrutura galgada, calcular as probabilidades de ocorrência de galgamentos acima dos limites predeterminados e qualificar as consequências na ocorrência de galgamentos. Com os resultados de galgamentos obtidos com a rede neuronal NN_OVERTOPPING2 e com as fórmulas empíricas de Mase, foram obtidos os mapas de risco para cada estrutura considerada na praia do Furadouro. No caso dos resultados de galgamento com o modelo SWASH, foram consideradas áreas próximas de cada estrutura, sendo realizado o cálculo do risco para estas áreas, e não para um ponto específico.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos. Inicia-se com o capítulo de introdução onde é realizada a contextualização do problema em estudo e a descrição dos objetivos e metodologias aplicadas no trabalho.

No capítulo 2 é realizada uma descrição das diversas soluções de defesa costeira com maior incidência na utilizada nesta dissertação, os quebra-mares destacados, mencionando os principais parâmetros de dimensionamento e impactes da sua construção.

No capítulo 3 são apresentadas as metodologias utilizadas, fazendo-se primeiramente uma descrição sucinta do fenómeno de galgamento, em geral. Neste capítulo, são especificadas as equações, os fenómenos físicos, as vantagens e as desvantagens da utilização de cada modelo/metodologia.

No capítulo 4 é feita uma descrição pormenorizada do local de estudo, marginal e estruturas e a sua evolução histórica. Neste capítulo é descrita a aplicação prática dos modelos de propagação e das metodologias utilizadas para o cálculo do galgamento, explicando todas as considerações efetuadas, *inputs* e *outputs* de cada modelo, bem como se efetua a apresentação e análise dos resultados obtidos. Por fim, é calculado o grau de risco e apresentados os mapas de risco.

No último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização desta dissertação, bem como algumas propostas para trabalhos futuros, de forma a melhorar ou complementar o já realizado.

2

ESTRUTURAS DE DEFESA COSTEIRA

2.1. INTRODUÇÃO

As zonas costeiras são de grande importância, particularmente em Portugal que apresenta uma grande extensão da faixa litoral. Do ponto de vista turístico, as praias constituem um grande atrativo, traduzindo-se numa elevada afluência no verão por parte de turistas, levando a um desenvolvimento do comércio. É, por isso, importante a manutenção das praias e do litoral, em geral, com qualidade, segurança e extensão suficiente para a prática balnear. Também a existência de vilas piscatórias aumenta a importância e a necessidade de uma faixa costeira cuidada.

Tem-se verificado uma regressão ou recuo da linha de costa generalizada nas praias de Portugal Continental, agravando-se os fenómenos de erosão. As causas mais recentes são associáveis ao enfraquecimento das fontes aluvionares (alterações ao nível das bacias hidrográficas, albufeiras e barragens, extrações de areias nos rios e estuários, e dragagens nos canais de navegação), à ocupação humana (sobre dunas, praias e arribas), à construção de quebra-mares portuários (Viana do Castelo, Aveiro, Figueira da Foz e Vila Moura), à implantação de esporões e de obras aderentes e à fragilização de dunas (terraplanagens, pisoteio, acessos às praias, parques de estacionamento, veículos motorizados e “cortes” de acesso para a arte xávega) (Veloso-Gomes, 2007).

A erosão verificada contribui também para a ocorrência de galgamentos, levando à destruição do edificado, que se tem verificado em diversos locais de Portugal. A construção de diversas estruturas de defesa costeira em Portugal pode de certa forma mitigar estes problemas. No entanto, a construção de uma estrutura nunca constitui uma solução definitiva, sendo necessária uma manutenção e acompanhamento. Se bem realizadas, apesar de colmatarem o problema no local onde se inserem, estas estruturas podem trazer problemas acrescidos para locais próximos, não havendo por isso uma solução ótima.

2.2. SOLUÇÕES DE DEFESA COSTEIRA

Como anteriormente referido existem diversas soluções possíveis de estruturas de defesa costeira, dependendo a sua utilização de diversos fatores como o clima de agitação marítima e o regime de marés, a intensidade das dinâmicas sedimentares locais, a topo-hidrografia, a geotecnia, os objetivos de defesa, a extensão dos problemas verificados, entre outros. As obras de proteção costeira são utilizadas mundialmente para proteção de praias, portos, entre outros. Os principais tipos são: estruturas transversais (esporões), longitudinais (aderentes ou destacados), alimentação artificial, sistemas dunares e soluções mistas (Veloso-Gomes, 2015).

Os esporões são as obras de defesa mais utilizadas em Portugal, apresentando um perfil aproximadamente perpendicular à costa, estando nela enraizada. Atualmente estudam-se e implementam-se esporões com diferentes formas em planta, por exemplo em T ou L, mas os mais comuns são os retilíneos. Estes permitem uma acreção de sedimentos a barlar, aumentando assim a área de praia. No entanto, visto que o esporão provoca uma interrupção do transporte sólido longitudinal, verifica-se frequentemente a sotamar do mesmo uma elevada erosão, levando por vezes à construção de outro esporão a sul (caso de Portugal com agitação predominante de noroeste), de forma a mitigar o problema agravado pela construção do primeiro esporão, formando-se assim um campo de esporões, quando a zona a proteger é muito extensa, Figura 2.1.



Figura 2.1 - Campo de esporões da Quarteira [1].

Para o bom funcionamento dos esporões, é necessário que exista um transporte longitudinal elevado e constante. Os esporões têm um perfil trapezoidal e podem ser realizados em diversos materiais, sendo o enrocamento o mais frequentemente utilizado.

As estruturas longitudinais aderentes são frequentemente associadas aos esporões de forma a reduzir as consequências da erosão a sotamar, Figura 2.2. Estas são realizadas “enraizadas” na costa e paralelas à mesma e têm como principal objetivo a fixação da linha de costa travando os avanços do mar, protegendo os arruamentos e o edificado. Estas estruturas não promovem a fixação de sedimentos, tendo apenas a função de proteger a costa, sem haver recuperação da praia. A dissipação de energia é realizada através do seu talude que pode adotar diferentes inclinações e formas, podendo mesmo ser vertical.



Figura 2.2 - Estrutura Aderente da Costa da Caparica [2].

Existe uma grande variedade de materiais que podem ser utilizados conforme o objetivo pretendido, os eventuais impactes ambientais e visuais e ainda a severidade da agitação marítima atuante, sendo os mais comuns o enrocamento e os blocos em betão. Na Figura 2.2 é visível uma estrutura aderente típica com um talude em enrocamento, situada na Costa da Caparica e na Figura 2.3, uma estrutura longitudinal aderente construída na Granja, que apresenta uma forma pouco comum para estas estruturas, uma “meia laranja” feita em betão e fundada em rocha, o que lhe garante uma grande durabilidade. O talude inferior em escada, confere uma elevada rugosidade, diminuindo o espraçamento e consequentemente os galgamentos.



Figura 2.3 - Estrutura Aderente com forma de “meia laranja” da Granja [3].

A alimentação artificial de uma praia, Figura 2.4, pode ser definida como uma “colocação, por meios artificiais, de materiais arenosos em locais imersos ou emersos, adequados à obtenção de um determinado perfil de praia (ou mesmo de duna) favorável à dissipação de energia das ondas e a uso balnear, simulando situações naturais” (Veloso-Gomes, 1991).



Figura 2.4 - Alimentação Artificial da praia Dona Ana, Algarve [4].

A utilização deste método requer um estudo aprofundado, de forma a garantir que não há um rápido desaparecimento dos sedimentos repostos e deverá ser acompanhada por outras operações que garantam a sua fixação (esporões, por exemplo).

Para além dos benefícios “técnicos”, as alimentações artificiais apresentam benefícios económicos claros, nomeadamente uma proteção “imediata” dos bens ao longo da linha da costa (ao contrário de muitas estruturas de defesa costeira dita “pesada”) e, ao aumentar a largura emersa do perfil transversal, aumenta também o potencial de ocupação da praia e, conseqüentemente, o seu potencial de exploração turística/rentabilização económica (Martins e Veloso-Gomes, 2012).

A reconstrução de sistemas dunares destruídos por tempestades severas inclui a colocação de plantas de forma a reter a areia transportada pelo vento (Engineers, 2002).

Existe ainda a possibilidade de utilização de soluções mistas, que compreendem a utilização de duas soluções conjuntas.

As obras longitudinais destacadas, ou quebramares destacados, são a solução adotada nesta dissertação para a proteção da zona de estudo, sendo por isso abordadas de forma mais aprofundada nas próximas seções.

2.3. QUEBRAMARES DESTACADOS

Os quebramares destacados são estruturas de defesa longitudinal, sensivelmente paralelos à costa e não enraizados nesta. Têm como principal objetivo a proteção da linha da costa ao formarem uma zona de abrigo da agitação marítima a sotamar do mesmo permitindo a acumulação de sedimentos e, conseqüentemente, o aumento do perímetro de praia. Estas estruturas foram inspiradas nos recifes, estruturas naturais em corais, existentes em alguns locais do mundo. Estas estruturas podem ser submersas ou emersas, os segundos apresentam um menor impacto visual, no entanto, os primeiros traduzem grandes riscos para a navegação e para os surfistas (Engineers, 2002) .

2.3.1. PERFIL E MATERIAIS

Os quebramares destacados são geralmente mais pequenos e menos extensos do que os quebramares de taludes, mas apresentam um perfil trapezoidal semelhante, Figura 2.5. De forma análoga aos esporões, podem realizar-se múltiplas estruturas, formando um campo de quebramares. Apresentam elementos com diferentes funções e características, garantindo resistência à agitação marítima.

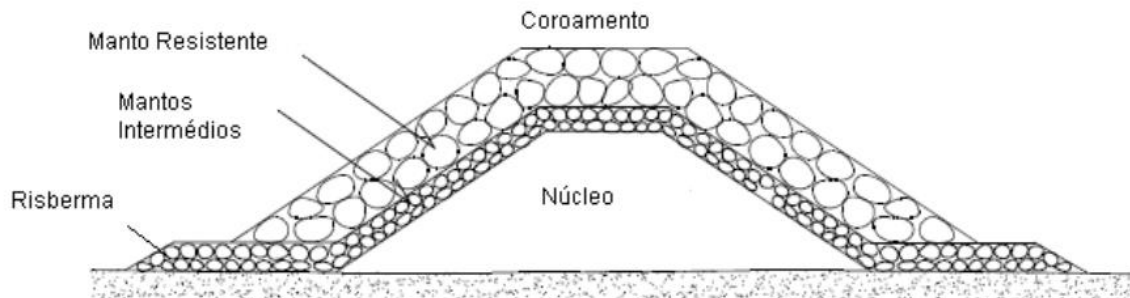


Figura 2.5 - Perfil transversal-tipo de um quebramar destacado (adaptado de Engineers (2002))

Os principais elementos constituintes de um quebramar destacado são:

- **Manto Resistente** – camada que está diretamente exposta à agitação marítima. Geralmente é constituído por duas fiadas de blocos, sendo estes em enrocamento ou blocos de betão. É normalmente bastante poroso, contribuindo para uma maior dissipação da energia das ondas. A utilização de enrocamento tem vantagens do ponto de vista dos impactos visuais e ambientais, podendo ocorrer a fixação de fauna e flora, levando a um aspeto mais natural e com menor impacto paisagístico;
- **Filtros ou mantos intermédios** – camadas intermédias entre o manto resistente e o núcleo, que podem ter várias fiadas e em que a sua granulometria e porosidade vai diminuindo em direção ao núcleo. A sua principal função é o impedimento da saída de material do núcleo devido às pressões negativas. As dimensões dos seus blocos são inferiores aos utilizados no manto resistente, desta forma é possível a utilização de enrocamento;
- **Filtro geotêxtil** – é uma camada de geotêxtil, por vezes, aplicada entre os filtros e o núcleo, com a função de evitar a saída do material do núcleo;
- **Núcleo** – zona interior do quebramar, com a função de estabilização do mesmo. Normalmente é constituído por enrocamento de granulometria variada, T.O.T (Todo o Tamanho);

- Risberma – prisma de fundação localizado na base da estrutura, de forma a reduzir a ocorrência de infraescavações, aumentando a segurança e a estabilidade da estrutura. É normalmente constituído por enrocamento semelhante ao utilizado nos mantos intermédios.

2.3.2. PARÂMETROS FUNCIONAIS

Para o dimensionamento de um quebramar destacado, é necessário ter conhecimento das principais características do local de implantação, entre elas, a batimetria, o regime de agitação, a amplitude da maré, a direção e intensidade dos ventos, as características sedimentares do local e as características geológicas e geotécnicas dos fundos. Deverão então ser estudados estes fatores e obter-se os parâmetros físicos do quebramar a implementar. Na Figura 2.6 e Figura 2.7 estão representados os parâmetros físicos que definem a estrutura:

- Comprimento longitudinal, L ;
- Distância e alinhamento em relação à costa, X ;
- Cota de coroamento, Z_C ;
- Largura do coroamento, b ;
- Ângulos dos taludes;
- Cota da fundação, Z_F ;
- Afastamento dos quebramares, caso seja um campo de quebramares, L_X .

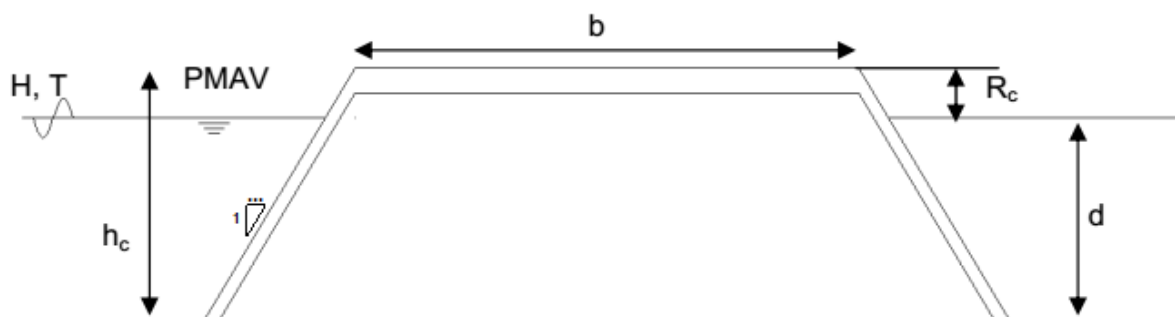


Figura 2.6 - Parâmetros físicos a dimensionar em perfil (Duarte, 2012).

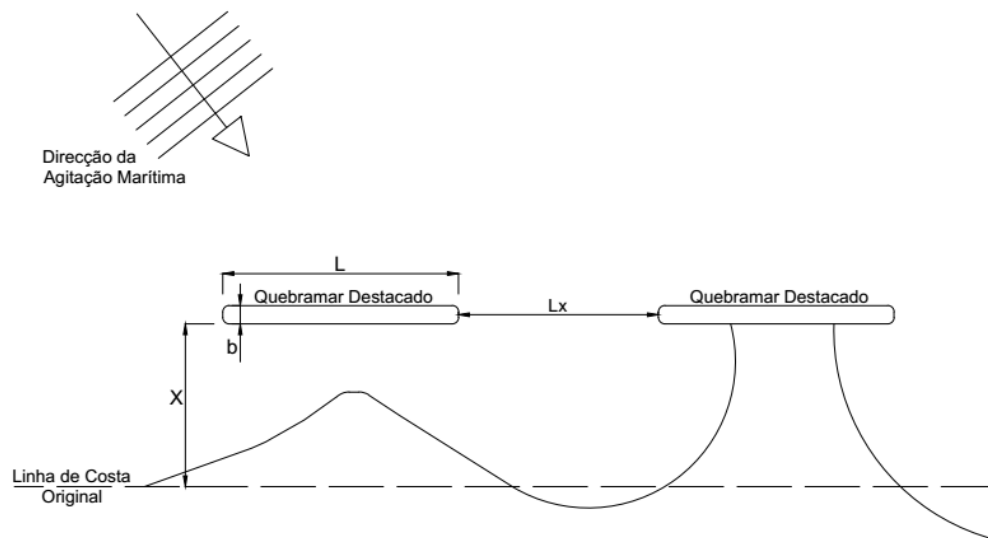


Figura 2.7 - Parâmetros Físicos a dimensionar em planta.

Para a definição da cota do coroamento é necessário ter em consideração a altura do bordo livre da estrutura, R_c , e o coeficiente de transmissão, dois parâmetros interligados que definirão a maior ou menor dissipação de energia provocada pelo quebramar e consequentemente o galgamento.

O R_c , é definido pela diferença entre a altura do quebramar e o nível de maré correspondente à preia mar de águas vivas, $N_{PM\Delta V}$, adotando um valor positivo para estruturas emersas e negativo para estruturas submersas. Deverá ser utilizada uma solução de quebramares submersos em zonas de agitação pouco energética.

É ainda necessário ter em consideração os impactes paisagísticos que a adoção de elevadas cotas de coroamento pode traduzir, bem como a possibilidade de estagnação das águas, fenómeno relacionado com o coeficiente de transmissão.

O coeficiente de transmissão, k_t , pode ser definido pela relação entre a energia da onda transmitida e a energia incidente $k_t = \sqrt{E_t/E_i}$. Desta forma, verifica-se que, quanto menor for o coeficiente de transmissão, menor será a energia da onda a sotamar da estrutura, o que pode levar a dificuldade na renovação da água.

2.3.3. FUNCIONAMENTO HIDRÁULICO

Um quebramar destacado comporta-se como uma barreira física à propagação da agitação marítima, ocorrendo fenómenos como a difração e a refração, entre outros, que levam à dissipação de energia e a um reajustamento do fundo através da deposição e transporte de sedimentos para as zonas de menor energia a sotamar do quebramar, através das correntes de difração, que se propagam desde o quebramar até à costa, Figura 2.8. Há assim um aumento do perímetro de praia e a criação de uma zona de menor agitação, fatores favoráveis para a prática balnear. É, no entanto, necessário assegurar que há renovação das águas na zona protegida, de modo a evitar a perda de qualidade das águas devido à sua estagnação.

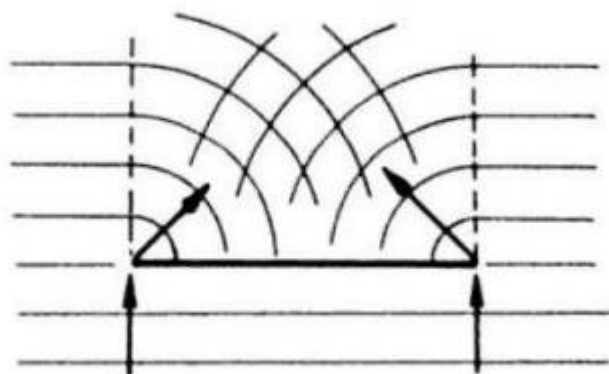


Figura 2.8 - Esquema de difração das ondas num obstáculo (ilha, estrutura artificial, etc.) (Silvester e Hsu, 1997) .

A acumulação de sedimentos pode tomar duas formas, designando-se uma saliência se ocorrer um prolongamento da praia na zona protegida, e tómbolo se ocorrer também prolongamento, mas que atinge a estrutura. Num sistema de quebramares podem ocorrer ambos os fenómenos e verifica-se ainda a possibilidade de ocorrência de duplas saliências, Figura 2.9.

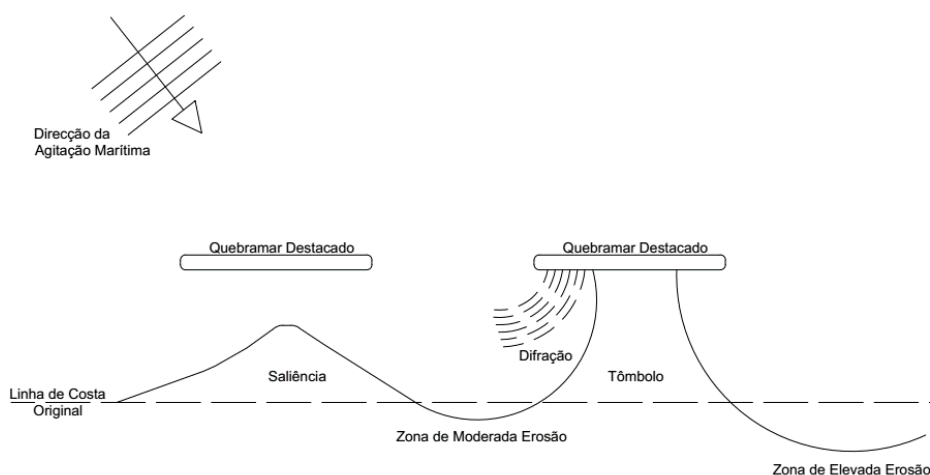


Figura 2.9 - Esquema da morfologia modificada de uma praia com a construção de quebramares destacados.

A maior ou menor tendência para a acumulação de sedimentos está relacionada com o comprimento do quebramar, da distância do mesmo à costa, da cota de coroamento e da declividade da onda.

A ocorrência de tómbolos pode trazer efeitos nefastos, pois irá provocar uma redução do transporte sedimentar longitudinal, levando à ocorrência de erosão a sul do mesmo (situação de Portugal Continental).

2.3.4. IMPACTES

Do ponto de vista hidrodinâmico, a construção destas estruturas irá provocar alterações nas correntes e na agitação marítima, que podem levar à ocorrência de locais de perigo do ponto de vista balnear que anteriormente não se verificavam. A redução da energia a sotamar poderá levar à ocorrência de

estagnação das águas, promovendo mudanças nos habitats, provocando a perda de zooplâncton e fitoplâncton e o aparecimento de novas espécies como algas, que diminuem a qualidade das águas.

De forma a evitar a estagnação da água, deverá contemplar-se a existência de aberturas entre os vários segmentos, fazendo um campo de quebra-mares. No entanto, estas aberturas irão originar correntes de retorno no local. Para quebra-mares submersos este problema não se verifica, viabilizando a construção de estruturas mais alongadas (Taveira-Pinto e Neves, 2003).

Do ponto de vista paisagístico, é de salientar o impacto negativo que os quebra-mares emersos podem ter, uma vez que condicionam a linha de horizonte, o que é algo pouco apreciado do ponto de vista balnear.

Ao nível sedimentar, os quebra-mares podem ter um impacto positivo na zona que protegem pois garantem a acumulação de sedimentos e o aumento da zona balnear. No entanto, estas estruturas podem trazer problemas para outros locais adjacentes podendo provocar erosão onde inicialmente não se verificava, Figura 2.9, devido à diminuição do transporte sedimentar que se verifica com a acreção de sedimentos a sotamar da estrutura.

Socioeconomicamente, a construção do quebra-mar será bastante positiva, pois irá aumentar a qualidade balnear da zona apesar do impacto paisagístico, traduzindo-se numa maior afluência de turistas. Também a segurança da frente urbana protegida pelo quebra-mar será aumentada, uma vez que a agitação marítima será inferior, diminuindo assim o risco de galgamento nestes locais, levando a uma maior segurança.

A construção destas estruturas tem um custo elevado devido à quantidade de material necessário e à localização do quebra-mar, devendo-se optar por uma construção por terra ou por mar, conforme o mais apropriado, e à necessidade de manutenção devido à ocorrência de assentamentos. A construção está ainda dependente das marés e da agitação marítima, dificultando a planificação correta da obra, podendo ter prazos de execução mais elevados (Duarte, 2012).

3

METODOLOGIAS APLICADAS

3.1. INTRODUÇÃO

Nas diferentes fases da aplicação da metodologia descrita em secção 1.2, são utilizadas várias metodologias, nomeadamente:

- Caracterização da agitação marítima – utilizou-se o modelo numérico SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) para a transferência e propagação do regime de agitação ao largo para a costa (até à batimétrica dos -10 m Z.H.), na praia em estudo
- Avaliação do galgamento - Utilizaram-se fórmulas empíricas, a rede neuronal NN_OVERTOPPING2 e o modelo numérico SWASH para a avaliação do galgamento.

Nas secções seguintes, apresenta-se uma descrição breve das várias metodologias utilizadas.

3.2. MODELO SWAN

O SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), foi desenvolvido na TUDelft (*Delft University of Technology*), Holanda (Booij *et al.*, 1999, SWAN Team, 2008), e consiste num modelo numérico de terceira geração de estimativa dos parâmetros caracterizadores de agitação marítima em zonas costeiras e baseia-se na equação de conservação da ação da onda. A descrição abaixo foi baseada no manual do SWAN (Team, 2007), Holthuijsen (2007) e Reis *et al.* (2013).

O modelo SWAN propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refração, difração e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido à rugosidade do fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

A propagação da agitação é realizada com a utilização de esquemas numéricos implícitos nos espaços espectral e geográfico e pode ser realizada em modo estacionário ou não estacionário. É necessário fornecer ao modelo uma grelha batimétrica e uma grelha computacional - que poderão ser descritas em coordenadas cartesianas ou esféricas – juntamente com condições fronteira e outros parâmetros de cálculo. Poderão ainda ser introduzidos outros tipos de dados para melhorar a modelação, tais como, um campo de ventos e correntes. Campos estes que poderão ser variáveis no espaço e/ou no tempo. Na Figura 3.1 encontra-se um esquema com as múltiplas grelhas passíveis de serem utilizadas no modelo SWAN.

Pode ser utilizado um sistema de malhas encaixadas, em que as malhas maiores e exteriores, de menor resolução, servem de condição fronteira para as malhas menores e interiores, fazendo com que os resultados obtidos na malha inferior sejam mais precisos reduzindo o tempo de computação, quando comparado com uma simulação de apenas uma malha de alta resolução em todo o domínio (Reis *et al.*, 2013).

O SWAN é então capaz de fornecer múltiplos parâmetros referentes à agitação da superfície livre, em qualquer ponto do domínio de estudo, Figura 3.1.

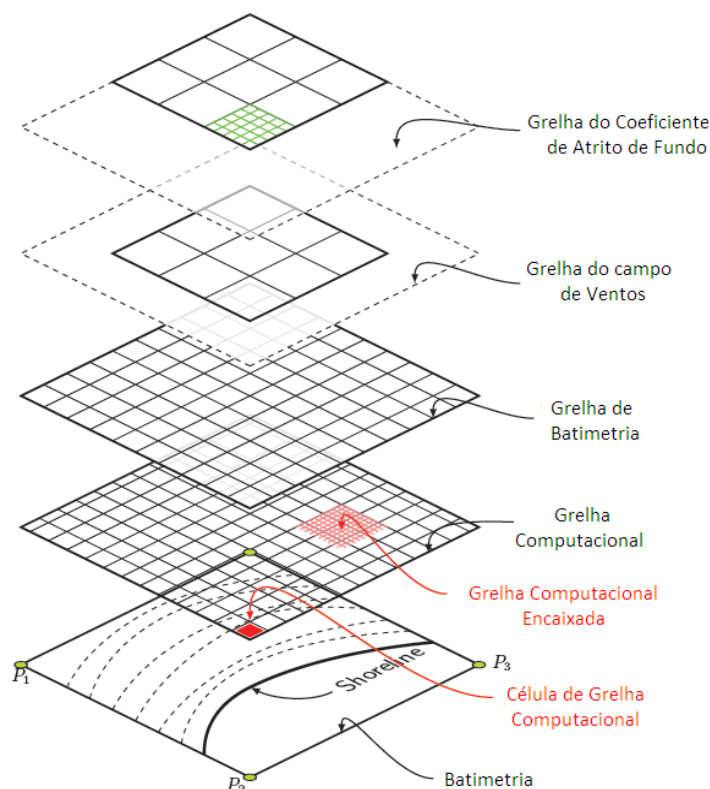


Figura 3.1 - Ilustração das várias grelhas que se podem usar no SWAN (Reis *et al.*, 2013).

Os resultados do SWAN em cada ponto do domínio computacional são a altura de onda significativa, H_s , os períodos de pico, T_p , e médio, T_{m01} e T_{m02} , e as direções de pico, θ_p , e média, θ_m e ainda o nível de maré (Fortes *et al.*, 2006).

3.2.1. EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA

Sendo o SWAN um modelo de terceira geração, é capaz, por isso, de interpretar e tratar o espectro de agitação como a sobreposição de um conjunto de ondas numa determinada área, em que cada uma destas ondas é caracterizada por uma frequência própria, permitindo que cada frequência seja resolvida individualmente a partir da teoria linear da onda, sendo então possível determinar a equação de superfície livre do grupo de ondas a partir da simples adição das expressões individuais relativas a cada onda componente. Assim, torna-se possível obter a descrição estatística da superfície livre do mar

através do espectro de variância de densidade ou pela variância da energia $E(\sigma, \theta)$, distribuindo a energia das ondas por frequências (Reis *et al.*, 2013).

A equação do balanço de energia espectral na qual se baseia o modelo pode ser formulada em coordenadas esféricas, para computações de grande escala, ou, perante aplicações de menor escala, em coordenadas cartesianas, equação (3.1). A equação de balanço de energia espectral utiliza a densidade espectral da ação da onda ($N = E/\sigma$) em detrimento da densidade de energia E , já que esta última não se conserva ao longo da propagação de energia entre ondas e correntes.

$$\begin{aligned} \frac{\partial N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial y} + \\ + \frac{\partial c_{\theta} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma} N(\sigma, \theta, x, y, t)}{\partial \sigma} = \frac{S(\sigma, \theta, x, y, t)}{\sigma} \end{aligned} \quad (3.1)$$

A componente cinemática da equação é descrita pelo 1º membro da equação, enquanto o 2º membro é referente aos termos fonte e sumidouro. O primeiro termo é referente à taxa de variação local da densidade de ação no tempo, os dois termos seguintes representam a propagação da energia das ondas através do espaço x-y, sendo a velocidade de grupo $c_{g,x}$ e $c_{g,y}$ ($c_g = d\sigma/dk$) definida a partir da relação da dispersão $\sigma^2 = g|k| \tanh(|k|d)$, onde k representa o número de onda e d a profundidade da água. Os dois termos seguintes são referentes à refração provocada pelas correntes e variações de profundidade e a variação da frequência angular causada por alterações da profundidade e correntes. c_{σ} e c_{θ} representam as velocidades de propagação no espectro, respetivamente, representando assim os termos cinemáticos.

No 2º membro da equação, $S(\sigma, \theta, x, y, t)$, engloba três termos distintos de geração e dissipação de energia (3.2),

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta) + S_{diss}(\sigma, \theta) \quad (3.2)$$

onde $S_{in}(\sigma, \theta)$ representa a energia gerada pelo vento, $S_{nl}(\sigma, \theta)$, as interações não lineares e $S_{diss}(\sigma, \theta)$, a dissipação de energia por fenómenos como a rebentação induzida pelo fundo, a rebentação parcial, ou *whitecapping*, e o atrito de fundo (Reis *et al.*, 2013).

3.2.2. TERMOS DE PROPAGAÇÃO

Existem diversos fatores ambientais e físicos que influenciam e modificam os parâmetros fundamentais da agitação marítima, que devem ser considerados e descritos pelos modelos de propagação como o SWAN.

O efeito da diminuição da profundidade respeita a relação de dispersão ($\sigma^2 = gk \tanh(kh)$), o que implica que a celeridade e o comprimento de onda diminuam proporcionalmente com a profundidade. A refração, é calculada através de uma abordagem Euleriana, dividindo o espaço de computação numa malha multicelular. O empolamento provoca uma elevação da superfície livre, a frequência constante, admitindo ausência de correntes.

Caso existam correntes marítimas, a frequência e a amplitude das ondas são afetadas, podendo-se apenas utilizar a teoria linear se o campo de correntes e a profundidade forem constantes no espaço e no tempo, podendo-se descrever a frequência absoluta pela equação (3.3).

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{u} \quad (3.3)$$

onde σ representa a frequência relativa ou intrínseca e $\vec{k}$ e $\vec{u}$ representam o número de onda e o vector da velocidade da corrente, respetivamente.

A presença de correntes na agitação marítima é considerada pelo modelo matemático do SWAN, através das seguintes expressões para a velocidade de propagação da energia da onda $c_g + \vec{u}$, c_θ e c_σ no plano cartesiano (x, y) , no espaço definido por θ e pela frequência relativa, σ .

$$\frac{dx}{dt} = c_g + \vec{u} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \frac{\sigma \vec{k}}{|\vec{k}|^2} + \vec{u} \quad (3.4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = c_\theta = -\frac{1}{k} \left[\frac{\delta\sigma}{\delta d} \frac{\delta h}{\delta m} + \vec{k} \frac{\partial \vec{u}}{\partial m} \right] \quad (3.5)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = c_\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial h} \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \nabla h \right) - c_g \vec{k} \frac{\partial \vec{u}}{\partial s} \quad (3.6)$$

nas quais o parâmetro s representa o deslocamento na direção de propagação, m é o deslocamento na direção perpendicular, h a profundidade e o termo d / dt exprime a derivada total no campo de propagação da energia da onda (Reis *et al.*, 2013).

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{c}_g + \vec{u}) \cdot \nabla_{\vec{x}} \quad (3.7)$$

3.2.3. INTERAÇÃO NÃO LINEAR DAS ONDAS

As interações não lineares entre ondas podem ter uma importância significativa em determinadas situações de agitação, que se traduzem numa transferência de energia no espectro. Para modelação da agitação marítima em águas pouco profundas a interação não linear quase ressonante de três ondas (Triad) é dominante, ao passo que em águas intermédias e profundas a interação entre grupos de quatro ondas (Quad) é a mais relevante.

A interação entre grupos de três ondas pode levar à ocorrência de espectros com várias frequências de pico, por oposição a uma única frequência de pico, devido a uma transferência abrupta de energia de frequências mais baixas para mais elevadas, como se pode verificar na Figura 3.2.

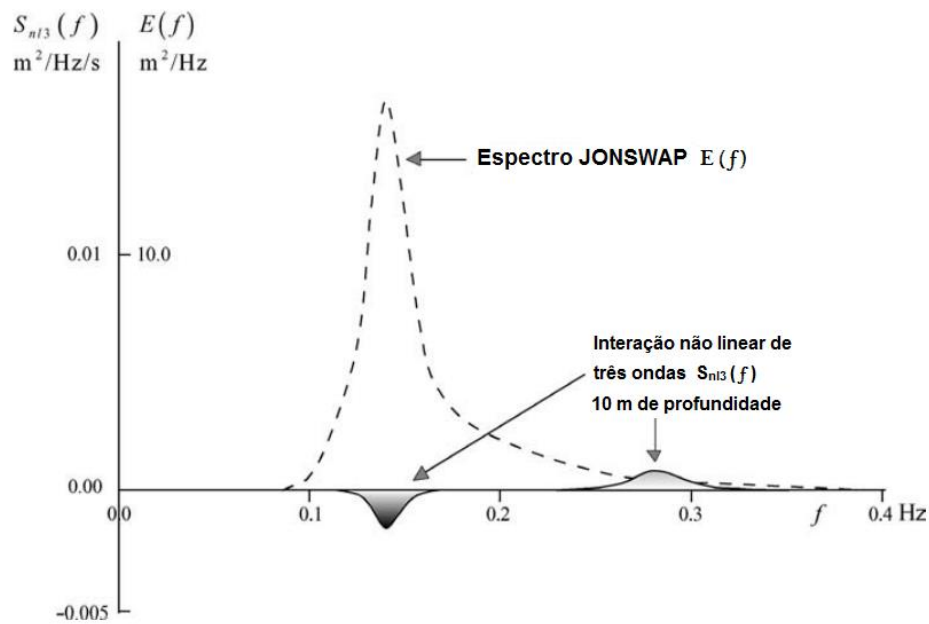


Figura 3.2 - Termo fonte devido à interação não linear de três ondas, calculado para um espectro JONSWAP (adaptado de Holthuijsen 2007)

A interação entre três ondas é descrita pelo SWAN através da aproximação de LTA (*Lumped Triad Approximation*) (Eldeberky, 1996), sendo esta uma versão derivada da aproximação DTA (*Discrete Triad Approximation*).

Em situações de agitação em águas de maior profundidade a interação entre grupos de quatro ondas é predominante, ocorrendo uma transferência da energia da frequência de pico para valores mais baixos e para zonas de frequências superiores, onde posteriormente a energia é dissipada por rebentação parcial (*whitecapping*), desenvolvendo o espectro que se pode verificar na Figura 3.3 (Reis *et al.*, 2013).

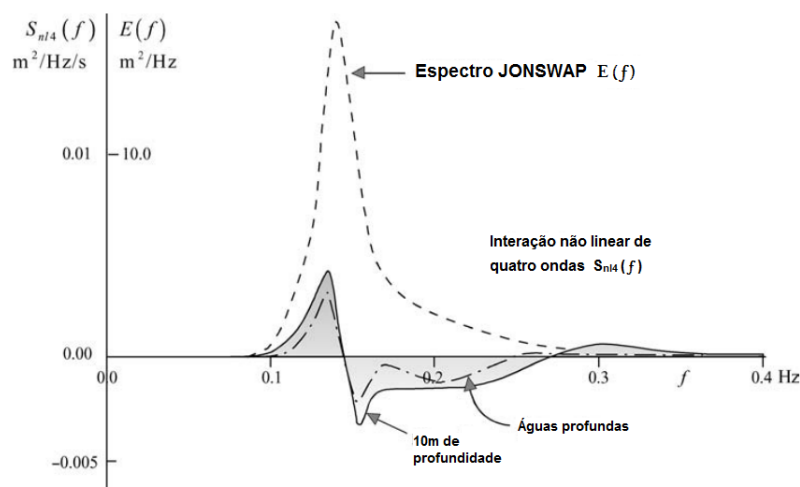


Figura 3.3 - Termo fonte devido à interação não linear de quatro ondas, calculado para um espectro JONSWAP (adaptado de Holthuijsen, 2007)

O SWAN apresenta a possibilidade de utilizar dois métodos exatos para calcular as transferências de frequências e as variações da forma do espectro com a diminuição da profundidade, FD-RIAM proposta por Hashimoto *et al.* (1998) e WRT (Webb-Resio-Tracy) (Resio *et al.*, 2001). No entanto a utilização destes métodos traduz-se num tempo de computação muito elevado.

De forma a otimizar o tempo de computação do modelo com a consideração da interação não linear de quatro ondas foram desenvolvidas técnicas baseadas em métodos paramétricos e aproximações. O SWAN utiliza uma formulação DIA (*Discrete Interaction Approximation*) desenvolvida por Hasselmann *et al.* (1985). Este método apresenta uma boa aproximação na descrição da interação não linear de quatro ondas, no entanto não é válida para ondas unidirecionais.

3.2.4. DISSIPACÃO DE ENERGIA

Os três fenómenos base que influenciam a dissipação da energia das ondas são: a rebentação parcial (*whitecapping*), a rebentação induzida pela profundidade e o atrito de fundo.

3.2.4.1. Rebentação Parcial (*Whitecapping*)

A rebentação parcial é essencialmente dependente da declividade da onda, H/L , e é formulada baseando-se no modelo de Hasselmann (1974) nos modelos de terceira geração, e pode ser representada pela seguinte equação:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \sigma_m \frac{k}{k_m} E(\sigma, \theta) \quad (3.8)$$

onde Γ representa o coeficiente de declividade, k o número de onda, σ_m a frequência média e k_m o número de onda médio.

O valor de Γ foi estimado por Komen e Janssen (1994) através da equação de balanço da energia para um estado de mar de completo desenvolvimento, o que significa que há uma dependência direta entre o valor de Γ e a formulação utilizada para a geração de onda pelos ventos. O SWAN utiliza a formulação de Komen e Janssen (1994) por omissão, que representa uma aproximação quasi-linear pois depende apenas de valores integrais do espectro (σ_m, k_m) que configuram uma declividade média.

$$\Gamma = C_{ds} \left((1 - \delta) + \delta \frac{k}{k_m} \right) \left(\frac{s}{s_{pm}} \right)^p \quad (3.9)$$

onde C_{ds} , δ e p são coeficientes ajustáveis, s é a declividade total da onda e s_{pm} é o valor da declividade total para o espectro de Pierson-Moskowitz. Os coeficientes ajustáveis foram estimados por Komen *et al.* (1984) e posteriormente por Janssen (1991).

van der Westhuysen *et al.* (2007) propuseram uma formulação diferente para a dissipação de energia por rebentação parcial no SWAN, baseada na aproximação não linear desenvolvida por Alves e

Banner (2003), que tem um carácter local pois depende da declividade local e não da declividade média estendida a todo o espectro (Reis *et al.*, 2013).

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -C_{ds} \left(\frac{B(k)}{B_r} \right)^{\frac{p}{2}} (\tanh(kh))^{\frac{2-p_0}{4}} \sqrt{gk} E(\sigma, \theta) \quad (3.10)$$

onde B_r é um coeficiente relacionado com a rebentação e obtido de forma experimental e $B(k)$ calcula-se a partir do integral:

$$B(k) = \int_0^{2\pi} C_g k^3 E(\sigma, \theta) d\theta \quad (3.11)$$

3.2.4.2. Rebentação Induzida Pelo Fundo

Com a aproximação à costa, a crescente diminuição da profundidade irá provocar uma concentração da energia da onda, até que esta atinge o limite e rebenta dissipando rápida e totalmente a sua energia, sendo este fenómeno representado no modelo através da proposta de Battjes e Jansen (1978), sugerindo uma fórmula, (3.12), para determinar a dissipação de energia por unidade de área causada pela rebentação, D_{tot} :

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\sigma_m}{2\pi} \right) H_{max}^2 = \alpha_{BJ} Q_b \sigma_m \frac{H_{max}^2}{8\pi} \quad (3.12)$$

onde $\alpha_{BJ} = 1$, Q_b é a parcela de ondas sujeitas a rebentação e H_{max} é a altura máxima para a qual não ocorre rebentação, definida por $H_{max} = \gamma d$, onde d define a profundidade e γ , o parâmetro de rebentação, que é normalmente uma constante ou expressa em função do declive do fundo e declividade da onda.

