



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



Avaliação do risco de galgamento para o porto da Madalena do Pico, Pico, Açores

JOÃO PEDRO CARAPINHA SENGO

(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização de Hidráulica

Orientadores

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos
Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Teixeira Cardoso Gamboa
Vogais:
Doutora Maria Teresa Leal Gonsalves Veloso dos Reis
Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

ABRIL 2017

AGRADECIMENTOS

Quero expressar os meus agradecimentos a todos aqueles que me ajudaram e motivaram para a conclusão do meu mestrado em Engenharia Civil.

Aos meus orientadores, Professor João Alfredo dos Santos (orientador ISEL) e Doutora Juana Fortes (co-orientadora LNEC), por toda a sabedoria, compreensão, aptidão e disponibilidade do longo de todo o meu trabalho.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em particular à Eng.^a Liliana Pinheiro e ao Eng.º Pedro Poseiro pela atenção, disponibilidade e rigor ao longo de todo o meu trabalho.

À Administração dos Portos dos Açores, em particular ao Eng.º Francisco Silva pela prontidão e disponibilidade de informação essencial para concretização deste trabalho. Em especial para os meus colegas Ricardo Bento e Valentim Costa.

À minha namorada Marília por me ter sempre apoiado e motivado, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais pela constante motivação e paciência e por estarem sempre dispostos a ajudarem seja no que for, quando for.

Resumo

A presente dissertação insere-se no ramo de especialização de Hidráulica da área da Engenharia Civil, e pretende contribuir para a avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias pela agitação marítima nelas incidente.

Deve ser garantida a segurança em toda e qualquer estrutura portuária, pois apenas assim é possível assegurar níveis aceitáveis de eficiência nos equipamentos, nos trabalhadores, nas atividades portuárias e, principalmente, nos utilizadores destas, tendo sempre em conta o balanço económico da situação.

Assim, torna-se essencial caracterizar as condições de agitação marítima incidentes nas estruturas, tarefa aqui realizada por modelos de previsão, através de parâmetros de agitação marítima, sendo uma mais valia poder-se comparar com dados provenientes de boia ondógrafo presente na zona de estudo.

Inicia-se este processo pelo modelo WaveWatch III que descreve a agitação marítima gerada pelo vento, ao largo, em grandes profundidades. Posteriormente, através dos modelos SWAN e DREAMS, caracteriza-se a agitação marítima junto das estruturas portuárias. Aplicando a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 calculam-se os caudais médios galgados nas estruturas em questão.

Por fim, procede-se à avaliação das consequências através do Método Simples implementado no LNEC, permitindo análises espaciais e a definição do risco para cada área analisada. A avaliação de risco permite tomar decisões sobre as zonas ou estruturas no porto passíveis de intervenção, para melhorar a qualidade da gestão de operações portuárias.

Todo este procedimento foi aplicado ao porto da Madalena do Pico, Açores, Portugal, verificando-se que existe um risco sério, fundamentado pelos modelos, que afeta todo o porto ao longo do ano.

Palavras-Chave: agitação marítima, risco de galgamento, WW III, SWAN, DREAMS, NN_OVERTOPPING2, Método Simples, porto da Madalena do Pico.

Abstract

The following dissertation is inserted in the Hydraulics branch of the civil engineering area. It aims to assess the risk associated to sea-wave overtopping of port structures.

The safety of any port structure must be guaranteed, only in this way it is possible to accomplish acceptable levels of efficiency in equipment, workers, marine related activities and, most of all, users; always contemplating the economic integrity.

Thus, it becomes essential to define sea wave conditions, which is done by sea forecast models, by using wave parameters. If there is a buoy near the study area, it should always be considered for comparison with forecast model results.

This process begins with the numerical model WaveWatch III, which allows to describe sea waves generated offshore by the wind. Then, using the SWAN and the DREAMS models, it is possible to characterize sea waves near the port structures. By applying the neural network tool NN_OVERTOPPING2, it is now possible to define the mean of overtopping discharge in the port structures.

Finally, overtopping consequences are evaluated through a simple methodology implemented at LNEC, allowing spacial analysis and defining the level of risk in the areas considered. The risk assessment allows decisions to be taken on whether there are areas or structures in the port that need to be intervened with a view to improving the quality of port operations management.

All this procedure was applied to the port of Madalena do Pico, Azores, Portugal, thus showing, through the models, that there is a serious risk all year long in the port.

Keywords: sea wave conditions, overtopping risk, WW III, SWAN, DREAMS, NN_OVERTOPPING2, Simple methodology, port of Madalena do Pico.