Em diversas publicações foram considerados valores diferentes para este parâmetro, Battjes e Janssen (1978) adotaram um valor de 0.8 baseado no critério de Miche. Battjes e Stive (1985) reanalisaram em laboratório e determinaram valores entre 0.6 e 0.8 dependendo da batimetria, com uma média de 0.73. Kaminsky e Kraus (1993) através de um elevado número de ensaios determinaram valores situados entre 0.6 e 1.59 e como valor médio 0.79.

3.2.4.3. Atrito de Fundo

A dissipação de energia por atrito do fundo, fenómeno que ocorre devido à interação da coluna líquida com o fundo, pode ser descrito no SWAN de três formas distintas, modelo empírico de JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973), lei de arrastamento de Collins (1972) e modelo de viscosidade de Madsen *et al.* (1988). Estes três modelos são baseados na seguinte expressão:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (3.13)$$

onde C_b é um coeficiente dependente do movimento do fluido junto ao fundo. No modelo SWAN podem ser adotados como valor de $C_b = 0.038m^2s^{-3}$, obtido pelas experiências de JONSWAP, e $C_b = 0.067m^2s^{-3}$ determinado por Bouws e Komen (1983) para condições de estado de mar de completo desenvolvimento em águas pouco profundas.

Em águas pouco profundas o aspeto do espectro de frequências para a variação do atrito de fundo pode ser representado pelo gráfico na Figura 3.4.

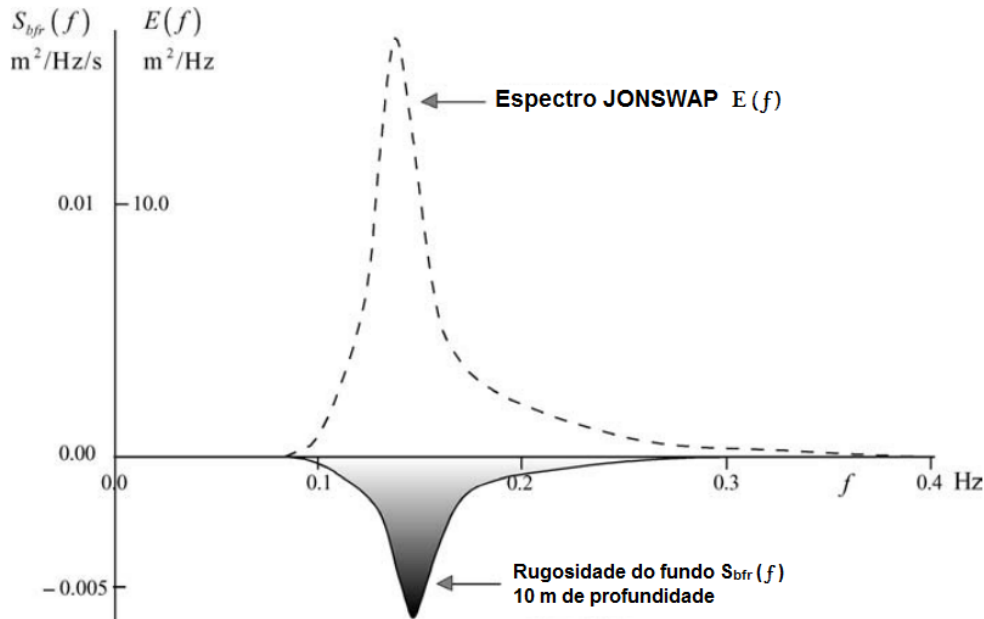


Figura 3.4 - Termo fonte devido à ação do atrito de fundo, calculado para um espectro JONSWAP (Holthuijsen, 2007).

3.2.5. IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

De forma a obter resultados apropriados e fazer uma boa modelação da propagação da agitação marítima é fundamental a escolha de um esquema numérico apropriado, devendo-se também ter em consideração o tempo de computação que este exige. Estes esquemas numéricos devem satisfazer critérios de estabilidade, convergência e consistência (Smith, 1978).

A malha retangular com a utilização de coordenadas cartesianas é descrita através de discretizações espaciais em ambas as direções, Δx e Δy . A discretização do tempo é feita através de intervalos de tempo, Δt , constantes para a integração simultânea dos termos de propagação e termos fonte (para computações em modo estacionário o tempo é removido das equações), e para definir o espaço spectral, é considerada com uma resolução direcional constante $\Delta\theta$ para cada frequência $\Delta\sigma/\sigma$.

De forma a resolver os pormenores da batimetria, o modelo necessita de utilizar altas resoluções. Nos esquemas numéricos explícitos a discretização espacial está ligada à discretização temporal pelo critério de Courant – Fredrichs – Levy (CFL), que explica que a um passo temporal apenas pode corresponder um avanço de uma célula em ambas as direções ($\Delta x, \Delta y$) o que limita diretamente as velocidades de propagação no espaço $\left(\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_{g,x}}; \Delta t \leq \frac{\Delta y}{c_{g,y}}\right)$.

O SWAN utiliza então um esquema numérico implícito e resolve as equações relativas ao processo de propagação através do método das diferenças finitas, todas as derivadas da ação de densidade são formuladas no mesmo nível temporal de computação. Os esquemas implícitos são incondicionalmente estáveis e os intervalos discretos dos passos Δx , Δy e Δt podem ser escolhidos de forma independente uma vez que não estão condicionados pelo critério CFL (Reis *et al.*, 2013).

Para escolher o esquema de propagação associado à propagação das ondas nos espaços geográfico e espectral, o utilizador pode escolher entre três esquemas distintos:

- i. Esquema BSBT (*Backward Space, Backward Time*) – é um esquema de primeira ordem de diferenças retardadas, aplicável em modo estacionário ou não estacionário. Este esquema é o esquema adotado por omissão pelo SWAN;
- ii. Esquema S&M (Stelling e Leendertse, 1992) – é um esquema de segunda ordem, exclusivo e adotados por omissão para simulações em modo não estacionário;
- iii. Esquema SORDUP – (*Second ORDer, UPwind* – Rogers *et al.* (2002)) – é um esquema de segunda ordem, exclusivo para corridas em modo estacionário.

Para uma descrição mais aprofundada destes esquemas numéricos e suas discretizações, recomenda-se a consulta de Holthuijsen (2007).

3.2.6. PROCEDIMENTOS DE PRÉ E PÓS PROCESSAMENTO

O modelo SWAN requer à partida ficheiros de entrada com toda a informação relativa ao caso de estudo e aos parâmetros da corrida em questão. Nestes ficheiros devem constar os diferentes nomes de ficheiros que o utilizador pretende que sejam lidos pelo programa, de modo a fornecer informação sobre a batimetria, malhas computacionais, parâmetros da agitação ao largo, ventos, níveis de maré, correntes, etc. Devem também constar especificações acerca dos vários fenómenos físicos considerados, assim como do esquema numérico e suas especificidades iterativas e finalmente quais os parâmetros de agitação e localização geográfica dos dados de saída que se pretendem (estes dados de saída podem vir na forma paramétrica ou espectral).

É então necessário definir a malha batimétrica e computacional da zona a modelar e as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio e a disponibilização dos parâmetros caracterizadores do regime de agitação, a altura significativa, H_s , o período médio, T_m , a direção média de propagação, θ_m , e os níveis da maré.

A malha batimétrica deve ser definida através da introdução das coordenadas iniciais, a sua extensão na direção x e y , na utilização do modelo em 2D, e o número de elementos que esta deverá ter e o tamanho Δx e Δy de cada elemento. A utilização de uma batimetria pormenorizada, com elementos de pequena dimensão, irá aumentar a exatidão da mesma, resultando numa melhor definição da zona.

A definição da malha computacional delimita a zona em que o modelo irá funcionar e ser aplicado, não sendo necessariamente igual à malha batimétrica, tendo, no entanto, de estar contida nesta. O SWAN permite a utilização de diversas malhas, sendo que estas vão reduzindo de tamanho, aproximando-se da zona de estudo, de forma a obter-se resultados mais rigorosos, sendo que os resultados da malha principal (*Main Grid*) irão determinar as condições de fronteira para a primeira malha mais pormenorizada (*Nested Grid*), que por sua vez irá determinar as condições de fronteira para a malha seguinte. Analogamente ao que acontece na definição da malha batimétrica, a utilização de elementos pequenos irá aumentar a exatidão do modelo, no entanto a consideração de um valor demasiado pequeno, irá resultar num tempo necessário para o processamento do modelo muito

elevado, sendo então preciso fazer uma otimização que melhor se adeque em termos de exatidão dos resultados e tempo de processamento.

Todos os dados necessários para a aplicação do modelo e a definição dos parâmetros que se pretendem obter, *output*, são fornecidos através do ficheiro *input* estando este dividido em 10 blocos. O primeiro bloco permite definir os comandos iniciais que definem o projeto e determinam o tipo de coordenadas a utilizar, o modo de processamento do modelo, estacionário ou não estacionário e 1D ou 2D e ainda alguns parâmetros iniciais. Do segundo ao sexto bloco são direcionados para a descrição do projeto através da definição das malhas, das condições iniciais a aplicar às fronteiras, os parâmetros físicos que serão considerados no modelo. Os blocos sete ao nono têm por função definir o *output*, os parâmetros que se pretendem obter, bem como as localizações. Por fim, o bloco dez tem como função o encerramento do ficheiro *input* (Team, 2007).

Quando se pretende executar o SWAN em modo não estacionário, é necessário um ficheiro de entrada por cada malha encaixada. No entanto, em modo estacionário é necessário criar um número de ficheiros de entrada igual ao número de entradas de dados vezes o número de malhas encaixadas. Assim, no caso de uma corrida para um período total de 24 horas, com dados de entrada de hora a hora, com 3 malhas encaixadas o utilizador terá de criar (24x3) 72 ficheiros diferentes. Daqui se compreende a importância de um gerador de ficheiros de dados de entradas que realize esta tarefa automaticamente, agilizando bastante a tarefa do utilizador do SWAN.

Foi desenvolvido no LNEC o SOPRO (Sistema Operacional de Previsão da Ondulação em Portos) (Fortes *et al.*, 2006), um pacote realizado em Microsoft Access™, com diversos módulos de modelos numéricos direcionados para a propagação de ondas e navegação em zonas portuárias, permitindo a existência de uma interface gráfica, Figura 3.5, que facilita a interação com os modelos, sem um conhecimento muito profundo do seu funcionamento, sendo, no entanto, necessário algum entendimento do assunto para a sua aplicação e posterior análise de dados. Permite ainda, a execução dos modelos, a manipulação dos dados, a obtenção de resultados e visualizações gráficas de forma simplificada.

The screenshot displays the SOPRO graphical interface, which is organized into several tabs and sections. The main window is titled 'Non Stationary Conditions' and contains the following sections:

- Project Identification:** Includes fields for 'Project Identification' and 'Computational Grid'.
- Currents Conditions:** Includes fields for 'Bathymetry Grid' and 'Spectrum Resolution'.
- Output Specifications:** Includes fields for 'Physical Processes' and 'Stationary Wave Conditions'.
- Results:** Includes fields for 'Stationary Wind Conditions'.

Below these tabs, there are several input fields and checkboxes:

- Nested grid:** A checkbox with 'yes' selected.
- Nested grid_1:** A checkbox with 'no' selected.
- X initial:** A text box containing '91000'.
- Y initial:** A text box containing '400000'.
- Grid rotation:** A text box containing '0'.
- Grid length in x direction (m):** A text box containing '65000'.
- Grid height in y direction(m):** A text box containing '100000'.
- DX:** A text box containing '600'.
- DY:** A text box containing '600'.
- DX for data transference:** A text box containing '500'.
- DY for data transference:** A text box containing '500'.

On the right side of the interface, there is a vertical column of buttons:

- Load Data
- Create Data Files
- Run SWAN
- Transfer Matrix
- Joint wave results
- Points extract
- CLOSE

At the bottom of the interface, there is a diagram showing the 'Main Grid' and 'Nested Grid' with their respective coordinates (Xinitial, Yinitial).

Figura 3.5 - Interface gráfica SOPRO.

O SOPRO tem particular utilidade na criação dos ficheiros *input*, pois possibilita a criação de um número elevado de ficheiros, sendo apenas necessária a introdução dos ficheiros de batimetria, de agitação com o formato pré-definido do SOPRO e da localização dos pontos *output*, a definição das características gerais da simulação e da localização das malhas sendo este um processo simples devido à interface gráfica. São então gerados automaticamente os ficheiros *input* desejados variando entre estes as características dos regimes de agitação das fronteiras e do nível de maré, para cada conjunto de dados iniciais ao largo.

3.3. CÁLCULO DO GALGAMENTO

3.3.1. INTRODUÇÃO

Existem diversas formas de cálculo do galgamento e do espraçamento, como as redes neuronais, os modelos numéricos, os modelos físicos e as fórmulas empíricas. A estes métodos estão associadas vantagens e desvantagens da sua utilização, sendo então necessário uma ponderação da solução mais adequada para o estudo que se pretende (Rodrigues, 2015).

A utilização de modelos físicos traduz uma maior aproximação à realidade na modelação de fenómenos como a interação onda-estrutura, e a possibilidade de se considerarem fenómenos que não se encontram totalmente estudados teoricamente e que não serão bem traduzidos por modelos numéricos e fórmulas, levando a uma maior correção nos resultados obtidos. No entanto, a utilização de modelos físicos estão associados erros relacionados com a necessidade de reduzir o protótipo para tamanhos possíveis de serem realizados, efeitos de escala, erros provenientes das medições necessárias, efeitos de medição, a utilização de material que não traduza da melhor forma o comportamento do material utilizado no protótipo, efeitos do modelo, entre outros. Os modelos físicos são também muito dispendiosos e o seu estudo é muito demorado, sendo então utilizados frequentemente para validação de modelos numéricos.

Os modelos numéricos possuem uma elevada capacidade de processamento e armazenamento de informação permitindo assim um estudo de fenómenos complexos de forma rápida e económica, sendo, no entanto, necessário validar os resultados obtidos. Estes permitem a resolução de equações complexas que sem a utilização dos mesmos se tornaria um processo muito moroso, porém, dependendo do modelo e aplicação, estes ainda apresentam um tempo de processamento considerável, havendo por isso sempre uma busca do aperfeiçoamento e otimização dos modelos existentes, tendo o aumento da complexidade destes acompanhado o aumento das capacidades dos computadores existentes. Os modelos numéricos são largamente aplicados pela sua relativa facilidade de aplicação e essencialmente pelo fator económico, pois são muito menos dispendiosos do que os modelos físicos e permitem uma obtenção de resultados diretos e sem erros de medição associados, sendo os erros apenas provenientes do modelo e das simplificações consideradas.

As redes neuronais têm o objetivo de simular o sistema nervoso central do ser humano, reconhecendo padrões e relações entre dados aparentemente ilógicos, tendo ainda a capacidade de lidar com dados incompletos, imprecisos, conflituosos e prever sistemas não lineares. Na aplicação à engenharia marítima, as redes neuronais são muito atrativas, pois permite a utilização de um grande conjunto de dados e a consideração de fenómenos físicos complexos, pois a sua informação é baseada em dados empíricos.

É ainda possível a utilização de fórmulas empíricas para o cálculo do galgamento e espraçamento, mais simples de aplicar, e têm em consideração fenómenos físicos complexos pois também são obtidas através da consideração de dados empíricos.

3.3.2. CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO DE GALGAMENTO E ESPRAIAMENTO

O fenómeno de galgamento traduz-se pelo transporte de uma massa de água sobre o coroamento de uma estrutura devido à agitação marítima. A energia da onda incidente é dissipada através da rebentação, atrito ou percolação, refletida para o largo e a restante energia cinética é transformada em energia potencial ocorrendo um escoamento sobre a praia ou estrutura, espraçamento (*runup*). O espraçamento é definido através da altura máxima, R , medida na vertical, que a água atinge relativamente ao nível médio da água na incidência de uma onda. Na ocorrência de espraçamento superior à altura do coroamento da estrutura, R_c , haverá então a ocorrência de galgamento da mesma, estando, por isso, estes dois fenómenos interligados.

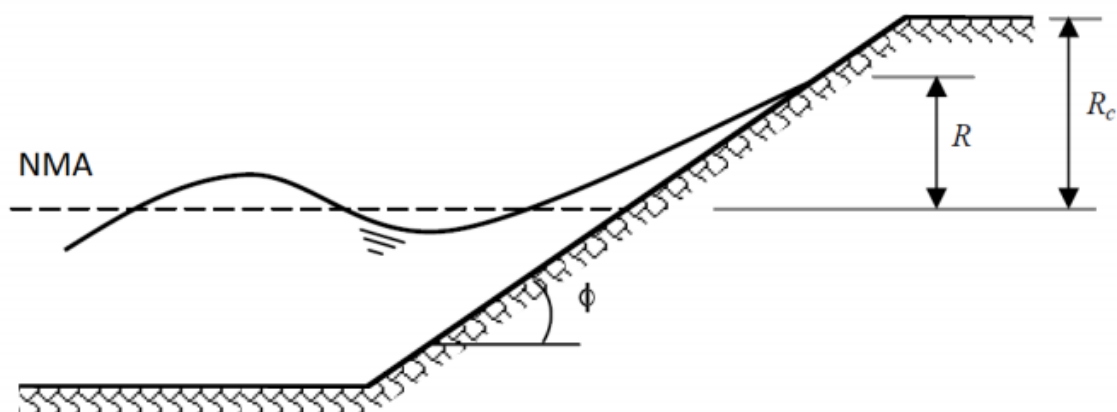


Figura 3.6 - Espraçamento numa estrutura (Adaptado de Bay, 2005)

O galgamento supracitado está diretamente relacionado com o tipo de galgamento denominado *green water* que ocorre quando o espraçamento é muito elevado, havendo a passagem de uma lâmina contínua de água sobre a estrutura. Existe ainda a possibilidade de ocorrer galgamento através da rebentação da onda na parede da estrutura, havendo um elevado volume de salpicos a passar a estrutura, denominando-se este tipo de *splash*. O galgamento pode ainda ser do tipo *spray*, em que apenas por ação do vento, ocorre passagem de água através de “borrifos”. Este tipo de galgamento é apenas tido em consideração em locais de ação do vento muito elevada. O primeiro tipo, pelo volume de água galgado, é normalmente o que causa maiores estragos e é mais importante de considerar. Porém, na realidade, não existe um galgamento contínuo, e este é um processo variável no tempo e com volume variável também (Pullen *et al.*, 2007).

O galgamento é geralmente expresso através do volume da massa de água que galga a estrutura por metro linear, em m^3/m , ou pelo caudal médio, q , de galgamento por metro linear da estrutura, em $L/s/m$ ou $m^3/s/m$.

O espraçamento é normalmente expresso associando a uma probabilidade de excedência de um valor. $R_{n\%}$ representa o valor do espraçamento excedido por $n\%$ de todos os espraçamentos de um registo.

No dimensionamento de obras marítimas, devido à irregularidade da agitação marítima, é difícil de prever a ocorrência de galgamentos, sendo estas estruturas dimensionadas considerando a possibilidade destes galgamentos ocorrerem com um grau admissível. O grau de galgamentos admitido varia ao longo da estrutura conforme a localização, funcionalidade, presença de bens e pessoas, entre outros.

O galgamento é influenciado essencialmente pelo nível da maré, que irá fazer variar a altura da estrutura que se encontra emersa, altura de onda, H , comprimento de onda, L , profundidade da água no pé da estrutura, d_s , período de onda, T e ângulo do talude, α .

A forma e material constituinte da estrutura também influenciam este fenómeno. Uma estrutura com mais descontinuidades, bermas, maior rugosidade e com um talude com maior permeabilidade irá permitir uma maior dissipação de energia, diminuindo o espraçamento.

3.4. FÓRMULAS EMPÍRICAS

3.4.1. FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DO GALGAMENTO

Existem diversas fórmulas empíricas para o cálculo do espraçamento e galgamento, em praias com e sem estruturas de proteção, sendo estas diferenciadas. A presença das estruturas vai influenciar a morfologia e dinâmica da praia, interferindo assim nos fenómenos físicos.

Nakamura *et al.* (1972) propôs uma fórmula simples que apenas tem em consideração a incidência de ondas regulares e os resultados do espraçamento utilizando como *input* a altura de onda significativa.

As principais fórmulas utilizadas para o cálculo do espraçamento em estruturas são as propostas por de Wall e van der Meer (1993) e pelo *Technical Advisory Committee on Flood Defence* (TAW) (2002), na Europa e pelo *Coastal Engineering Manual* (USACE 2002), nos Estados Unidos da América. As três formulações têm em consideração o comportamento irregular das ondas e são ponderadas as descontinuidades do talude, através da adoção de um declive imaginário. Os *inputs* necessários para a utilização destas fórmulas, são a altura de onda no pé da estrutura, sendo que em estruturas localizadas na costa ou em águas pouco profundas, a sua quantificação é muito difícil.

Devido à relação entre o espraçamento e o galgamento, foram também sugeridas formulações empíricas que relacionam estes parâmetros. A fórmula de Owen (1980) e van der Meer e Janssen (1995) seguem uma forma exponencial (3.14), em que Q^* representa o caudal galgado adimensional, R^* representa a altura da estrutura submersa e A e B são coeficientes empíricos determinados através de modelos físicos.

$$Q^* = A \exp(-BR^*) \quad (3.14)$$

Hedges e Reis (1998) propuseram uma fórmula semi-empírica (3.15) que assume que a estrutura tem um comportamento semelhante a um açude, utilizando assim as fórmulas direcionadas para este. R_c representa a altura entre a cota de coroamento da estrutura e o nível da maré, e R_{max} , o valor máximo de espraçamento,

$$\begin{aligned} \frac{Q}{\sqrt{(gR_{max}^3)}} &= A \left(1 - \frac{R_c}{R_{max}}\right)^B \quad \text{se} \quad 0 < \frac{R_c}{R_{max}} < 1 \\ \frac{Q}{\sqrt{(gR_{max}^3)}} &= 0 \quad \text{se} \quad \frac{R_c}{R_{max}} \geq 1 \end{aligned} \quad (3.15)$$

A fórmula de Mase *et al.* (2013) foi a utilizada neste trabalho, pelo que abaixo se efetua uma descrição em maior pormenor.

3.4.2. PROPOSTA DE MASE ET AL.

Mase *et al.* (2013) apresentam um conjunto de fórmulas empíricas, Tabela 3.2, que utiliza como dados iniciais a altura de onda ao largo e o período ao largo, para o cálculo do espraimento e do galgamento das estruturas em terra ou em águas pouco profundas. Estas fórmulas têm em consideração os fenómenos de refração, interação onda-corrente e outros fenómenos que ocorrem na propagação da onda do largo para a costa.

3.4.2.1. Dados de validação

Para a validação das fórmulas de espraimento, Mase *et al.* (2013) utilizaram quer o conjunto de dados de ensaios físicos realizados por Mase *et al.* (2004) quer os dados obtidos em ensaios com três perfis de praia com declive de fundo de 1:10, 1:20 e 1:30 com estruturas com talude de declive de 1:0.5 e 1:3. Estes valores são normalmente utilizados nas estruturas japonesas para estruturas quase verticais e pouco inclinadas, respetivamente. Para a validação das fórmulas de galgamento, foram utilizados os dados experimentais de Tamada *et al.* (2002).

Tabela 3.1 - Condições dos ensaios físicos considerados

Condição	Valor
Escala do Modelo	1/45, 1/50
Espectro de onda	Bretschneider-Mitsuyasu
Altura de onda H_0 (cm)	3.80 – 12.82
Período de onda T_0 (s)	0.8 – 2.1
Declividade da onda H_0/L_0	0.009 – 0.06
Altura da água h (cm)	40.0, 42.5, 43.0, 45.0
Declive do fundo, $\tan \theta$	1/10, 1/20, 1/30
Declive da estrutura $\cot \alpha$	0.5, 3.0

3.4.2.2. Declive Imaginário

A utilização de um declive imaginário, que resulta do facto dos declives das estruturas de proteção não serem uniformes, foi inicialmente proposto por Saville (1958), considerando uma linha que unia dois pontos, um no pé do talude onde se dá a rebentação das ondas, h_b , e outro no limite do espraimento. Esta metodologia teve diversas adaptações, como as propostas do TAW (2002) e de Waal e Van der Meer (1993) que consideram um declive imaginário, mas definido de uma forma diferente. Também na proposta de Mase *et al.* (2013) foi reformulado o conceito de declive imaginário, tendo em consideração a secção transversal da praia em frente à estrutura e o perfil da própria estrutura, Figura 3.7.

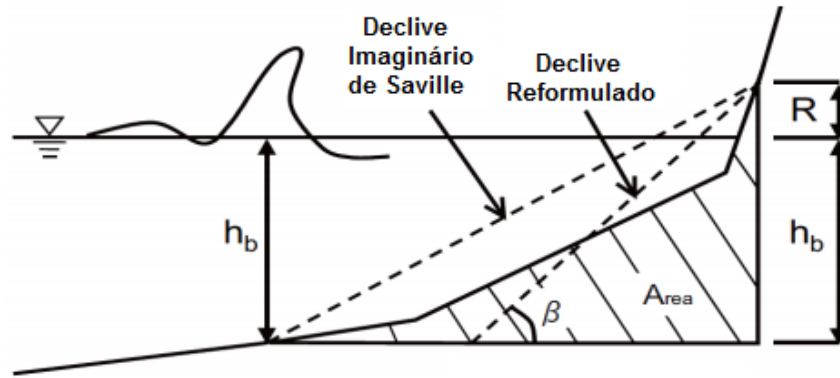


Figura 3.7 - Esquema da reformulação do declive imaginário (Mase *et al.*, 2013).

O declive imaginário reformulado, $\cot \beta$ pode ser determinado através da fórmula:

$$\frac{1}{\tan \beta} \approx \cot \beta = \frac{2A_{rea}}{(h_b + R)^2} \quad (3.16)$$

em que h_b representa a profundidade onde ocorre rebentação, A_{rea} , a área transversal da estrutura e da praia entre o local de rebentação e o nível de espraçamento, R . O cálculo do espraçamento é função do declive imaginário reformulado, sendo então um processo iterativo.

3.4.2.3. Profundidade de rebentação

Para determinar a profundidade de rebentação das ondas, h_b , foi utilizado o modelo de Mase e Kirby (1992), um método simplista e preciso no cálculo deste parâmetro para ondas irregulares. Foi então determinado um diagrama, Figura 3.8, que relaciona a declividade da onda ao largo, H_0/L_0 e a altura de rebentação adimensional, h_b/H_0 , para valores de declive do fundo de 1:10, 1:20, 1:30 e 1:100. H_0 , é referente à altura de onda significativa ao largo, L_0 é o comprimento de onda ao largo e pode ser obtido pela expressão (3.17) e T_0 , representa a média do terço superior do período da onda ao largo.

$$L_0 = \frac{gT_0^2}{2\pi} \quad (3.17)$$

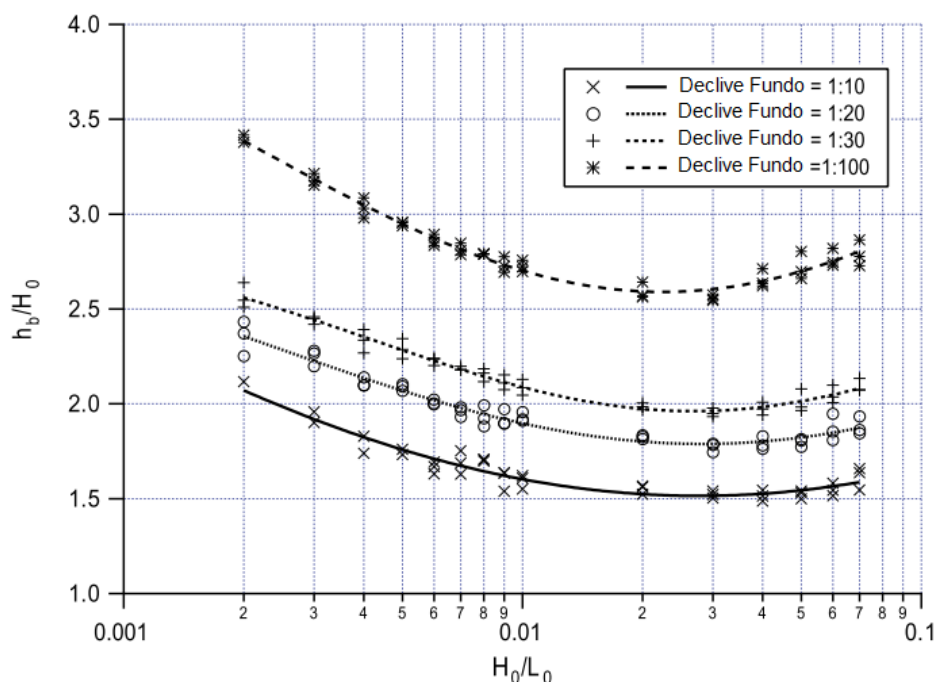


Figura 3.8 - Diagrama que relaciona a altura de rebentação com a declividade da onda ao largo (Mase *et al.*, 2013).

3.4.2.4. Formulações de Mase para cálculo do espraçamento e do galgamento

Mase *et al.* (2013) propuseram as formulações para o cálculo do espraçamento e galgamento de estruturas em terra ou em águas pouco profundas, representadas na Tabela 3.2. $R_{2\%}$ representa o espraçamento excedido por 2% de todos os espraçamentos, $R_{1/10}$, corresponde à média do décimo mais alto dos espraçamentos e $R_{1/3}$ é a média do terço mais elevado dos espraçamentos. O cálculo do galgamento e R_{max} , foram adaptados da proposta de Hedges e Reis (1998), sendo indispensável a determinação dos parâmetros empíricos A e B da fórmula (3.15). Foram então adaptadas duas definições para R_{max} , $R_{max37\%,100}$ que representam o valor máximo de espraçamento com maior probabilidade de ocorrência na incidência de 100 ondas, isto é, o valor de espraçamento que não é excedido em 37% dos casos assumindo uma distribuição de Rayleigh, e $R_{max99\%,100}$, o valor máximo de espraçamento não excedido em 99% dos casos na incidência de 100 ondas.

Tabela 3.2 - Fórmulas empíricas para o cálculo do espraçamento e galgamento (Mase *et al.*, 2013).

	Fórmulas	Condições de aplicação
Espraçamento	$R_{2\%} = H_0 \cdot \left(2.99 - 2.73 \exp \left(-0.57 \cdot \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0} \right) \right)$ $R_{1/10} = H_0 \cdot \left(2.72 - 2.56 \exp \left(-0.58 \cdot \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0} \right) \right)$ $R_{1/3} = H_0 \cdot \left(2.17 - 2.18 \exp \left(-0.70 \cdot \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0} \right) \right)$ $R_{max37\%,100} \approx 1.52R_{1/3} \approx 1.09R_{2\%}$ $R_{max99\%,100} \approx 2.15R_{1/3} \approx 1.54R_{2\%}$	$0.2 < \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0} < 0.4 \text{ aprox.}$ $0.009 < \sqrt{H_0/L_0} < 0.06$ $-0.37 < h/H_0 < 0.53$
Galgamento	$q = \sqrt{gH_0^3} \cdot \left(0.018 \left(\frac{R_{max}}{H_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left[1 - \left(\frac{R_c}{H_0} \right) / \left(\frac{R_{max}}{H_0} \right) \right] \right)^{3.200}$ $q = 0$	$R_{max} = R_{max37\%,100}$ $0 \leq R_c < R_{max}$ $R_c \geq R_{max}$
	$q = \sqrt{gH_0^3} \cdot \left(0.018 \left(\frac{R_{max}}{H_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left[1 - \left(\frac{R_c}{H_0} \right) / \left(\frac{R_{max}}{H_0} \right) \right] \right)^{6.240}$ $q = 0$	$R_{max} = R_{max99\%,100}$ $0 \leq R_c < R_{max}$ $R_c \geq R_{max}$

3.4.2.5. Correção do galgamento

Segundo Pullen *et al.* (2007), é necessário fazer uma correção ao valor de R_{max} , de forma a considerar o nível de permeabilidade e rugosidade da berma da estrutura. Na existência de uma berma de coroamento permeável, de largura G_c , é então aplicada um coeficiente de correção de redução do galgamento, C_r :

$$C_r = 3.06 \exp(-1.5 G_c/H_{m0})$$

$$C_r = 1 \quad \text{se } C_r > 1 \text{ ou } \frac{G_c}{H_{m0}} < 0.75 \quad (3.18)$$

Obtém-se assim o caudal final através da expressão:

$$Q_f = q \cdot C_r \quad (3.19)$$

3.5. MODELO SWASH

Após a utilização do SWAN para transferência da agitação marítima do largo para águas pouco profundas, foi necessária a escolha de outro modelo numérico para a continuação da simulação da propagação da agitação e galgamentos no local de estudo. Considerou-se então a utilização do modelo SWASH (*Simulating WAVes till SHore*) pois é um modelo robusto e eficiente com um grande campo

de aplicações e que apresenta um tempo de processamento baixo para este tipo de simulações, em comparação com outros modelos. O SWASH é um modelo recente *open source*, desenvolvido na TUDelft (Delft University of Technology), Holanda, tal como o SWAN e é particularmente direcionado para a simulação e previsão da transformação da agitação marítima, permitindo o estudo onde ocorra uma variação muito rápida do escoamento.

3.5.1. EQUAÇÕES BASE

Os modelos numéricos utilizados para o estudo da propagação da agitação marítima em grande escala dividem-se em duas categorias: estocásticos (*phase-averaged*), os quais utilizam um método probabilístico para as simulações, necessitando de dados reais ou obtidos em laboratório, e determinísticos (*phase-resolving*), que produz as suas simulações baseadas em leis de conservação (massa e momento), podendo também utilizar dados reais ou de laboratório para calibração.

O SWASH é um modelo determinístico, não hidrostático de superfície livre, e é baseado nas equações não lineares de águas pouco profundas (Nonlinear Shallow Waters – NLSW) com um termo referente à pressão não hidrostática. Estas equações são uma simplificação das equações de Navier-Stokes, equações que descrevem o escoamento de fluídos, fazendo uma integração em função da altura do escoamento, tornando assim as equações de mais simples aplicação e por isso com maior eficiência (Buckley *et al.*, 2014).

Existem outros modelos numéricos que têm por base as equações NLSW com a adição de um termo relativo à pressão não hidrostática. No entanto, não existia nenhum direcionado para a simulação de galgamentos oceânicos.

O modelo pode ser utilizado em 1, 2 ou 3 dimensões, com coordenadas cartesianas ou circulares podendo as equações nas quais o modelo se baseia serem escritas com estas definições. Serão apresentadas as equações para um caso de aplicação 2D, profundidade média, com coordenadas cartesianas (x,y), pois é uma forma simplificada mas generalista de apresentação das mesmas:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3.22)$$

em que t representa o tempo, x e y estão localizados à superfície da água, o eixo z tem orientação vertical, $\zeta(x,y,z)$ é a elevação da superfície medida a partir da superfície da água, $d(x,y)$ é a profundidade da água, $h = \zeta + d$ é a profundidade total, $u(x,y,t)$ e $v(x,y,t)$ representam a velocidade do escoamento na direção x e y , respectivamente, $q(x,y,z,t)$ é referente à pressão não hidrostática (normalizada pela densidade), g é a aceleração da gravidade, c_f é a rugosidade do fundo adimensional, τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} e τ_{yy} são os termos relativos à componente horizontal da turbulência.

O integral do gradiente da pressão não hidrostática pode ser expresso da seguinte forma:

$$\int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial q}{\partial x} dz = \frac{1}{2} h \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2} q_b \frac{\partial(\zeta - d)}{\partial x} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{2q_b}{h} - \frac{\partial w_b}{\partial t} \quad (3.24)$$

$$w_b = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y} \quad (3.25)$$

sendo q_b a pressão não hidrostática no fundo, w_s e w_b a velocidade na direção z na superfície livre e no fundo, respetivamente.

A conservação local da massa é então dada pela seguinte fórmula:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{w_s - w_b}{h} = 0 \quad (3.26)$$

A componente relativa ao coeficiente de rugosidade pode ser calculada da seguinte forma, para um modelo baseado no coeficiente de Manning, n :

$$c_f = \frac{n^2 g}{\sqrt[3]{h}} \quad (3.27)$$

Por fim, a componente relativa à turbulência é obtida da seguinte forma:

$$\tau_{xx} = 2 v_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad ; \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = v_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad ; \quad \tau_{yy} = 2 v_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.28)$$

sendo v_t a componente horizontal da turbulência (Zijlema *et al.*, 2011).

3.5.2. INTEGRAÇÃO EM PROFUNDIDADE

O SWASH pode ser utilizado admitindo uma profundidade média, ou com diversas “camadas” (*layers*) ao longo da coluna líquida, no qual o domínio computacional é dividido num número fixo de *layers* considerado. O SWASH melhora a dispersão de frequências aumentando o número de *layers*, e não aumentando a ordem das derivadas das variáveis dependentes, como ocorre nos modelos Boussinesq. Por isso, apesar do modelo utilizar um método para melhorar a dispersão das frequências, este não é um modelo Boussinesq (Team, 2016).

O modelo utiliza uma relação de dispersão de frequências própria, dependendo do número de *layers* equidistantes, sendo esta uma aproximação da relação linear da dispersão ($\sigma^2 = gk \tanh(kh)$). O SWASH é apenas capaz de aplicar esta relação de dispersão de frequência para a utilização de 1, 2 ou

3 layers equidistantes, adotando as formulações (3.29), (3.30) e (3.31), respetivamente para cada número de layers.

$$\sigma^2 = gk \frac{kd}{1 + \frac{1}{4}k^2d^2} \quad (3.29)$$

$$\sigma^2 = gk \frac{kd + \frac{1}{16}k^3d^3}{1 + \frac{3}{8}k^2d^2 + \frac{1}{256}k^4d^4} \quad (3.30)$$

$$\sigma^2 = gk \frac{kd + \frac{5}{54}k^3d^3 + \frac{1}{1296}k^5d^5}{1 + \frac{5}{12}k^2d^2 + \frac{5}{432}k^4d^4 + \frac{1}{46656}k^6d^6} \quad (3.31)$$

3.5.3. FENÓMENOS FÍSICOS

O SWASH considera diversos fenómenos físicos essenciais na simulação da transmissão da agitação marítima em águas pouco profundas (com influência dos fundos) bem como na interação desta com estruturas, que podem produzir grandes alterações nos parâmetros característicos da agitação como a direção de propagação e altura de onda. Alguns fenómenos considerados pelo modelo são: propagação das ondas, dispersão das frequências, empolamento, refração, difração, interação não linear onda-onda, rebentação, espraçamento e refluxo, rugosidade do fundo, reflexão e transmissão parcial, interação de ondas com a estrutura, interação onda-corrente, correntes induzidas pelas ondas, turbulência na direção vertical, escoamentos rapidamente variados, entre outros.

É possível simular com o modelo uma grande variedade de topografias e condições de agitação bem como simular o fenómeno de transporte de sedimentos suspensos, de salinidade e da temperatura. A presença destas componentes irá causar uma variação da densidade da água, induzindo um escoamento. Na simulação da temperatura, a transferência de calor entre água e ar não são consideradas (Team, 2016).

3.5.4. CONDIÇÕES INICIAIS E DE FRONTEIRA

A definição das condições iniciais é muito importante para simulações curtas, de alguns minutos, e as condições de fronteira têm uma maior importância em simulações longas. Frequentemente, não são consideradas condições iniciais e a modelação inicia-se com velocidade zero e altura de água igual em todo o modelo, até que se obtenha estabilidade.

Como condições iniciais, podem ser aplicados valores constantes de altura de água, componentes da velocidade u e v , a turbulência e o grau de dispersão da turbulência.

Podem ser geradas ondas a partir de uma ou duas fronteiras, porém estas não deverão ter uma batimetria muito irregular e não deverão estar próximas de estruturas de elevado declive. Podem ser geradas ondas regulares e irregulares, espectro de JONSWAP, Pierson-Moskowitz e TMA, com dispersão direcional. Pode ainda ser considerada uma série temporal ou um ficheiro proveniente do SWAN para definir as condições de agitação na fronteira. Deverá ainda ser aplicado uma condição de baixa reflexão nestas fronteiras para melhor modelar a entrada da agitação no domínio computacional.

Nas fronteiras que não são geradoras de ondas, se nada for imposto, estas serão fronteiras fechadas, com um comportamento totalmente refletivo, devendo então serem aplicadas condições que melhor traduzam a realidade, como a adoção da condição de radiação de Sommerfield, condição de fronteira pouco refletiva, condição de linearização de Riemann, entre outras. Deverá aplicar-se ainda uma fronteira do tipo “esponja” (*sponge layer*), que tem como objetivo a absorção da energia das condições de agitação nas fronteiras onde esta deveria sair do domínio computacional, de forma a reduzir a reflexão nas mesmas, que não ocorre na realidade. O SWASH permite ainda a aplicação de duas fronteiras “contínuas” opostas, nas quais, a agitação que sai do domínio computacional por uma fronteira, é continuada na fronteira oposta, não ocorrendo assim reflexão (Team, 2016).

3.5.5. TEMPO COMPUTACIONAL, DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL E ESPACIAL

Para uma correta e mais precisa simulação do espraçamento e galgamentos, deverá ser considerado a simulação entre 500 e 1000 ondas incidentes. Segundo o manual de utilização do modelo, entre 10% e 15% do tempo computacional é utilizado para se obter uma situação estável, sendo por isso aconselhável um acréscimo ao tempo necessário para a simulação das ondas.

Para a consideração da discretização temporal a utilizar no modelo, Δt , é adoptado o número de Courant, que relaciona a velocidade do escoamento, u e v , a discretização espacial, Δx e Δy , com o Δt , representado na seguinte equação para simulações 2D:

$$C_r = \Delta t \left(\sqrt{gd} + \sqrt{u^2 + v^2} \right) \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} \leq 1 \quad (3.32)$$

O modelo diminui para metade o Δt quando este se torna superior a 1, e duplica quando é menor que uma constante, geralmente 0.2. No entanto, estes valores limites podem ser modificados, através de um comando no ficheiro *input*, não se devendo adotar valores máximos acima de 0.8 para se obter uma simulação estável, e é ainda aconselhável um valor máximo de 0.5 para simulações de interação da agitação com estruturas com elevado declive.

É ainda importante uma boa discretização espacial da malha computacional, que tal como no SWAN pode ser em coordenadas cartesianas ou esféricas, sendo que no presente trabalho se utilizou as coordenadas cartesianas. Segundo Suzuki *et al.* (2014), para simulações em 1D, a adoção de diferentes espaçamentos, levou a resultados muito semelhantes no que se refere à propagação da agitação não se manifestando uma grande influência da variação do espaçamento, sendo esta mais visível nos resultados obtidos para o galgamento. Porém, em 2D, a adoção dos mesmos valores para discretização espacial levou à instabilidade do modelo, não sendo possível retirar conclusões. No entanto, ficou registada a importância da adoção de valores de Δx e Δy apropriados para a obtenção de melhores resultados do galgamento.

Para melhorar a precisão e estabilidade do modelo, deverá utilizar-se um número de pontos da malha por comprimento de onda associado ao período de pico dependendo assim a discretização espacial das características da agitação marítima. O manual do SWASH considera aceitável para ondas $H/d \ll 1$ a adoção de 50 pontos da malha por comprimento de onda, e para ondas maiores considerar-se 100 pontos de malha por comprimento de onda.

No entanto, é conveniente fazer alguns testes de sensibilidade considerando diferentes números para os pontos por comprimento de onda de modo a avaliar se se verificam melhores resultados ou maior eficiência. É ainda aconselhado que a área de interesse a estudar fique situada a, pelo menos, dois comprimentos de onda das fronteiras.

Na direção vertical, a definição da malha é feita por meio do número de *layers* e a sua definição depende essencialmente dos dois tipos de aplicação, estudo de estruturas verticais ou da propagação das ondas. Para o estudo de estruturas verticais, o modelo aconselha que sejam adotados, pelo menos, 10 *layers*, no entanto esta adoção irá trazer um tempo de processamento muito elevado para o modelo. Para o estudo da propagação das ondas, o número de *layers* é definido através da dispersão linear da frequência. Quanto mais elevada for a profundidade adimensional kd , em que k representa o número de onda e d a profundidade, maior será o número de *layers* a utilizar.

Tabela 3.3 - Número de *layers* a utilizar em função de kd e erro associado (Team, 2016).

K	Limites	Erro
1	$kd \leq 0.5$	1%
1	$kd \leq 2.9$	3%
2	$kd \leq 7.7$	1%
3	$kd \leq 16.4$	1%

Para muitas aplicações pode ser adotada apenas uma *layer*, traduzindo-se em erros um pouco mais elevados, mas ainda assim com uma aproximação aceitável.

A espessura das *layers*, h_k , pode ser definida de forma relativa ou absoluta, devendo-se definir pelo menos uma *layer* de forma relativa para garantir que a soma das espessuras seja igual à altura total da água (Team, 2016).

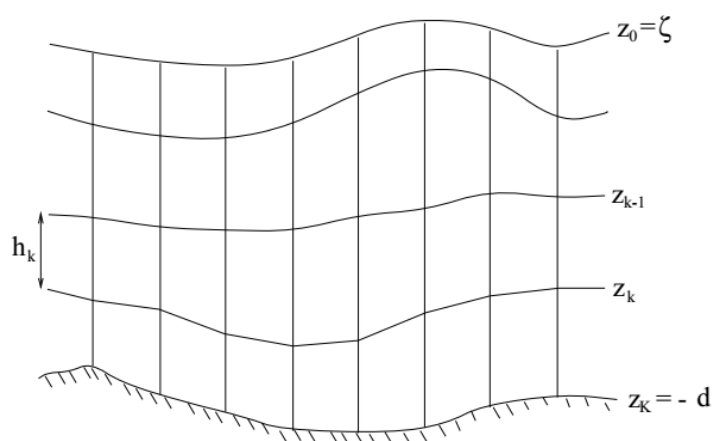


Figura 3.9 - Definição da malha vertical com K *layers*.

3.5.6. CONSERVAÇÃO DO MOMENTO

A conservação do momento é de grande importância para a simulação da rebentação das ondas, assegurando que as propriedades da agitação são modeladas de forma correta.

Para a conservação do momento, o modelo permite a aplicação de vários esquemas numéricos, esquema padrão de primeira ordem, esquema de ordem superior definido através da formulação de κ e ainda um esquema TVD (*Total Variation Diminishing*) para simulações considerando as equações de transporte da temperatura, da salinidade ou dos sedimentos. O comando relativo à adoção de um esquema de conservação do momento ou energia é o comando DISCRET, sendo posteriormente definido o esquema a adoptar.

O valor de κ faz a definição do tipo de esquema de ordem superior a aplicar e pode ter valores entre -1 e 1. Por defeito, o modelo aplica um esquema de conservação de momento BDF (*Second Order Backward Difference*), um esquema de segunda ordem, com $\kappa = -1$, para os termos de advecção horizontal e de primeira ordem para os termos verticais, nas equações de momentos u , v e w .

Se nenhum comando relativo à conservação do momento for definido no ficheiro de input, o modelo numérico define se irá aplicar a conservação do momento ou da energia, sendo que a segunda é apenas aplicada numa situação de um escoamento onde ocorra uma elevada contração.

O termo de advecção horizontal para as equações de momento w é normalmente ignorado, devido à pequena influência em comparação com o gradiente da pressão vertical. No entanto, são automaticamente consideradas quando o comando BREAK é ativado (Team, 2016).

3.5.7. PARÂMETROS FÍSICOS

O modelo SWASH permite a consideração de diversos parâmetros que influenciam diretamente a agitação marítima, nomeadamente o vento, a turbulência, a porosidade, entre outros.

A consideração do vento não deve ser adotada para problemas de pequena escala como a propagação em praias e portos. O modelo permite a aplicação de sete modelos de propagação do vento e a sua influência na agitação.

O modelo considera a rugosidade do fundo, tendo esta um grande efeito na propagação da agitação em locais de baixa profundidade. O SWASH permite a consideração da rugosidade através de diversos coeficientes, podendo-se adotar um valor fixo ou através de formulações como a de Chezy, Manning, Colebrook-White, entre outras.

A turbulência é um parâmetro também importante e é dividida em horizontal e vertical. Na componente horizontal existem três modelos que podem ser aplicados, a consideração de um valor constante, o modelo de Smagorinsky e a hipótese de Prandtl. A componente vertical é obtida através do modelo $k - \varepsilon$, sendo k a turbulência por unidade de massa e ε a grau de dissipação da turbulência (Team, 2016).

3.5.8. FICHEIROS DE INPUT E OUTPUT

De forma muito semelhante ao SWAN, o SWASH utiliza como input do modelo um ficheiro realizado em bloco de notas com a extensão “.sws”, que contém todos os comandos e definições necessárias para a operacionalidade do modelo. Este ficheiro contém os comandos relativos à definição da batimetria e da malha computacional, os dados da agitação marítima, o esquema de conservação de momento a utilizar, o tempo da simulação e discretização temporal, entre outros.

Como dados de *output*, o modelo permite a obtenção de resultados relativos a velocidade, direção, galgamento, altura de onda significativa, entre outros, sendo mesmo possível a obtenção de alguns dados por *layer*. Permite ainda que estes sejam fornecidos ao utilizador por intervalos de tempo, permitindo um melhor acompanhamento dos resultados do modelo.

3.6. FERRAMENTA NN_OVERTOPPING2

O NN_OVERTOPPING2 (*Overtopping Neural Network*) é uma rede neuronal criada pela *WL Delft Hydraulics*, agora denominado de *Deltares*, integrada no projeto de investigação CLASH (*Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping*) financiado pela União Europeia com o objetivo de estudar e prever o galgamento de estruturas marítimas.

3.6.1. REDES NEURONAIS

As redes neurais assemelham-se ao sistema nervoso central do ser humano devido à capacidade de obter e armazenar conhecimento, sendo possível de utilizar posteriormente na resolução de problemas. O sistema nervoso é composto por neurónios, onde a informação é armazenada e processada, fazendo ligação através de dendrites a outros neurónios recebendo sinais através de estímulos, sinapses, e transmitem informação através dos axónios. Um único neurónio pode estar ligado a centenas ou milhares de neurónios, criando uma enorme rede de ligações neurais.

As redes neurais são constituídas por camadas, camada de entrada, que faz a receção dos dados designando um “neurónio” para cada variável de entrada, camadas ocultas ou intermédias, onde decorre o processamento da informação e a camada de saída, onde é devolvida a resposta da rede também com uma quantidade de “neurónios” equivalente ao número de variáveis de saída, Figura 3.10.

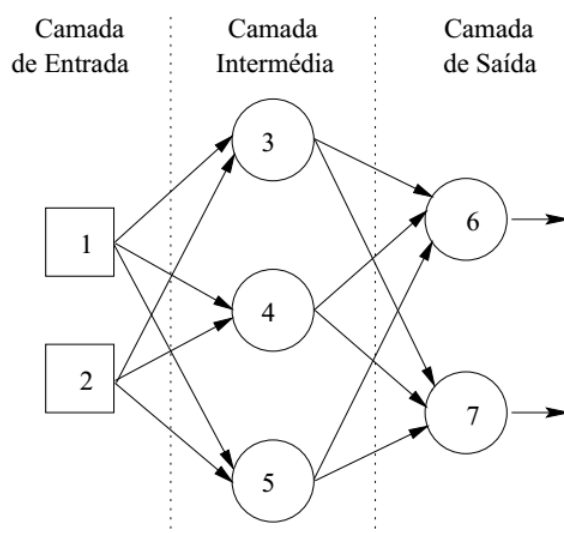


Figura 3.10 - Estrutura de uma rede neuronal (Cortez e Neves, 2000).

As grandes vantagens das redes neurais prendem-se com a capacidade de aprendizagem e generalização, conseguir responder adequadamente a novas situações com base em experiências

passadas, ultrapassando a dificuldade de relacionar dados incompletos ou imprecisos (Cortez e Neves, 2000).

3.6.2. NN_OVERTOPPING2

A rede neuronal NN_OVERTOPPING2 é aplicada no cálculo do galgamento de estruturas marítimas. Esta fornece o caudal médio de galgamento por metro linear, $m^3/s/m$, e os seus intervalos de confiança, através dos quantis, $q_{2.5\%}$, $q_{5\%}$, $q_{25\%}$, $q_{50\%}$, $q_{75\%}$, $q_{95\%}$ e $q_{97.5\%}$.

Esta rede permite a consideração de um elevado número de diferentes estruturas devido às variáveis de entrada que são necessárias fornecer, admitindo estruturas de paramento vertical. Dos *inputs* necessários, três são referentes às condições de agitação marítima, a altura de onda significativa no pé da estrutura obtido através da análise espectral, $H_{m0,toe} = 4\sqrt{m_0}$, o período de pico no pé da estrutura obtido através da análise espectral, $T_{m-1,0\ toe}$, que se pode obter por $T_{m-1,0\ toe} \approx T_p/1.1$ para o espectro de JONSWAP, e a direção da propagação da onda em relação à normal da estrutura, β . Os restantes 12 parâmetros são relacionados com a geometria da estrutura, sendo que o nível médio da maré é aqui tido em consideração nas definições das profundidades:

- h [m] - profundidade de água à frente da estrutura;
- h_t [m], B_t [m] - profundidade e largura da risberma do pé do talude da estrutura. Se esta não existir, estes deverão ter um valor de zero;
- B [m], h_b [m], $\tan \alpha_B$ [-] - parâmetros relativos à berma da estrutura, largura, altura e declive. Se esta se encontrar acima do nível da água, $h_b = 0$, e se for horizontal, $\tan \alpha_B = 0$;
- R_c [m], A_c [m], G_c [m] - parâmetros relativos à parte superior da estrutura, distância na vertical entre o nível de água e a cota de coroamento, distância na vertical entre o nível da água e o coroamento da berma permeável e largura da berma de coroamento;
- $\cot \alpha_d$ [-], $\cot \alpha_u$ [-] - declive da estrutura entre a risberma e a berma e declive da estrutura entre a berma e o coroamento.
- γ_f [-] - parâmetro relativo à porosidade da estrutura, adotando valor de 1 para estruturas impermeáveis e 0.5 para estruturas em enrocamento. Valores relativos a outros materiais são sugeridos no manual.

A Figura 3.11 ilustra as 15 variáveis de entrada que é necessário fornecer ao NN_OVERTOPPING2.

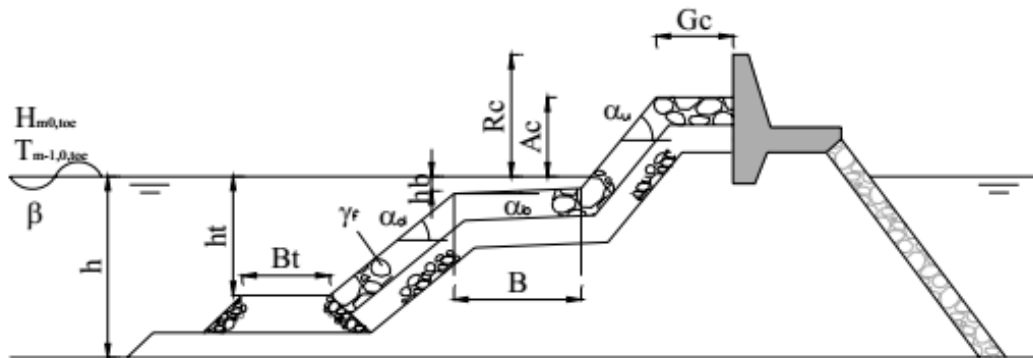


Figura 3.11 - Variáveis de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005) .

A informação utilizada pela rede neuronal resulta da análise de 700 redes neuronais baseadas nos dados obtidos através de ensaios de modelos físicos realizados em laboratório para 8400 combinações de *input-output*, variando os parâmetros relativos à agitação e geometria e para diversas estruturas, quebramares de taludes, mistos e verticais.

No manual são ainda sugeridos diversos valores a considerar para as variáveis de entrada para estruturas com características não típicas de quebramares, permitindo desta forma uma gama de aplicações muito extensa. A rede neuronal NN_OVERTOPPING2 permite a consideração de um elevado número de dados através da utilização de ficheiros de *input* com características pré-determinadas. Apesar de ser de aplicação simples, rápida e de elevada utilidade, esta rede apresenta algumas condicionantes. Existe uma gama de valores das variáveis para as quais a rede não funcionará se não forem cumpridas. Com efeito, para valores de caudal adimensional, $Q = q/\sqrt{gH_s^3}$, entre 10^{-6} e 10^{-5} , os resultados obtidos não são corretos, devendo ser apenas tomados em conta como indicativos e para $Q < 10^{-6}$ não são apresentados resultados. Para algumas estruturas, como estruturas verticais impermeáveis, é aplicado um fator corretivo (Coeveld *et al.*, 2005).

3.7. VALORES LIMITES DE GALGAMENTO, AVALIAÇÃO DO RISCO E ELABORAÇÃO DE MAPAS DE RISCO

3.7.1. VALORES DE GALGAMENTO ADMISSÍVEIS

No dimensionamento de estruturas marítimas é considerado um limite máximo de galgamento que pode ocorrer, dependendo este do uso da zona protegida que esta defende. O limite de galgamento permitido pode ser expresso de diferentes formas: caudal médio galgado por metro linear, volume galgado médio e máximo, velocidade da água no galgamento, entre outros.

A ocorrência de galgamentos traduz diversos problemas, sendo os mais preocupantes a perda de vidas, a destruição de estruturas e a destruição de equipamentos. Existem diversos limites propostos, variando nos valores sugeridos. Pullen *et al.* (2007) é uma das publicações em que são sugeridos valores admissíveis de galgamento dependentes da utilização da zona protegida pela estrutura. Na Tabela 3.4 à Tabela 3.7 é possível verificar os valores propostos para a atividade humana, edifícios, veículos e para a própria estrutura marítima, respetivamente (Pullen *et al.*, 2007).

Tabela 3.4 - Valores admissíveis de caudal de galgamento para pessoas (adaptado de Pullen *et al.* (2007))
(Rodrigues *et al.*, 2014).

Condições e tipo de danos ⁽³⁾	Caudal médio q (L/s/m)
Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com perceção de que se pode molhar. O galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jatos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar.	1 – 10
Pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente perturbadas ou assustadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas, que se deslocam numa zona larga.	0.1
Pessoas totalmente desprevenidas, que não conseguem observar a agitação incidente, que podem facilmente ficar assustadas ou perturbadas, com vestuário inadequado para se molharem, que se desloquem numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas.	0.03

Tabela 3.5 - Valores admissíveis de caudal médio de galgamento para navios, equipamento e edifícios (adaptado de Pullen *et al.* (2007)) (Rodrigues *et al.*, 2014).

Condições e tipo de danos	Caudal médio q (L/s/m)
Danos significativos ou afundamento de grandes navios	50
Afundamento de barcos pequenos localizados a 5-10m da estrutura	10 ⁽¹⁾
Danos em grandes navios	
Danos em edifícios	1 ⁽²⁾
Danos em equipamento localizados a 5–10m da estrutura	0.4 ⁽¹⁾

(1) Limites relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima

(2) Limites relacionados com o galgamento efetivo obtido no edifício

Tabela 3.6 - Valores admissíveis de caudal de galgamento para veículos (adaptado de Pullen *et al.* (2007)) (Rodrigues *et al.*, 2014).

Condições e tipo de danos	Caudal médio q (L/s/m)
Circulação a baixa velocidade, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jatos de água a cair na via, veículo não imerso.	10 – 50 ⁽⁴⁾
Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projetado com grande velocidade ou com jatos de água a cair na via que podem imergir o veículo.	0.01 – 0.05 ⁽⁵⁾

(4) Limites relacionados com o galgamento efetivo obtido na via de circulação.

(5) Limites relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima, mas é assumido que a via de circulação se encontra imediatamente atrás da estrutura.

Tabela 3.7 - Valores admissíveis de caudal médio de galgamento para a estrutura (adaptado de Pullen *et al.* (2007)) (Rodrigues *et al.*, 2014).

Condições e tipo de danos		Caudal médio q (L/s/m)
Estrutura de defesa com talude no tardo	Sem danos se o coroamento e o tardo estiverem bem protegidos.	50 – 200
	Sem danos no coroamento e no tardo de um dique de argila coberto por relva.	1 – 10
	Sem danos no coroamento e no tardo mesmo se não estiverem protegidos.	0.1
Defesas frontais	Danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa frontal.	200
	Danos em zonas de circulação relvadas ou levemente protegidas.	50

Apesar de serem valores tabelados, a sua adoção e consideração é subjetiva, podendo variar de utilizador para utilizador devido ao pequeno número de classes sugeridas.

3.7.2. AVALIAÇÃO DO RISCO

Existem diversas formas de avaliação do risco, tendo estas em comum a possibilidade de obtenção de mapas de risco, que facilitam a visualização dos locais de maior preocupação. No LNEC foi amplamente utilizado um método simplista da avaliação das consequências da ocorrência de galgamento Santos *et al.* (2011), Poseiro (2013) e Martinho (2014)

O grau de risco, independentemente do método utilizado de consideração das consequências, é calculado da seguinte forma:

$$\text{Grau de Risco} = \text{Grau de probabilidade} * \text{Grau de consequências} \quad (3.33)$$

O grau de probabilidade é obtido através do estudo da probabilidade de ocorrências de galgamentos acima dos valores admissíveis pré-estabelecidos, agrupando-se assim em graus conforme a sua percentagem, Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Graus de probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis (Poseiro *et al.*, 2013)

Descrição	Probabilidade de Ocorrência	Grau
Improvável	0 – 1%	1
Raro	1 – 10%	2
Ocasional	10 – 25%	3
Provável	25% - 50%	4
Frequente	> 50%	5

O grau de consequências pode ser avaliado através da Tabela 3.9, que apresenta graus considerando as consequências que seriam provocadas por um acontecimento de galgamento com valores acima dos admissíveis, fazendo distinção entre consequências para as pessoas, ambiente, edifícios, entre outros. Este processo tem uma grande subjetividade associada, podendo para a mesma situação variar o grau admitido dependendo do utilizador, que poderia ser diminuída através da adoção de outros métodos de avaliação de consequências. A tabela sugerida é particularmente direcionada para a avaliação de portos, havendo alguns pontos que não serão tidos em consideração no caso de estudo.

Tabela 3.9 - Graus de Consequências (Santos *et al.*, 2011)

Grau	Descrição	Consequências						
		Pessoas	Ambiente	Gestão Portuária	Património			
					Edifícios	Equipamentos	Estrutura	Veículos
1	Insignificantes	Possibilidade de ferimentos muito ligeiros	Impacto ambiental desprezável	Alterações ligeiras nas atividades portuárias	Danos exteriores quase inexistentes	Danos quase inexistentes	Dano na zona ativa da estrutura não necessitando reparação	Danos quase inexistentes
2	Reduzidas	Uma única lesão ligeira	Pequenos derrames (por exemplo de combustível)	Algumas alterações nas atividades portuárias; má publicidade para o porto a nível local	Danos interiores e exteriores insignificantes	Danos ligeiros que não implicam a paragem do equipamento; resolução de problemas quase imediata	Ocorrência de movimentos e quedas de blocos sem exposição de filtros; reparação imediata desnecessária	Danos insignificantes que não afetam a sua utilização
5	Sérias	Múltiplas lesões ligeiras ou uma única lesão grave	Algumas áreas com acesso proibido devido a poluição causada por derrames	Operações de carga e descarga condicionadas; possibilidade de paragem parcial do porto; má publicidade generalizada	Danos interiores moderados	Danos que implicam inatividade temporária do equipamento para reparação	Ocorrência de movimentos e quedas de blocos com exposição de filtros; superestrutura afetada mas sem movimentos significativos	Danos sérios com consequências na sua utilização, mas que não levam à sua paragem temporária
10	Muito sérias	Muitas lesões graves ou uma perda de vida	Episódios de poluição dentro e fora do porto com possibilidade de consequências irreparáveis para o ambiente	Impossibilidade de realização de operações de carga e descarga durante vários dias; má publicidade a nível nacional	Grandes danos no interior; estrutura do edifício afetada	Danos graves; inatividade prolongada do equipamento	Filtros afetados; movimentos substanciais da superestrutura	Danos exteriores sérios com consequências na sua utilização que levam a uma paragem prolongada
25	Catastróficas	Muitas perdas de vidas	Derrames generalizados; contaminação muito grave; consequências irreparáveis para o ambiente; necessidade de ajuda internacional	Restrições muito sérias às operações de carga e descarga durante muito tempo; perda de trocas comerciais durante muito tempo; má publicidade internacional	Danos interiores muito graves; estrutura do edifício seriamente afetada; colapso iminente	Perda do equipamento (reparação impossível)	Colapso da estrutura	Danos sérios inviabilizando a sua utilização em definitivo

É então calculado o Grau de Risco, pelo produto do grau de consequências com o grau de probabilidade de ocorrência de galgamentos acima dos admissíveis. Através da Tabela 3.11,

determina-se a aceitabilidade deste, apresentando classes para os resultados obtidos, indicando valores para os quais é necessária alguma preocupação e tomada de medidas de controlo de risco.

Tabela 3.10 - Graus de risco: matriz de cruzamento do grau atribuído à Probabilidade de Ocorrência de um evento adverso e do grau atribuído às Consequências da ocorrência desse evento (Poseiro *et al.*, 2013)

Grau de Risco		Consequências				
		1	2	5	10	25
Probabilidade de Ocorrência	1	1	2	5	10	25
	2	2	4	10	20	50
	3	3	6	15	30	75
	4	4	8	20	40	100
	5	5	10	25	50	125

Tabela 3.11 - Avaliação de aceitabilidade do grau de risco (Poseiro *et al.*, 2013)

Grau de Risco	Descrição	Controlo do Risco
1 – 3	Insignificante	Risco desprezável; não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco.
4 – 10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável/tolerável caso se selecione um conjunto de medidas para o seu controlo.
15 – 30	Indesejável	Risco que deve ser evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é essencial a monitorização.
40 – 125	Inaceitável	Risco intolerável; tem que se proceder ao controlo do risco (e.g. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc.).

Após a determinação do grau de risco e do grau de aceitabilidade, é possível criar mapas de risco, que de forma intuitiva e de fácil leitura traduzem o risco de cada localização considerada.

Desta forma, o processo de avaliação do Risco pode ser generalizado da seguinte forma:

1. Avaliação do grau de probabilidade de ocorrência de galgamentos acima dos valores admissíveis pré-estabelecidos através da Tabela 3.8;
2. Qualificação das consequências na ocorrência de galgamentos e determinação do grau, pela Tabela 3.9;
3. Cálculo do grau de risco e avaliação da sua aceitabilidade pela Tabela 3.11;
4. Obtenção de mapas de risco.

4

CASO DE ESTUDO – PRAIA DO FURADOURO

4.1. INTRODUÇÃO

A praia do Furadouro, Figura 4.1, está localizada no concelho de Ovar, distrito de Aveiro, e tem como fronteiras, o concelho de Espinho a norte, o concelho de Murtosa a sul e o oceano atlântico a oeste. Encontra-se a cerca de 30 km a sul da cidade do Porto, e a cerca de 25 km a norte da cidade de Aveiro. Esta praia está intercalada entre as praias da Maceda a norte e da Torreira a sul.



Figura 4.1 – Visão Geral da praia do Furadouro [5].

A marginal é composta por um passeio largo e um muro de proteção. Esta praia tem uma grande importância do ponto de vista balnear pois atrai a esta zona uma grande quantidade de pessoas, quer nos meses de verão quer em alturas não balneares (aos fins de semana, por exemplo), levando a um aumento populacional nessas épocas. No entanto, no restante período do ano, verifica-se uma população residente muito reduzida. Este fenómeno provoca também um elevado desenvolvimento de espaços destinados ao turismo e estruturas de apoio aos banhistas, muito próximos da praia, localizando-se, por vezes, no areal, provocando uma grande pressão na praia.

Na marginal encontra-se um hotel e diversos cafés, restaurantes e ainda algumas pequenas habitações. A norte e sul da praia existe uma grande zona de vegetação natural e passadiços de madeira, para proteção das dunas. A norte está ainda localizado o parque de campismo.

A praia do Furadouro é uma das zonas em Portugal que apresenta problemas sérios de erosão, sendo frequente a ocorrência de galgamentos e a destruição da marginal. Atualmente, como forma de diminuir este problema, existem diversas estruturas de proteção costeira. A praia é limitada por dois esporões, norte e sul, e 3 estruturas longitudinais de defesa aderente, a norte e sul dos esporões norte e sul, respetivamente, e entre estes, Figura 4.2.



Figura 4.2 - Estruturas da praia do Furadouro (adaptado do Google Maps)

4.2. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Esta região ganhou no século XVII uma grande importância do ponto de vista piscatório, devido ao decaimento da pesca na ria de Aveiro provocada pela peste, levando a que uma grande comunidade de pescadores provenientes de Ovar se deslocasse para o Furadouro e aí se tornaram residentes, tendo instalado e construído os seus palheiros no grande areal que existia na altura, Figura 4.3.



Figura 4.3 - Palheiros na praia do Furadouro (1964) [6].

Os banhistas chegaram ao Furadouro no final do século XVIII, tendo-se instalado inicialmente nos palheiros dos pescadores. Mais tarde, construíram as suas próprias habitações, implantando-se essencialmente na zona norte da praia.

A construção de armazéns de conserva na zona levou a um crescimento da comunidade piscatória e com o início da prática balnear, o Furadouro tornou-se um aglomerado importante na costa portuguesa.

Em 1869, foi construída uma estrada que ligava o Furadouro a Ovar, que veio impulsionar o crescimento turístico que se veio a verificar nas décadas seguintes, com o aparecimento em número considerável de pensões e hotéis, assim como alguns cafés. Isto significa uma grande afirmação do Furadouro como praia de veraneio, dado que com a decadência da pesca na costa do Furadouro os armazéns foram diminuindo e, em 1956, existiam na praia somente 13 (Projecto Lei 147/IX, Lei, 2002).

Atualmente, a praia é particularmente dedicada ao turismo balnear, sendo a comunidade piscatória reduzida, havendo, no entanto, diversos símbolos relativos a essa atividade, Figura 4.4.



Figura 4.4 – Barco - Símbolo da comunidade piscatória [7].

Os primeiros problemas de avanço o mar, foram registados em 1857, tendo provocado a destruição de diversos palheiros. O problema agravou-se e apenas em 1958, já com a existência de edificado direcionado para o turismo, foi construído um paredão provisório com 600 m de extensão para proteção da marginal.

De forma a reduzir os problemas associados ao avanço do mar, entre 1972 e 1974, foi realizada uma obra de carácter definitivo que compreendia a construção de um paredão de cerca de 9 m de altura e de 3 esporões, espaçados de 350 m, com um comprimento de aproximadamente 200 m e altura de 5.5 m, tendo o esporão mais a norte acabando por ficar soterrado devido à elevada acumulação de sedimentos nessa zona (Reis, 2015).

Até às soluções atualmente existentes, houve um grande número de reconstruções e modificações dos dois esporões devido à destruição provocada pela agitação marítima nas estruturas e na marginal e do edificado aí situado, sendo também necessária a adoção de soluções que garantissem maior segurança. Foram ainda realizadas a construção de três estruturas de defesa aderente.

4.3. PROBLEMAS REGISTADOS

Portugal tem uma agitação marítima predominantemente de noroeste, sendo que o transporte de sedimentos é usualmente feito de norte para sul. Tendo isto presente, é possível afirmar que as modificações nos cursos de água e na costa realizados a norte vão ter precursões para sul. A artificialização do rio Douro através da construção de barragens e a construção dos esporões de Espinho, situados sensivelmente a 15 km a norte e com uma extensão de cerca de 300 m, são os principais causadores da diminuição do fluxo de sedimentos à praia do Furadouro, pois causam uma barreira à livre passagem dos mesmos que se verificava antes da sua construção. Também as dragagens realizadas para a coleta de areia para obras de construção e para a segurança dos canais de navegação, contribuem de uma forma significativa para este fenómeno (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

Os problemas de erosão ou recuo da linha de costa fazem parte da história da praia do Furadouro, assim como de muitas outras praias vizinhas da região centro, observando-se um aumento do recuo da linha de costa em relação à frente marginal edificada. A intensa pressão urbana, juntamente com as dinâmicas costeiras em curso, representam um problema antigo. Já há duas décadas que há preocupações quanto ao futuro da população do Furadouro, que vêm a ser fundamentadas pelos acontecimentos recentes nesta localidade (Veloso-Gomes, 2010).

Porém, estas não são as únicas causas possíveis de serem associadas à erosão, sendo necessário considerar a hipótese de uma mudança direcional dos ventos e consequentemente das ondas, podendo explicar as crescentes taxas de erosão (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

Apesar dos problemas de erosão registados, a praia do Furadouro, possuía uma morfologia aproximada à expectável com a existência dos esporões, denotando-se uma acreção a barlamar dos esporões e erosão a sotamar dos mesmos, com particular significado a sul do esporão norte, como é possível verificar na Figura 4.5, datada do ano de 2006.

Porém, em março de 2010, após temporais de sul e sudoeste, direções pouco habituais nesta zona e para as quais as praias não se encontravam protegidas, ocorreu o galgamento das estruturas longitudinais aderentes e um elevado arrastamento de sedimentos a barlamar do esporão norte, formando uma arribas de erosão nesse local. Houve, assim, uma redução substancial da largura dessa mesma praia, chegando em alguns locais aos 60 a 70 m de redução de praia em relação a 2009 (Ramos, 2012).



Figura 4.5 - Praia a norte do esporão norte do Furadouro em 2006 e em Março de 2010 (indicação aproximada da arriba de erosão) (Veloso-Gomes, 2010).

A ARH-Centro adotou algumas medidas de emergência, de forma a mitigar a situação, tal como ripagem de areias, ficando a praia com a configuração que se pode verificar na Figura 4.6. Apesar das obras, esta tornou-se uma zona de particular preocupação, o que se veio a verificar nos anos posteriores, em que a ocorrência de galgamentos aumentou em quantidade e gravidade.

Não existindo dados concretos e com uma extensão temporal grande, há uma grande dificuldade em quantificar a probabilidade de ocorrência de temporais semelhantes aos ocorridos e com grande influência na dinâmica da praia. No entanto, esta situação está a ser reposta naturalmente, denotando-se um aumento progressivo na quantidade de sedimentos presentes nessa zona, mas verificando-se ainda uma redução face ao existente anteriormente aos referidos temporais.

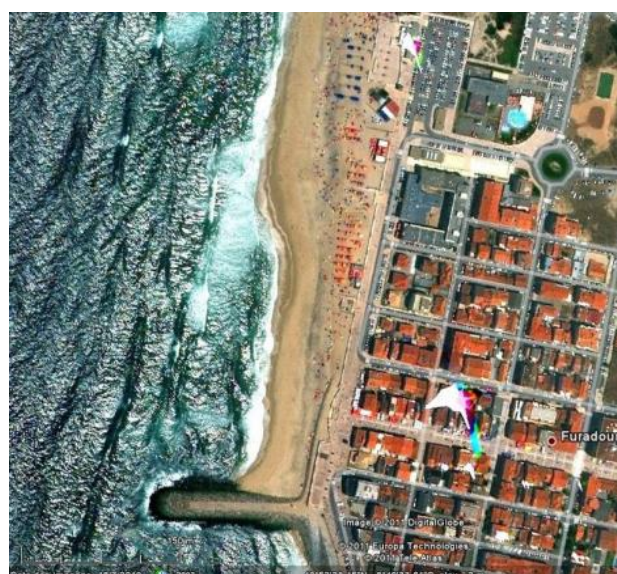


Figura 4.6 - Praia do Furadouro, após ripagem das areias (Google Earth) (Ramos, 2012).

Nos anos subsequentes, esta zona foi particularmente fustigada com fenómenos de galgamento, registando-se alguns dos piores temporais, que provocaram estragos significativos, levando à destruição parcial dos esporões e das estruturas aderentes, bem como da marginal, muro e edifícios na marginal e em arruamentos localizados numa zona mais interior, Figura 4.7. Na Figura 4.8, é possível verificar as zonas de inundação associadas aos dois temporais de 2014, em que a parte vermelha mais escura corresponde aos locais afetados em ambos os dias, demonstrando a severidade dos acontecimentos.

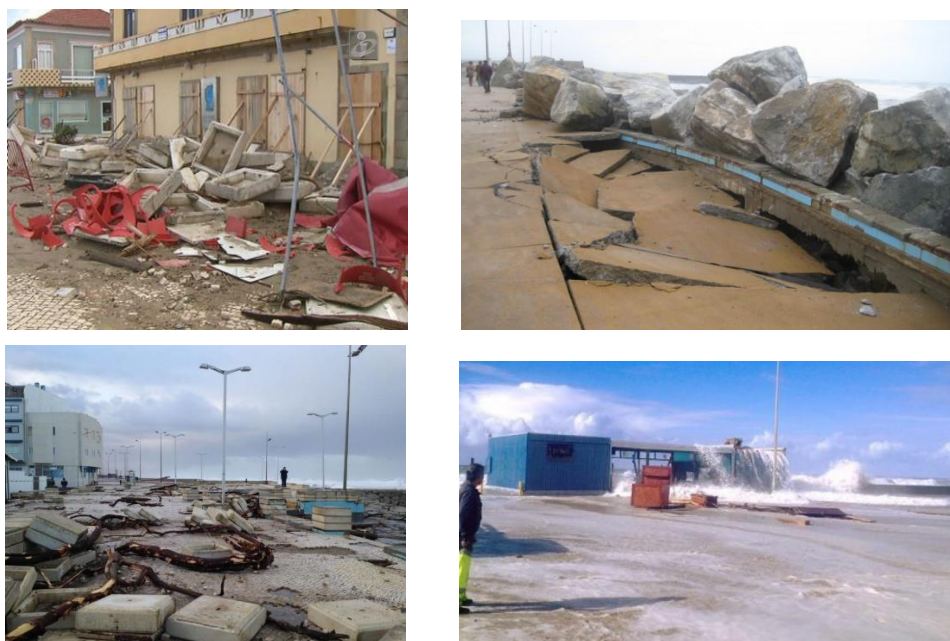


Figura 4.7 - Estragos na marginal da praia do Furadouro. [8] [9]

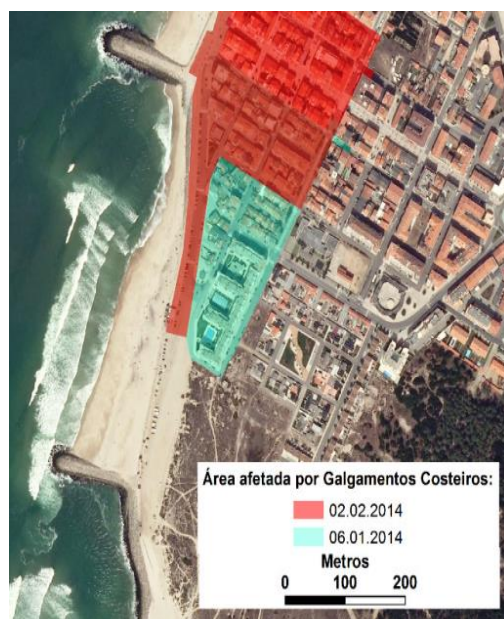


Figura 4.8 - Zonas de Inundação dos temporais de 2014 (Cedido pela Câmara de Ovar).

Estas ocorrências levaram a sucessivas obras de reconstrução das estruturas de proteção da costa, sendo por vezes realizadas sem um grande estudo aprofundado, devido à situação de emergência e como precaução, tendo em vista a diminuição das consequências na possibilidade de ocorrência de outro temporal, sendo essa defesa indispensável para a diminuição dos estragos.

No entanto, é notória a grande precariedade das soluções presentes face ao avanço do mar e a sensação de insegurança por parte dos moradores e comerciantes, encontrando-se todos os invernos em alerta para a ocorrência de galgamentos. As diversas ações de reconstrução das estruturas de defesa e da marginal acarretam também elevados custos, que poderiam ser reduzidos com a adoção de soluções mais eficazes.

4.4. MARGINAL

Como anteriormente referido, a marginal da praia do Furadouro é particularmente direcionada para o turismo e a prática balnear. Na parte norte, existe o parque de campismo, um dos responsáveis pelo elevado número de banhistas que visitam a região. Este encontra-se a cerca de 200 m do areal, tendo, no entanto, uma proteção da forte vegetação aí presente, não se tendo registado problemas relativos à ação da agitação marítima.



Figura 4.9 - Dunas e passadiços a norte.

Cerca de 100 m a sul, encontra-se a Avenida da Marginal, Avenida do Infante D. Henrique, que se prolonga por toda a frente da praia, desde o fim do passadiço e zona arborizada a norte, Figura 4.9, até à zona de características semelhantes a sul. Na zona norte da avenida, encontra-se um parque de estacionamento e no areal, uma zona lúdica, com bancos, muro e um café com esplanada. Este é frequentemente invadido por areia sendo necessária a sua remoção, Figura 4.10. Imediatamente a sul, encontram-se as primeiras estruturas de apoio aos banhistas, bem como um café que se encontra parcialmente destruído, como é possível verificar na Figura 4.11 e Figura 4.12, respetivamente.



Figura 4.10 – Largo invadido por areia.



Figura 4.11 - Estruturas de apoio a banhistas.



Figura 4.12 - Bar destruído.

Caminhando para sul, do lado do mar, existe um passeio, com largura aproximada de 8 m e um muro, Figura 4.13, com altura aproximada de 1 m, tendo sido este totalmente reconstruído em 2014. Esta configuração mantém-se até ao encontro entre a avenida com a avenida dos Bombeiros Voluntários do Porto, sendo esta a avenida principal do Furadouro, existindo aí um largo, com esculturas, Figura 4.14. Nesta extensão, do lado de terra, existe um posto de turismo e um hotel a poucos metros da estrada, Figura 4.15, tendo depois algumas habitações, cafés e restaurantes, visível na Figura 4.16 e Figura 4.17.



Figura 4.13 - Muro norte.



Figura 4.14 - Largo Central.



Figura 4.15 - Posto de Turismo e Hotel (Google Maps).



Figura 4.16 – Habitações.



Figura 4.17 - Cafés e Restaurantes.

Junto então ao esporão norte, caminhando para sul, do lado do mar, existe um muro de betão com altura de cerca de 0.8 m, estando este mais recuado em relação ao anterior, reduzindo assim a largura do passeio em cerca de 2 m, aumentando a segurança dos peões, Figura 4.18. Do outro lado da rua, de forma semelhante à zona mais a norte, encontram-se habitações e locais de comércio. De principal relevância, verifica-se a presença também de um grande condomínio fechado, visível na Figura 4.19.