Índice

1. Introdução	1
1.1 <i>Enquadramento</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Objetivos e metodologia</i>	<i>3</i>
1.3 <i>Estrutura da dissertação</i>	<i>5</i>
2 Galgamento: caraterização e avaliação de risco	7
2.1 <i>Introdução</i>	<i>7</i>
2.2 <i>Fatores condicionantes</i>	<i>7</i>
2.2.1 <i>Agitação marítima</i>	<i>7</i>
2.2.2 <i>Nível do mar</i>	<i>9</i>
2.2.3 <i>Caraterísticas da estrutura</i>	<i>9</i>
2.3 <i>Metodologia de cálculo do galgamento</i>	<i>10</i>
2.3.1 <i>Introdução</i>	<i>10</i>
2.3.2 <i>Redes neuronais artificiais</i>	<i>10</i>
2.4 <i>Valores admissíveis de galgamento</i>	<i>13</i>
2.5 <i>Avaliação de risco de galgamento e elaboração de mapas de risco</i>	<i>15</i>
2.5.1 <i>Introdução</i>	<i>15</i>
2.5.2 <i>Método simples de avaliação de risco</i>	<i>17</i>
3 Caso de estudo: o porto da Madalena do Pico	19
3.1. <i>Introdução</i>	<i>19</i>
3.2 <i>Caraterização das estruturas marítimas</i>	<i>21</i>
3.2.1 <i>quebra-mar Norte (cais comercial)</i>	<i>21</i>
3.2.2 <i>Rampa (zona cargas/descargas)</i>	<i>25</i>
3.2.3 <i>Terminal marítimo João Quaresma</i>	<i>26</i>
3.2.4. <i>Marina/Zona bar e restaurantes</i>	<i>27</i>
3.2.5. <i>quebra-mar Oeste</i>	<i>28</i>
4 Determinação da agitação marítima no porto	31
4.1 <i>Introdução</i>	<i>31</i>
4.2 <i>Dados utilizados</i>	<i>32</i>
4.2.1 <i>Introdução</i>	<i>32</i>

4.2.2	Caracterização da agitação marítima com o WW III	32
4.2.3	Dados da boia ondógrafo.....	35
4.2.4	Dados de maré.....	36
4.3	<i>Aplicação do modelo SWAN</i>	37
4.3.1	Introdução	37
4.3.2	Batimetria e ventos.....	37
4.3.3	Domínio computacional e malhas de cálculo	38
4.3.4	Caraterísticas gerais das simulações.....	40
4.3.5	Metodologia de aplicação do modelo SWAN	41
4.3.6	Resultados e comparação para o período de 1 mês: boia vs. WW III vs. SWAN	42
4.3.7	Resultados SWAN de 2007 a 2014.....	44
4.3.8	Comparação dos resultados do modelo SWAN com os dados da boia	50
4.4	<i>Aplicação do modelo DREAMS</i>	51
4.4.1	Introdução	51
4.4.2	Condições de aplicação.....	52
4.4.3	Cálculos.....	55
4.4.4	Resultados do modelo DREAMS	57
5	Determinação do galgamento e avaliação do risco no porto.....	61
5.1	<i>Introdução</i>	61
5.2	<i>Determinação do galgamento</i>	61
5.2.1	Aplicação da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2	61
5.2.2	Cálculo dos parâmetros relacionados com as condições de agitação marítima	62
5.2.3	Cálculo dos parâmetros relacionados com as características da estrutura.....	66
5.2.4	Resultados e análise dos casos em estudo	70
5.3	<i>Avaliação do risco de galgamento</i>	84
5.3.1	Valores admissíveis.....	84
5.3.2	Probabilidade de ocorrência.....	85
5.3.3	Consequências da ocorrência de galgamento	86
5.3.4	Grau de risco.....	87
5.3.5	Mapa de risco	88
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros	89
6.1	<i>Conclusões</i>	89
6.2	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	90
	Referências bibliográficas	91

Anexo	95
<i>Anexo A – Resultado no modelo SWAN</i>	<i>97</i>
<i>Anexo B – Ferramentas de cálculo prévio para NN_OVERTOPPING2</i>	<i>101</i>
<i>Anexo C – Resultados modelo NN_OVERTOPPING2.....</i>	<i>103</i>

Índice de figuras

Figura 1 - Galgamento no quebra-mar Norte do porto da Madalena do Pico (Porto da Madalena, 2012)	3
Figura 2 - Esquema da metodologia de avaliação de risco	4
Figura 3 - Esquema de perfil de quebra-mar de taludes	9
Figura 4 - Esquema de uma rede neuronal artificial (Van Gent et al., 2007)	11
Figura 5- Parâmetros geométricos e de onda num perfil transversal tipo de um quebra-mar (adaptado de Rodrigues., 2014)	11
Figura 6 - Portugal e Ilhas; Arquipélago dos Açores; Ilha do Pico; Madalena do Pico	19
Figura 7 - Fotografia aérea da vila de Madalena antes da implantação do quebra-mar Oeste; Porto da Madalena – Google Earth	20
Figura 8 - Ocorrências de galgamentos (fotografia do Porto da Madalena, 2012)	20
Figura 9 - Principais estruturas do Porto da Madalena (adaptado de Google Earth)	21
Figura 10 - Esquema em planta do quebra-mar Norte (fornecido por Porto dos Açores, S.A.)	22
Figura 11 - Tetrápodes de reserva; Vista quebra-mar Norte exterior (cedido por LNEC, 2015)	22
Figura 12 - Projeto atual de Perfil transversal tipo do tronco do quebra-mar Norte (Portos dos Açores,S.A.)	23
Figura 13 – Perfil Transversal da cabeça do quebra-mar Norte (Portos dos Açores S.A.)	23
Figura 14 - Esquema de materiais presentes no manto dos taludes do quebra-mar Norte (adaptado de planos por Porto do Açores, S.A.)	24
Figura 15 – Perfil transversal tipo da zona interior do quebra-mar Norte (Porto dos Açores, S.A.)	24
Figura 16 - Vista geral do intradorso do quebra-mar Norte (cedido por LNEC)	25
Figura 17 - Rampa do porto (cedido por LNEC)	25
Figura 18 - Novo Terminal de passageiros João Quaresma (à esq.; cedido por LNEC) e fotografia aérea (à dir.; portodamadalenablogspot.com)	26
Figura 19 - Zona de embarque para navios ro-ro no terminal (cedido por LNEC)	27
Figura 20 - Zona de laser/marina da Madalena	27
Figura 21 – Resumo do material utilizado no quebra-mar Oeste (adaptado de Portos dos Açores, S.A.)	28
Figura 22 – Perfil transversal tipo do quebra-mar Oeste (Portos dos Açores, S.A.)	29
Figura 23 - Coordenadas do WWII para a zona central do Açores	33
Figura 24 – Malha Main batimétrica da região dos Açores (Instituto Hidrográfico)	38
Figura 25 - Malha Nested	39
Figura 26 - Malha Nested1	39
Figura 27 - Localização da boia e do porto no arquipélago (adaptado de Google Earth)	41
Figura 28 - Localização do ponto P6 comparativamente ao porto da Madalena (adaptado de Google Earth)	42

Figura 29 - Localização dos pontos P8, P14 e P19	47
Figura 30 - Histograma de direções para P8 para 2007-2014	47
Figura 31 - Histograma de direções para P14 para 2007-2014	48
Figura 32 - Histograma de direções para P19 para 2007-2014	48
Figura 33 - Histograma de períodos de pico para P8 para 2007-2014	49
Figura 34 - Histograma de períodos de pico para P14 para 2007-2014	49
Figura 35 - Histograma de períodos de pico para P19 para 2007-2014	49
Figura 36 - Direções Geração-Radiação no porto	52
Figura 37 - Representação dos inputs referentes à batimetria	53
Figura 38 - Variação da batimetria no porto	53
Figura 39 - Representação dos locais a estudar	54
Figura 40 - Representação dos 50 pontos na malha	55
Figura 41 - Esquema de direções de ângulo de onda incidente, ângulo normal à estrutura e ângulo entre a direção de propagação e a normal	63
Figura 42 - Esquema geral dos locais para o estudo do galgamento	64
Figura 43 - Fotografia no molhe Norte nos pontos L1, L2 e L3 (cedido por LNEC)	65
Figura 44 - Fotografia da zona do ponto L4 (cedido por LNEC)	65
Figura 45 - Fotografia de ambos os molhes com os pontos L1, L5 e L6 (cedido por LNEC)	65
Figura 46 - Ponto L1, Corte A'-A'	66
Figura 47 - Ponto L2, Corte 3-3	67
Figura 48 - Ponto L3 - Corte 6-6	68
Figura 49 - Ponto L4, corte 11-11	68
Figura 50 – Ponto L5, corte D- D	69
Figura 51 – Ponto L6, corte B-B	69
Figura 52 - Representação gráfica do grau de risco de galgamento (adaptado de Google Earth)	88
Figura 53 - Ouput-tipo de parâmetros da agitação marítima no SWAN para o mês de teste	97
Figura 54 - Exemplo ficheiro de vetores de vento (V_x , V_y) e output-tipo de parâmetros da agitação marítima no SWAN para os 8 anos	97
Figura 55 - Exemplo de interface de ondas estacionárias no SWAN	98
Figura 56 - Exemplo interface de cálculo de coeficientes de reflexão, no Excel	101
Figura 57 - Exemplo de tabelas de cálculo de coeficientes de reflexão, Excel	101
Figura 58 - Input-tipo para cálculo do NN_OOVERTOPPING2	101