Figura 4.18 - Muro sul.



Figura 4.19 - Condomínio Fechado.

Na zona central entre os dois esporões tem início a zona de passadiços, paliçadas, vegetação e dunas, construídas no âmbito da requalificação ambiental da zona sul da praia do Furadouro em 2011, projeto visível na Figura 4.20. Este local foi reabilitado em 2014, aquando das obras de recuperação de diversas estruturas do Furadouro, tendo atualmente a configuração que se pode verificar na Figura 4.21.



Figura 4.20 - Projeto zona sul (ARH Centro, 2009).



Figura 4.21 - Zona sul da praia do Furadouro.

4.5. CARATERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS MARÍTIMAS

4.5.1. ESTRUTURA LONGITUDINAL ADERENTE NORTE

No local mais a norte da praia do Furadouro, existe uma estrutura longitudinal aderente, com o perfil atual após a reconstrução em 2011, projeto da Consulmar, Figura 4.24, tendo sido realizada primeiramente a construção numa extensão de 185 m, sendo que posteriormente esta teve continuidade para norte, tendo presentemente um desenvolvimento total de cerca de 600 m. Apesar de diversas obras de reorganização e arranjo desta estrutura, a sua forma manteve-se sensivelmente inalterada, estando fundada a uma cota de +0.5 Z.H., tendo um talude de inclinação 3:2, com 3 m de espessura, em enrocamento com blocos de peso compreendido entre 60 e 90 kN, Figura 4.23, e ainda um filtro de

enrocamento entre 5 e 10 kN com uma espessura de 1.50 m e um núcleo constituído por T.O.T. Apresenta ainda um risberma à cota + 2.7 m Z.H. com cerca de 4 m de largura. A cota de coroamento da estrutura é de, aproximadamente, +8.0 m Z.H., tendo pequenas variações ao longo da sua extensão, como se pode comprovar na Figura 4.22, do coroamento desta, mas podendo-se considerar este como um valor médio.



Figura 4.22 - Coroamento da estrutura aderente norte.



Figura 4.23 - Enrocamento da estrutura aderente norte.

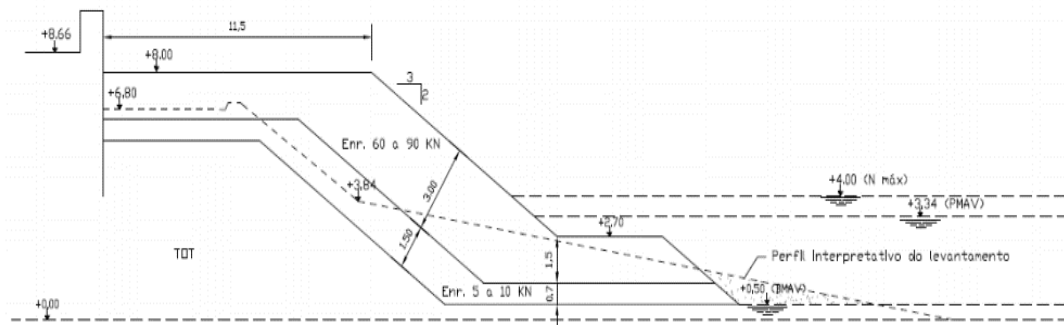


Figura 4.24 - Perfil da estrutura aderente norte (Adaptado de Consulmar, 2010).

Na zona mais a norte desta estrutura, é possível verificar uma destruição do talude, Figura 4.25, sendo, no entanto, numa zona menos atingida pela agitação marítima, devido à acumulação de sedimentos que aí se verifica. No restante desenvolvimento, esta estrutura encontra-se em bom estado de conservação, não se registando locais de destruição e desarrumação do enrocamento, Figura 4.26.



Figura 4.25 - Parte da estrutura aderente norte destruída.



Figura 4.26 - Talude da estrutura aderente norte.

Verifica-se uma diminuição da acumulação de sedimentos na aproximação ao esporão devido aos temporais anteriormente referidos, sendo a zona próxima do enraizamento deste a mais fustigada pela agitação marítima, como se pode verificar na Figura 4.27, e uma elevada acumulação de sedimentos na parte mais a norte, visível na Figura 4.28, dando à estrutura menor altura, apesar da cota de coroamento ser sensivelmente semelhante à existente a sul.



Figura 4.27 - Erosão a sotamar do esporão norte.

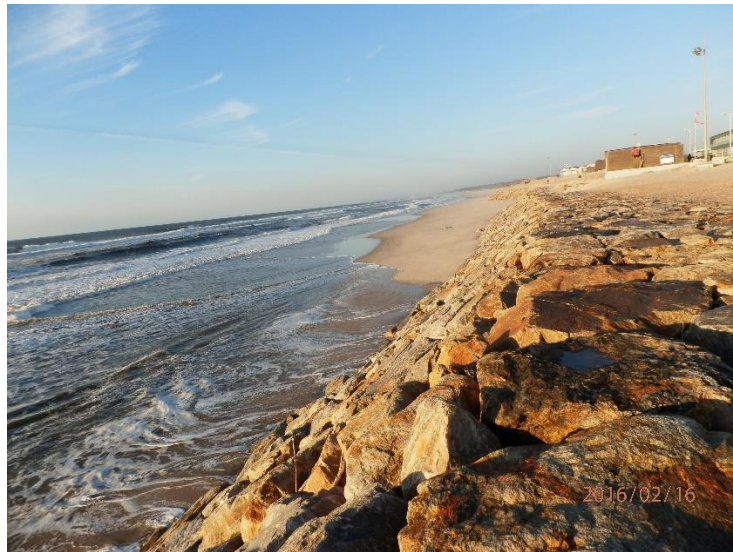


Figura 4.28 - Maior acumulação de sedimentos a norte.

4.5.2. ESPORÃO NORTE

Na parte norte da praia do Furadouro, situa-se o esporão norte, Figura 4.29, com direção perpendicular à costa. A sua construção original data da década de 70, tendo sido realizadas desde então, diversas reconstruções. A última reconstrução, e das mais significativas, foi realizada em 2014 pela empresa Irmãos Cavaco SA. Este tem uma forma típica dos esporões, semelhante aos quebramares de taludes trapezoidais. Apresenta uma extensão de cerca de 135 m, um coroamento com cerca de 8 m de largura, e taludes com uma inclinação aproximada de 2:3. O seu coroamento encontra-se selado por betão e apresenta uma cota aproximada de +8.0 m Z.H. no enraizamento, visível na Figura 4.30, descendo ligeiramente ao longo da estrutura, apresentando na cabeça, uma cota de aproximadamente + 7.40 m Z.H. A cabeça do esporão, tem uma forma circular, sendo este um dos locais críticos destas estruturas, pois está muito exposta à agitação.



Figura 4.29 - Esporão norte.

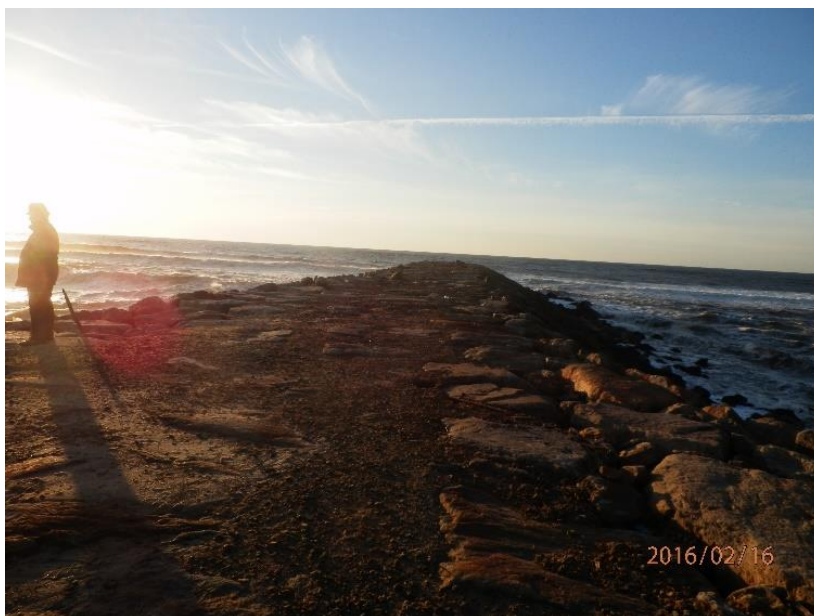


Figura 4.30 - Coroamento do esporão norte.

Verifica-se a existência de algumas pedras soltas em ambos os lados da estrutura, como se pode verificar na Figura 4.31, no entanto ambos os taludes apresentam uma boa construção, sem grandes rombos ou deslocamento do enrocamento.



Figura 4.31 - Pedras soltas na base do esporão norte.

No enraizamento do lado de sul, encontra-se uma rampa de acesso à praia para uso dos banhistas, sendo que esta se encontra num local onde se verificam problemas de erosão, Figura 4.32.



Figura 4.32 - Rampa de acesso à praia.

Na Figura 4.33, encontra-se a planta do esporão norte, com base num levantamento realizado pela empresa Irmãos Cavaco S.A. em novembro de 2014.

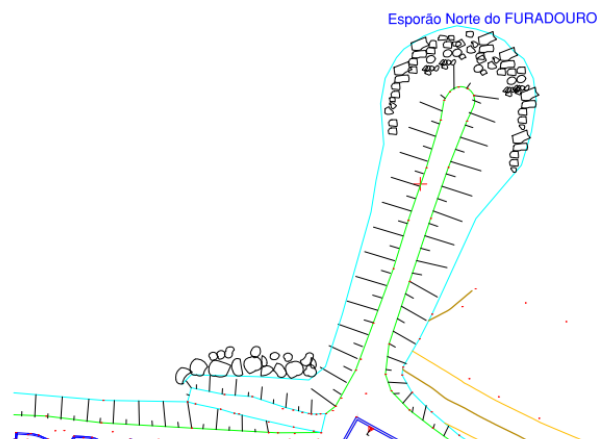


Figura 4.33 - Planta do esporão norte (Levantamento Topográfico realizado pela ICSA em novembro de 2014).

4.5.3. ESTRUTURA LONGITUDINAL ADERENTE ENTRE ESPORÕES

Esta estrutura prolonga-se em toda a extensão da marginal, entre o esporão norte e sul, estando estes distanciados de aproximadamente 530 m. Esta estrutura foi alvo em 2014 de uma extensa reconstrução, com carácter de emergência, realizada pela empresa Irmãos Cavaco S.A., tendo sido um dos principais locais fustigados pelos galgamentos ocorridos nesse ano. Foi realizada uma proteção da base da fundação, a colocação de enrocamento nos locais onde existiam rombos e ainda um aumento da cota de coroamento de meio metro, relativo ao anteriormente existente.

A estrutura possui um manto resistente em enrocamento com peso compreendido entre 4 e 6 tf, visível na Figura 4.35, com inclinação 3:2 e um núcleo em T.O.T., com uma risberma de 4 m de comprimento e 1 m de altura, realizada em enrocamento com peso entre 2 e 4 tf.

O coroamento tem uma cota variável, sendo de, aproximadamente, +9.30 m Z.H. na parte mais a norte, sofrendo algumas alterações ao longo da sua extensão, com uma variação de ± 0.40 m. Na parte final, e próxima do esporão sul, verifica-se um aumento significativo para cerca de +10 m Z.H.. Apresenta ainda uma largura variável, entre 7 m e 9 m até ao encontro do muro de proteção, como é visível na Figura 4.34. É constituído pelo mesmo material do manto, havendo no entanto uma selagem em betão. Verificou-se ainda a existência de blocos colocados no coroamento na parte sul da estrutura para proteção adicional, Figura 4.36.

Na Figura 4.37 e Figura 4.38, encontra-se o perfil transversal da estrutura e a planta da mesma com base num levantamento realizado pela empresa Irmãos Cavaco S.A. em novembro de 2014.



Figura 4.34 - Coroamento da estrutura aderente central.



Figura 4.35 - Enrocamento da estrutura aderente central.



Figura 4.36 – Blocos no coroamento.

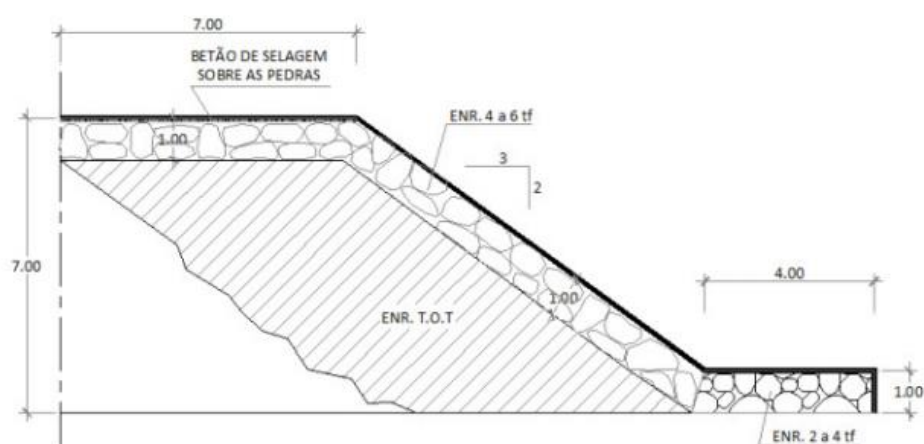


Figura 4.37 - Perfil transversal da estrutura aderente central (cedido pela Câmara de Ovar).

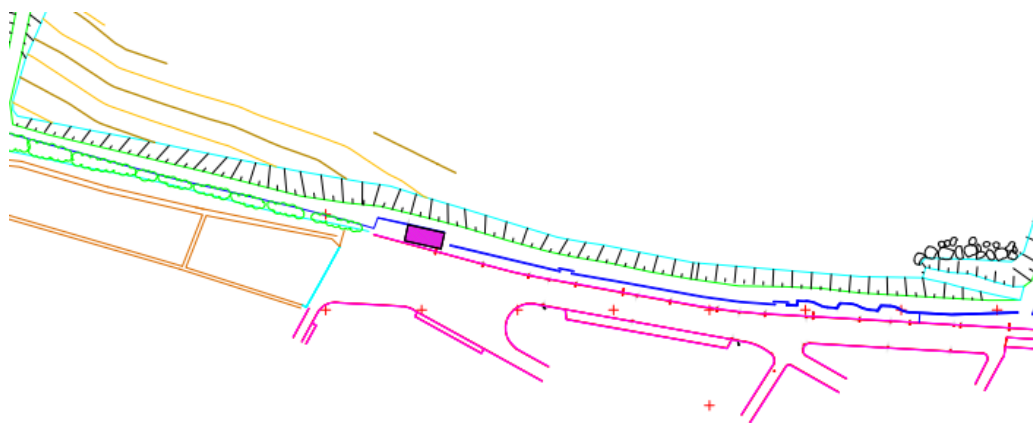


Figura 4.38 - Planta da estrutura aderente central (levantamento topográfico realizado pela ICESA em novembro de 2014).

É possível verificar-se a existência de algumas pedras soltas na base da estrutura, na zona adjacente ao esporão norte, no entanto não existe desarrumação e rombos na estrutura, como é possível verificar na Figura 4.39.



Figura 4.39 - Visão geral da estrutura aderente central.

Verifica-se que a zona mais a norte da estrutura é o local de maior preocupação devido à elevada erosão que aí se verifica, havendo uma maior exposição à agitação marítima bem como uma maior probabilidade de ocorrência de galgamentos, como se pode verificar na Figura 4.40. A extensão do areal vai aumentando para sul, apresentando na zona do esporão sul uma acumulação de sedimentos considerável, soterrando em parte o enraizamento deste, visível na Figura 4.41.

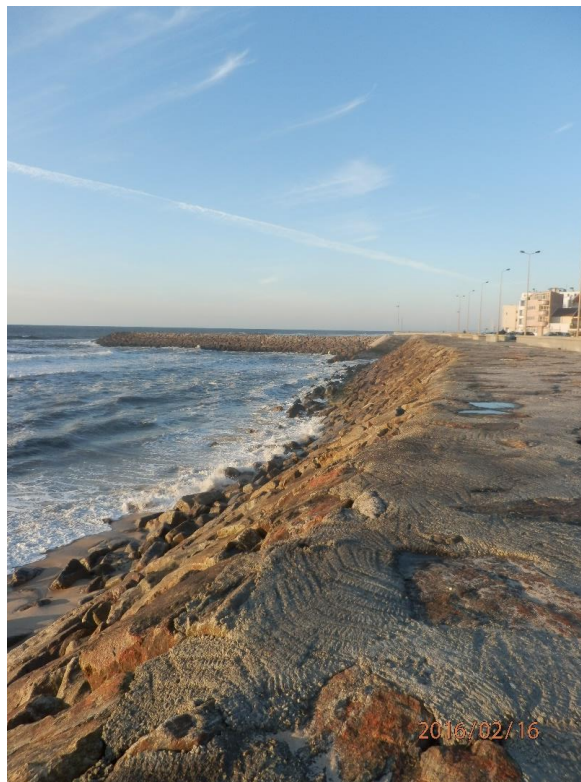


Figura 4.40 - Erosão a norte e presença de pedras soltas na base.

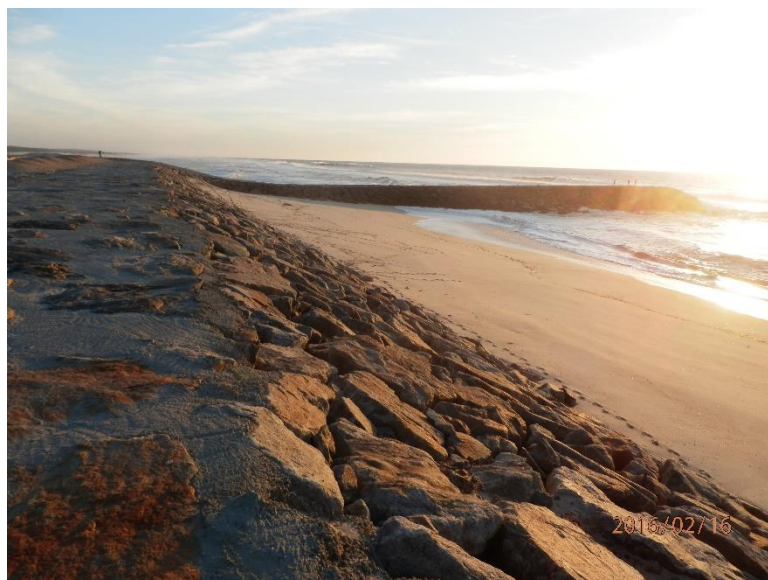


Figura 4.41 - Acumulação de sedimentos a sul e enraizamento do esporão parcialmente soterrado.

4.5.4. ESPORÃO SUL

Inversamente ao ocorrido no esporão norte, este não se encontra na sua localização inicial, tendo sido reconstruído em 1998 numa localização mais a sul. Tem uma configuração muito semelhante ao esporão norte, com direção perpendicular à costa, uma extensão igualmente aproximada de 135 m, um perfil trapezoidal, com taludes de inclinação de 3:2. O coroamento apresenta uma cota variável de cerca de + 10 m Z.H. no enraizamento e + 7 m Z.H. na cabeça, tem uma largura de, aproximadamente, 8 m, possível de verificar na Figura 4.42. A cabeça do esporão tem de forma análoga ao esporão norte, uma configuração circular e o seu enrocamento encontra-se selado por betão até cerca de metade da extensão deste. Na Figura 4.43 é possível ter uma visão geral do esporão, bem com da estrutura aderente central.



Figura 4.42 - Coroamento do esporão sul.



Figura 4.43 - Vista geral do esporão sul e estrutura aderente (Piqueiro, 2015).

Este esporão foi reabilitado em 2011, para correção do posicionamento de algum enrocamento, Figura 4.44, que se tinha entretanto deslocado. Atualmente apresenta um excelente estado de conservação, como é possível verificar na Figura 4.45. Na Figura 4.46, é possível observar também a planta do esporão sul obtida através de um levantamento realizado pela empresa Irmãos Cavaco S.A. em novembro de 2014.

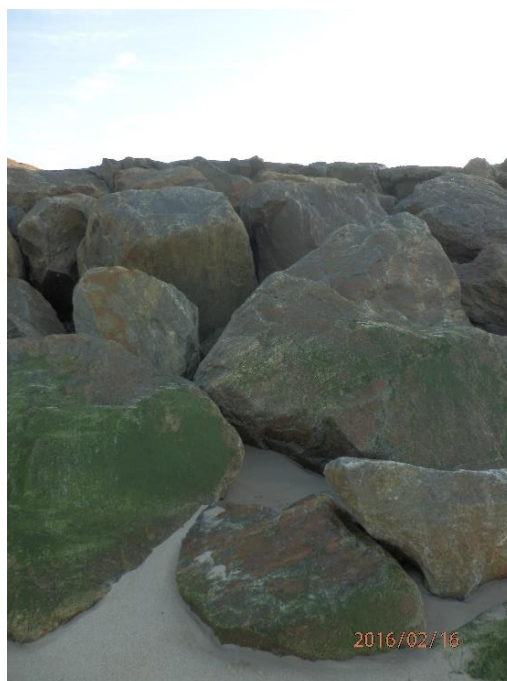


Figura 4.44 - Enrocamento do esporão sul.



Figura 4.45 - Bom estado de conservação do esporão sul.

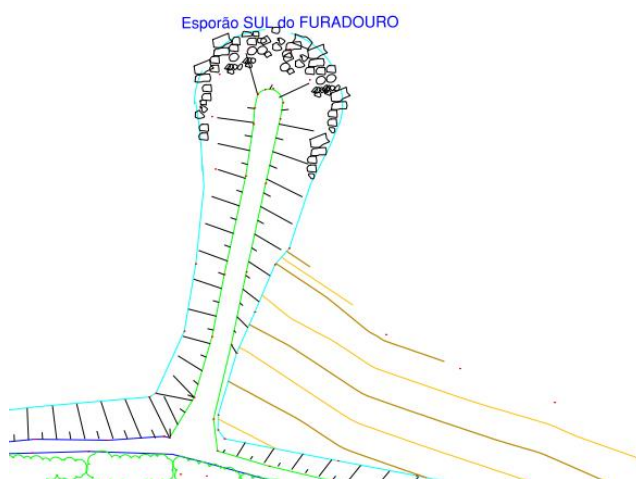


Figura 4.46 - Planta do esporão sul (levantamento topográfico realizado pela ICSA em novembro de 2014).

4.5.5. ESTRUTURA LONGITUDINAL ADERENTE SUL

Na parte mais a sul, existe, por fim, uma estrutura aderente, com uma extensão aproximada de 215 m, com um perfil muito semelhante ao da estrutura aderente entre os esporões. Porém, na zona final existe uma bifurcação, encontrando-se o seu interior preenchido com areia. O coroamento apresenta uma cota descendente, sendo inicialmente no enraizamento do esporão de cerca de + 10 m Z.H. e na zona final das bifurcações de + 5.5 m Z.H., tendo uma largura de, aproximadamente, 4 m e encontrando-se selado por betão, Figura 4.47.

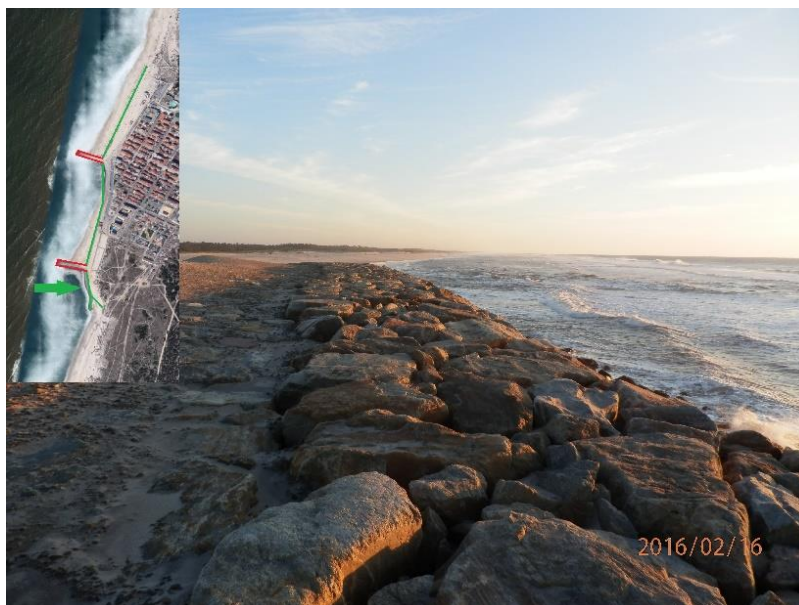


Figura 4.47 - Coroamento da estrutura aderente sul.

Esta estrutura está muito exposta à agitação marítima, devido à erosão a sotamar do esporão, no entanto, apresenta um bom estado de conservação, notando-se apenas alguns blocos soltos na sua base, como é possível verificar na Figura 4.48.

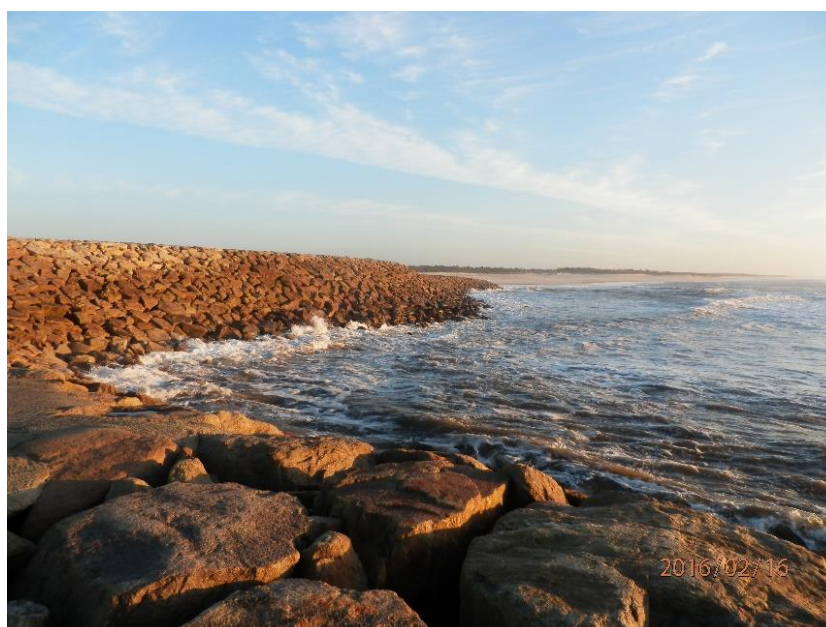


Figura 4.48 - Vista geral da estrutura aderente sul.

Esta estrutura protege vegetação, dunas e passadiços, não apresentando riscos para estruturas e pessoas. Na Figura 4.49 encontra-se a planta da estrutura obtida através de um levantamento realizado pela empresa Irmãos Cavaco S.A. em novembro de 2014.

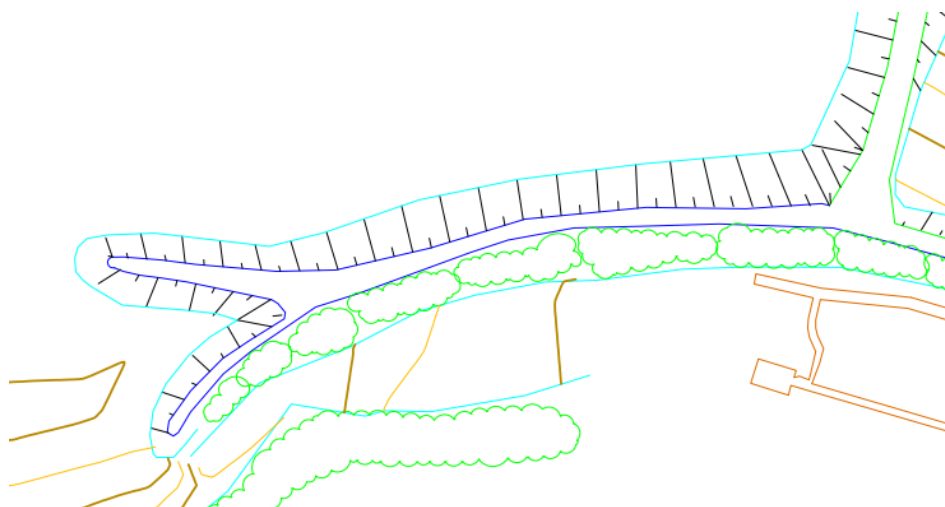


Figura 4.49 - Planta da estrutura aderente sul (levantamento topográfico realizado pela ICSA em novembro de 2014)

4.6. APLICAÇÃO DO MODELO SWAN

4.6.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Como condições de fronteira, foram consideradas os parâmetros de agitação marítima ao largo obtidos através da ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), uma organização direcionada para a previsão de dados meteorológicos, providenciando diversos dados relativos ao ar e ao mar. Foram assim obtidos as estimativas de agitação marítima ao largo na zona em estudo (praia do Furadouro), nomeadamente, a altura de onda significativa, a direção média e o período médio numa extensão temporal de 01 de outubro de 1979 até 31 de agosto de 2015, em intervalos de 6h, perfazendo assim um conjunto de 52476 dados ao largo, a utilizar como condição de fronteira do modelo SWAN.

Fazendo uma análise aos dados obtidos ao largo, é possível, através da Figura 4.50, verificar que existe uma predominância de agitação vinda de noroeste, como é típico na costa oeste de Portugal Continental, sendo a mais recorrente entre os 300 e os 320°, com 14757 registos, apesar de se verificarem ocorrências de outras direções, nomeadamente de sudoeste, que provocaram grandes estragos como referido no subcapítulo 4.3. No entanto, em termos estatísticos, a média é de 290.9° e o desvio padrão de 65.6°. Analisando os meses de verão e inverno, verifica-se um pequeno aumento da média dos valores registados, mais próximo do norte, de 296.3° e um desvio padrão de 9.7°. Nos meses de inverno e outono verifica-se uma diminuição da média dos registos da direção para 285.6°, aproximando-se de oeste, com um desvio padrão de 60.8°, Tabela 4.1.

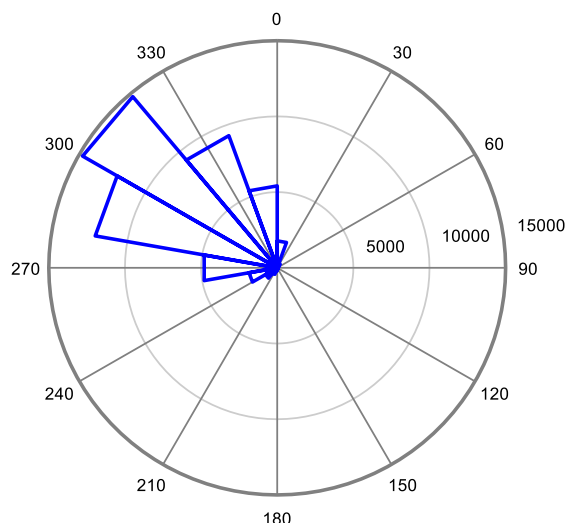


Figura 4.50 - Direção da agitação ao largo da praia do Furadouro.

Em relação à altura de onda significativa, a média é de 2.05 m e o desvio padrão é de 0.96 m, verificando-se uma maior frequência de valores entre 1 e 3 m. A altura de onda significativa atinge o valor máximo de 9.82 m, como se pode observar na Figura 4.51. Fazendo uma análise aos meses de verão e primavera, verifica-se uma média dos registos de altura significativa de 1.60 m, com um desvio padrão de 0.63 m, e um valor máximo de 5.84 m. Nos meses de inverno e outono, como seria expectável, verifica-se um aumento da média dos registos da altura significativa, para 2.49 m, sendo o desvio padrão de 0.51 m e o valor máximo de 9.82 m.

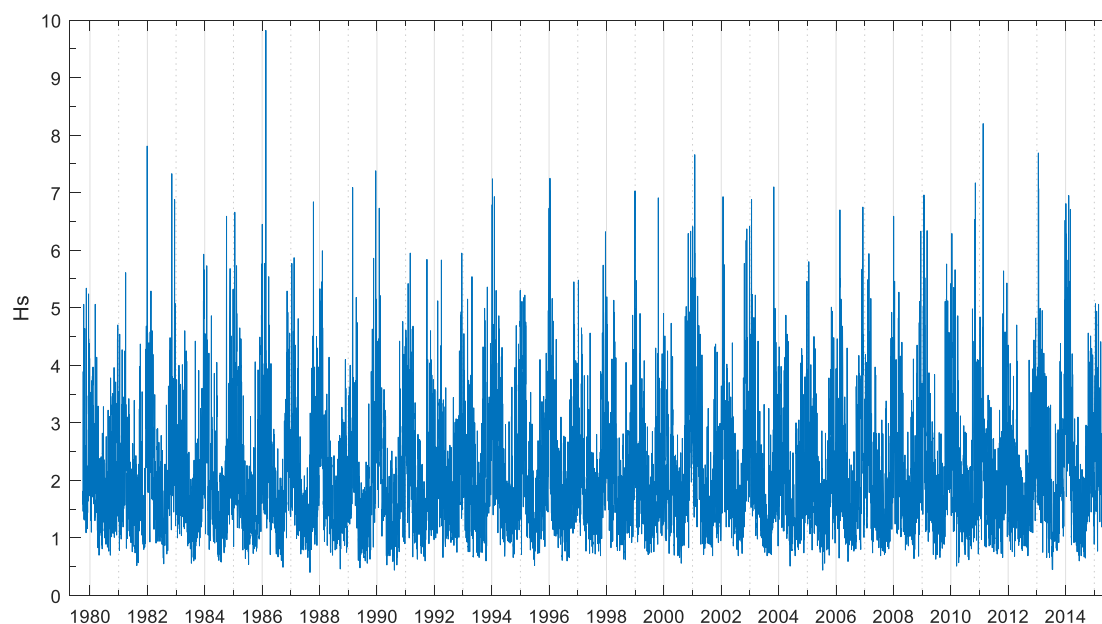


Figura 4.51 - Altura de onda significativa ao largo da praia do Furadouro.

O período médio obtido apresenta um valor médio de 9.07 s e um desvio padrão de 1.97 s, sendo que a maior predominância de valores se situa entre 7 e 11 s. De forma análoga ao verificado nas alturas de onda significativas, também neste período se registam picos, tendo ocorrido um valor máximo de 16.7 s, como se pode verificar na Figura 4.52. Separando em meses de verão e primavera, abril até setembro, e inverno e outono, outubro até março, verifica-se uma diminuição da média do período nos meses de verão e primavera para 8.0 s verificando-se nos restantes meses uma média de 10.1 s, sendo superior, como seria expectável.

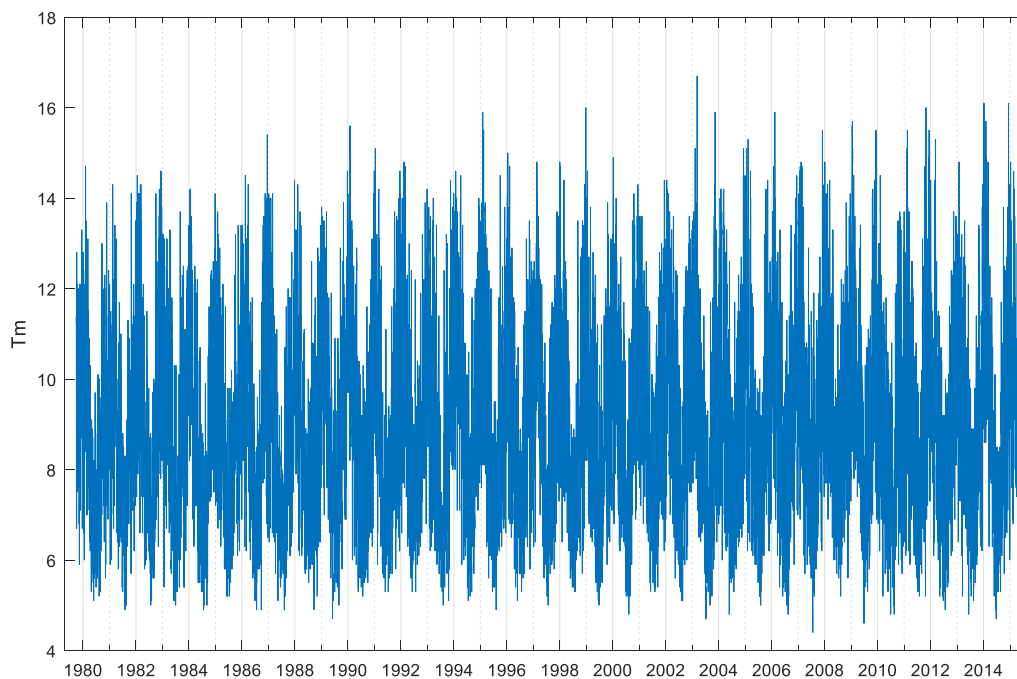


Figura 4.52 - Período médio ao largo.

Na Figura 4.53, é possível verificar a ocorrência simultânea dos registos de altura de onda significativa e do período médio. A situação mais frequente ocorre para valores de altura de onda significativa maiores ou iguais a 1 m e menores que 2 m, com um período médio superior ou igual a 7 s e inferior a 8 s. É importante analisar os valores extremos, verificando-se quatro ocorrências de altura de onda significativa superior a 8 m, com um período médio entre os 13 s e 15 s e ainda a ocorrência de 12 registos de período médio superior a 16 s.

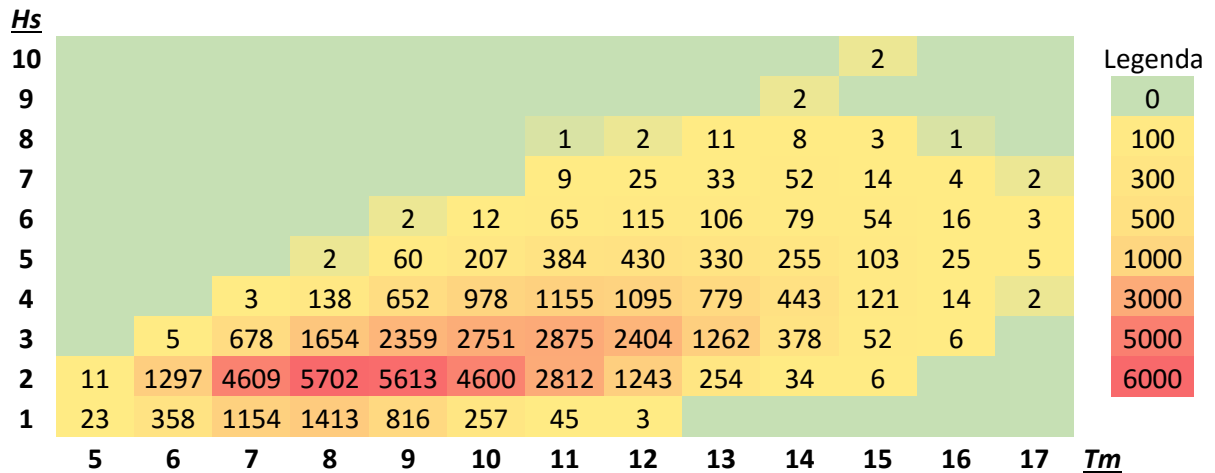


Figura 4.53 – Matriz das ocorrências das alturas de onda significativas e do período médio ao largo.

Na Tabela 4.1, encontra-se um resumo da análise estatística realizada aos regimes de agitação marítima obtidos ao largo.

Tabela 4.1 - Análise estatística dos dados de agitação marítima ao largo.

	Hs (m)	Tm (s)	θ_m (°)
Média	2.05	9.1	290.9
Mediana	1.82	8.9	304.0
Moda	1.49	8.1	300.0
Desvio Padrão	0.96	2.0	65.6
Mínimo	0.40	4.4	0.0
Máximo	9.82	16.7	360.0
Contagem	52476	52476	52476

Inverno	Hs (m)	Tm (s)	θ_m (°)
Média	2.49	10.1	285.6
Mediana	2.32	10.1	298.0
Moda	1.73	10.8	300.0
Desvio Padrão	1.02	1.8	60.8
Mínimo	0.51	5.1	0.0
Máximo	9.82	16.7	360.0
Contagem	26244	26244	26244

Verão	Hs (m)	Tm (s)	θ_m (°)
Média	1.60	8.0	296.3
Mediana	1.49	7.8	310.0
Moda	1.36	7.1	315.0
Desvio Padrão	0.63	1.5	69.7
Mínimo	0.40	4.4	0.0
Máximo	5.84	14.5	360.0
Contagem	26232	26232	26232

Os elementos relativos ao nível de maré apenas são referentes à maré astronómica, sendo esta causada pela atração gravitacional entre a Terra, o Sol e a Lua, variando a altura da maré dependendo da posição destes astros. Em Portugal, esta é do tipo semi-diurno, havendo a ocorrência de duas preia-mar e de duas baixa-mar por dia lunar. As marés apresentam uma periodicidade conhecida sendo desta forma possível prever os seus registos.

A sobrelevação da maré, devido a efeitos meteorológicos como ventos fortes e à variação da pressão atmosférica não está contemplada nos dados obtidos, sendo que esta é menos preponderante do que a maré astronómica, podendo, no entanto, por vezes, provocar fenómenos de galgamento que não se verificariam apenas com a maré astronómica, *storm surge*, associado à diminuição da pressão atmosférica, que provoca a elevação da maré. As consequências associadas a esta sobrelevação variam com a sua intensidade e particularmente com o nível de maré astronómica que se verifica, sendo facilmente associado a uma maior perigosidade aquando da sua ocorrência na existência de preia-mar. Esta é apenas possível de quantificar recorrendo a registos de marégrafos, não tendo nenhuma periodicidade associada [10].

Gama (1996) analisou dados relativos à sobrelevação meteorológica durante o período entre 1986 e 1988 recorrendo aos dados de 7 marégrafos nacionais, concluindo que os valores de sobrelevação poderão ser superiores a 1 m. A estação mais próxima da zona de estudo, situada em Aveiro, registou 0.78 m como valor máximo de sobrelevação.

Para os cálculos com o SWAN, foram então utilizados os dados de maré astronómica obtidos, tendo sido posteriormente adicionado o valor constante de 0.7 m para a consideração da sobrelevação. Analisando os dados do nível de maré obtidos, verifica-se que a média é de + 2.7 m Z.H., variando entre +1.24 m Z.H. e +4.38 m Z.H.

Nos cálculos com o SWAN, não foi considerada a atuação de vento por falta de informação. Também o tempo necessário para as simulações, já de si elevado, seria muito maior, não sendo viável a sua utilização. De forma análoga à influência do vento, também os efeitos das correntes não foram considerados.

4.6.2. BATIMETRIA E MALHA COMPUTACIONAL

Para a utilização do SWAN foi necessária a definição da zona de estudo, da sua batimetria e das malhas computacionais. A batimetria foi obtida pelas cartas hidrográficas nº1 e nº2 do Instituto Hidrográfico, fazendo uma representação de uma faixa de costa compreendida entre o rio Minho e o Cabo Mondego. Tratam-se de cartas com coordenadas militares, x e y , com origem num ponto fictício 300 km a sul e 200 km a oeste de Melriça, origem do sistema de coordenadas cartesianas Datum 73, muito utilizado em Portugal, Figura 4.54.

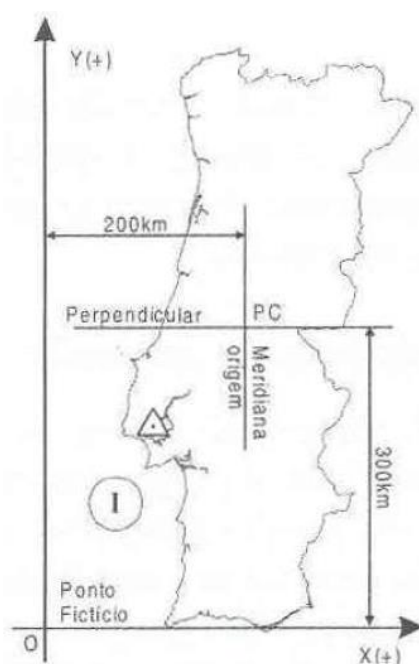


Figura 4.54 - Sistema de coordenadas militares [11].

Com recurso ao programa Surfer8TM, foi possível obter uma visualização gráfica da batimetria do local em estudo, facilitando o processo de escolha dos limites a aplicar, quer na batimetria, quer nas malhas de cálculo do modelo SWAN. Este programa, considerando o ficheiro de batimetria fornecido, e atendendo à escolha dos limites a utilizar e ao espaçamento em x e em y considerado, efetua uma interpolação, obtendo-se uma nova batimetria, mais pormenorizada e adequada à zona em estudo. Desta forma, definiu-se a batimetria, que se apresenta na Figura 4.55, e com as características da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Definição da batimetria.

	Inicial	Comprimento	Final	DX/DY	nº DX/DY
X	91 000	65 000	156 000	200	325
Y	380 000	140 000	520 000	200	700

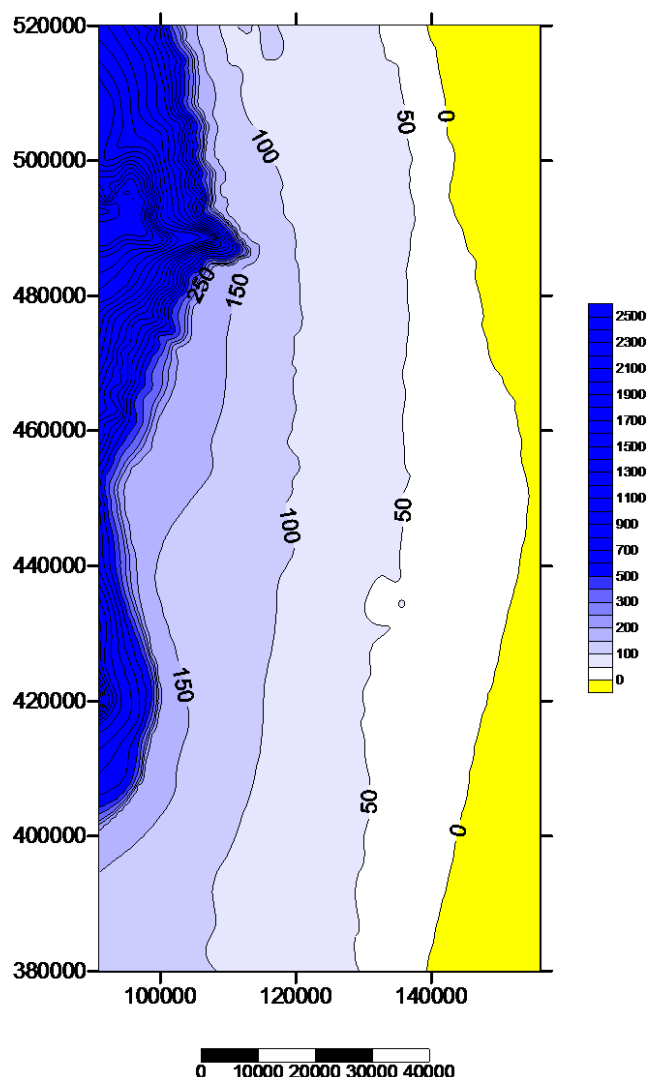


Figura 4.55 - Batimetria da zona em estudo.

Como é possível verificar, numa extensão de cerca de 40 km a partir da costa, a batimetria dos fundos apresenta uma baixa inclinação, sendo que nessa extensão apenas tem uma variação total de cotas batimétricas de cerca de 200 m, dando um valor médio de inclinação de 0.5%. A oeste dessa zona de menor inclinação, esta varia bruscamente para valores mais elevados.

Neste caso de estudo, tendo em conta a sua escala, apenas foram consideradas duas malhas, a malha Global (*Main Grid*) e uma mais pormenorizada (*Nested Grid*).

Na definição da malha computacional, foi necessário incluir zonas de elevada profundidade, cerca de 500 m, pois é sensivelmente a partir deste valor que começa a haver uma influência do fundo na agitação marítima, utilizando assim como limite para a *Main Grid* na direção x o mesmo limite definido para a batimetria.

Foi também considerada a zona onde se situa a bóia-ondógrafo do porto de Leixões de coordenadas (128 705.4, 43 577.81), para posterior validação dos resultados obtidos com o modelo SWAN com dados medidos nessa bóia. Foi assim necessária uma maior extensão do domínio na direção y , tendo em conta que esta se encontra a uma distância aproximada de 50 km da praia do Furadouro. Além

disso, é conveniente considerar uma distância de, pelo menos, 20 km para norte deste ponto, de modo a não haver influência das condições de fronteira

Para definir a *Nested Grid*, considerou-se uma extensão em x de modo a que o limite de oeste se localizasse numa profundidade aproximada de 50 m e com uma extensão em y de cerca de 12.5 km, para norte e para sul da praia, ficando assim aproximadamente centrada neste eixo.

Resulta assim, uma *Main Grid* com uma área de 65 km x 100 km e uma *Nested Grid* de 26 km x 25 km com elementos quadrados em ambas as malhas (Δx e Δy iguais). Na Tabela 4.3, é possível verificar as definições consideradas para as malhas computacionais que se encontram na Figura 4.56.

Tabela 4.3 - Definições das Malhas.

		Inicial (m)	Comprimento (m)	Final (m)	$\Delta x/\Delta y$ (m)	nº $\Delta x/\Delta y$ (m)
Main Grid	X	91 000	65 000	156 000	500	130
	Y	400 000	100 000	500 000	500	200
Nested Grid	X	130 000	26 000	156 000	200	130
	Y	422 000	25 000	447 000	200	125

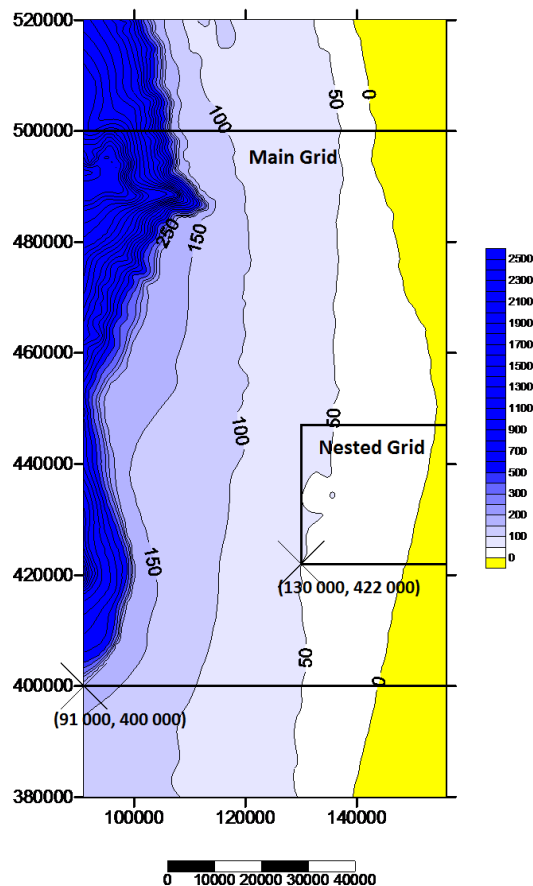


Figura 4.56 - Malhas consideradas.

4.6.3. PONTOS OUTPUT E FICHEIROS INPUT

Na aplicação do SWAN, é necessário escolher previamente os pontos onde se pretendem obter os resultados do modelo (embora o modelo forneça resultados em todos os pontos das malhas definidas). Os pontos escolhidos tiveram em consideração o estudo da influência da profundidade na agitação, sendo que estão no alinhamento longitudinal da praia em locais com profundidade aproximada de 10, 20, 40 e 50 m. Foi considerado ainda um ponto coincidente com a bóia ondógrafo de Leixões, A Tabela 4.4 e a Figura 4.57 identificam a localização dos pontos mencionados.

Tabela 4.4 - Pontos selecionados para obtenção dos resultados do modelo SWAN.

	X	Y	Cota Batimétrica (m)
S1	150 0000	433 400	10.05
S2	146 000	433 600	20.65
S3	139 200	433 600	40.28
S4	130 000	433 800	50.63
S5	128 705.4	43 577.81	77.12

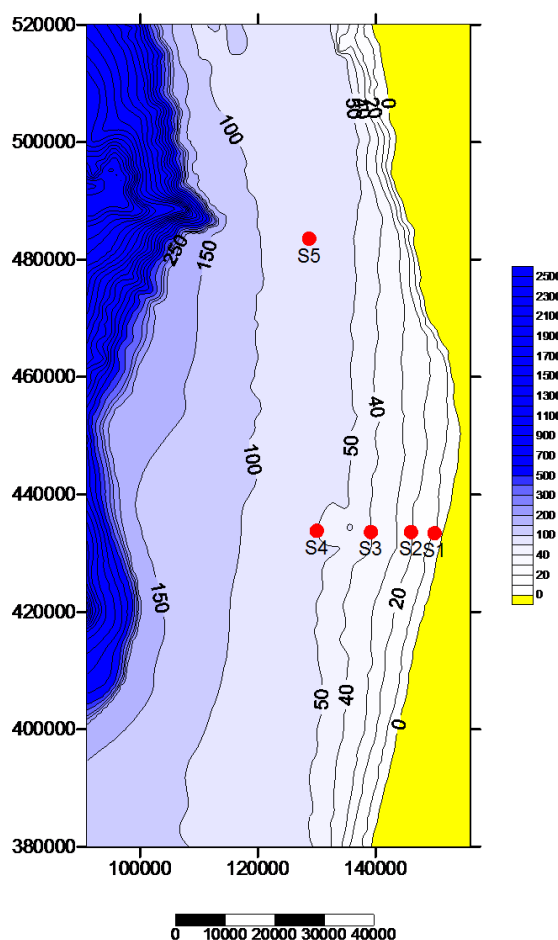


Figura 4.57 - Localização dos pontos output para a aplicação do SWAN.

Com base nas características de agitação ao largo (H_s , T_p e Dir), procedeu-se à sua transferência para a zona em estudo, e em particular, para cada um dos pontos selecionados. Tal implicou a criação de 104952 ficheiros de *input* necessários, 52476 para cada malha computacional. Esta criação é realizada de forma expedita com recurso ao pacote de software SOPRO (Fortes *et al.*, 2006). No anexo 1, encontra-se um exemplo de um ficheiro *input* utilizado para a simulação do SWAN para o caso de estudo, para cada uma das malhas considerada.

4.6.4. CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS SIMULAÇÕES

A versão do SWAN utilizada para as simulações foi a 40.72AB, para os 52476 regimes de agitação entre outubro de 1979 e agosto de 2015 em modo estacionário e com as seguintes características:

- Sem consideração de correntes e ventos;
- Espectro direcional caracterizado por um espectro em frequência de JONSWAP de 21 intervalos, de 0.04 a 0.5 Hz, com distribuição logarítmica, e uma discretização em direção que cobre 360°, dividida em 24 intervalos;
- Um coeficiente de rebentação constante de 0.65 para o período total;
- Inclusão dos fenómenos físicos de difração, interação onda-onda tripla (TRIAD) e quádrupla (QUAD) e rebentação induzida pelo fundo e por excesso de declividade (whitcapping). O atrito de fundo é introduzido segundo a expressão semi-empírica de JONSWAP.

4.6.5. ANÁLISE DE RESULTADOS

A aplicação do modelo SWAN produziu um ficheiro de resultados para cada simulação para a *Main Grid* e para a *Nested Grid* contendo os valores da altura de onda significativa, da direção média e de pico e do período de pico e os períodos médios, T_{m01} e T_{m02} . Para cada ponto selecionado, o SOPRO permite a junção dos resultados obtidos para cada condição de agitação marítima incidente de forma expedita, através da criação de ficheiros TRANSFER, os quais englobam todos os resultados obtidos no período de análise para cada ponto *output*.

Na Tabela 4.5, apresenta-se uma análise estatística dos resultados obtidos para cada um dos primeiros 4 pontos de *output*, sendo os resultados obtidos para o ponto S5 apresentados no capítulo de validação com os dados da bóia.

Tabela 4.5 - Análise estatística dos resultados obtidos nos pontos S1, S2, S3 e S4.

S1 (10m)				S2 (20m)		
	Hs (m)	Tp (s)	θm (°)	Hs (m)	Tp (s)	θm (°)
Média	1.58	9.0	298.9	1.68	9.0	301.5
Mediana	1.38	9.1	298.3	1.50	9.1	301.4
Moda	1.34	9.1	289.0	1.21	9.1	274.8
Desvio Padrão	0.85	2.0	23.6	0.82	2.0	28.2
Mínimo	0.00	4.5	208.9	0.00	4.5	188.9
Máximo	4.99	16.7	349.3	8.36	16.7	351.9
Contagem	52476	52476	52476	52476	52476	52476

S3 (40m)				S4 (50m)		
	Hs (m)	Tp (s)	θm (°)	Hs (m)	Tp (s)	θm (°)
Média	1.81	9.0	303.9	1.89	9.0	293.1
Mediana	1.63	9.1	304.8	1.70	9.1	303.5
Moda	1.48	8.2	275.9	1.25	8.2	278.0
Desvio Padrão	0.87	2.0	30.7	0.88	2.0	61.5
Mínimo	0.00	4.5	0.4	0.01	4.5	0.0
Máximo	8.47	16.7	359.8	8.68	16.7	360.0
Contagem	52476	52476	52476	52476	52476	52476

A diminuição da profundidade de água produz efeitos na propagação das ondas, i.e., verifica-se que a direção média sofre uma ligeira rotação no sentido de W, resultante do fenómeno de refração, não sendo, no entanto, facilmente verificado pelos resultados estatísticos.

Na Figura 4.58 comparam-se os dados da direção média ao largo com os resultados obtidos para o ponto S1, a 10 m de profundidade. Verifica-se uma rotação da direção no sentido de W, estando o maior número de ocorrências, 18730, situadas entre os 280° e 300° para os resultados de S1, aproximando-se da direção oeste, enquanto que para o largo estavam entre 300° e 320°. Tal é o resultado da refração, na medida em que a crista das ondas se vão dispendo paralelamente às linhas batimétricas. Também para os outros pontos se verifica esta rotação, embora menos evidenciada devido à sua maior profundidade e afastamento da costa.

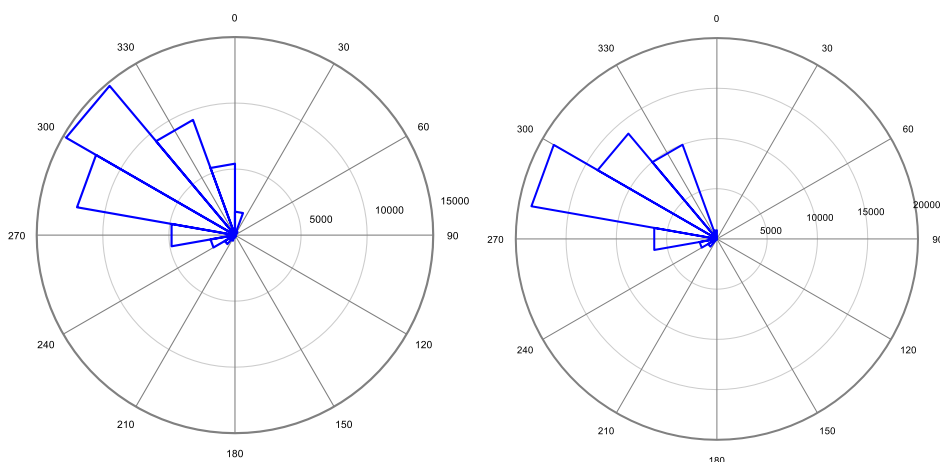


Figura 4.58 - Direção média ao largo (esquerda) e no ponto S1 (direita).

Realizou-se uma análise para os 4 pontos selecionados, utilizando-se apenas os resultados obtidos de janeiro a março de 2014, tendo-se escolhido esta extensão temporal devido à ocorrência de temporais que provocaram galgamentos na praia do Furadouro.

Analisando a Figura 4.59, referente aos resultados obtidos para a altura de onda significativa, verifica-se que os resultados para os 4 pontos são muito próximos, verificando-se valores mais elevados para o ponto S4 e mais baixos para S1. Isto é, ocorre uma diminuição da altura de onda significativa com o aproximar da costa e a diminuição da profundidade da água. Também em comparação com os dados ao largo, verifica-se uma diminuição deste parâmetro, cuja média era 2.05 m, valor este superior a todos os valores médios dos resultados.

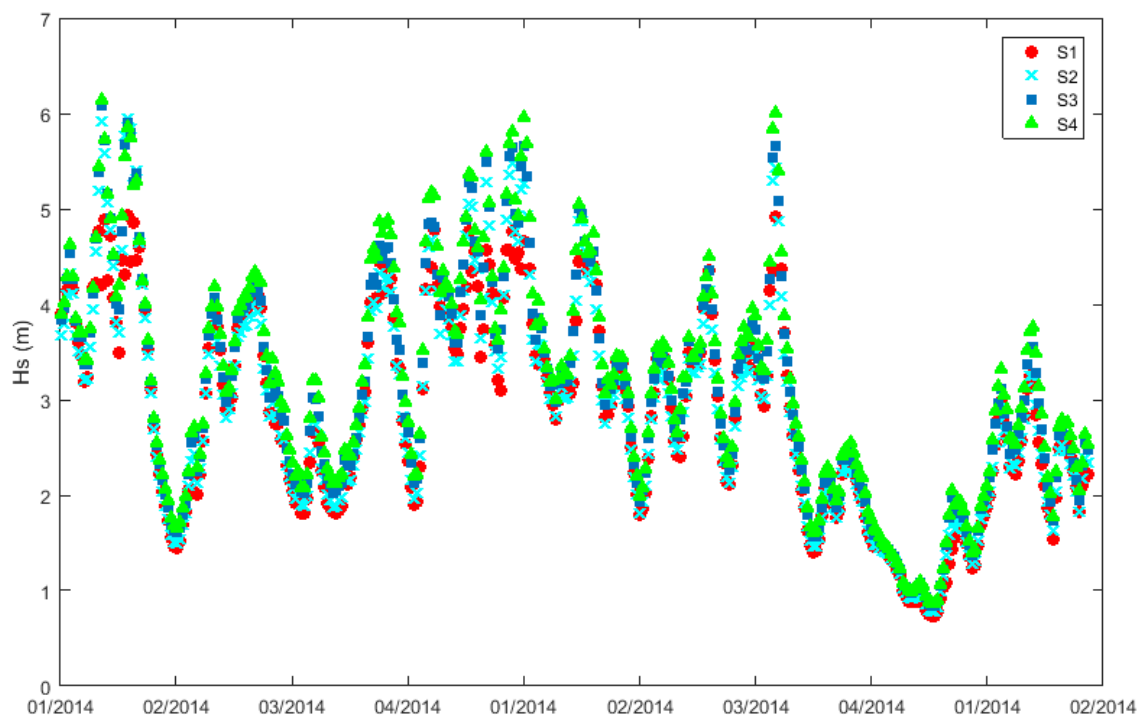


Figura 4.59 - Comparação dos resultados da altura de onda significativa nos 4 pontos de *output*.

Analisando o período médio, Figura 4.60, verifica-se uma maior dispersão de valores, apresentando para S1 valores menores e estando os outros 3 pontos com resultados muito próximos.

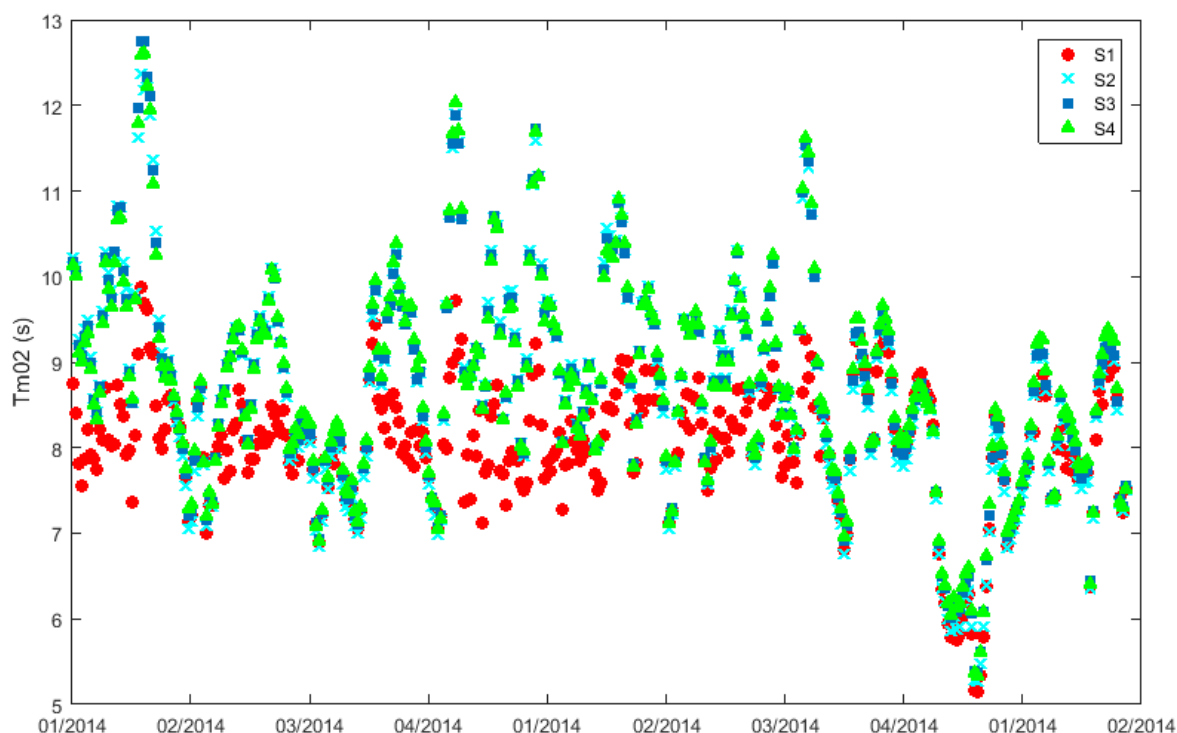


Figura 4.60 - Comparação dos resultados do período médio nos 4 pontos de output.

Verifica-se a presença de picos na altura de onda significativa e no período, sendo estes coincidentes nos primeiros dias de cada mês, indicadores da ocorrência de temporais que se verificaram na praia do Furadouro onde ocorreram galgamentos das estruturas de defesa.

4.6.6. COMPARAÇÃO DOS DADOS DA BÓIA COM O PONTO S5

O ponto S5, mais afastado da zona de estudo, é coincidente com a localização da bóia ondógrafo do porto de Leixões. Tal permitiu efetuar a validação dos resultados obtidos com o SWAN, com o intuito de se analisar o comportamento do modelo e a fiabilidade dos seus resultados.

Existem 10 bóias ondógrafo em funcionamento em Portugal Continental, que têm a função de registar em tempo real os dados referentes à agitação marítima, altura de onda, período de onda e direção e disponibilizar esses dados via rádio para a estação ondógrafo. Por vezes, por falha técnica, falha de transmissão, manutenção ou avaria, os dados da bóia não são registados. Para a análise comparativa com o ponto S5, considerou-se os dados da bóia referentes ao período de 1 de agosto de 2001 a 31 de agosto de 2002, de 6 em 6 horas. Existem, no entanto, algumas falhas de registos, contabilizando no total um conjunto de 1368 registos para comparar, tendo-se considerado apenas os resultados do SWAN coincidentes com os registos disponíveis para a comparação.

Na Tabela 4.6 encontra-se a análise estatística realizada para comparar os resultados obtidos com os registados pela bóia. Verifica-se que os valores médios, para todos os parâmetros avaliados, são relativamente próximos.

Tabela 4.6 - Comparação estatística dos registros da bóia de Leixões e dos resultados do ponto S5.

	Hs (m)		Tm (s)		θ_p (°)	
	S5	Bóia	S5	Bóia	S5	Bóia
Média	1.96	1.94	7.1	7.1	291.2	306.8
Mediana	1.79	1.94	6.8	6.8	307.5	310.0
Moda	1.50	1.50	7.4	5.0	307.5	315.0
Desvio Padrão	0.80	0.97	1.5	1.8	74.6	19.8
Min	0.48	0.41	4.1	3.0	7.5	200.0
Max	6.33	6.91	10.9	12.9	352.0	345.0
Contagem	1368	1368	1368	1368	1368	1368

Foram ainda calculados parâmetros estatísticos indicados para comparação de dados, o ME (Mean Error ou erro médio), o MAE (Mean Absolute Error ou erro médio absoluto), RMSE (Root Mean Square Error ou raiz do erro médio quadrático) e o SI (Scatter Index ou índice de dispersão), que podem ser consultados na Tabela 4.7.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)}{n} \quad (4.1)$$

$$MEA = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \hat{X}_i|}{n} \quad (4.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{n}} \quad (4.3)$$

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{X}} \quad (4.4)$$

onde X representa os resultados obtidos, $\hat{X}$ os dados registrados na bóia e $\bar{X}$ a média dos dados registrados na bóia.

Tabela 4.7 - Parâmetros estatísticos para comparação dos registros da bóia com os resultados do ponto S5.

	Hs (m)	Tm (s)	θ_p (°)
ME	0.0186	0.0232	-15.6703
MAE	0.2457	0.6315	32.8531
RMSE	0.3208	0.816	78.6537
SI	0.1655	0.1156	0.2564

O ME foi calculado somando as diferenças obtidas entre os dados registrados na bóia e os resultados obtidos no ponto S5. Para Hs e Tm, verificaram-se valores positivos, o que indica uma sobrestimação

dos resultados, sendo, no entanto, muito próximo de zero, o que indica uma boa aproximação. Para a direção obteve-se um valor negativo, indicador de subestimação, sendo, no entanto, um valor aceitável para o parâmetro em questão.

O MAE é um melhor indicador do valor real do erro em comparação com o ME, somando o valor absoluto da diferença dos dados para cada registo. Para Hs e Tm verifica-se um valor muito próximo de zero, o que indica uma boa aproximação e um erro baixo. Também para a direção o valor obtido apresenta uma boa aproximação dos resultados.

O RMSE traduz a raiz quadrada da média dos erros ao quadrado, tendo também esta idealmente um valor próximo de zero. Para os três parâmetros de agitação, verificou-se uma boa aproximação.

O SI traduz o quociente entre o RMSE e a média dos valores registados, tendo também como valor ideal o zero, que se verifica para os três parâmetros de agitação analisados.

Concluiu-se então que os dados registados na boia de Leixões apresentam uma boa aproximação aos resultados obtidos para o ponto S5 pela aplicação do modelo SWAN, validando a aplicação do modelo e os resultados obtidos.

4.7. APLICAÇÃO DE FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA CÁLCULO DO GALGAMENTO

4.7.1. PROGRAMA FORTRAN

No cálculo do galgamento através da utilização de fórmulas empíricas, optou-se pela utilização das formulações de Mase *et al.* (2013), devido ao facto de se utilizar dados de agitação marítima ao largo, e não no pé da estrutura ou na zona de rebentação, além de que esta formulação é direcionada para o cálculo em praias com estrutura de proteção em terra ou em águas pouco profundas, o que se verifica no caso de estudo.

Foram assim utilizados resultados obtidos em S1 através da aplicação do SWAN para a batimétrica de -10 m Z.H. como condições iniciais. Note-se que Mase *et al.* (2013) não especifica a definição de largo, podendo considerar-se águas mais profundas. Para a sua implementação, foi utilizado um programa FORTRAN desenvolvido no LNEC (Fortes *et al.*, 2013).

Para a aplicação do programa é necessário fornecer ficheiros com a informação necessária para a aplicação das fórmulas, Figura 4.61. Os resultados relativos à agitação marítima no ponto S1, altura de onda significativa, período de pico, direção de agitação e nível da maré, são especificados num ficheiro com nome “alturas_condicoeslargo”. É também necessário um ficheiro “dados_condicoeslargo” com definições relativas à batimetria do ponto ao largo (valor positivo), o declive do perfil de praia (em graus), a metodologia a utilizar, 1 para consideração de $R_{max} = R_{max_{37\%,100}}$ (espraçamento não excedido em 37% dos casos em ensaios de 100 ondas) e 2 para $R_{max} = R_{max_{99\%,100}}$ (espraçamento não excedido em 99% dos casos em ensaios de 100 ondas), a cota do coroamento da estrutura (valor negativo), a largura do coroamento da estrutura, o declive do fundo, devendo este ser de 1:10, 1:20, 1:30 ou 1:100 e o grau de permeabilidade do talude (γ_f), devendo adotar-se o valor de 0.5 para estruturas em enrocamento.

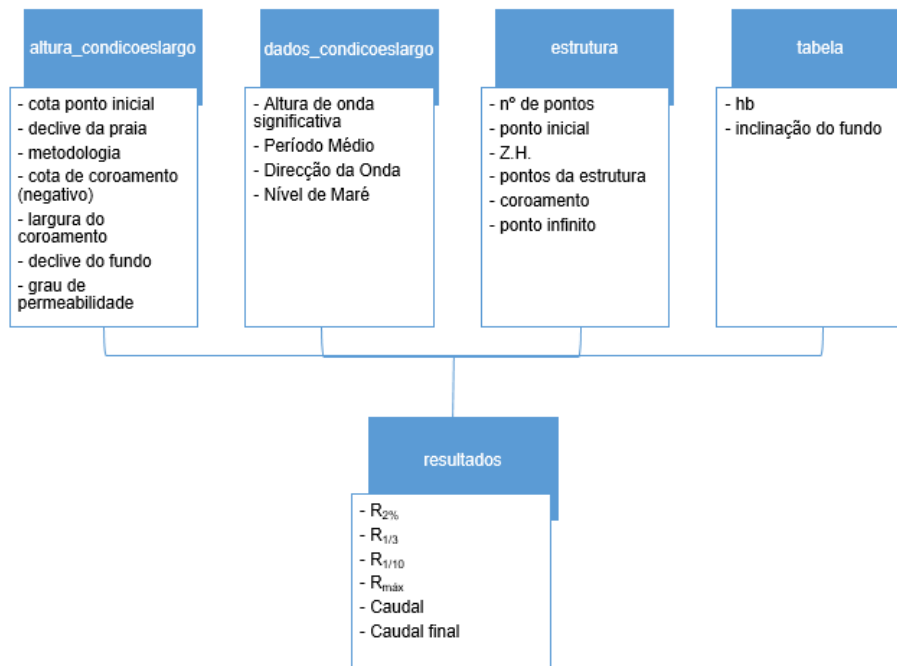


Figura 4.61 - Esquema de aplicação do programa FORTRAN

No ficheiro “estrutura” são dadas indicações relativas à geometria do fundo e da estrutura através da introdução da distância ao ponto inicial e da batimetria de cada ponto considerado, utilizando-se valores negativos para cotas acima do Z.H. e positivas para abaixo. Inicialmente deve-se referir o número de pontos a ser considerado, o primeiro ponto é referente ao ponto inicial onde ocorre a agitação marítima disponibilizada, o ponto seguinte é referente à interceção da praia ou estrutura com o Z.H., seguindo-se o ponto referente à base da estrutura. Os pontos seguintes são relativos à geometria da estrutura, sendo possível a utilização de vários pontos caso existam bermas, sendo o último referente ao coroamento. Por fim, deve-se colocar um ponto de coordenadas infinitas.

É ainda necessário fornecer ao programa um ficheiro “tabela” referente à relação entre a declividade da onda ao largo e a altura de rebentação para o declive do fundo de 1:10, 1:20, 1:30 e 1:100, relações que podem ser observadas na Figura 3.8.

Como *output*, obtém-se um ficheiro com os seguintes dados: comprimento de onda ao largo, L_0 , declividade da onda ao largo, H_0/L_0 , altura de rebentação adimensional, h_b/H_0 , altura de rebentação, h_b , a razão entre a profundidade do ponto inicial e o comprimento de onda, $R_{2\%}$, $R_{1/10}$, $R_{1/3}$, R_{max} , o caudal e por fim, o caudal final, que representa o caudal modificado com um factor de correcção aplicado, Cr.

Apesar de serem fórmulas empíricas, o que traduz uma maior facilidade de aplicação, este é um processo iterativo devido à definição do declive imaginário em função do espriamento, demonstrando a grande utilidade da utilização do programa em FORTRAN.

4.7.2. APLICAÇÃO DO PROGRAMA

Como anteriormente referido, foram utilizados os resultados de agitação marítima que se obtiveram para o ponto S1, a 10 m de profundidade em relação ao Z.H.. Este ponto encontra-se numa zona central da praia, no entanto, estes dados foram considerados para toda a extensão da mesma.

Foram consideradas 6 estruturas, Tabela 4.8 e Figura 4.62, estando duas localizadas na zona norte do esporão norte, três na zona da estrutura aderente central e uma a sul do esporão sul.

A definição das suas geometrias foi feita com base nos perfis apresentados no subcapítulo 4.5, recorrendo ao levantamento realizado pela empresa Irmãos Cavaco S.A. de novembro de 2014. Como largura do coroamento, para as estruturas mais a norte, foi considerado o valor de 11.5 m, sendo esta a distância aproximada do coroamento até ao muro. Para as duas estruturas seguintes foi considerada uma largura de 8 m, e nas duas estruturas seguintes, 5 e 6, foi considerada uma largura de 0 m, pois estas encontram-se na zona de vegetação e passadiços, sendo que o coroamento da estrutura é um local de passagem de peões. Como base da estrutura foi considerado o ponto em que se iniciava o areal, segundo o levantamento utilizado. Com a batimetria do local, determinou-se o declive do perfil de praia e do fundo.

Na Tabela 4.9 e Tabela 4.10, estão representados os dados de *input* considerados para cada estrutura para o ficheiro “dados_condicoeslargo” e “estrutura”, respetivamente.

Tabela 4.8 - Coordenadas do coroamento das estruturas consideradas.

	X	Y
Estrutura 1	151790	434174
Estrutura 2	151724	433996
Estrutura 3	151692	433828
Estrutura 4	151664	433646
Estrutura 5	151622	433458
Estrutura 6	151600	433348



Figura 4.62 - Localização das estruturas consideradas (ArcMap 10).

Tabela 4.9 - Dados de input do ficheiro “dados_condicoeslargo”.

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4	Estrutura 5	Estrutura 6
Cota ponto inicial (m)	10.44	10.42	10.43	10.18	9.88	9.66
Declive da praia (°)	0.620	0.660	1.000	0.494	0.610	0.546
Metodologia	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Cota de coroamento (m Z.H.)	-8.00	-8.00	-9.53	-8.97	-10.21	-10.26
Largura do Coroamento (m)	11.5	11.5	8	8	0	0
Declive do fundo (1/m)	100	100	100	100	100	100
Grau de permeabilidade	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabela 4.10 - Dados de input do ficheiro "estrutura".

Estrutura 1			Estrutura 2		Estrutura 3	
nº pontos	8		8		8	
	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X(m)	Z (m)
ponto inicial	0	10.44	0	10.42	0	10.43
Z.H.	1660.51	0	1663.37	0	1533.97	0
	1706.75	-0.5	1706.75	-0.5	1679	-2.53
	1710.05	-2.7	1710.05	-2.7	1679	-3.53
	1714.05	-2.7	1714.05	-2.7	1683	-3.53
Coroamento	1722	-8	1722	-8	1692	-9.53
Ponto infinito	2000	-100	2000	-100	2000	-100
Estrutura 4			Estrutura 5		Estrutura 6	
nº pontos	8		8		6	
	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X(m)	Z (m)
ponto inicial	0	10.18	0	9.882	0	9.662
Z.H.	1422.53	0	1307.26	0	1479.04	0
	1651	-1.97	1609	-3.21	-	-
	1651	-2.97	1609	-4.21	-	-
	1655	-2.97	1613	-4.21	1586.14	-1.02
Coroamento	1664	-8.97	1622	-10.21	1600	-10.26
Ponto infinito	2000	-100	2000	-100	2000	-100

4.7.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DA APLICAÇÃO DAS FÓRMULAS DE MASE

Os resultados apresentados seguidamente são referentes à consideração de $R_{max} = R_{max99\%,100}$, espraçamento não excedido em 99% dos casos em ensaios com 100 ondas, pois representa a situação mais gravosa. Apenas serão apresentados os gráficos referentes aos galgamentos e espraçamento da estrutura 2, sendo que os restantes podem ser consultados no Anexo B.

Foi realizada uma análise estatística aos resultados obtidos, que se apresenta na Tabela 4.11. A numeração utilizada nestas tabelas para identificar as estruturas é crescente em direção ao sul, isto é, a estrutura mais a norte é a 1 e a mais a sul, a 6, Figura 4.62.

Tabela 4.11 - Análise estatística do caudal galgado médio, q (L/s/m), obtido através das fórmulas empíricas de Mase.

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4	Estrutura 5	Estrutura 6
Média	0.005	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000
Desvio Padrão	0.074	0.074	0.010	0.020	0.000	0.001
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	5.181	5.183	1.078	2.022	0.029	0.203
Ocorrências	3301	3301	732	1056	83	129
Contagem	52476	52476	52476	52476	52476	52476

Verifica-se um valor médio e máximo de caudal médio galgado mais elevado nas duas estruturas mais a norte, é também nestas estruturas onde se verifica os caudais máximos e o maior número de ocorrências de galgamentos. Note-se que estas são as estruturas que apresentam uma maior largura de coroamento, sendo que se estas não fossem consideradas, a disparidade seria ainda mais elevada.

O valor máximo verificado de 5.183 L/s/m regista-se na estrutura 2 no dia 30 de Janeiro de 1990 pelas 6h, data para a qual não há registos de galgamentos, devido à falta de informação existente. Os dados de agitação marítima considerados para esse dia correspondem a uma altura de onda significativa aproximada de 5 m, nível de maré médio de 4.10 m, período de pico de 15.08 s e direção de 284.83°, sendo este o conjunto de parâmetros para o qual seria expectável que houvesse maiores galgamentos. Na Tabela 4.12, estão representadas as características da agitação marítima para a qual se obteve maiores galgamentos.

Tabela 4.12 - Maiores registos de Galgamentos na aplicação das fórmulas de Mase

Data	NM (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	q máximo (L/s/m)
30/1/1990	4.10	4.99	15.09	284.8	5.18
30/1/1990	3.93	4.93	15.09	282.9	3.77
30/12/1998	3.81	4.95	15.09	282.4	3.39
30/12/1998	3.80	4.86	15.09	289.4	2.85
23/2/2007	3.72	4.86	15.09	278.5	2.56
16/1/2009	3.97	4.69	15.09	289.1	2.53
4/1/2014	4.06	4.89	13.64	281.8	3.20
6/1/2014	3.67	4.92	16.69	281.9	3.47
2/2/2014	4.04	4.78	15.09	295.7	3.32
3/3/2014	3.88	4.92	15.09	293.7	3.49

Recorrendo a registos, mais fáceis de obter para os últimos anos de estudo, é possível verificar que alguns resultados obtidos são coincidentes com grandes galgamentos ocorridos, principalmente nos registos de janeiro e fevereiro de 2014, período de tempo para a qual houve registos de diversos galgamentos com grande magnitude, levando à destruição da marginal e originando rombos nas estruturas de defesa.