Índice de tabelas

Tabela 1 - Valores admissíveis para o caudal médio de galgamento para a estrutura marítima (Pullen et al., 2007)	13
Tabela 2 - Valores admissíveis do caudal médio de galgamento para navios, equipamentos e edifícios na zona abrigada da estrutura (Pullen et al., 2007)	14
Tabela 3 - Valores do caudal médio de galgamento admissível para pessoas (Pullen et al., 2007)	14
Tabela 4 - Valores do caudal médio de galgamento admissível para veículos (Pullen et al., 2007)	15
Tabela 5 - Graus de ocorrência (Santos et al. 2011)	16
Tabela 6 - Graus de consequências, adaptado de Lourenço, 2016 (Santos et al., 2011)	17
Tabela 7 - Graus de risco e controlo (Fortes, 2014)	18
Tabela 8 - Coordenadas de entrada para o WW III	33
Tabela 9 - Estatística descritiva da agitação marítima no WW III	33
Tabela 10 - Parâmetros das malhas de cálculo	40
Tabela 11 - Coordenadas M e P dos 25 pontos utilizados no SWAN	44
Tabela 12 - Estatística descritiva dos resultados do SWAN para o ponto P6	45
Tabela 13 - Correspondências entre pontos do DREAMS com os locais a estudar	55
Tabela 14 - Tipos de estruturas ao longo dos trechos	56
Tabela 15 - Ângulo da estrutura com o Norte	66
Tabela 16 - Parâmetros de entrada para o NN_OVERTOPPING2	69
Tabela 17 - Parâmetros de entrada para o NN_OVERTOPPING2 (continuação)	70
Tabela 18 - Estatística descritiva de agitação marítima para L1 e L2	71
Tabela 19 - Estatística descritiva da agitação marítima para os pontos L3 e L4	72
Tabela 20 - Estatística descritiva da agitação marítima para os pontos L5 e L6	73
Tabela 21 - Estatística descritiva para o percentil 90% de Hs para L2	74
Tabela 22 - Estatística descritiva do caudal médio galgado para L1 e L2	81
Tabela 23 - Estatística descritiva para o ponto L5	82
Tabela 24 - Resumo de caudais médios de galgamento máximos	83
Tabela 25 - Valores máximos admissíveis de caudal médio galgado para os pontos L1 a L6	85
Tabela 26 - Probabilidades de ocorrência por Pullen et al, 2007	86
Tabela 27 - Graus de ocorrência para os pontos L1 a L6	86
Tabela 28 - Graus de consequências para os pontos L1 a L6	87
Tabela 29 - Grau de risco associado ao grau de ocorrência e consequência para os pontos L1 a L6, e controlo de risco	87
Tabela 30 - Estatística descritiva para q caudal médio galgado para L4	105
Tabela 31 - Estatística descritiva para q médio galgado, para L6	106
Tabela 32 - Correspondências entre galgamentos máximos em cada estrutura e verificação nas restantes	109

Índice de gráficos

Gráfico 1 - Altura significativa no modelo WW III para o período de 2007 a 2014	34
Gráfico 2 - Período de pico no modelo WW III para o período de 2007 a 2014	34
Gráfico 3 - Direção de onda no modelo WW III para o período de 2007 a 2014	35
Gráfico 4 - Nível de maré para os anos 2007 a 2014	36
Gráfico 5 - Nível de maré no ano de 2014	36
Gráfico 6 - Comparação entre os dados de altura significativa do mês de janeiro de 2013 para o WW III, registo da boia, e SWAN (Main)	43
Gráfico 7 - Comparação de alturas significativas no WW III e no SWAN para o período de 2007 a 2014 perto da boia	46
Gráfico 8 - Comparação de período de pico entre WW III e SWAN para o período de 2007 a 2014 perto da boia	46
Gráfico 9 - Comparação entre Hs para SWAN e boia para o período de 2007-2014	50
Gráfico 10 - Comparação entre período de pico na boia e no SWAN para 2007-2014	51
Gráfico 11 - Altura significativa no quebra-mar Norte	58
Gráfico 12 - Altura significativa no quebra-mar Oeste	58
Gráfico 13 - Período médio no porto	58
Gráfico 14 - Direção média no quebra-mar Norte	59
Gráfico 15 - Direção média no quebra-mar Oeste	59
Gráfico 16 - Período médio de agitação (s)	75
Gráfico 17 - Altura significativa para L1	75
Gráfico 18 - Altura significativa para L2	76
Gráfico 19 - Altura significativa para L3	76
Gráfico 20 - Altura Significativa para L4	77
Gráfico 21 - Alturas significativas para L5	77
Gráfico 22 - Altura significativa para L6	78
Gráfico 23 - Alturas significativas entre L1 e L4 (molhe Norte)	78
Gráfico 24 - Comparação entre gHsTm e q (NN_OVERTOPPING2) para L1	79
Gráfico 25 - Comparação entre gHsTm e q ($q > 100$ l/s/m) (NN_OVERTOPPING2) para L1	79
Gráfico 26 - Comparação entre gHsTm e q (NN_OVERTOPPING2) para L2	80
Gráfico 27 - Comparação entre gHsTm e q ($q > 100$ l/s/m) (NN_OVERTOPPING2) para L2	80
Gráfico 28 - Direções médias de incidência de onda em L1	83
Gráfico 29 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2007	98
Gráfico 30 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2008	98
Gráfico 31 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2010	99

Gráfico 32 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2011	99
Gráfico 33 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2012	99
Gráfico 34 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2013	100
Gráfico 35 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2014	100
Gráfico 36 - Comparação entre gHsTm e q médio galgado (NN_OVERTOPPING2) para L3	103
Gráfico 37 - Comparação entre gHsTm e q médio galgado ($q > 100$ l/s/m) (NN_OVERTOPPING2) para L3	103
Gráfico 38 - Estatística descritiva para q médio galgado para L3	104
Gráfico 39 - Comparação entre gHsTm e q médio galgado (NN_OVERTOPPING2) para L4	104
Gráfico 40 - Comparação entre gHsTm e q médio galgado (NN_OVERTOPPING2)	105
Gráfico 41 - Estatística descritiva para q médio galgado, para L5	105
Gráfico 42 - Comparação entre gHsTm e q médio galgado (NN_OVERTOPPING2) para L6	106
Gráfico 43 - Direção da agitação marítima no ponto L2	107
Gráfico 44 - Direção da agitação marítima no ponto L3	107
Gráfico 45 - Direção da agitação marítima no ponto L4	107
Gráfico 46 - Direção da agitação marítima no ponto L5	108
Gráfico 47 - Direção da agitação marítima no ponto L6	108

Acrónimos

AHP – Analytic Hierarquic Process

CLASH - Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analisis on Permissible Wave Overtopping

LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

NM - nível de maré

NOOA - National Oceanic and Atmospheric Administration

WW III - WaveWatch III

Z.H. - zero hidrográfico

Simbologia

A_c – distância entre o nível de repouso da água e a cota da berma de coroamento da parte permeável da estrutura

B – largura da berma da estrutura medida na horizontal

B_t – largura da banqueteta de pé do talude

G_c – largura da berma de coroamento

h - altura de água no pé da estrutura

h_b – altura da água na berma da estrutura

$Hm_{0,toe}$ – altura de onda significativa espectral no pé da estrutura

H_s - altura de onda significativa

h_t – altura de água na banqueteta de pé do talude

Q - caudal adimensional

q - caudal médio de galgamento

qx - caudal efetivo de galgamento

R_c – distância entre o nível de repouso da água e a cota do coroamento da parte impermeável da estrutura

T_m - período médio de onda

$T_{m-1, 0 toe}$ – período médio de onda espectral no pé da estrutura

T_p - período de pico de onda

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 de incidência da onda face à estrutura

ϕ – diâmetro de enrocamento

γ_f – parâmetro indicativo da rugosidade e permeabilidade da estrutura

θ - direção de onda

θ_m - direção média de onda

θ_p - direção de pico de onda

1. Introdução

1.1 Enquadramento

As infraestruturas portuárias são cada vez mais importantes para a vida do Homem e para a relação contínua entre sociedades. Por essa razão, num país como Portugal, que se torna cada vez mais internacional, é essencial ter infraestruturas de qualidade para continuar e promover tais relações.

Sendo um país com uma costa de grande extensão (943 km), adicionado de 2 arquipélagos (667 km – Açores; 250 km – Madeira) que servem como pontos de ligação entre vários continentes, Portugal é hoje em dia uma das mais importantes portas de entrada para a Europa a nível marítimo. O desenvolvimento da economia leva a que haja um acréscimo de utilização dos portos, traduzida por exportações, atividades de lazer, etc. É do maior interesse manter e melhorar a qualidade das infraestruturas portuárias, obviamente sabendo como é que estas se comportam, e conseqüentemente, onde e quando é que poderão falhar.

Um dos fenómenos que causa mais perdas em termos económicos e ambientais são os galgamentos das estruturas portuárias pela agitação marítima. A eficácia de um porto depende diretamente da eficácia das suas estruturas de proteção marítima, e quando estas não são eficientes, o porto torna-se um lugar inseguro e perigoso.

A tarefa mais importante que uma estrutura de proteção marítima tem a desempenhar é a criação de condições de abrigo, onde se inclui a redução do galgamento pela agitação marítima. Importa mencionar que existem estruturas portuárias com largos anos de idade, sendo lícito afirmar-se que o dimensionamento das mesmas não foi baseado em tantos factos e dados como os atualmente disponíveis.

O LNEC implementou uma metodologia de avaliação de risco de galgamento em vários portos (Raposeiro *et al.*, 2010, Reis *et al.*, 2011, Santos *et al.*, 2011, Rocha, 2012, Rocha *et al.*, 2013), partindo do sistema integrado GUIOMAR

(Neves *et al.*, 2009), já atualizado para HIDRALERTA, baseado em programação *python* em ambiente Unix. O sistema HIDRALERTA recorre a modelos de propagação de agitação marítima, nomeadamente o SWAN (Booij *et al.*, 1999) e o DREAMS (Fortes, 2002), para caracterizar os estados de agitação na fronteira imediata do porto a partir de séries de valores de altura, período e direção de onda estimados ou observados ao largo do porto. Os estados de agitação são obtidos através de modelos de previsão de ondas de escala oceânica; no entanto, é fundamental utilizar, sempre que disponível, dados *in situ* fornecidos por boias da região em estudo. O sistema HIDRALERTA já foi aplicado ao porto de Ponta Delgada, ilha de São Miguel, Açores (Rodrigues *et al.*, 2014), ao porto da Praia da Vitória, ilha Terceira, Açores (Neves *et al.*, 2012, Rocha, 2012, Rocha *et al.*, 2013) e ao porto de Sines (Neves, *et al.*, 2012).

Através da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), estimam-se os efeitos desses estados de agitação junto à costa, manifestados por galgamento e inundações. O grau de risco de galgamento é avaliado de acordo com uma metodologia simples, primeiramente implementada no LNEC por Reis *et al.* (2011), identificando os valores limites do caudal médio galgado por metro linear de estrutura, por meio das tabelas de Pullen *et al.*, (2007). É de sublinhar que atualmente já existem novas tabelas de Pullen, datadas de 2016. Atribuem-se graus de probabilidade de acontecimento do fenómeno e graus de consequências. O grau de risco é então calculado pelo produto do grau de probabilidade de ocorrência do fenómeno pelos graus das respetivas consequências. Sobre esta metodologia destacam-se os trabalhos realizados por Rocha (2012) e Rocha *et al.* (2013) no porto e baía da Praia da Vitória, Neves *et al.* (2012) no porto de Sines.