Na Figura 4.63, é possível verificar os valores médios de galgamento resultantes na estrutura 2 e tal como afirmado anteriormente, os valores máximos ocorrem no início de 2014, verificando-se também na parte inicial de 1990 valores muito elevados, não havendo, no entanto, registos de ocorrências de galgamentos nesse período, sendo que se poderá apenas tratar de falta de informação.

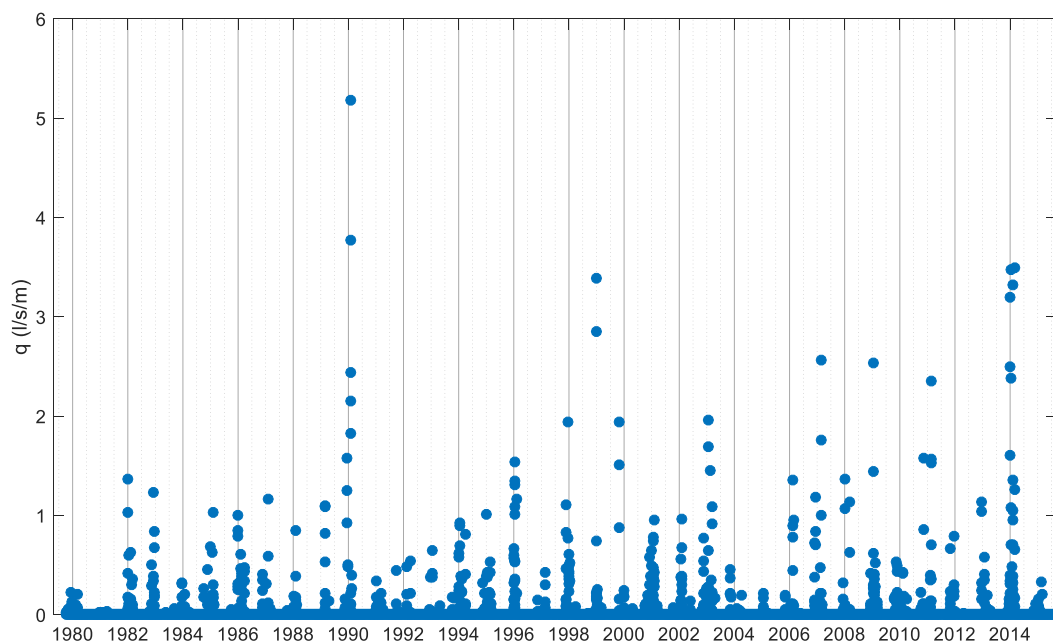


Figura 4.63 - Caudal médio galgado, q (L/s/m), na estrutura 2, obtido pela aplicação das fórmulas de Mase.

Na Figura 4.64 é possível verificar os valores de espraio máximo para a estrutura 2, com uma grande concentração de resultados entre os 1 e os 3 m, havendo frequentemente picos, sendo estes coincidentes com os registos de inverno. Tal como expectável, os valores mais elevados registam-se em 1990 e 2014, pois este fenómeno relaciona-se com a ocorrência de galgamentos, verificando-se picos coincidentes com valores de galgamento mais elevados.

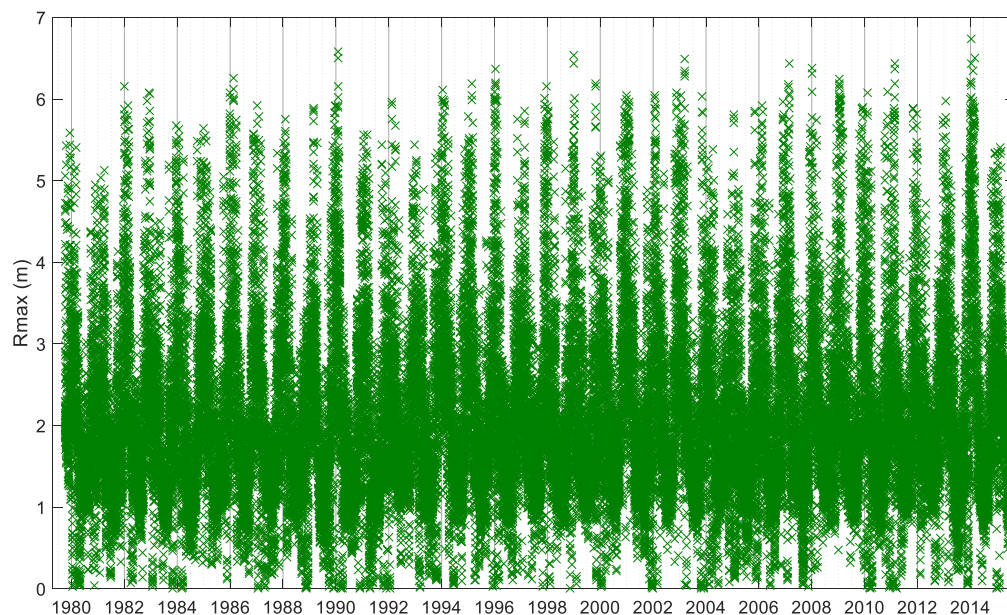


Figura 4.64 - Espraio máximo (m), para a estrutura 2 obtido pela aplicação das fórmulas de Mase.

4.8. APLICAÇÃO DA REDE NEURONAL NN_OVERTOPPING2

4.8.1. DADOS DE INPUT

A definição dos dados de input para a rede neuronal foi um processo complexo pois as estruturas em análise encontram-se numa praia, em zonas nem sempre sujeitas à agitação marítima. Adicionalmente, a rede neuronal é direcionada essencialmente para o cálculo de galgamentos de estruturas portuárias.

Para além disso, o modelo SWAN apresenta algumas limitações em zonas de baixa profundidade e o modelo SWASH não permite obter resultados no pé da estrutura, para todas as condições de agitação marítima obtidas em S1, devido ao grande esforço computacional envolvido. Para contornar este problema, foi necessário calcular o empolamento que se verifica na transformação da altura de onda desde S1 até junto ao pé das estruturas, calculando-se assim a altura de onda na base da estrutura. Os restantes parâmetros relativos ao regime de agitação, o período e a direção, foram considerados os obtidos pelo SWAN para o ponto S1, não se considerando a refração.

Para o cálculo do empolamento que se verifica desde o ponto S1 a -10 m Z.H. para o pé de cada estrutura, calculou-se o coeficiente de empolamento verificado na aplicação do SWAN entre o largo e o ponto S1, $K_{s0.1}$, para cada condição de agitação. Posteriormente, calculou-se através da fórmula (4.6), o coeficiente de empolamento entre as bases da estrutura e o largo, $K_{s0.2}$, relacionaram-se os dois coeficientes calculados, e obteve-se o coeficiente de empolamento entre o ponto S1 e as bases das estruturas em estudo, $K_{s1.2}$. É possível assim extrair a altura de onda significativa no pé das estruturas, para cada condição de agitação observada no período de 1979 a 2015.

$$K_{s0.1} = \frac{H_1}{H_0} = \frac{Hs \text{ S1}}{Hs \text{ Largo}} \quad (4.5)$$

$$K_{s0.2} = \frac{H_2}{H_0} = \frac{\cosh \frac{2\pi d_2}{L_2}}{\sqrt{\sinh \frac{2\pi d_2}{L_2} * \cosh \frac{2\pi d_2}{L_2} + \frac{2\pi d_2}{L_2}}} \quad (4.6)$$

$$K_{s1.2} = \frac{H_2}{H_1} = \frac{\cosh \frac{2\pi d_2}{L_2}}{\sqrt{\sinh \frac{2\pi d_2}{L_2} * \cosh \frac{2\pi d_2}{L_2} + \frac{2\pi d_2}{L_2}}} * \frac{1}{K_{s0.1}} \quad (4.7)$$

Uma estrutura costeira é constituída pela parte superior, central e inferior. Na rede neuronal, esta distinção é feita com base no nível médio e na altura de onda no pé da estrutura, considerando como parte central a faixa entre $NM + 1.5H_{m0,toe}$ e $NM - 1.5H_{m0,toe}$, onde se poderá encontrar uma berma. Devido a esta consideração, para o mesmo perfil podem ser adotados parâmetros diferentes, considerando a existência de uma berma ou uma risberma conforme os dados das características de agitação marítima para as estruturas 1 a 5. Na estrutura 6 não se irá alterar por apresentar apenas um talude desde a base ao coroamento.

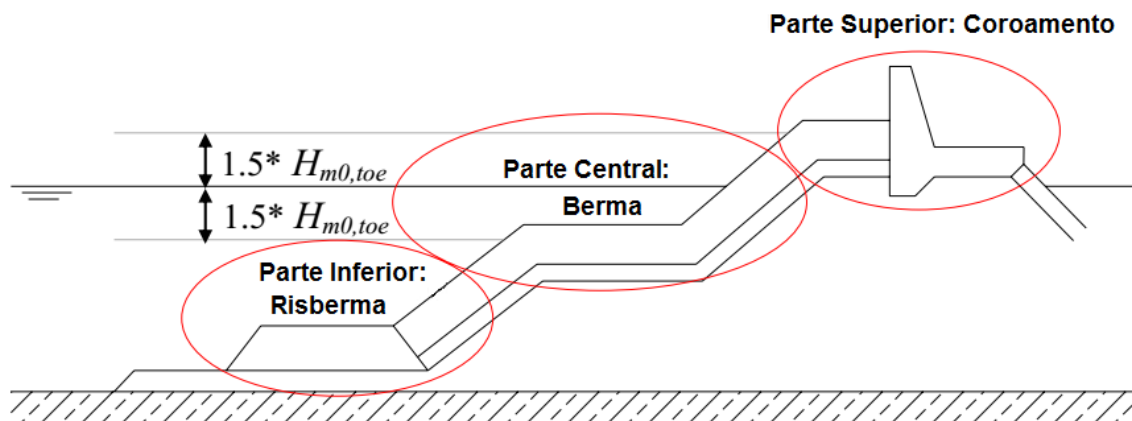


Figura 4.65 - Partes de uma estrutura costeira (adaptado de Coeveld *et al.* (2005)).

Analogamente ao considerado na aplicação das fórmulas de Mase, para as estruturas 5 e 6 não foi considerada largura no coroamento, apesar deste existir, pois nestes dois casos, a zona de passagem de peões encontra-se no coroamento das estruturas.

Na Tabela 4.13 estão descritos os parâmetros considerados para as estruturas em estudo, em função dos dados de agitação marítima e do nível de maré, para a consideração da existência de uma risberma, caso 1, e de uma berma, caso 2.

Tabela 4.13 - Parâmetros de *input* do NN_OVERTOPPING2 de cada estrutura.

	Estrutura 1		Estrutura 2		Estrutura 3		Estrutura 4		Estrutura 5		Estrutura 6
Caso	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
β	21-(Dir-270)		32-(Dir-270)		0-(Dir-270)		17-(Dir-270)		12-(Dir-270)		5-(Dir-270)
h	NM-0.5		NM-0.5		NM-2.53		NM-1.97		NM-3.21		NM-1.02
$H_{m0,toe}$	Hs		Hs		Hs		Hs		Hs		Hs
$T_{m1,0}$	Tp/1.1		Tp/1.1		Tp/1.1		Tp/1.1		Tp/1.1		Tp/1.1
h_t	NM-2.7	NM-0.5	NM-2.7	NM-0.5	NM-3.53	NM-2.53	NM-2.97	NM-1.97	NM-4.21	NM-3.21	NM-1.02
B_t	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0	0
γ_f	0.5		0.5		0.5		0.5		0.5		0.5
$cotg \alpha_d$	1.5	1.5	1.5	0	1.5	0	1.5	0	1.5	0	1.5
$cotg \alpha_u$	1.5		1.5		1.5		1.5		1.5		1.5
R_c	9-NM		9-NM		10.33-NM		9.77-NM		10.21-NM		10.26-NM
B	0	4	0	4	0	4	0	4	0	4	0
h_b	0	NM-2.7	0	NM-2.7	0	NM-3.53	0	NM-2.97	0	NM-4.21	0
$\tan \alpha_B$	0		0		0		0		0		0
A_c	8-NM		8-NM		9.53-NM		8.97-NM		10.21-NM		10.26-NM
G_c	11.5		11.5		8		8		0		0

4.8.2. EXECUÇÃO DA REDE NEURONAL

O NN_OVERTOPPING2 apresenta uma versão online onde é possível efetuar o cálculo de galgamentos, sendo necessária a introdução manual dos dados. Para uma avaliação de um elevado número de simulações este método não é eficiente, existindo então um programa para estas situações. Este é de fácil utilização, sendo apenas necessária a criação de um ficheiro input “NN_OVERTOPPING.inp” com as 15 variáveis pela ordem pré-definida separadas por espaços e correr o executável. Os resultados serão apresentados num ficheiro “NN_OVERTOPPING.lis”, com todos os resultados e com avisos relativos às simulações.

O programa apresenta um tempo de processamento muito eficiente, capaz de executar as 52476 simulações em cerca de 1 minuto para cada estrutura.

4.8.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA REDE NEURONAL NN_OVERTOPPING2

Nos casos em que os parâmetros e dados de input estão fora da aplicabilidade da rede ou que os caudais são muito pequenos, a rede neuronal emite avisos. Quando, o NN_OVERTOPPING2 não é

aplicável pois alguma variável não se encontra dentro dos limites de aplicabilidade, devolve um erro do tipo 1. Neste caso de estudo, este é o mais frequente devido à localização das estruturas, não sendo possível calcular galgamentos para níveis de maré muito pequenos ou abaixo da base ou da risberma.

Os resultados obtidos encontram-se divididos entre 4 avisos. O tipo 1 já descrito acima, o tipo 3, valores de caudal menores que 10^{-6} , não havendo então resultados, o tipo 4, em que é aplicado um fator corretivo aos resultados por se tratar de uma estrutura rugosa com elevada inclinação e o tipo 5, em que é aplicado o mesmo fator corretivo, porém os resultados encontram-se entre 10^{-5} e 10^{-6} , sendo por isso apenas indicativos. Na Tabela 4.14 encontra-se a distribuição dos avisos obtidos. A estrutura 4 e 5, são casos particulares, em que a cota do pé da estrutura é muito elevada, pelo que na maioria dos casos as ondas não atingem o pé da estrutura, e são poucos ou nenhuns dados para que a rede neuronal execute.

Tabela 4.14 - Distribuição dos avisos da aplicação do NN_OVERTOPPING2.

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4	Estrutura 5	Estrutura 6
Aviso 1	31537	31662	52162	49090	52476	41004
Aviso 3	16553	16446	306	3189	0	8980
Aviso 4	488	463	0	1	0	408
Aviso 5	3898	3905	8	196	0	2084
Contagem	52476	52476	52476	52476	52476	52476

Apenas os outputs referentes aos avisos 4 e 5 fornecem informação relativa aos caudais de galgamento, adotando-se para os outros casos valor de 0 L/s/m. Esta simplificação foi realizada, tendo em consideração que os avisos relativos às variáveis que não se encontram dentro dos limites da aplicabilidade, são essencialmente por defeito, i.e., menores que os valores mínimos possíveis de adotar. Realizou-se uma análise estatística dos resultados obtidos, Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Análise estatística do caudal de galgamento, q (L/s/m), obtidos pela aplicação do NN_OVERTOPPING2

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4	Estrutura 5	Estrutura 6
Média	0.007	0.007	0.000	0.000	0.000	0.006
Desvio Padrão	0.051	0.049	0.000	0.002	0.000	0.070
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	2.566	2.500	0.012	0.126	0.000	5.085
Ocorrências	4386	4368	8	197	0	2492
Contagem	52476	52476	52476	52476	52476	52476

Devido ao explicado anteriormente, verifica-se que as médias de caudais de galgamento por metro linear de estrutura são próximas de zero, pois o número de ocorrências sem galgamento é muito

elevado. No entanto, os valores máximos observados são também muito baixos, sendo o caudal mais elevado de 5.09 L/s/m, que se verifica na estrutura 6 no dia 3 de janeiro de 1983 pelas 6h, altura para a qual as estruturas em consideração ainda não tinham sido construídas. O segundo registo mais elevado é de 4.59 L/s/m que se registou para a mesma estrutura no dia 11 de março de 1989, dia para o qual também não há registos de galgamentos, sendo que as informações de ocorrências para os primeiros 20 anos considerados são muito escassas. As estruturas para as quais se regista um maior número de ocorrências de galgamentos são as estruturas 1 e 2, algo expectável pelos registos de ocorrências. No entanto, a estrutura 3 também deveria entrar neste grupo, o que não se verifica.

Como mencionado anteriormente, esta rede neuronal é direcionada para estruturas portuárias, sendo que a existência de uma praia na frente da estrutura, limita a sua aplicação.

4.9. APLICAÇÃO DO MODELO SWASH

4.9.1. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

Para a aplicação do modelo SWASH, foram consideradas, tal como para a aplicação das fórmulas empíricas, os resultados da agitação marítima obtida pela aplicação do SWAN para o ponto S1, a -10 m Z.H..

O tempo de processamento do modelo SWASH varia muito conforme as características da agitação, do tempo total da simulação e, essencialmente, da discretização espacial. No entanto, mesmo considerando uma discretização que optimize o tempo de computação à custa da precisão, este será sempre muito elevado em comparação com a aplicação do modelo SWAN. Assim, não foi possível a aplicação do modelo SWASH para as 52476 condições de agitação que foram consideradas anteriormente.

Foi então necessário definir características da agitação marítima que correspondessem, com uma boa aproximação, à agitação marítima que se verifica no local e que provoca elevados galgamentos. Definiu-se como dados de tempestade, as condições de agitação em S1, com altura de onda significativa acima de 3 m e com nível de maré acima de 2.5 m. Julga-se que este conjunto de dados irá provocar os maiores galgamentos, tendo por base os resultados obtidos com aplicação das fórmulas empíricas de Mase e da rede neuronal. Obtiveram-se 2262 condições de agitação de tempestade, determinando-se posteriormente os valores médios para cada parâmetro resultando numa altura de onda significativa de 3.65 m, um período de pico de 11.92 s, uma direção de 284.9° (NW) e um nível de maré de 3.24 m, considerando-se estes os dados de *input* para aplicação do modelo.

Foi então aplicada na fronteira oeste a agitação segundo um espectro JONSWAP com $\gamma = 3.3$ e com os dados referentes à altura de onda significativa, ao período de pico, direção da agitação e dispersão direcional.

Foi ainda aplicada na fronteira este, uma *sponge layer* para simular da melhor forma a saída da onda da malha computacional evitando assim a reflexão nesta fronteira da massa de água galgada, que iria aumentar os resultados finais. O manual sugere que esta não deve ser menor do que três vezes o comprimento de onda para os dados de agitação iniciais e na fronteira de geração.

Desta forma, para os dados utilizados, obteve-se um comprimento de onda aproximado de 115 m, tendo sido considerada para a *sponge layer*, um comprimento de 400 m. Na fronteira onde se gera a onda, a oeste, foi também considerado o comando WEAK, de forma a tornar esta pouco refletiva. Nas fronteiras norte e sul não foi aplicado nenhum comando, por isso, por defeito estas são fechadas, o que pode introduzir alguma reflexão. Esta decisão foi tomada após diversos testes com uma discretização

espacial de 4 por 4 m, para os quais, com a aplicação do comando WEAK, a simulação tinha um comportamento errático, em que a superfície da água flutuava de forma aleatória.

4.9.2. BATIMETRIA E MALHA COMPUTACIONAL

Para a aplicação do modelo, foi necessária a utilização de uma batimetria mais detalhada em comparação com a utilizada na aplicação do SWAN. Foi então realizada uma união entre um levantamento LIDAR de 2011, que fornece dados até aproximadamente 3 m de profundidade ao Z.H. e a batimetria utilizada anteriormente, através do software Surfer8™, o que permitiu a obtenção da batimetria com espaçamento de 2 m por 2 m. Foram também utilizados dados do levantamento realizado pela empresa Irmãos Cavaco S.A. mencionado anteriormente para uma melhor definição das estruturas aderentes, pois era necessário uma definição das cotas de coroamento com pormenor.

O levantamento LIDAR utilizado apresenta um fundão a cerca de 250 m da costa o que pode provocar alguns problemas e um comportamento inesperado na propagação da agitação, como se pode verificar na Figura 4.66.

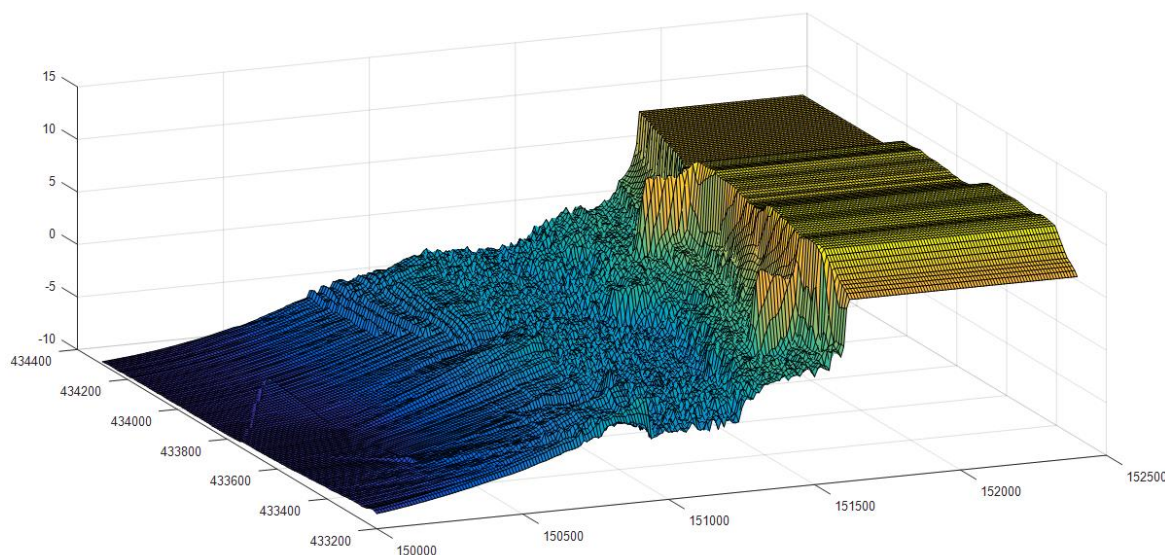


Figura 4.66 - Batimetria utilizada na aplicação do SWASH.

Foram realizados diversos testes considerando diferentes comandos relativos à propagação das ondas e diferentes discretizações espaciais.

Tendo por base uma batimetria com uma discretização espacial de 2 m por 2 m, a malha computacional a ser considerada no SWASH deveria ser discretizada com um valor de espaçamento múltiplo de 2. Esta consideração é realizada de forma a diminuir o tempo computacional e os erros, pois tal evita que o modelo tenha de realizar interpolações da profundidade para os pontos não definidos pelo ficheiro da batimetria.

Assim, testaram-se vários espaçamentos, 2 m, 4 m e 10 m.

O manual sugere que com uma profundidade de aproximadamente 10 m na fronteira de oeste, e uma altura de onda significativa de 3.65 m, se obtém $H/d = 0.365 < 1$ e com um comprimento de onda

aproximado de 115 m, a discretização ideal seria de 2 m. Mas para esse espaçamento de malha, e para uma simulação de 1h no modelo, são necessários 3 dias, para um computador com um processador Intel® Core™ i5-4200U CPU @ 1.60GHz 2.30GHz, com 6GB de RAM.

No caso de uma discretização com espaçamento de 10 m, sendo apenas necessário 1h para a simulação de 1h no modelo, verificou-se que se obtinha resultados muito diferentes aos obtidos para o espaçamento 2 m, nomeadamente nos galgamentos. Com 10 m de espaçamento os resultados do SWASH não apresentavam galgamentos, no entanto, para o mesmo *input* com maior definição, estes já existiam. Apesar dos maus resultados obtidos, não se podendo considerar estes resultados como corretos e com comportamento aproximado da situação real, estes testes foram importantes para o estudo de diversos comandos, pois por vezes o modelo apresentava comportamentos imprevisíveis e erros para os quais era difícil de determinar a sua origem, sendo assim possível com testes com pequena duração fazer várias experiências.

Nos testes com uma discretização espacial de 4 m, obtiveram-se resultados mais representativos da realidade, no entanto, apenas os valores mais elevados de galgamento eram registados.

Frente ao exposto, optou-se por uma discretização de 2 m, diminuindo ainda a batimetria para espaçamentos de 1 m por 1 m, de forma a reduzir grandes variações na profundidade. Verificou-se que a utilização de uma malha computacional mais fina seria benéfica, no entanto, o tempo computacional exigido tornou inviável a sua utilização.

A malha computacional apresenta um comprimento de 2400 m na direção x , entre 150 000 e 152 400, sendo o valor inicial coincidente com a coordenada x do ponto S1. Na direção y tem uma extensão de 1100 m, entre 433 200 e 434 300, estando a zona de estudo aproximadamente no centro, deixando desta forma uma distância às fronteiras para que tenha uma menor interferência nos resultados obtidos para o local de interesse.

4.9.3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA SIMULAÇÃO E FICHEIRO INPUT

De forma a melhor simular a propagação da agitação marítima e o fenómeno de galgamento, o modelo SWASH apresenta uma elevada quantidade de definições e comandos que podem ser utilizados, permitindo adaptar o modelo para as diversas situações possíveis de simular.

Neste caso de estudo, foi considerado um valor constante de turbulência na direção horizontal de $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$, um coeficiente de rugosidade de Manning de $0.03 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$, um valor acima do sugerido de 0.019, devido à consideração das estruturas aderentes que apresentam uma maior rugosidade e à elevada irregularidade verificada nos fundos.

No que se refere às equações de conservação da quantidade de momento, não foram especificados os esquemas a utilizar, tendo sido utilizados os esquemas de segunda ordem BDF, para a direção horizontal e de primeira ordem para a direção vertical, definidos por defeito pelo modelo. Foi ainda utilizado um comando referente à discretização temporal, TIMEI METH, limitando esta a 0.8 como valor máximo e 0.1 de mínimo do número de Courant, mencionado no capítulo 3.5.5. Os valores adotados diferem dos sugeridos pelo manual para simulações com estruturas de elevado declive devido à necessidade de tornar a simulação mais estável.

No comando relativo à consideração da pressão não hidrostática apenas foi aplicado o comando principal NONHYDrostatic, sendo por isso adotado o esquema utilizado por defeito de Keller-Box. Como condições iniciais de altura de água e velocidade, considerou-se uma situação de repouso, ou seja, 0 m e 0 m/s, respetivamente.

Com um período de pico aproximado de 12s e respeitando a necessidade de, pelo menos, se considerar 500 ondas para uma correta avaliação do galgamento e do tempo necessário para se obter uma situação estabilizada, adotou-se como tempo total de simulação 2h e 30 min. Como discretização temporal, após a realização de vários testes, foi necessário adotar um valor de 0.00001, aumentando a estabilidade do modelo e permitindo que este simulasse o tempo total pretendido. O número de *layers* é definido através de *kd*, para o qual se obteve o valor de 0.55, e recorrendo à Tabela 3.3, verifica-se que se deve utilizar uma *layer*, tendo um erro associado de 3%.

No ficheiro *input* estão indicados todos os comandos e ficheiros a considerar na utilização do modelo, bem como a indicação dos *outputs* que se pretendem obter. Este tem um modelo fixo indicado pelo SWASH, escolhendo-se apenas os comandos que se pretendem aplicar. No anexo C está representado um modelo de ficheiro *input* utilizado no estudo.

4.9.4. OUTPUTS

Como output, foi indicado que se pretendia obter dados relativos à altura de água e à altura de onda significativa para uma malha de 10 m por 10 m com intervalos de tempo de 30 s. A utilização de dados de 10 em 10 m prendeu-se com o facto de utilizando menores intervalos, iria criar um ficheiro com um tamanho muito elevado, impossibilitando a sua utilização. Com estes dados, foi possível a realização de vídeos em Matlab® para perceber a melhor forma, o comportamento do modelo permitindo também a visualização de galgamentos.

A quantificação dos galgamentos é obtida através de um output no qual são indicadas as coordenadas do coroamento das estruturas consideradas para a aplicação das fórmulas empíricas e do NN_OVERTOPPING2, e com o comando QMAG, que indica o caudal instantâneo no ponto, nas unidades m^2/s , sendo estas uma simplificação das normalmente utilizadas no cálculo de galgamentos, $m^3/s/m$. Foram ainda pedidos ficheiros com resultados relativos à altura da água e altura de onda significativa no alinhamento das estruturas, permitindo também a criação de vídeos em 2D para verificar o comportamento nas estruturas.

4.9.5. ANÁLISE DE RESULTADOS PARA A SITUAÇÃO ATUAL

Como referido anteriormente, obteve-se como output do SWASH os galgamentos registados nas 6 estruturas consideradas para aplicação das fórmulas empíricas de Mase e da rede neuronal NN_OVERTOPPING2 com registos a cada 15 s. De forma semelhante ao realizado anteriormente, foi feita uma análise estatística aos resultados obtidos, Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Análise estatística dos galgamentos, q (L/s/m), para a situação atual pela aplicação do SWASH.

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4	Estrutura 5	Estrutura 6
Média	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000	29.256
Desvio Padrão	0.000	0.064	0.000	0.000	0.000	542.742
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	0.000	1.010	0.000	0.000	0.000	13070.715
Ocorrências	0	193	0	0	0	5
Contagem	600	600	600	600	600	600

É importante salientar que nos resultados obtidos para os dois métodos utilizados anteriormente, foram considerados 52476 registos de diferentes estados de mar, e, na aplicação do modelo SWASH, a contagem é referente à consideração de um estado de mar analisando-se 600 ondas, não sendo por isso, possível de comparar os métodos.

Observa-se que apenas há registos de galgamentos para a estrutura 2 e 6, obtendo-se para a primeira, um valor máximo de 1.015 L/s/m sendo este valor abaixo do obtido pela aplicação do NN_OVERTOPPING2 e das fórmulas empíricas de Mase, e um valor médio de 0.016 L/s/m. A estrutura 6 apresenta 5 registos de galgamentos com valores muito elevados, sendo mesmo irrealistas. Isto deve-se à reflexão observada na fronteira sul. Este problema será posteriormente abordado de forma mais aprofundada.

Tratando-se de um modelo 2DH, fazer uma avaliação apenas baseada em 6 pontos, é demasiado simplista, considerando que se obtiveram resultados para toda a zona de estudo. Desta forma, através do *output* com a malha de 10 m por 10 m, analisaram-se as ocorrências de galgamentos e de caudal médio galgado, fazendo-se uma distinção, por cores, para o número de ocorrências de galgamentos em percentagem e por dimensões, para o caudal médio de galgamento para cada ponto do coroamento, Figura 4.67.

O caudal médio galgado é apenas indicativo, pois é difícil de distinguir pequenas diferenças de caudal. No entanto, a consideração deste para a formulação dos gráficos é importante para uma melhor perceção do fenómeno de galgamento nos diversos locais, facilitando a visualização dos locais onde podem ocorrer elevadas ocorrências de galgamento, mas de baixa magnitude, ou a situação inversa.

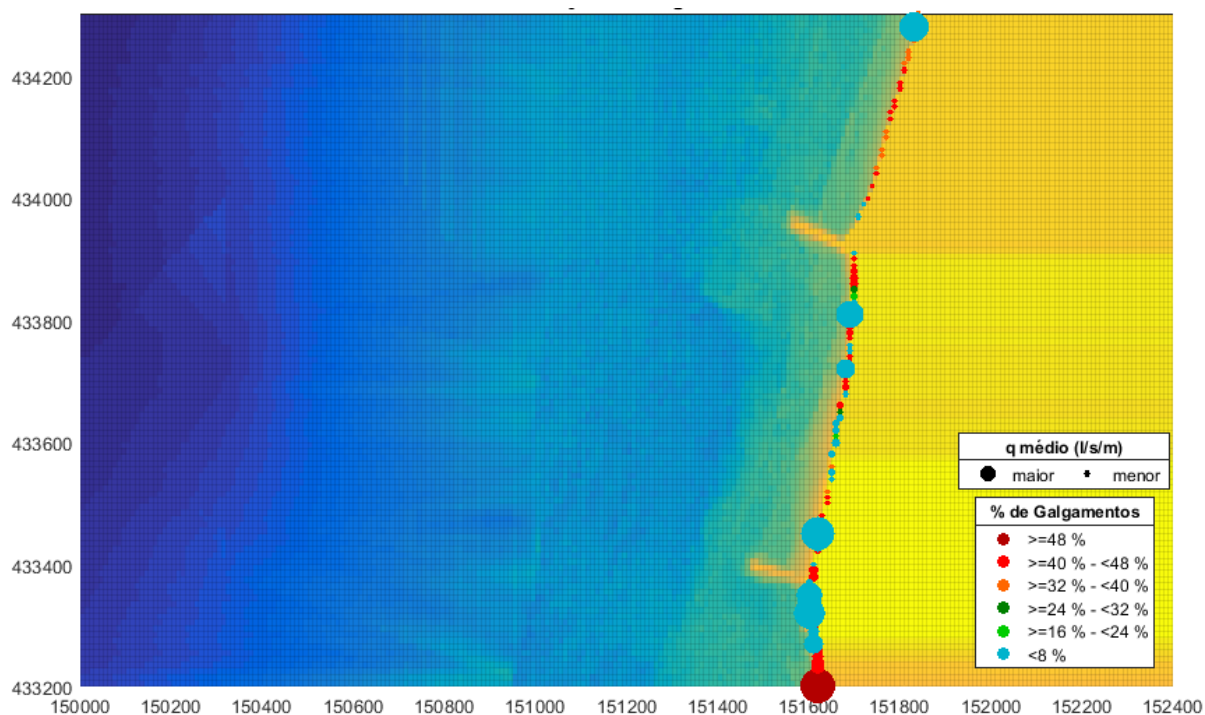


Figura 4.67 - Localização dos galgamentos para a situação atual.

Na fronteira sul verifica-se um elevado número de ocorrências de galgamentos de grande magnitude. Isto deve-se ao facto de terem sido consideradas fronteiras fechadas, ocorrendo por isso reflexão e,

consequentemente, galgamentos que não se verificam na realidade. Na fronteira norte este fenómeno não se verifica de forma tão significativa, devido à direção da agitação marítima ser de noroeste, verificando-se, no entanto, galgamentos com elevado caudal médio, não tendo, no entanto, influência nos resultados obtidos para as estruturas mais próximas.

Na zona norte da praia verificam-se muitas ocorrências de galgamentos, podendo-se associar as que ocorrem mais a norte às consequências da reflexão. Na aproximação ao esporão norte, o número de ocorrências, bem como a sua magnitude, vão-se reduzindo. Apesar de não se verificarem galgamentos para a estrutura S3, verifica-se pelo mapa, que na zona a sul do esporão norte, há uma elevada ocorrência de galgamentos, porém com um caudal médio galgado médio e ainda um local com uma baixa ocorrência, mas com um caudal médio muito elevado. Não considerando a zona sul do esporão sul, pelo motivo acima explicado, verifica-se que entre os dois esporões é onde há uma maior incidência de galgamentos. No entanto, recorrendo aos resultados para as estruturas identificadas na Figura 4.62, apenas se verificam galgamentos na estrutura 2 e 6.

4.10. APLICAÇÃO DE UM QUEBRAMAR DESTACADO

Esta dissertação surge como uma continuação ou como um complemento, da dissertação realizada anteriormente Castro (2015), pelo que a solução adicional de proteção a utilizar será a estrutura que apresentou melhores resultados naquele trabalho, sendo necessário, no entanto, a definição de alguns parâmetros que não foram mencionados.

4.10.1. LOCALIZAÇÃO E GEOMETRIA DO QUEBRAMAR

Como mencionado, a localização do quebramar é aproximadamente a mesma utilizada por Castro (2015), com uma orientação sensivelmente perpendicular à costa, a uma distância aproximada de 150 m à estrutura de defesa longitudinal existente, aumentando esta distância na cabeça a sul, uma extensão de 250 m e coroamento com 20 m de largura, sendo estes os únicos parâmetros definidos. Foi considerada a mesma inclinação dos taludes a barlar e a sotamar (1:2) e a cota de coroamento definida foi de +4m Z.H., tendo sido este um valor definido com base em estruturas existentes, sendo considerado aceitável do ponto de vista paisagístico e suficientemente eficiente na proteção de sotamar.

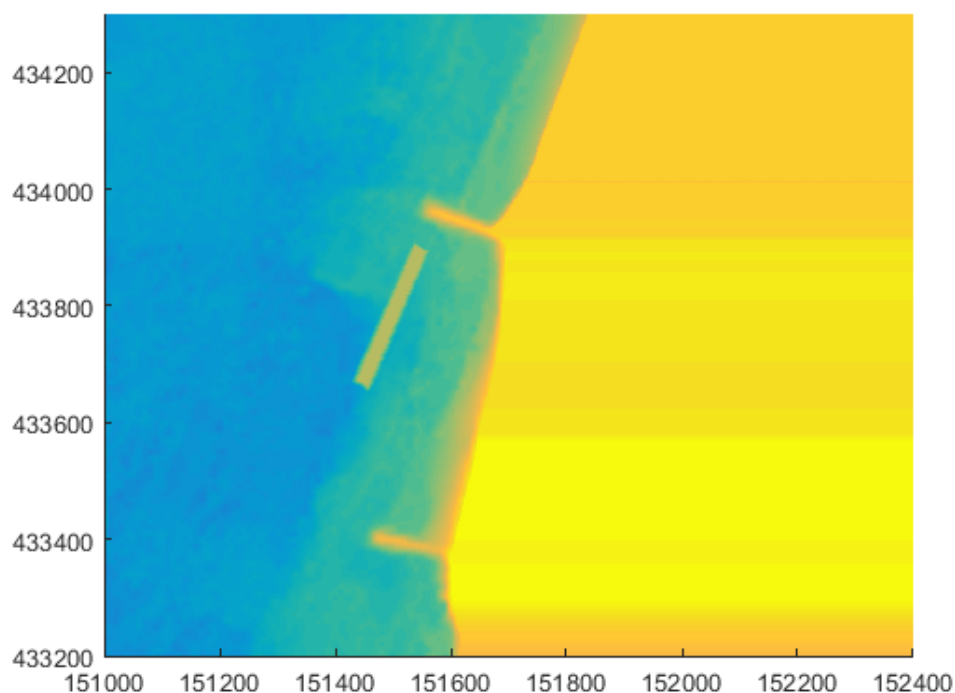


Figura 4.68 - Localização do quebramar destacado considerado.

4.10.2. APLICAÇÃO DO MODELO SWASH

O cálculo do galgamento através das fórmulas empíricas e do NN_OVERTOPPING2 não é possível pois os parâmetros fundamentais da agitação serão afetados pela presença do quebramar, não sendo possível quantificar essa mudança através destes métodos. Assim, para este quebramar, apenas será realizado o estudo do galgamento com o modelo numérico SWASH.

Para o estudo do galgamento dos quebramares é importante considerar a porosidade. Um quebramar com maior porosidade irá reduzir o espriamento, havendo uma maior perda de energia da onda no contacto com o talude, diminuindo os galgamentos.

No SWASH, a porosidade pode ser considerada aplicando uma matriz a toda a malha batimétrica definindo para cada ponto a sua porosidade (adotando o valor de 1 para os pontos impermeáveis). Pérez (2014) estudou galgamentos em quebramares recorrendo ao modelo SWASH. Verificou que quando a porosidade é aplicada a toda a estrutura ocorre uma transmissão quase total, verificando-se uma influência muito reduzida na propagação da agitação marítima. Aplicando uma camada de porosidade sobre um quebramar impermeável, definido pela batimetria, verificaram-se maiores efeitos da presença do quebramar, no entanto, o modelo apresenta uma elevada dissipação de energia na interação da onda com a estrutura, não se verificando uma boa aproximação à realidade. Pérez (2014) concluiu então que o SWASH ainda não é capaz de modelar de uma forma correta a existência de uma estrutura com porosidade, devendo este comando ser melhorado, visto que é um modelo numérico em desenvolvimento. No entanto, Van Mierlo (2014), realizou testes aplicando diferentes porosidades num quebramar para proteção de um porto e na restante malha computacional. O estudo tinha como objetivo analisar o efeito do quebramar na altura e período da onda a sotamar da estrutura, comparando os resultados com resultados obtidos num ensaio físico previamente realizado. Van Mierlo (2014) concluiu que os resultados obtidos pelo SWASH tinham uma boa aproximação aos

obtidos pelos ensaios físicos, pelo que, o modelo era capaz de simular a influência do quebramar na agitação marítima.

O objetivo desta dissertação não é determinar os galgamentos verificados diretamente no quebramar pois este funcionará como uma barreira física de proteção da zona a sotamar, havendo maior interesse na determinação da influência que este terá na propagação da agitação marítima do que na avaliação do espraçamento e interação da estrutura com a onda. Desta forma, considerou-se que a presença do quebramar apenas na definição da batimetria traduziria uma boa aproximação à realidade. Foi então necessário alterar o ficheiro relativo à batimetria, aplicando nos pontos onde se encontra o quebramar a nova cota.

Para a simulação com a presença de um quebramar foram consideradas as mesmas definições utilizadas anteriormente. Desta forma, o ficheiro *input* será igual para ambas as simulações, pois o quebramar é considerado através do ficheiro da batimetria.