No porto da Madalena do Pico são frequentes os fenómenos de galgamento e inundação (ver Figura 1), levando a interrupções de atividades do porto, nomeadamente da sua atividade primária: o transporte de passageiros e veículos entre as ilhas do Faial e do Pico.

Este trabalho é o primeiro estudo, com o sistema HIDRALERTA, da ocorrência de galgamentos no porto da Madalena do Pico, Açores, tomando em consideração estimativas de modelos de previsão para a agitação marítima entre 2007 e 2014, no sentido de se efetuar uma avaliação de risco para as estruturas de maior relevância do porto.



Figura 1 - Galgamento no quebra-mar Norte do porto da Madalena do Pico (Porto da Madalena, 2012)

1.2 Objetivos e metodologia

Pretende-se com esta dissertação:

- Avaliar a probabilidade de ocorrência de fenómenos de galgamento para as estruturas relevantes localizadas no porto da Madalena do Pico, Pico, Açores, aplicando a metodologia HIDRALERTA desenvolvida pelo LNEC;
- Avaliar as consequências da ocorrência de galgamento em tais estruturas através do Método Simples adotado pelo LNEC;
- Elaborar mapa de risco com o objetivo de se visualizar quais as zonas mais ou menos necessitadas de medidas de prevenção ou intervenções.

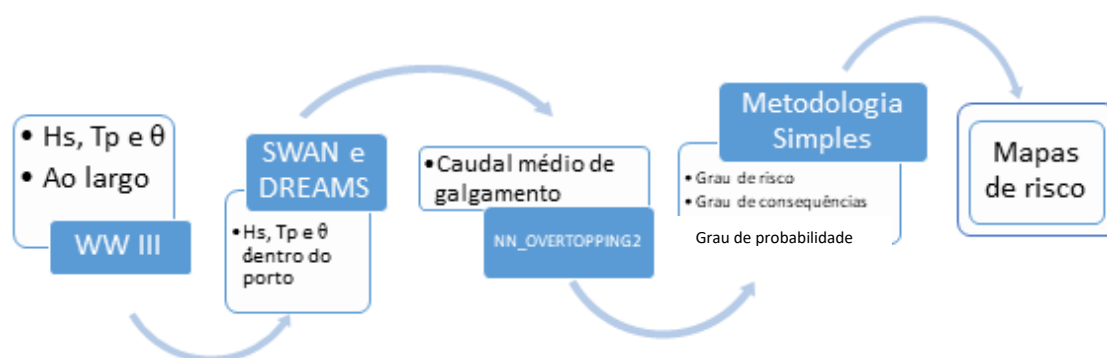


Figura 2 - Esquema da metodologia de avaliação de risco

Para atingir estes objetivos aplicou-se a metodologia da avaliação de risco ao porto da Madalena do Pico que segue os passos seguintes, Figura 2:

- Caracterização da agitação marítima ao largo – nomeadamente Hs, Tp e θ - e, posteriormente, junto das estruturas portuárias, em pontos estratégicos: Feita através de conjuntos de dados registados pela boia ondógrafo fundeada perto da ilha do Pico, no período de 2007 a 2014. Compararam-se os dados registados pela boia ondógrafo com os valores fornecidos por modelos de previsão à escala oceânica WaveWatch III (Tolman 1997, 1999^a, 2009) num intervalo de tempo mais curto - janeiro de 2013. Utilizando os dados de agitação marítima registados e mapas batimétricos da zona, simula-se através do SWAN (Booji *et al.* 1999) a propagação dessas ondas até às proximidades do porto. Estabelecendo o ponto específico para realizar a transição dos outputs do SWAN, efetua-se o cálculo via DREAMS (Fortes, 2002) para o interior do porto, mas agora utilizando a batimetria deste.
- Determinação do galgamento de cada estrutura portuária: Através das séries temporais das características da agitação marítima – altura, período e direção da onda – do ponto 22 do SWAN (um ponto perto da boia, onde se verificam a validade das estimativas da agitação marítima) e das características físicas de cada estrutura portuária, calculam-se

séries temporais de caudal médio galgado por metro linear por meio da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005).

- Avaliação do grau de risco associado ao galgamento: Feita de forma qualitativa pelo produto do grau de probabilidade de ocorrência de galgamentos superiores a limiares pré-fixados pelo grau das consequências dessas mesmas ocorrências. Este processo inicia-se pela delimitação da natureza das atividades realizadas junto das estruturas portuárias alvo, seguido do estabelecimento do valor máximo do caudal médio galgado para cada uma destas. Os limites para esses valores serão definidos de acordo com as recomendações de Pullen *et al.* (2007). O grau da probabilidade de ocorrência é definido a partir da frequência de excedência daqueles limiares, sendo o grau de risco resultante utilizado na criação de mapas de risco.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação divide-se em 6 capítulos.

O capítulo primeiro introduz o tema, objetivos, metodologia e a própria estrutura da dissertação.

O capítulo segundo introduz o fenómeno de galgamento, descrevendo as principais condicionantes e explica o funcionamento dos modelos de previsão do galgamento utilizados neste trabalho, assim como o método simples de avaliação de risco.

O capítulo terceiro informa sobre o caso de estudo do porto da Madalena do Pico, nos Açores. Descrevem-se as estruturas portuárias, apresentando os pontos principais através de figuras e projetos atuais, tendo também em consideração os aspetos mais sensíveis.

O capítulo quarto foca-se na determinação das características da agitação marítima a partir de um modelo de previsão oceânica – WaveWatch III (Tolman 1997, 1999a, 2009) e de dados medidos *in situ*, via boia ondógrafo. É neste

capítulo que se introduz nos modelos SWAN e DREAMS, como meios para caraterizar a agitação marítima incidente, comparando-se também os dados obtidos na boia com as previsões do WW III e do SWAN para um mês, servindo este exercício para verificar se os modelos de previsão apresentam estimativas próximas da realidade.

No capítulo quinto, introduz-se a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, as suas condições de aplicação e a consequente utilização da informação aqui obtida para fundamentar a avaliação do risco de galgamento através de um método simples utilizado pelo LNEC.

Por fim, no capítulo sexto, apresentam-se as principais conclusões da dissertação e sugestões de trabalho futuro.

2 Galgamento: caracterização e avaliação de risco

2.1 Introdução

O galgamento oceânico traduz-se no transporte de uma massa de água sobre o coroamento de uma estrutura de proteção marítima por efeito da agitação marítima, medido em m^3/s por metro linear de estrutura ou em $l/s/m$.

Este fenómeno dá-se quando a energia de uma onda não é totalmente dissipada pelas estruturas de proteção marítima, seja pelo baixo nível de coroamento, seja por outras características das estruturas. A dissipação de energia pode dever-se a forças de atrito e de percolação, bem como à rebentação de onda junto das zonas portuárias.

Logicamente, o dimensionamento de estruturas marítimas para o efeito de dissipação de energia de ondas é feito tendo em conta o nível de galgamento admissível para a zona em estudo. Este varia de acordo com a localização e o tipo de estrutura. Exemplificando: o caudal de galgamento admissível para uma zona portuária pedonal terá que ser menor que para a extremidade de um molhe de proteção de agitação marítima. É importante saber ajustar o valor máximo do caudal médio galgado de acordo com as diversas zonas de cada porto, visto é que é inconcebível, em termos económicos, ter estruturas sobredimensionadas.

2.2 Fatores condicionantes

2.2.1 Agitação marítima

O fator mais importante de qualquer avaliação do risco de galgamento é a agitação marítima incidente. Esta é caracterizada, para este caso, por altura, período e direção de onda, que podem ser obtidos via *in situ* (a partir de medições de boias ondógrafos), ou por meio de modelos numéricos para a geração de agitação marítima pelo vento à escala oceânica. Este último é o mais comumente utilizado, visto que não existem dados *in situ* em toda a extensão oceânica. No entanto, aquando da existência de dados *in situ*, como acontece

no caso estudado nesta dissertação, torna-se essencial verificar se as estimativas da agitação marítima produzidas pelos modelos de previsão se aproximam dos valores medidos em boias ondógrafos.

Como modelo de previsão de agitação marítima tem-se o WaveWatch III (Tolman 1997, 1999a, 2009). Para modelos a escala regional e local, utilizam-se os modelos de propagação SWAN (Booji et al., 1999, SWAN Team, 2008) e DREAMS (Fortes, 2002).

O modelo SWAN, desenvolvido na Delft University of Technology (TUDelft), Holanda, é um modelo numérico espectral, de média em fase, de terceira geração, *open source*, baseado na equação da conservação da onda, que se traduz na computação de estimativas da agitação marítima, tendo também em conta a influência da batimetria, da velocidade do vento e outros fenómenos associados, tais como a rebentação de ondas, correntes, etc. Os parâmetros obtidos pelo SWAN são caracterizadores da agitação marítima ao longo de uma série temporal, destacando-se a altura de onda significativa, H_s , períodos de pico, T_p , período médio, T_m e direção de pico, θ_p , e direção média, θ_m .

A condicionante principal do SWAN é este modelo apresentar resultados válidos para zonas costeiras apenas e não para zonas imediatamente junto das estruturas de abrigo. O modelo DREAMS vem então permitir a caracterização da agitação marítima incidente dentro de portos, visto que a propagação das ondas aqui é modificada pelos efeitos de reflexão, difração e refração associados à presença das várias estruturas. No entanto, também o DREAMS apresenta limitações, pois não simula o efeito de correntes na propagação das ondas, nem regista ou conceptualiza o fenómeno de galgamento nas estruturas. Os resultados do DREAMS são a altura, período e direção de onda. O galgamento é tanto maior quanto maior for a combinação entre a altura de onda com o período de onda, juntamente com o alinhamento da propagação desta relativamente à estrutura marítima.

2.2.2 Nível do mar

A informação sobre o nível do mar pode ser obtida com base em marégrafos *in situ*, através da medição direta do nível das águas, ou através de previsão astronómica, à qual será necessário adicionar a sobrelevação meteorológica.

O nível de maré é altamente influenciador das alturas de onda, estando normalmente o galgamento de estruturas associado a níveis de maré altos.

Neste trabalho, o nível do mar é descrito de acordo com os dados obtidos no marégrafo da Horta pelo Instituto Hidrográfico.

2.2.3 Características da estrutura

Os quebra-mares estudados neste trabalho foram construídos com objetivo de criar zonas de abrigo, possibilitando operações portuárias tais como atracagem de embarcações e operações de carga e descarga.