4.10.3. ANÁLISE DE RESULTADOS DE GALGAMENTOS COM A CONSTRUÇÃO DE UM QUEBRAMAR DESTACADO

De forma a analisar os resultados obtidos com a aplicação de um quebramar, foram utilizados os mesmos métodos de tratamento dos resultados referidos anteriormente para a avaliação da situação atual, obtendo-se assim a Tabela 4.17 e Figura 4.69.

Tabela 4.17 - Análise estatística dos galgamentos, q (L/s/m), para a situação com a construção de um quebramar destacado pela aplicação do SWASH.

	Estrutura 1	Estrutura 2	Estrutura 3	Estrutura 4	Estrutura 5	Estrutura 6
Média	0.000	0.102	0.000	0.000	0.000	7.925
Desvio Padrão	0.000	0.219	0.000	0.000	0.000	109.402
Mínimo	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máximo	0.000	2.295	0.000	0.000	0.000	1922.233
Ocorrências	0	504	0	0	0	4
Contagem	600	600	600	600	600	600

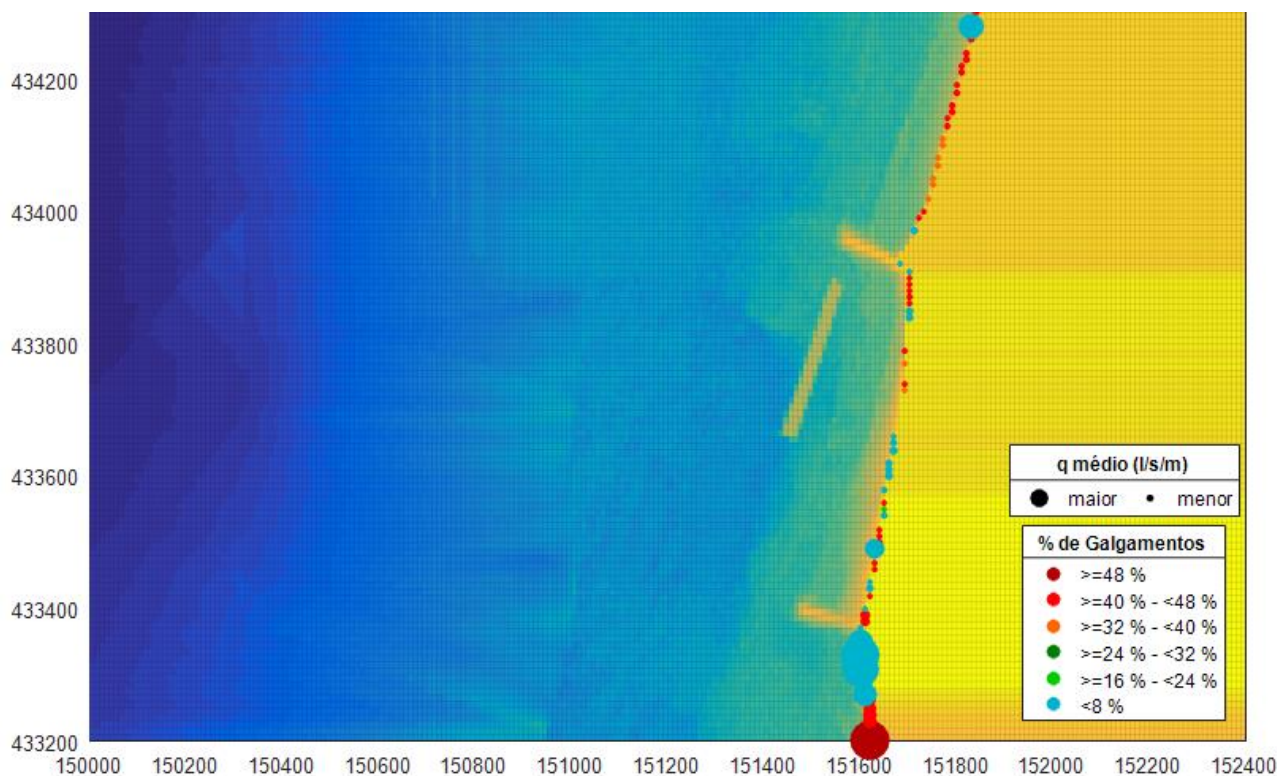


Figura 4.69 - Localização das ocorrências dos galgamentos para a situação com a construção de um quebramar destacado.

Recorrendo à Tabela 4.17, verifica-se que para a única estrutura com resultados, estrutura 2, a barlar do esporão norte, o número de ocorrências de galgamentos aumenta consideravelmente, bem como o valor médio do caudal médio galgado, tendo a construção do quebramar um efeito negativo neste local.

De igual forma ao verificado na análise para a situação atual, os resultados obtidos para os pontos de coroamentos das estruturas consideradas, Figura 4.62, não fazem uma boa representação dos galgamentos ocorridos na zona de estudo.

Com base na Figura 4.69, constata-se facilmente que a construção do quebramar irá proteger a zona a sotamar, havendo uma elevada redução da ocorrência de galgamentos bem como da sua magnitude neste local. No local imediatamente a sul do esporão norte, zona de abertura entre o esporão e o quebramar, próximo da localização da estrutura 3, verifica-se ainda a ocorrência de galgamentos, mas com uma ocorrência menor do que os obtidos para a situação sem quebramar, considerando-se por isso que a estrutura de defesa tem um efeito positivo neste local, mas não resolve de forma eficiente e definitiva o problema numa das zonas historicamente com maiores registos de galgamentos.

Verifica-se também que na zona entre a cabeça sul do quebramar e o esporão sul, irá haver um ligeiro aumento da ocorrência de galgamentos em comparação com o verificado anteriormente. Conclui-se desta forma, que é necessária uma otimização da solução de proteção costeira adotada.

De forma análoga ao anteriormente analisado, nas zonas da fronteira a norte e a sul do esporão norte não é possível tirar conclusões devido ao efeito de fronteira que se verifica, no entanto, não seria

expectável obter efeitos elevados nestes locais considerando a localização da solução de quebramar adotada.

Conclui-se assim que o quebramar terá um efeito favorável na proteção da zona a sotamar e na zona imediatamente a sul do esporão norte, porém terá consequências negativas a barlamar do esporão norte e no local entre a cabeça sul do quebramar e o esporão sul.

4.11. CÁLCULO DO RISCO E CRIAÇÃO DE MAPAS DE RISCO

Para os resultados obtidos para as várias metodologias empregues, procede-se então à análise do risco e à criação dos mapas de risco.

4.11.1. VALORES ADMISSÍVEIS DE GALGAMENTO E PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA

O dimensionamento de estruturas e as avaliações de risco são realizadas considerando a possibilidade de ocorrência de galgamentos, limitando os valores de caudal galgado por metro linear de estrutura conforme a utilização. Desta forma, analisando a utilização e características da marginal na zona afeta a cada estrutura, procedeu-se ao cálculo dos valores de galgamento admissível para cada zona.

A estrutura 1 é a estrutura mais a norte encontrando-se num local direcionado, essencialmente, para o comércio com a presença de alguns cafés e habitacional, com algumas moradias na primeira linha da marginal. Neste local está localizado o hotel. O edifício encontra-se a aproximadamente 30 m do coroamento da estrutura, a zona direcionada para os peões a cerca de 11.5 m e existe ainda uma via para passagem de carros com características direcionadas para o tráfego de baixa velocidade.

A estrutura 2, localizada imediatamente a norte do esporão norte, onde na marginal se encontra uma zona principalmente direcionada para o comércio e algumas habitações, está a uma distância aproximada de 25 m do coroamento, havendo entre estes um muro de proteção, que delimita a zona de passagem de peões, que se encontra a, aproximadamente, 11.5 m do coroamento. Na zona específica da estrutura, não existe passagem de carros.

A estrutura 3 localiza-se a sul do esporão norte, na marginal encontra-se algum comércio e habitações, a uma distância aproximada de 30 m. A via apresenta características para tráfego de baixa velocidade, sendo esta uma zona particularmente turística e encontra-se a aproximadamente 14 m do coroamento da estrutura. A zona de passagem de peões encontra-se a aproximadamente 8 m do coroamento.

A estrutura 4 localiza-se na zona central da estrutura aderente central, numa zona essencialmente de pequenas habitações, encontrando-se também o condomínio fechado, mas este com a distância considerável do coroamento. A zona de passagem de peões e a via encontram-se a, aproximadamente, 8 m e 14 m do coroamento, respetivamente. A via apresenta características semelhantes à existente na estrutura 3.

A estrutura 5 encontra-se a norte do esporão sul, sendo que nesta zona não existe edifício, apenas um passadiço, dunas e uma zona arborizada. No entanto, o passadiço encontra-se a uma distância considerável do coroamento e, não existindo muro, considera-se que a zona de passagem de peões é no coroamento da estrutura. Não existe uma via direcionada para veículos.

A estrutura 6 encontra-se a sul do esporão sul, mas apresenta características similares à estrutura 5.

É ainda importante referir que em todas as localizações, não existe impedimento à visualização da agitação marítima, sendo facilmente detetado o perigo.

Tendo em conta esta descrição, foi então possível determinar os caudais limite para cada parâmetro, Tabela 4.18, sendo que o utilizado para o cálculo do risco será o mais condicionante.

Tabela 4.18 - Valores de caudal de galgamento admissível para as estruturas, q (L/s/m).

Estrutura	Pessoas	Veículos	Edifícios	Estrutura
1	0.1	-	1	200
2	0.1	30	1	200
3	0.1	30	1	200
4	0.03	-	-	50
5	0.03	-	-	50

A partir dos resultados de galgamentos obtidos pelas diversas metodologias utilizadas, e considerando os limites acima referidos, foi possível determinar o número de ocorrências que excederam os valores limite, calculando-se então a probabilidade de excedência dos mesmos, associando esta aos graus propostos na Tabela 3.1. Na Tabela 4.19 e na Tabela 4.20 estão representados os resultados obtidos com a utilização das fórmulas empíricas de Mase e da rede neuronal NN_OVERTOPPING2

Tabela 4.19 - Probabilidade de ocorrência de galgamentos aplicando as fórmulas de Mase.

Probabilidade de Ocorrência (%)					Grau
Estrutura	Pessoas	Veículos	Edifícios	Estrutura	
1	0.84%	-	0.11%	0.00%	1
2	0.84%	-	0.11%	0.00%	1
3	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	1
4	0.19%	0.00%	0.01%	0.00%	1
5	0.00%	-	-	0.00%	1
6	0.02%	-	-	0.00%	1

Tabela 4.20 - Probabilidade de Ocorrência de galgamentos aplicando a rede neuronal NN_OVERTOPPING2.

Probabilidade de Ocorrência (%)					Grau
Estrutura	Pessoas	Veículos	Edifícios	Estrutura	
1	1.68%	-	0.04%	0.00%	2
2	1.64%	-	0.03%	0.00%	2
3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1
4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1
5	0.00%	-	-	0.00%	1
6	2.43%	-	-	0.00%	2

Verifica-se para ambos os métodos, que os graus de probabilidade de ocorrência de galgamentos são baixos (máximo 2) e que na estrutura 5, não se verifica nenhuma ocorrência de caudal acima dos limites pré-definidos.

As duas estruturas mais a norte, 1 e 2, e a mais a sul, apresentam com a utilização da rede neuronal, maiores percentagens de caudal médio de galgamento acima dos limites. Esta diferença é explicada pelas diferentes considerações que os dois métodos fazem relativamente à agitação e à geometria da praia e estrutura. A direção da agitação é um dos *inputs* da rede neuronal, no entanto, na aplicação das fórmulas de Mase, esta não é considerada. Os restantes parâmetros relativos à agitação também são considerados de forma diferente, o NN_OVERTOPPING2 considera a altura de onda na base da estrutura, o que levou ao cálculo desta devido ao fenómeno de empolamento. Além disso, este modelo apenas considera a cota batimétrica inicial no pé da estrutura, não fazendo nenhuma consideração ao perfil e ao declive do fundo. As fórmulas empíricas de Mase têm em consideração o perfil da praia e fundo, sendo que os ângulos destes são considerados no cálculo da profundidade de rebentação, necessária para determinar o declive imaginário e, por sua vez, o espraçamento.

Para o cálculo do risco com base nos resultados da aplicação do SWASH, tendo em consideração que apenas as estruturas 2 e 6 apresentavam galgamentos, não era razoável a utilização desses dados. Desta forma, para o cálculo dos galgamentos acima dos valores limites, foi considerada uma área de influência para cada estrutura, limitadas pela meia distância entre as estruturas e as fronteiras, para as estruturas 1e 6, Figura 4.70, respetivamente.

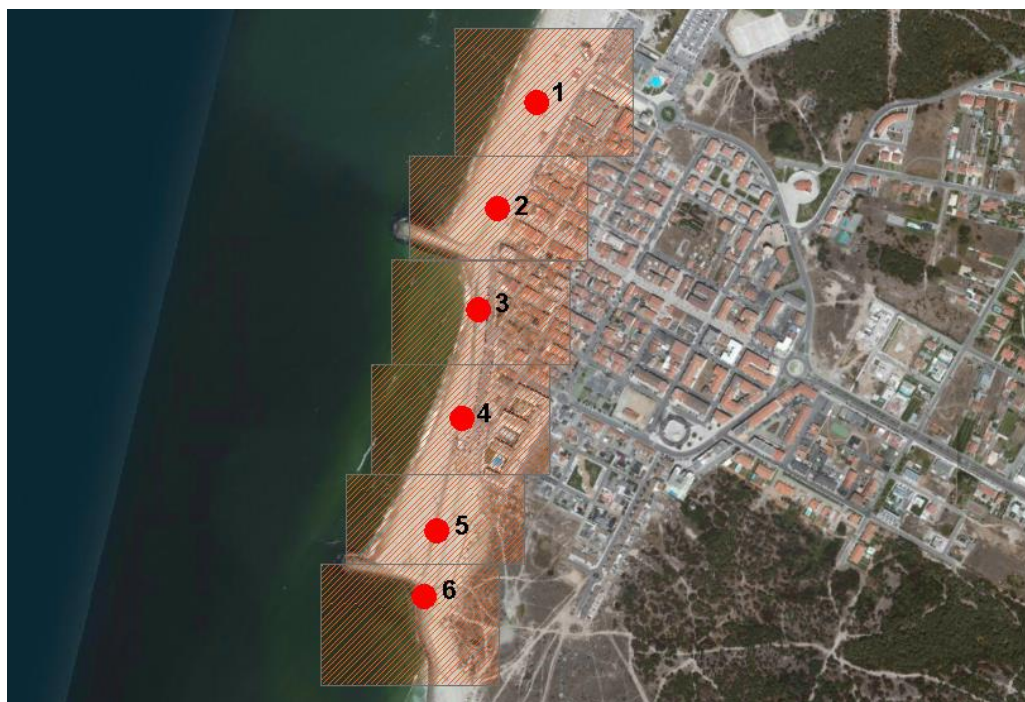


Figura 4.70 - Zonas de influência de cada estrutura para o cálculo do risco (ArcMap 10).

Admitindo que dentro de cada zona as características da marginal não são muito variáveis, consideraram-se os mesmos valores limites indicados anteriormente e obtiveram-se as probabilidades de ocorrência de galgamentos para as zonas de influência de cada estrutura, Tabela 4.21 e Tabela 4.22, para a situação atual e com a construção de um quebramar destacado.

Tabela 4.21 - Probabilidade de ocorrência de galgamentos para a aplicação do SWASH para a situação atual.

Área	Probabilidade de Ocorrência (%)				Grau
	Pessoas	Veículos	Edifícios	Estrutura	
1	49.52%	-	12.91%	0.08%	4
2	15.61%	-	1.59%	0.00%	3
3	54.93%	0.61%	39.02%	0.20%	5
4	27.74%	0.20%	20.56%	0.07%	4
5	36.36%	-	-	0.16%	4
6	53.44%	-	-	19.38%	5

Tabela 4.22 - Probabilidade de Ocorrência de galgamentos para a aplicação do SWASH com a construção de um quebramar destacado.

Área	Probabilidade de Ocorrência (%)				Grau
	Pessoas	Veículos	Edifícios	Estrutura	
1	59.21%	-	15.30%	0.14%	5
2	17.57%	-	1.28%	0.00%	3
3	9.63%	0.02%	1.11%	0.02%	2
4	5.30%	0.00%	3.69%	0.00%	2
5	38.71%	-	-	0.11%	4
6	51.79%	-	-	18.54%	5

É facilmente visível um aumento significativo de percentagens de galgamentos em comparação com os obtidos aplicando as fórmulas de Mase e do NN_OVERTOPPING2. No entanto, para as aplicações das fórmulas empíricas e do NN_OVERTOPPING2 foram utilizados os parâmetros de agitação ocorridos para os 36 anos, e na aplicação do SWAH, foi considerado um registo de agitação de tempestade, não sendo por isso comparáveis as duas situações.

Na situação atual, as estruturas 1 e 6, como foi explicado anteriormente, apresentam elevados galgamentos devido à reflexão nas fronteiras. Os restantes locais apresentam probabilidades de ocorrências de galgamentos acima dos valores limite muito elevados, com a zona da estrutura 2 a ser a menos solicitada e a zona da estrutura 3 a que apresenta maior grau. Estas são, respetivamente, a norte e a sul do esporão norte, sendo por isso expectáveis mais galgamentos a sotamar do esporão e menos a barlar, devido à acumulação de sedimentos. As estruturas 4 e 5 apresentam também elevados galgamentos, mas menos em comparação com a estrutura 3.

Com a construção do quebramar, verifica-se uma redução acentuada nas percentagens de ocorrências de galgamentos acima dos valores limite para as estruturas 3 e 4, diretamente protegidas pelo quebramar, e um ligeiro aumento nas estruturas 2 e 5, como se tinha verificado anteriormente. Na estrutura 3 e 4, há uma redução de 2 e 3 graus, respetivamente, com uma redução superior a 80% do obtido anteriormente, sendo estes resultados muito favoráveis na proteção da zona.

Apesar dos resultados obtidos serem consistentes com o expectável para os locais em causa, as percentagens obtidas são demasiado elevadas, concluindo-se que os parâmetros que resultam em perda de energia aplicados no SWASH, estão subestimados.

4.11.2. AVALIAÇÃO DAS CONSEQUÊNCIAS

Para a avaliação das consequências da ocorrência de galgamentos, no que é referente às pessoas, apesar de não existirem grandes registos de acidentes e feridos, devido ao trabalho de mitigação efetuado pelas autoridades na delimitação da zona de perigo, admitiu-se um valor intermédio de grau de consequências. O grau de consequências para a existência de veículos foi obtido utilizando as mesmas considerações, excetuando-se os locais onde não existem vias.

No fator relativo ao ambiente, tratando-se de uma zona essencialmente urbana, havendo apenas nas 2 estruturas a sul uma zona dunar e arborizada, o galgamento destas não traduz um grande impacto ambiental pois não provoca poluição e danos irreparáveis, adotando-se assim o valor mínimo para o grau de consequências.

Relativamente aos edifícios, verificou-se a existência de estragos moderados no interior de habitações e comércio existentes na marginal, não havendo, no entanto, danos no que se refere à integridade da estrutura dos mesmos.

Na parte relativa às estruturas, verificou-se por diversas vezes a ocorrência de galgamentos com elevadas consequências para a estrutura, sendo necessária a sua reconstrução. Verificou-se que nas estruturas circundantes do esporão norte, estes estragos eram mais acentuados, afetando assim as estruturas 2, 3 e 4. Nas restantes estruturas verificou-se a ocorrência de alguns estragos, mas de menor gravidade.

Aplicando então a Tabela 3.9 e com as considerações acima descritas, obteve-se então a Tabela 4.23, onde se encontra a avaliação dos graus de consequências para a Praia do Furadouro.

Tabela 4.23 - Grau de Consequências na praia do Furadouro.

Estrutura	Consequências				
	Pessoas	Ambiente	Edifícios	Estruturas	Veículos
1	5	1	5	10	5
2	.5	1	5	25	-
3	5	1	5	25	5
4	5	1	5	25	5
5	5	1	-	10	-
6	5	1	-	5	-

Para o cálculo do Risco na aplicação do SWASH, apesar de serem consideradas zonas de influência, Figura 4.70, considerou-se que dentro de cada área as características da zona não se alteravam de forma considerável, considerando-se os mesmos graus de consequências para as estruturas.

4.11.3. CÁLCULO DO GRAU DE RISCO E OBTENÇÃO DE MAPAS DE RISCO

Após a obtenção dos graus relativos à probabilidade de ocorrência de galgamentos e do grau de consequências, é então possível determinar o grau de risco para cada estrutura, facilitando a perceção dos resultados obtidos, particularmente dos locais que apresentam risco.

Através da equação (3.33), foram então calculados os graus de risco para cada estrutura ou área com cada método utilizado de avaliação de galgamentos e através da Tabela 3.11 verifica-se a

aceitabilidade do risco calculado. Na Tabela 4.24 e na Tabela 4.25 estão representados os resultados obtidos com a utilização das fórmulas empíricas de Mase, da rede neuronal NN_OVERTOPPING2. Serão também apresentados os mapas de risco respectivos.

Tabela 4.24 - Grau de Risco e aceitabilidade para a aplicação das fórmulas de Mase.

Estrutura	Grau de Probabilidade	Grau de Consequências	Grau de Risco	Descrição
1	1	10	10	Reduzido
2	1	25	25	Indesejável
3	1	25	25	Indesejável
4	1	25	25	Indesejável
5	1	10	10	Reduzido
6	1	5	5	Reduzido



Figura 4.71 - Mapa de Risco para a aplicação das fórmulas de Mase (ArcMap 10).

Tabela 4.25 - Grau de Risco e aceitabilidade com aplicação da rede neuronal NN_OVERTOPPING2.

Estrutura	Grau de Probabilidade	Grau de Consequências	Grau de Risco	Descrição
1	2	10	20	Indesejável
2	2	25	50	Inaceitável
3	1	25	25	Indesejável
4	1	25	25	Indesejável
5	1	10	10	Reduzido
6	2	5	10	Reduzido



Figura 4.72 - Mapa de Risco para a aplicação da rede neuronal NN_OVERTOPPING2 (ArcMap 10).

Comparando os resultados obtidos para os dois métodos acima considerados, verifica-se que a aplicação do NN_OVERTOPPING2 apresenta para as duas estruturas a norte do esporão um grau de risco mais elevado do que o verificado para a utilização das fórmulas de Mase. Com as fórmulas empíricas, verifica-se um grau de risco mais elevado para as estruturas 2, 3 e 4, essencialmente devido aos graus de consequências atribuídos a estes locais.

A Tabela 4.26 e a Tabela 4.27, representam o grau de risco obtido para as zonas consideradas, para a aplicação do SWASH para a situação atual e com a construção de um quebramar destacado.

Tabela 4.26 - Grau de Risco e aceitabilidade com a aplicação do SWAH para a situação atual.

Área	Grau de Probabilidade	Grau de Consequências	Grau de Risco	Descrição
1	4	10	40	Inaceitável
2	3	25	75	Inaceitável
3	5	25	125	Inaceitável
4	4	25	100	Inaceitável
5	4	10	40	Inaceitável
6	5	5	25	Indesejável

Tabela 4.27 - Grau de Risco e aceitabilidade com a aplicação do SWAH com a construção de um quebra-mar destacado.

Área	Grau de Probabilidade	Grau de Consequências	Grau de Risco	Descrição
1	5	10	50	Inaceitável
2	3	25	75	Inaceitável
3	2	25	50	Inaceitável
4	2	25	50	Inaceitável
5	4	10	40	Inaceitável
6	5	5	25	Indesejável

Verifica-se que para ambas as situações o grau de risco está no patamar mais elevado para todas as zonas consideradas, excetuando a última devido ao baixo grau de consequências considerado. Verifica-se uma redução significativa no grau de risco nas estruturas 3 e 4, aproximando-se do limite inferior do grau de “Inaceitável”. A Figura 4.73 representa o mapa de risco para a aplicação do SWASH, nas duas situações, pois estes são iguais.

Não se verifica para nenhuma aplicação a ocorrência de um grau de risco classificado como Risco Insignificante.

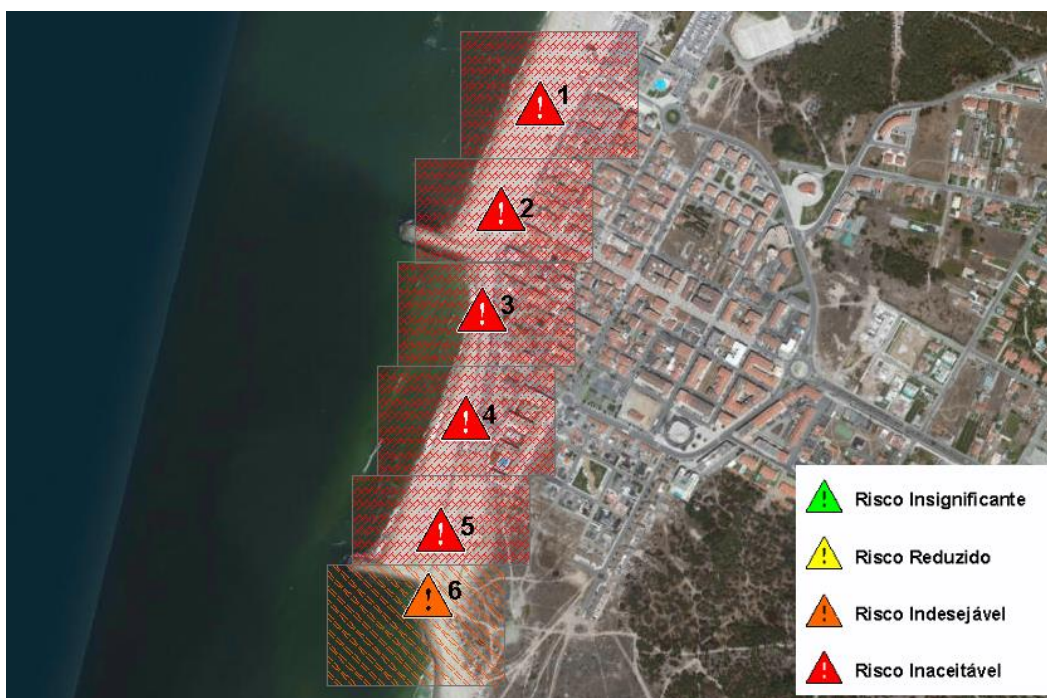


Figura 4.73 - Mapa de Risco para a aplicação do SWASH para ambas as situações (ArcMap 10).

5

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1. SÍNTESE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS

Esta dissertação tinha como objetivo a avaliação dos galgamentos na praia do Furadouro comparando a situação atual com a construção de um quebramar destacado, tendo-se recorrido a 3 métodos para a avaliação dos galgamentos na situação atual e a 1 método que permite considerar o efeito dessa construção da estrutura de defesa costeira.

Foi necessário aplicar inicialmente o SWAN para a definição do regime de agitação próximo da costa, verificando-se uma redução da altura de onda significativa e uma rotação da direção da propagação, dispondo as cristas da onda perpendicularmente à costa, devido à influência dos fundos na propagação. Foi ainda realizada uma validação dos resultados obtidos, comparando os registos da bóia ondógrafo de Leixões com os resultados para o ponto S5, coincidente com esta, obtendo-se uma boa concordância, concluindo-se que os resultados da aplicação do SWAN eram válidos.

Posteriormente procedeu-se à avaliação dos galgamentos para a situação atual, utilizando as fórmulas empíricas de Mase *et al.* (2013), tendo-se obtido maiores galgamentos para as situações coincidentes com registos de galgamentos ocorridos. As duas estruturas mais a norte apresentaram os maiores caudais galgados, sendo seguidos pela estrutura 4. Na aplicação da rede neuronal NN_OVERTOPPING2 obtiveram-se maiores caudais de galgamento para as estruturas 1, 2 e 6, sendo as duas primeiras coincidentes com o obtido para as fórmulas de Mase. Na aplicação da rede neuronal houve uma maior dificuldade devido à presença da praia na frente da estrutura, algo que o NN_OVERTOPPING2 não considera no seu *input*.

A aplicação do SWASH permitiu concluir que a zona situada entre os dois esporões é a mais crítica, onde ocorrem mais eventos de galgamento, verificando-se, no entanto, a norte do esporão norte, também uma zona de maior ocorrência de galgamentos, localização da estrutura 2. Relativamente à zona a sotamar do esporão sul, não é possível retirar conclusões, devido à elevada influência da fronteira da malha computacional neste local.

O modelo numérico permitiu ainda verificar os efeitos provocados pela construção de um quebramar destacado. Verificou-se que na zona a sotamar da estrutura existe uma grande redução da ocorrência e magnitude dos galgamentos, cumprindo o propósito da sua construção, não apresentando, no entanto, uma eficiência elevada na proteção na zona de abertura entre o esporão norte e a estrutura, sendo necessária uma otimização da solução adotada.

A construção da estrutura de defesa irá provocar efeitos negativos a barlar do esporão norte e a sul do quebramar, sendo que a primeira poderá trazer problemas acrescidos pois é uma localização para onde se verificam galgamentos frequentes e apresenta uma elevada presença habitacional e comercial. Na segunda localização com efeitos negativos após a construção do quebramar, por se tratar de uma

zona sem habitações e não se verificar um aumento significativo dos caudais de galgamento, os efeitos não são muito graves e não representam necessidade de medidas.

No cálculo do grau de risco, verificou-se para a aplicação das fórmulas empíricas de Mase e para o NN_OVERTOPPING2, que as estruturas 2, 3 e 4 são as que apresentam um risco mais elevado, sendo necessário medidas de proteção para estes locais, concluindo-se que as estruturas de proteção costeira atualmente existente não são eficientes. Calcularam-se, também, os graus de risco para a aplicação do SWASH, não sendo esta comparável com a realizada anteriormente, que avaliava os galgamentos para os regimes de agitação verificados para os 36 anos considerados, enquanto nesta aplicação, são obtidos resultados de galgamentos para uma simulação de tempestade. Nesta situação, verificou-se que para o regime de agitação considerado, toda a zona de estudo apresenta grau de risco muito elevado, havendo, no entanto, um claro melhoramento com a construção de um quebramar destacado. Conclui-se também que alguns parâmetros considerados na aplicação do SWASH, dos quais resultam perda de energia da agitação, foram subestimados.

Os resultados obtidos pelos diferentes métodos diferem muito. Cada método apresenta especificidades e alguns pormenores resultam em disparidades nos resultados, bem como alguma desproporção com a realidade. Comparando as fórmulas empíricas de Mase e o NN_OVERTOPPING2, o primeiro considera o perfil de praia e essa inclinação do fundo, no entanto, a inclinação deve ser escolhida entre 4 possibilidades e ainda, as fórmulas não têm em consideração a direção da agitação.

Na aplicação da rede neuronal, os principais problemas prendem-se com a impossibilidade de considerar uma praia na frente da estrutura, e com o facto dos dados do regime de agitação serem relativos ao pé da estrutura, local para onde não é fácil de se obter com a presença de uma praia. A principal incorreção na utilização destes métodos para esta situação deve-se ao facto de estes funcionarem em 1D, não permitindo a consideração da presença de estruturas como os esporões e das formas do fundo, que irão provocar fenómenos de refração, alterando os parâmetros fundamentais de agitação, bem como não permitem obter uma ideia generalizada do local de estudo, considerando-se apenas pontos específicos.

A aplicação do SWASH, apesar de colmatar o problema dos outros métodos no que diz respeito à 1D, apresenta também problemas. O SWASH não tem em consideração os caudais de galgamento por *splash*, apenas considera os do tipo *green water*, enquanto que os métodos referidos anteriormente, por resultarem de resultados de ensaios em modelo físico, fazem essa consideração. O modelo numérico apresenta também grandes problemas de estabilidade, sendo muito difícil a sua aplicação, parando a simulação frequentemente ou por vezes apresentando resultados irrealistas.

Aquando da ocorrência de um erro na simulação, a informação e a sugestão fornecida pelo modelo não são explícitas, tornando-se num longo processo de tentativa e erro devido aos inúmeros comandos utilizados. Por outro lado, o manual fornecido não é totalmente claro, apresentando incoerências e falta de informação. Também o tempo de processamento não permite a exploração de diversas condições de agitação, não se podendo fazer um estudo ao longo do tempo como o realizado pelos outros métodos. Este é também um entrave para o estudo dos comandos, pois a experimentação destes com pequenas alterações, obriga à espera de diversos dias pelos resultados ou pela ocorrência de um erro. O modelo não tem em consideração as alterações ao nível morfológico que irão ocorrer no local com a construção do quebramar, não simulando assim da melhor forma as consequências da sua construção. Ainda não existem muitos estudos realizados utilizando este modelo, bem como pessoas habilitadas para a sua utilização, o que dificulta a possibilidade de pedir apoio e opiniões sobre a simulação em estudo. Todos estes fatores, próprios de um modelo numérico em desenvolvimento,

traduzem numa grande dificuldade e tempo despendido na aplicação do mesmo obtendo-se, por vezes, resultados para os quais não se tem confiança.

O cálculo dos graus de risco tem como principais problemas, a grande subjetividade na aplicação das classes sugeridas. Estas classes apresentam também, por vezes, elevados intervalos, não fazendo uma boa distinção das situações, sendo benéfico a presença de mais classes ou subclasses. No entanto, os graus de risco permitem a construção dos mapas de risco, que permitem de forma imediata a perceção das zonas com maior risco.

De uma forma global, esta dissertação permitiu concluir que as estruturas presentes atualmente na zona de estudo não são eficientes na proteção, pois apresentam taludes muito pouco rugosos funcionando como rampa de lançamento da água, particularmente a norte do esporão norte e na zona entre os dois esporões. A construção de um quebramar destacado iria ter um elevado efeito na proteção da zona a sotamar deste, tendo pequenos efeitos em zonas adjacentes, considerando-se, no entanto, que a sua construção terá um efeito global benéfico, devendo-se, porém, otimizar a solução e estudar alternativas.

5.2. PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De forma a complementar o trabalho realizado nesta dissertação, a adoção de uma batimetria mais atual e que considerasse integralmente a zona de estudo, sem a necessidade de juntar dados de diferentes levantamentos e ainda a realização de um levantamento das estruturas e do perfil de praia traduzir-se-ia numa maior aproximação ao que se verifica na zona de estudo.

O modelo numérico SWASH tem um elevado número de comandos possibilitando a realização de simulações muito variadas, tendo esta dissertação um período de desenvolvimento muito curto para a avaliação e estudo pormenorizado das diferentes possibilidades. A utilização de uma porosidade do fundo e estruturas diferente, a utilização e estudo de diferentes esquemas de conservação do momento dos utilizados, uma melhor definição dos parâmetros de dissipação de energia, a utilização de *layers*, a definição de uma malha mais fina e com uma maior extensão e o estudo de mais regimes de agitação e de níveis de maré para a zona de estudo, seriam aplicações importantes a realizar em trabalhos futuros, permitindo a obtenção de melhores resultados para o estudo da zona e uma melhor descrição da influência destas no modelo SWASH, pois o modelo tem poucas aplicações, particularmente para estudos reais, sendo mais recorrente a sua utilização para a simulação e validação de ensaios físicos.

Sugere-se ainda a utilização de outro modelo numérico de cálculo de galgamentos para comparação com os resultados obtidos pelo SWASH, um estudo mais aprofundado da influência da construção do quebramar destacado nas correntes, no transporte de sedimentos e na morfologia, na estagnação e qualidade da água e ainda o estudo de outras soluções de proteção costeira para a zona de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, Jose Henrique GM; Banner, Michael L - Performance of a saturation-based dissipation-rate source term in modeling the fetch-limited evolution of wind waves. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 33. n.º 6 (2003). p. 1274-1298. 1520-0485
- ARH Centro - Projecto de Requalificação Ambiental da Zona Sul da Praia do Furadouro, Incluindo Reposição Dunar. Planta de Implantação. 2009.
- Battjes, JA; Janssen, JPFM - Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering Proceedings*. Vol. 1. n.º 16 (1978). 2156-1028
- Battjes, JA; Stive, MJF - Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research* 90 (C5), 9159-9167.(1985). (1985). 0148-0227
- Bay, Ibrahim - Measurement and analysis of wave overtopping. University of Liverpool, 2005.
- Bouws, E; Komen, GJ - On the balance between growth and dissipation in an extreme depth-limited wind-sea in the southern North Sea. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 13. n.º 9 (1983). p. 1653-1658. 1520-0485
- Buckley, Mark; Lowe, Ryan; Hansen, Jeff - Evaluation of nearshore wave models in steep reef environments. *Ocean Dynamics*. Vol. 64. n.º 6 (2014). p. 847-862. 1616-7341
- Castro, Joana - Estudo de uma Obra de Proteção Costeira Destacada para a Frente Urbana do Furadouro. (2015).
- Coeveld, EM; Van Gent, MRA; Pozueta, B - Neural Network: Manual NN OVERTOPPING 2. CLASH WP8, WL-Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands. (2005).
- Collins, J Ian - Prediction of shallow-water spectra. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 77. n.º 15 (1972). p. 2693-2707. 2156-2202
- Consulmar - Planta da Retenção e Perfis Tipo. Projecto Base. 2010.
- Cortez, Paulo; Neves, José - Redes neuronais artificiais. *Universidade do Minho, Braga, Portugal*. (2000).
- de Waal, JP; Van der Meer, JW - Wave runup and overtopping on coastal structures. *Coastal Engineering Proceedings*. Vol. 1. n.º 23 (1993). 2156-1028
- Duarte, Sérgio Pedro de Matos - Projectos de um sistema de quebramares destacados para a frente marítima da foz do rio Douro no Porto. (2012).
- Eldeberky, Yasser - Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore. TU Delft, Delft University of Technology, 1996. 9090097570
- Engineers, U.S. Army Corps Of - Coastal engineering manual. *Engineer Manual*. Vol. 1110. (2002). p. 2-1100.
- Fortes, CJEM; Reis, MT; Neves, P - Programa Calcula Runup Galgamento Mase. f. (2013).
- Fortes, Conceição JEM; Santos, João Alfredo; Pinheiro, Liliana; da Graça Neves, Maria - SOPRO: Uma Ferramenta para Estudos de Engenharia Portuária e Costeira. (2006).
- Gama, C - Caracterização do Fenómeno da Sobrelevação do Nível do Mar de Origem Meteorológica em Portugal Continental. Efeito Amplificador deste Fenómeno sobre as Variações Volumétricas de

Sedimentos nas Praias da Comporta, S. Torpes, Odeceixe e Arrifana. Lisboa, Portugal: Universidade de Lisboa. Master's thesis, 138p, 1996.

Hashimoto, Noriaki; Tsuruya, Hiroichi; Nakagawa, Yasuyuki - Numerical computations of the nonlinear energy transfer of gravity-wave spectra in finite water depths. *Coastal Engineering Journal*. Vol. 40. n.º 01 (1998). p. 23-40. 0578-5634

Hasselmann, Klaus - On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology*. Vol. 6. n.º 1-2 (1974). p. 107-127. 0006-8314

Hasselmann, Klaus; Barnett, TP; Bouws, E; Carlson, H; Cartwright, DE; Enke, K; Ewing, JA; Gienapp, H; Hasselmann, DE; Kruseman, P - Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrographisches Institut, 1973.

Hasselmann, Susanne; Hasselmann, Klaus; Allender, JH; Barnett, TP - Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 15. n.º 11 (1985). p. 1378-1391. 1520-0485

Hedges, TS; Reis, MT - Random wave overtopping of simple sea walls: a new regression model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water, maritime and energy*. Vol. 130. n.º 1 (1998). p. 0001-0010. 0965-0946

Holthuijsen, Leo H - Waves in Oceanic and Coastal Waters. *Waves in Oceanic and Coastal Waters, by Leo H. Holthuijsen, pp. 404. Cambridge University Press, January 2007. ISBN-10: . ISBN-13: .* Vol. 1. (2007).

Janssen, Peter AEM - Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 21. n.º 11 (1991). p. 1631-1642. 1520-0485

Kamisky, GM; Kraus, NC - Evaluation of depth-limited wave breaking criterion. 1993.

Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, J.; Janssen, S. and P.A.E.M. - Dynamics and Modelling of Ocean Waves. Cambridge University Press, 1994.

Komen, GJ; Hasselmann, K; Hasselmann, K1 - On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *Journal of physical oceanography*. Vol. 14. n.º 8 (1984). p. 1271-1285. 1520-0485

Projecto De Lei N.º 147/IX - Criação Da Freguesia Do Furadouro, No Concelho De Ovar, Distrito De Aveiro, 2002

Madsen, Ole Secher; Poon, Ying-Keung; Graber, Hans C - Spectral wave attenuation by bottom friction: theory. *Coastal Engineering Proceedings*. Vol. 1. n.º 21 (1988). 2156-1028

Martinho, Marta Filipa Morais Alves - Avaliação e gestão de riscos em áreas litorais. Contributo para o desenvolvimento de um sistema de previsão e alerta de inundação em zonas costeiras. 2014.

Martins, Hugo; Veloso-Gomes, Fernando - Alimentação artificial de praias em ambientes energéticos intermédios. (2012).

Mase, Hajime; Kirby, James T - Hybrid frequency-domain KdV equation for random wave transformation. *Coastal Engineering Proceedings*. Vol. 1. n.º 23 (1992). 2156-1028

Mase, Hajime; Miyahira, Akira; Hedges, Terry S - Random wave runup on seawalls near shorelines with and without artificial reefs. *Coastal Engineering Journal*. Vol. 46. n.º 03 (2004). p. 247-268. 0578-5634

- Mase, Hajime; Tamada, Takashi; Yasuda, Tomohiro; Hedges, Terence S; Reis, Maria T - Wave runup and overtopping at seawalls built on land and in very shallow water. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*. Vol. 139. n.º 5 (2013). p. 346-357. 0733-950X
- Nakamura, M; Sasaki, Y; Yamada, J - Runup on seawalls with composite cross section. 1972.
- Owen, MW - Design of seawalls allowing for wave overtopping. *Report Ex*. Vol. 924. (1980). p. 39.
- Pérez, Meritxell Salas - Overtopping over a real rubble mound breakwater calculated with SWASH. TU Delft, Delft University of Technology, 2014.
- Piqueiro, Francisco - Fotografia aérea efetuada sobre a praia do Furadouro. FEUP, Porto, 2015.
- Poseiro, P; Fortes, CJEM; Santos, JA; Reis, MT; Craveiro, J - Aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) à análise das consequências de ocorrência de galgamentos. O caso da baía da Praia da Vitória. *Atas das 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. (2013).
- Pullen, T; Allsop, NWH; Bruce, T; Kortenhaus, A; Schuttrumpf, H; Van der Meer, JW - EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual. 178p., Environment Agency, Reino Unido, Expertise Netwerk Waterkeren, Holanda e Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, Alemanha. ISBN: ISBN 978-3-8042-1064-6. 2007.
- Ramos, Tiago - Estudo de reabilitação de estruturas de defesa costeira: casos de estudo do Mindelo, Norte do Furadouro e Torreira. (2012).
- Reis, Ana Rita - Dicotomia entre a zona piscatória e a zona balnear: Espinho, Esmoriz e Furadouro. (2015).
- Reis, Rui; Fortes, Conceição; Gabriel, Selma; Moura, Delminda - Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima: Praia da Galé. *EROS: Erosão dos litorais rochosos-diferenças na protecção conferida pelas praias arenosas e pelas plataformas litorais*. (2013). p. 1-69.
- Resio, Donald T; Pihl, Jorgen H; Tracy, Barbara A; Vincent, C Linwood - Nonlinear energy fluxes and the finite depth equilibrium range in wave spectra. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Vol. 106. n.º C4 (2001). p. 6985-7000. 2156-2202
- Rodrigues, Joana; Poseiro, Pedro; Reis, Maria Teresa; Fortes, Conceição Juana; Pinto, Francisco Taveira - Aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) na avaliação das consequências de galgamento em zonas portuárias—caso de Ponta Delgada, Açores. (2014).
- Rogers, WE; Kaihatu, JM; Petit, HAH; Booij, N; Holthuijsen, LH - Diffusion reduction in an arbitrary scale third generation wind wave model. *Ocean Engineering*. Vol. 29. n.º 11 (2002). p. 1357-1390. 0029-8018
- Santos, JA; Reis, MT; Neves, DRCB; Fortes, CJEM; Rodrigues, S; Azevedo, EB; Rodrigues, MC; Simões, A; Ramalheira, J; Raposeiro, P - Aplicação de uma metodologia para avaliação do risco para a navegação e galgamentos no Porto da Praia da Vitória. *7ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. AIPCN/PIANC, Porto. Vol. 6. (2011).
- Saville, Thorndike - Wave run-up on composite slopes. US Beach Erosion Board, 1958.
- Silvester, Richard; Hsu, John RC - Coastal stabilization. World Scientific, 1997. 9810231547
- Stelling, Guus S; Leendertse, Jan J - Approximation of convective processes by cyclic AOI methods. ASCE, 1992.

Suzuki, Tomohiro; Altomare, Corrado; Verwaest, Toon; Trouw, Koen; Zijlema, Marcel - Two-dimensional wave overtopping calculation over a dike in shallow foreshore by SWASH. Coastal Engineering Research Council, 2014. 0989661121

Tamada, T; Inoue, M; Tezuka, T - Diagrams for the estimation of wave overtopping rate on gentle slope-type seawalls. 2002.

Taveira-Pinto, Francisco; Neves, Ana Cristina - 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, Universidade do Porto, Porto, 2003.

Team, S.W.A.N. - SWAN user manual. Delft University of Technology. The Netherlands. (2007).

Team, S.W.A.S.H. - SWASH User Manual version 3.14A. (2016).

van der Meer, Jentsje W; Janssen, JPFM; Hydraulics, Delft - Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments. Delft Hydraulics, 1995.

Van der Meer, JW - Technical report wave run-up and wave overtopping at dikes. Rijkswaterstaat, DWW, 2002.

van der Westhuysen, André J; Zijlema, Marcel; Battjes, Jurjen A - Nonlinear saturation-based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water. *Coastal Engineering*. Vol. 54. n.º 2 (2007). p. 151-170. 0378-3839

Van Mierlo, FAJM - Numerical modelling of wave penetration in ports. TU Delft, Delft University of Technology, 2014.

Veloso-Gomes, F; Taveira-Pinto, F; Das Neves, L; Pais-Barbosa, J - 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. (2006).

Veloso-Gomes, Fernando - Algumas reflexões sobre a problemática das obras de protecção costeira. *Actas do 2º Simpósio sobre Protecção e Revalorização da Faixa Costeira do Minho ao Liz, University of Oporto*. (1991). p. 128-143.

Veloso-Gomes, Fernando - A gestão da zona costeira portuguesa. *Revista de Gestão Costeira Integrada*. Vol. 7. n.º 2 (2007). p. 83-95.

Veloso-Gomes, Fernando - Contributos Para A Revisão Do Plano De Ordenamento Da Orla Costeira Na Região Centro. (2010).

Veloso-Gomes, Fernando - Intervenções e estrutura de defesa costeira. Aparentamentos da unidade curricular de Trabalhos Marítimos 1, 5º ano da opção de Hidráulica do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ano letivo 2015/2016: 2015.

Zijlema, Marcel; Stelling, Guus; Smit, Pieter - SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*. Vol. 58. n.º 10 (2011). p. 992-1012. 0378-3839

Sites Web:

[1] - <http://www.sulinformacao.pt/2015/08/abastecimento-de-agua-quarteira-quase-normalizado/> - acesso a 23/03/2016

- [2] - <http://jregiao-online.webnode.pt/products/reposi%C3%A7%C3%A3o-de-areias-concluida-em-tr%C3%AAs-praias-da-costa-da-caparica/> - acesso a 01/04/2016
- [3] - <http://olhares.uol.com.br/meia-laranja-foto2147081.html> - acesso a 01/04/2016
- [4] - <https://www.publico.pt/local/noticia/quercus-tira-qualidade-de-ouro-a-praia-dona-ana-no-algarve-1703485> - acesso a 01/04/2016
- [5] - https://scontent-lhr3-1.xx.fbcdn.net/hphotos-xat1/t31.0-8/10003645_272222996280373_1417257647_o.jpg - acesso a 23/03/2016
- [6] - http://verovarnopassado.blogspot.pt/p/fotos-do-livro-pesca-no-furadouro-1800_6848.html - acesso a 23/03/2016
- [7] - <http://2.bp.blogspot.com/-EfcfmZaNdbI/UN99VCXoJsI/AAAAAAAAAZz0/gwLMNkKclAc/s1600/DSCN9720.JPG> - acesso a 23/03/2016
- [8] - <http://etcetaljornal.pt/j/2014/04/furadouro-ovar-mais-pedra-como-emergencia-para-travar-o-mar/> - acesso a 23/03/2016
- [9] - http://rr.sapo.pt/noticia/37901/mar_faz_estragos_em_ovar_marinha_pede_cuidado_a_populacao - acesso a 23/03/2016
- [10] - <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/sobreelevacaomar.html> - acesso a 23/03/2016
- [11] - <http://qgis.pt/blog/2014/07/13/transformacao-de-coordenadas-e-utilizacao-das-grelhas-ntv2-no-qgis/#2> - acesso a 23/03/2016

ANEXOS:

Anexo A - Exemplo de um Ficheiro Input do SWAN para a *Main Grid*

Anexo B – Gráficos da aplicação das Fórmulas Empíricas de Mase

Anexo C - Ficheiro Input do SWASH

ANEXO A - EXEMPLO DE UM FICHEIRO INPUT DO SWAN PARA A MAIN GRID

```
PROJECT 'PF' '0'
SET 1.97 90 0 NAUTICAL
MODE STATIONARY TWODIMENSIONAL
COORDinates CART
CGRID REG 91000 400000 0 65000 100000 108 167 CIRCLE 24 0.04 0.5 25
INPGRID BOTTOM REG 91000 380000 0 325 700 200 200 EXC 0
READINP BOTTOM 1. 'BATIMETRIA.BOT' idla=3

$-----wave settings

BOUNd SHAPespec JONSWAP peak DSPR Degrees
BOUN SIDE N CON PAR 3.88 11.3 299 10
BOUN SIDE S CON PAR 3.88 11.3 299 10
BOUN SIDE E CON PAR 3.88 11.3 299 10
BOUN SIDE W CON PAR 3.88 11.3 299 10

$----- Physics

DIFFRACTION 1 0 0 1
OFF QUADruplet
TRIad
FRICTION JONSWAP

$-----

$NUMeric ACCUR 0 0 0 0 [niter]=50

$----- Output

NGRID 'outNgrid' 130000 422000 0 26000 25000 52 50
NESTout 'outNgrid' 'outgrid.dat'
FRAME 'PF' 91000 400000 0 65000 100000 108 167
TABLE 'PF' HEADER 'malhaPF.dat' XP YP HSIGN TM02 PDIR DEP RTP DIR TM01
POINTS 'CN' FILE 'DADOS_PONTOS.DAT'
TABLE 'CN' HEADER 'pontoPF.dat' XP YP HSIGN TM02 PDIR DEP RTP DIR TM01
$
TEST 0,0
COMPUTE
STOP
```


ANEXO B – GRÁFICOS DA APLICAÇÃO DAS FÓRMULAS EMPÍRICAS DE MASE

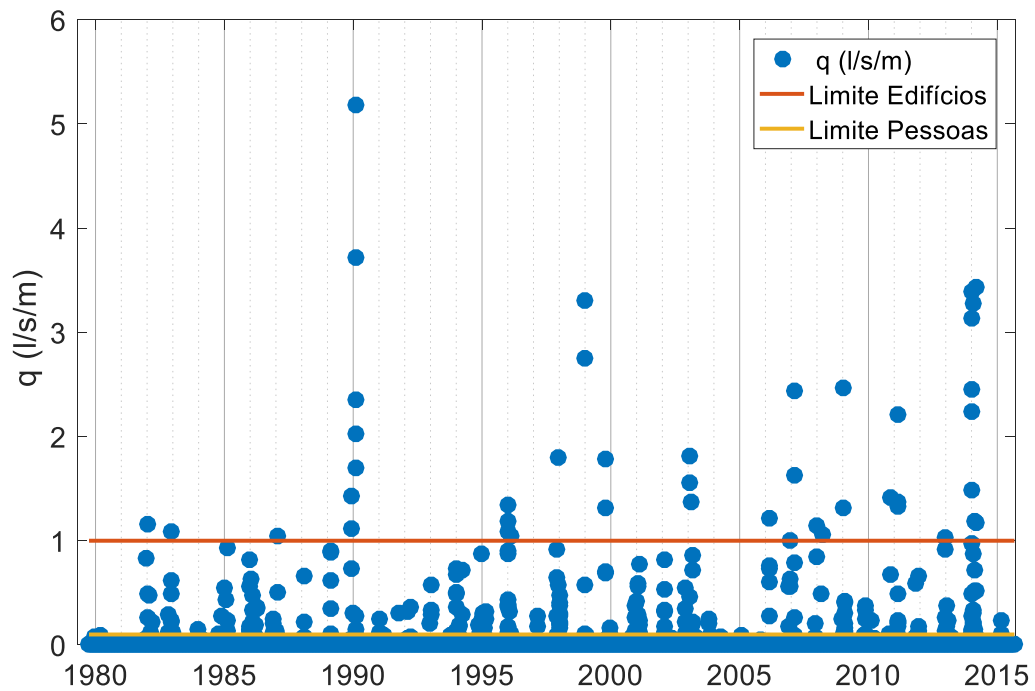


Figura 1 - Caudal médio galgado na estrutura 1 para o método 1

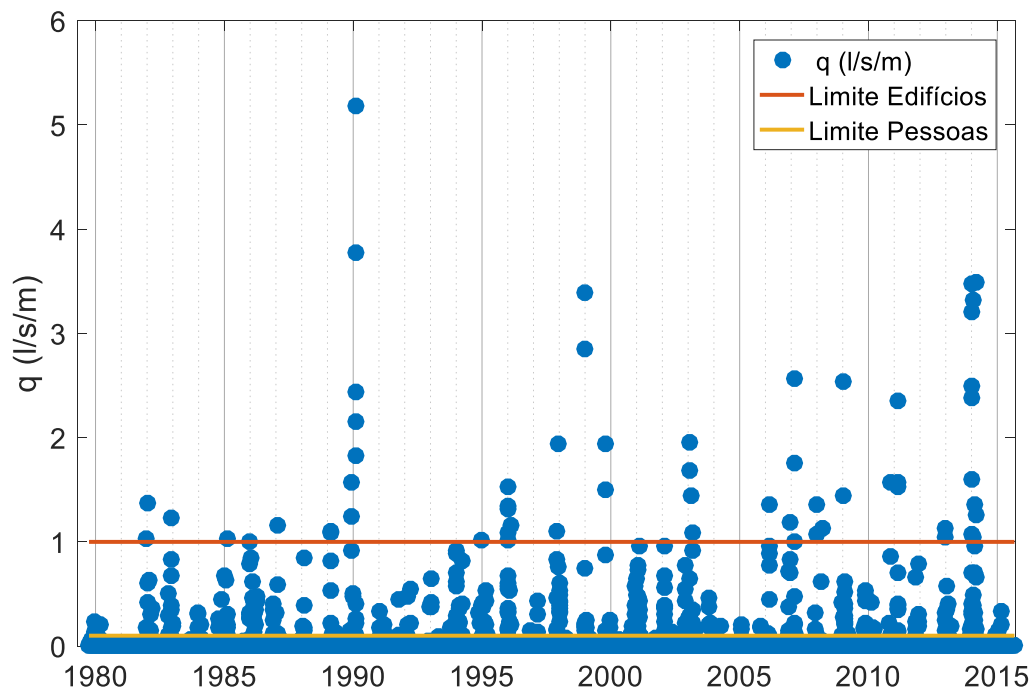


Figura 2 - Caudal médio galgado na estrutura 1 para o método 2

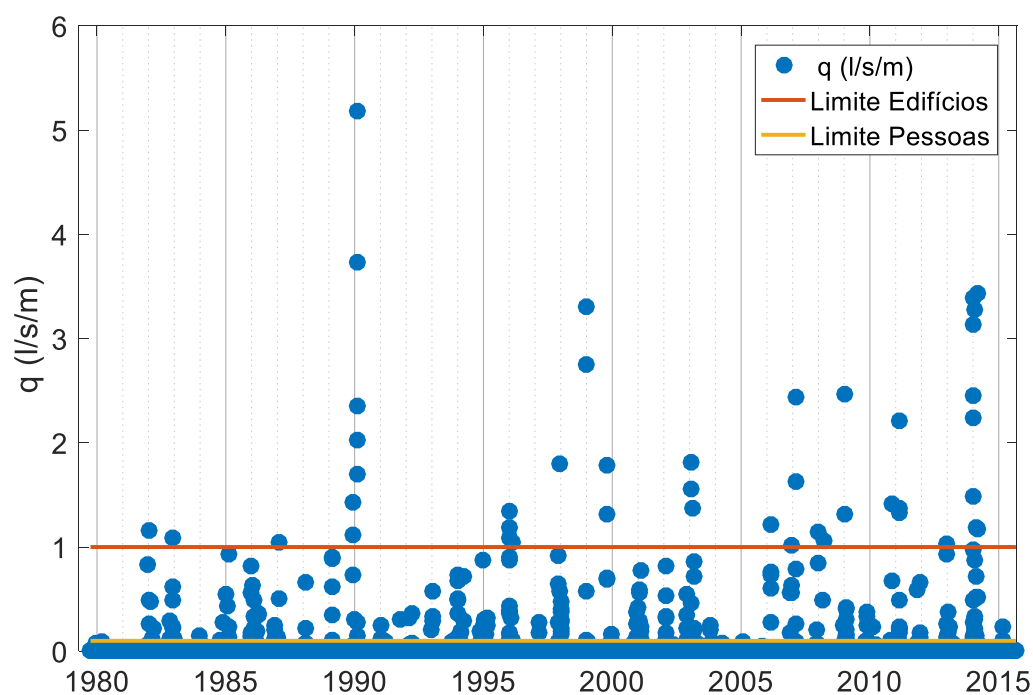


Figura 3 - Caudal médio galgado na estrutura 2 para o método 1

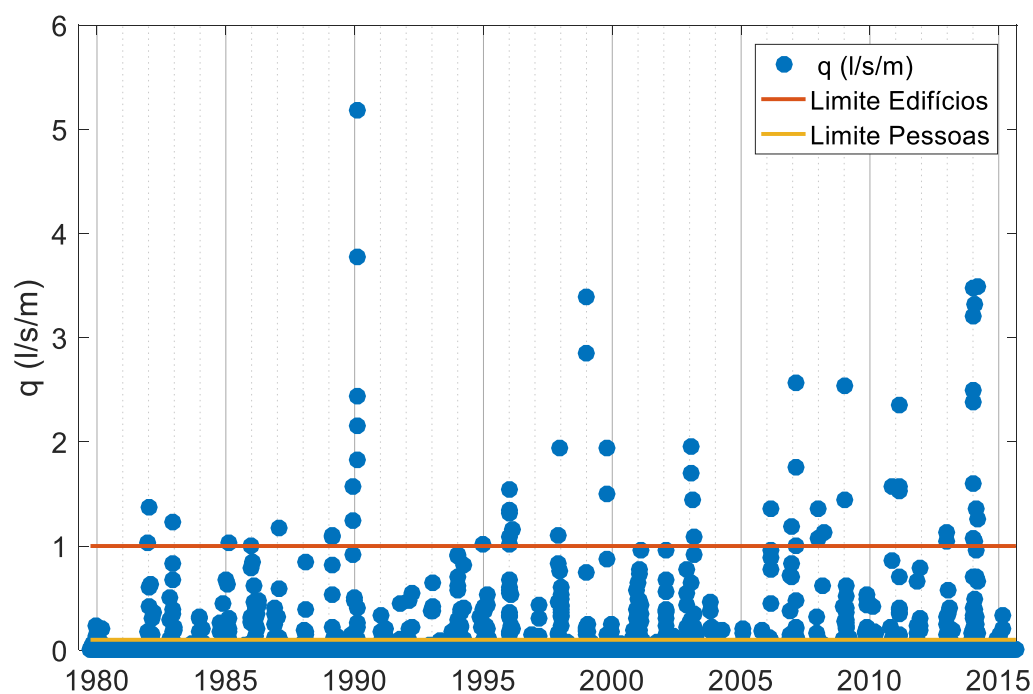


Figura 4 - Caudal médio galgado na estrutura 2 para o método 2

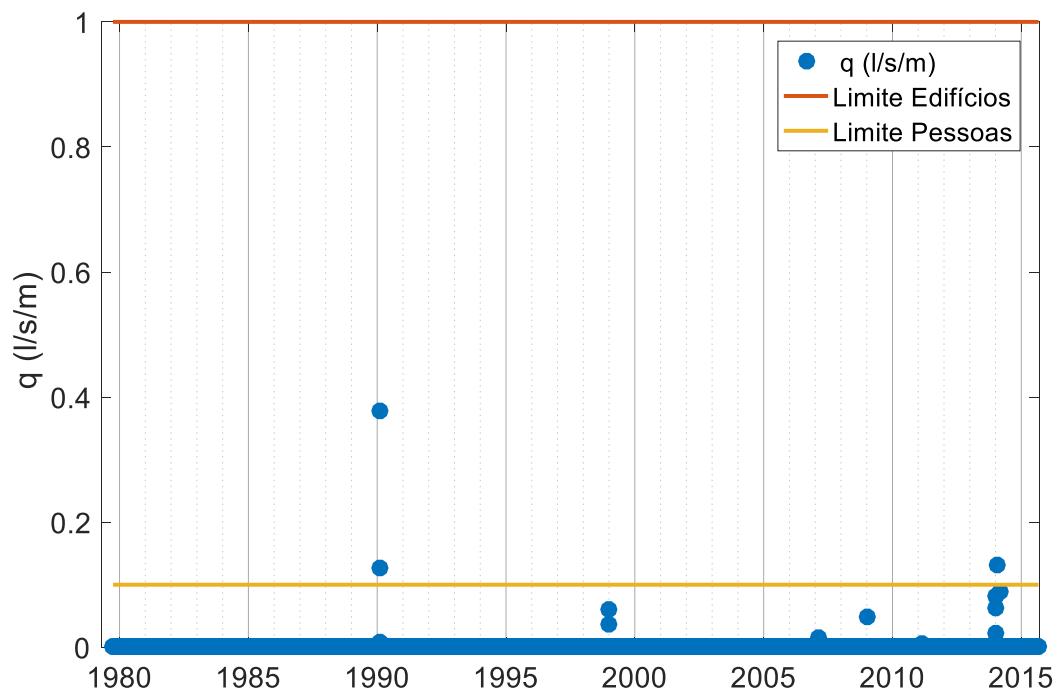


Figura 5 - Caudal médio galgado na estrutura 3 para o método 1

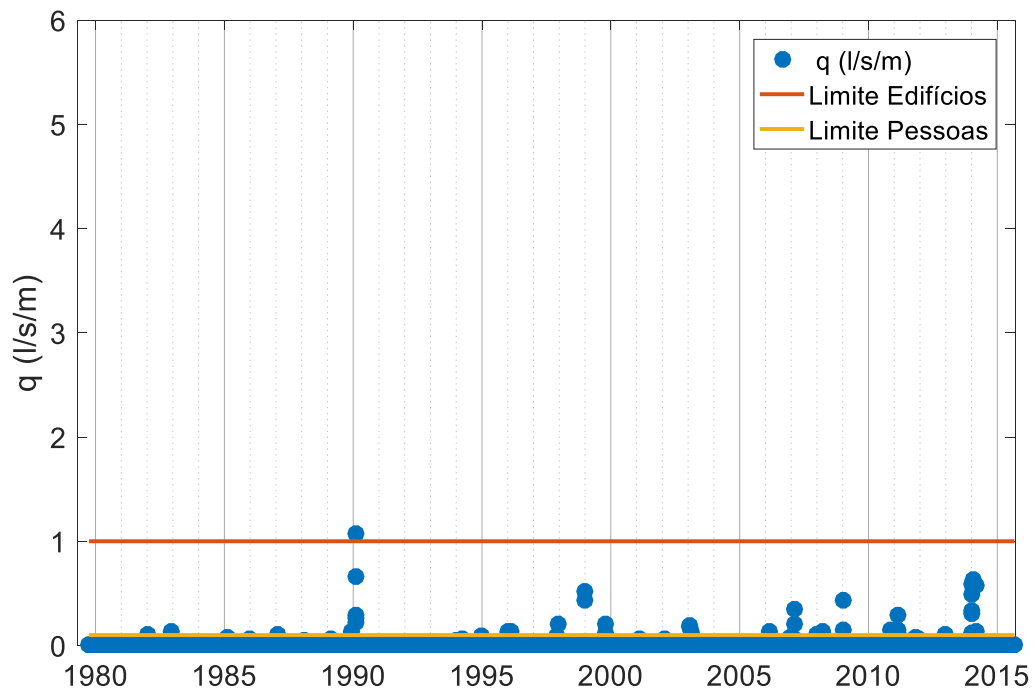


Figura 6 - Caudal médio galgado na estrutura 3 para o método 2

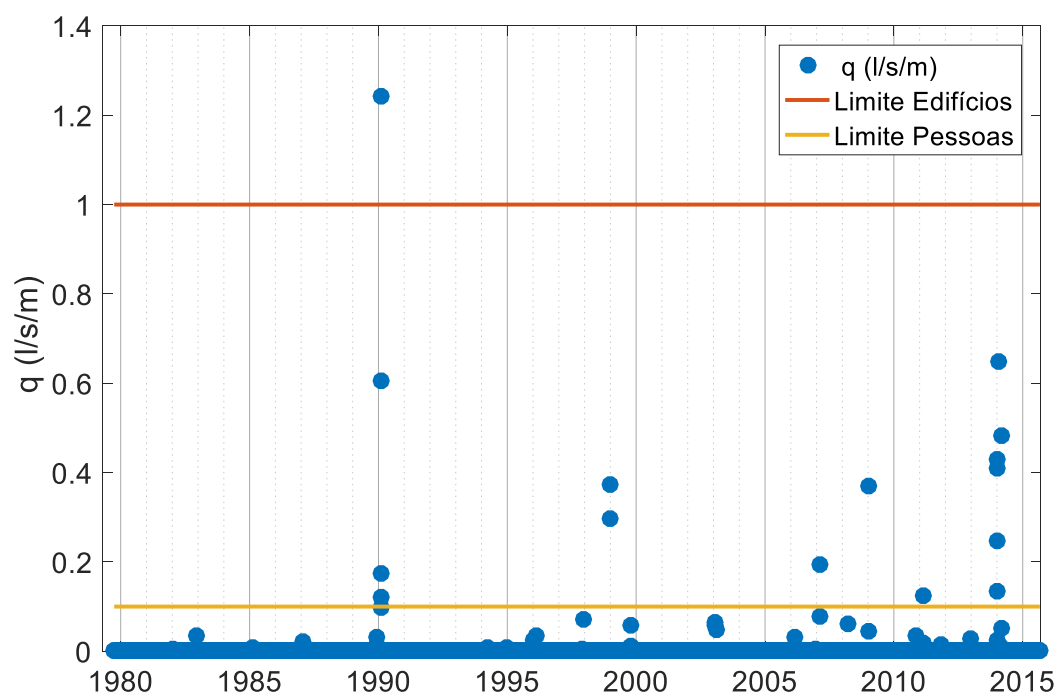


Figura 7 - Caudal médio galgado na estrutura 4 para o método 1

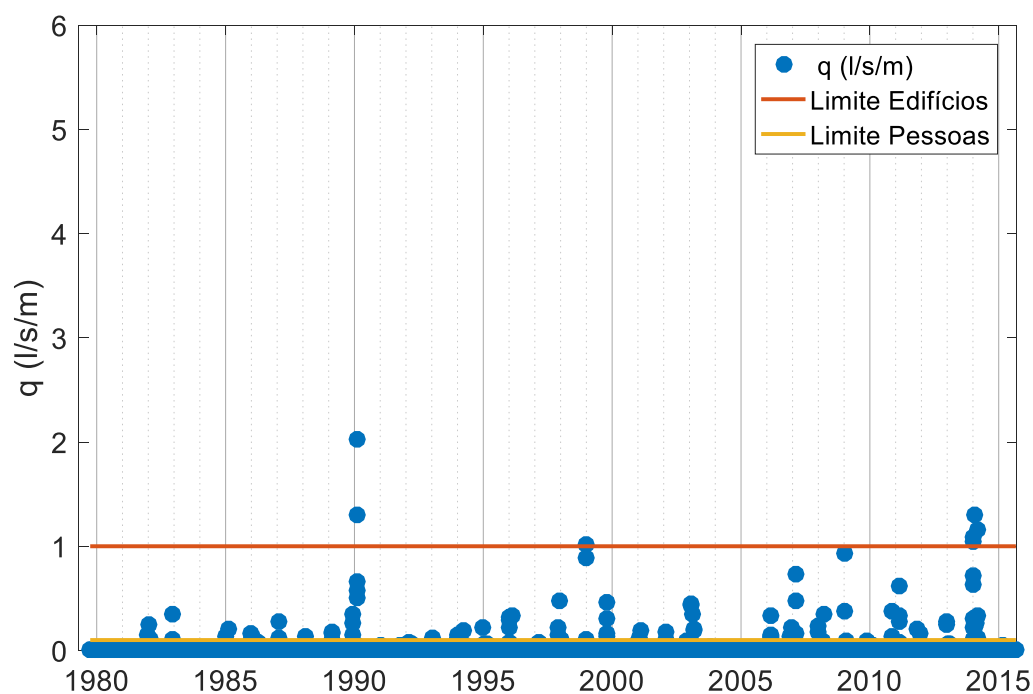


Figura 8 - Caudal médio galgado na estrutura 4 para o método 2

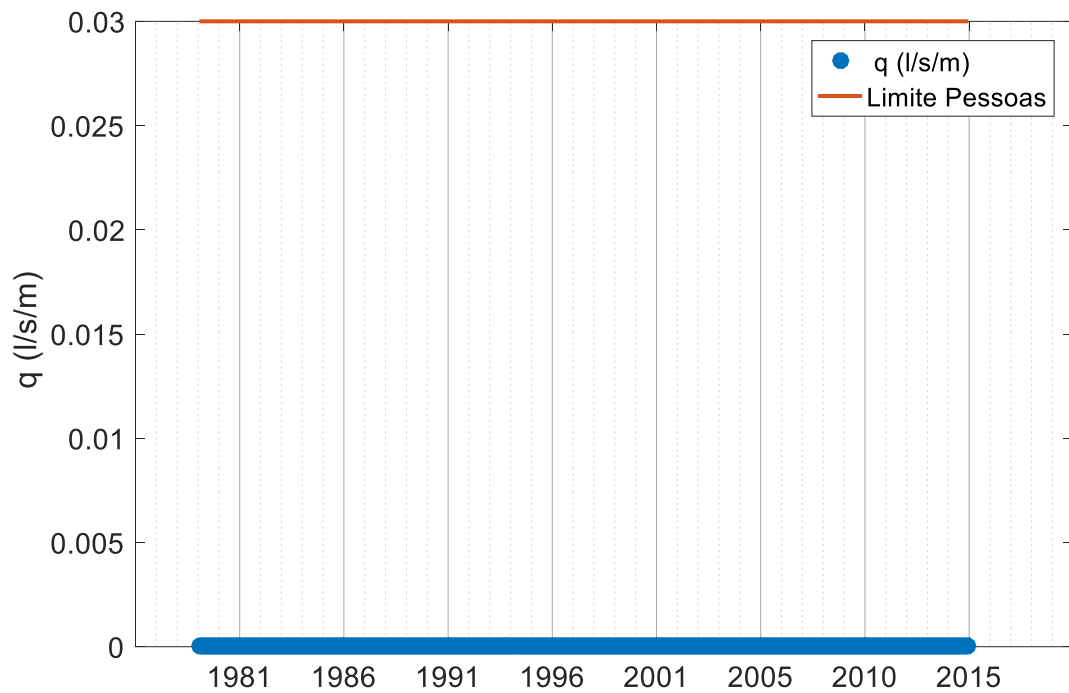


Figura 9 - Caudal médio galgado na estrutura 5 para o método 1

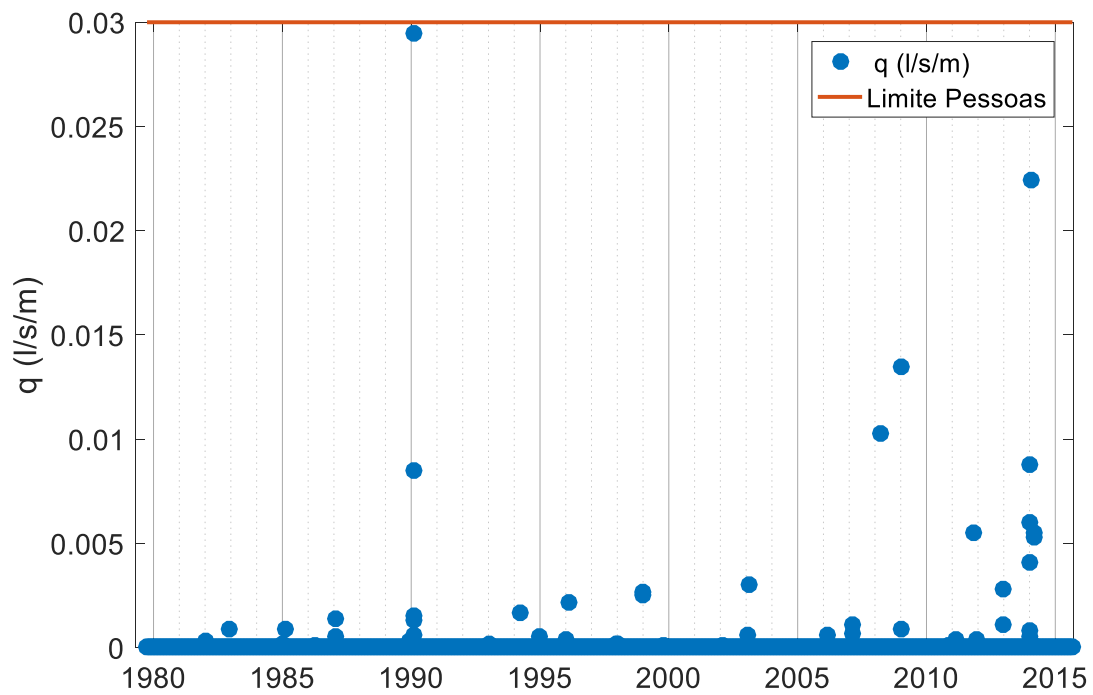


Figura 10 - Caudal médio galgado na estrutura 5 para o método 2

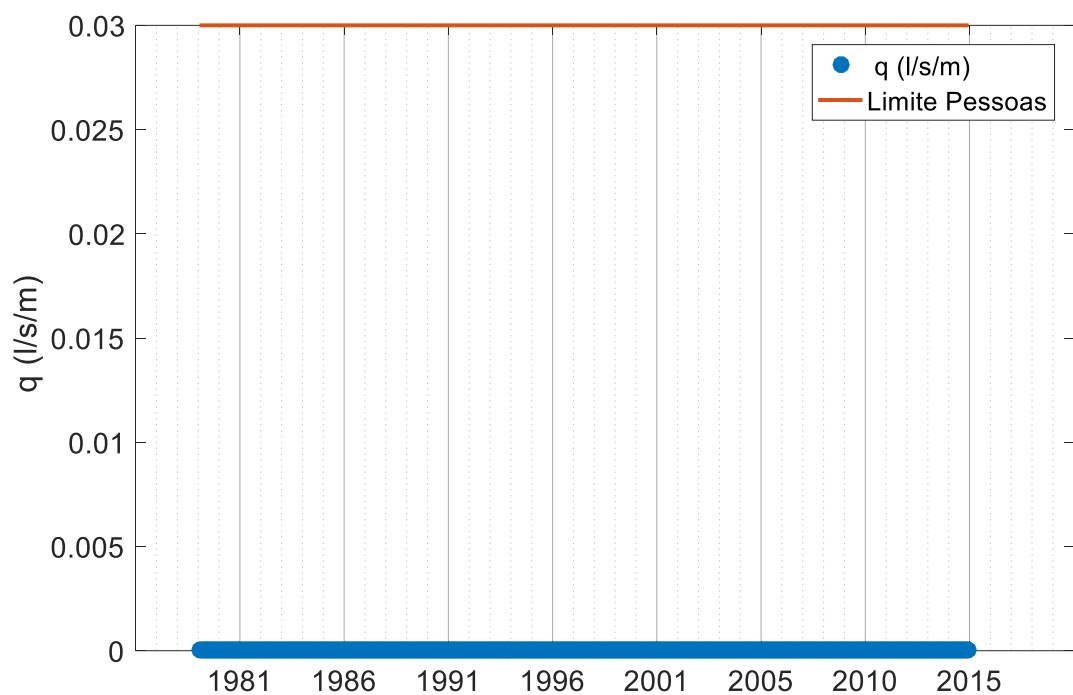


Figura 11 - Caudal médio galgado na estrutura 6 para o método 1

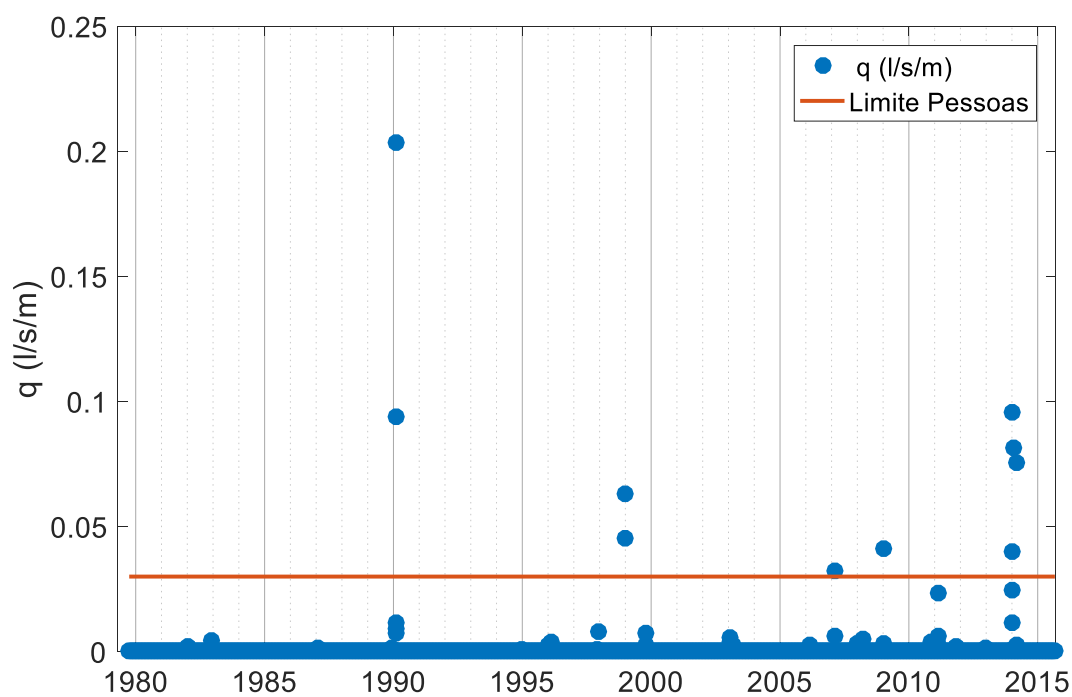


Figura 12 - Caudal médio galgado na estrutura 6 para o método 2

ANEXO C - FICHEIRO INPUT DO SWASH

```
PROJECT 'PF' '0'
$
$*****MODEL INPUT*****
$
$$$$$$$$$$$$$$$ INICIAL SETTING $$$$$$$$$$$$$$
SET 3.24 90 0.01 NAUTICAL
$
MODE NONST TWOD
COORDinates CARTesian
$
$ Malha Computacional
CGRID REGular 150000 433200 0 2400 1100 1200 550
$
$ Batimetria
INPGRID BOTTOM 150000 433200 0 2400 1100 1 1
READIN BOTTOM 1. 'PRAIA_BATIM.DAT' idla=3
$
$ Condições Iniciais
INIT 0
$
BOUNd SHAPespec JONswap 3.3 SIG PEAK DSPR
BOUN SIDE W CCW BTYPE WEAK CON SPECT 3.65 11.92 284.9 20
SPON E 400
$
NONHYDrostatic
FRIC MANNING 0.03
VISC 0.01
$
TIMEI METH EXPL 0.1 0.8
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$ OUTPUT $$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
QUANT HSIG MVDIR DUR 60 MIN
$
FRAME 'PF' 150000 433200 0 2400 1100 240 110
TABLE 'PF' HEAD 'malhaPF.dat' XP YP WATL HSIG BOTLEV DEPTH TSEC OUTPUT
000000.000 30 SEC
$
POINTS 'PC' FILE 'DADOS_PONTOS_COROAMENTO.dat'
TABLE 'PC' HEAD 'pontos_coroamento_estr.dat' XP YP WATL HSIG BOTLEV QMAG DISCH
TSEC OUTPUT 000000.000 15 SEC
$
CURve 'ST1' 150000 434174 240 152400 4334174
TABLE 'ST1' HEAD 'estrutura1.dat' XP YP DIST WATL HSIG BOTLEV QMAG DISCH TSEC
OUTPUT 000000.000 30 SEC
```

\$
CURve 'ST2' 150000 433996 240 152400 433996
TABLE 'ST2' HEAD 'estrutura2.dat' XP YP DIST WATL HSIG BOTLEV QMAG DISCH TSEC
OUTPUT 000000.000 30 SEC
\$
CURve 'ST3' 150000 433828 240 152400 433828
TABLE 'ST3' HEAD 'estrutura3.dat' XP YP DIST WATL HSIG BOTLEV QMAG DISCH TSEC
OUTPUT 000000.000 30 SEC
\$
CURve 'ST4' 150000 433646 240 152400 433646
TABLE 'ST4' HEAD 'estrutura4.dat' XP YP DIST WATL HSIG BOTLEV QMAG DISCH TSEC
OUTPUT 000000.000 30 SEC
\$
CURve 'ST5' 150000 433458 240 152400 433458
TABLE 'ST5' HEAD 'estrutura5.dat' XP YP DIST WATL HSIG BOTLEV QMAG DISCH TSEC
OUTPUT 000000.000 30 SEC
\$
CURve 'ST6' 150000 433348 240 152400 433348
TABLE 'ST6' HEAD 'estrutura6.dat' XP YP DIST WATL HSIG BOTLEV QMAG DISCH TSEC
OUTPUT 000000.000 30 SEC
\$
TEST 1,0
COMPUTE 000000.000 00.00001 SEC 023000.000
STOP