A geometria e os elementos do manto dos quebra-mares influenciam diretamente o galgamento da estrutura – ver Figura 3 -, principalmente a cota de coroamento, que atua diretamente na redução do galgamento. O seu dimensionamento envolve vários pontos sensíveis, no sentido em que coroamentos demasiado elevados requerem maiores custos de material, mobilização de equipamento e mão-de-obra, causando também impacto visual e ambiental negativos.

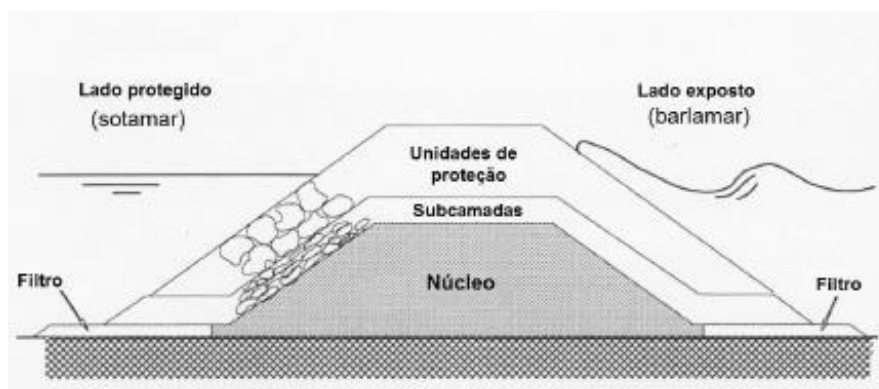


Figura 3 - Esquema de perfil de quebra-mar de taludes

2.3 Metodologia de cálculo do galgamento

2.3.1 Introdução

A determinação do caudal médio galgado é possível recorrendo a fórmulas empíricas, modelos físicos, e pelo conjunto de modelos numéricos e redes neuronais (Brito, 2007).

Entre 2002 e 2004, a União Europeia decidiu que era necessário poder caracterizar pontos fulcrais das costas por meio da previsão da ocorrência de galgamento em estruturas marítimas, financiando, assim, o projeto de investigação CLASH (*Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and hazard Analisis on permissible Wave Overtopping*). Um dos resultados deste projeto foi a criação da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), que vem fazer o que os modelos numéricos SWAN e DREAMS não têm, nomeadamente a capacidade de previsão de caudal médio galgado em perfis de estruturas mais complexas e determinação de intervalos de confiança para as estimativas do caudal médio galgado (Rodrigues, 2014).

2.3.2 Redes neuronais artificiais

Uma rede neuronal revela-se uma excelente ferramenta processual pois executa, de forma rápida e eficiente tarefas de grande complexidade, tais como o processamento da informação, memória associativa e a capacidade para classificar e generalizar conceitos (Rodrigues, 2014).

Devido à complexidade, em geral, dos cenários portuários, seja por falta de informação de dados, pela geometria e/ou pela ausência de padrões e relações lógicas, a utilização de redes neuronais como ferramenta torna-se essencial. O processo lógico das redes neuronais funciona em camadas (Van Gent *et al.*, 2007). Na primeira camada tem-se o conjunto de inputs, traduzidos pelo número

de variáveis de entrada; passando por uma camada intermédia “oculta”, onde cada neurónio estabelece as ligações necessárias para produzir os resultados que “sairão” na camada final, como mostrado pela Figura 4.

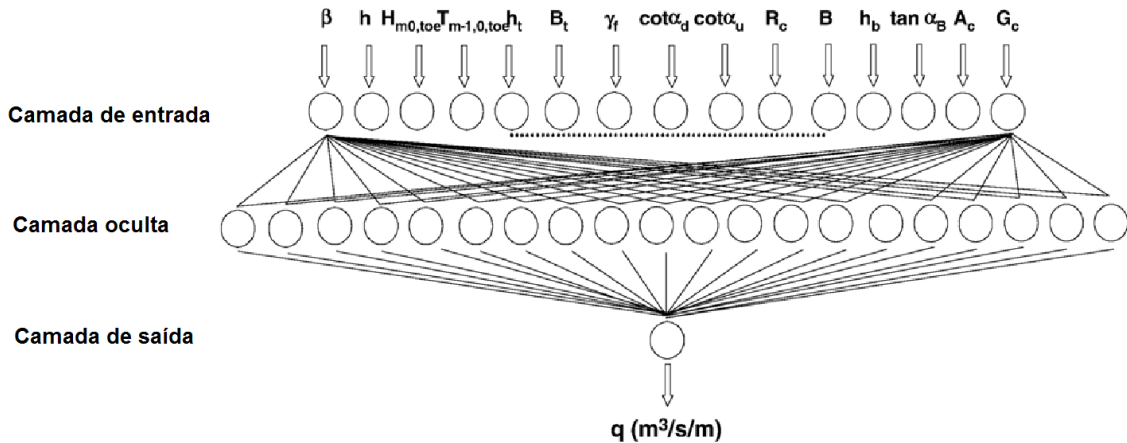


Figura 4 - Esquema de uma rede neuronal artificial (Van Gent et al., 2007)

A ferramenta NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al., 2005) é o resultado do desenvolvimento de redes neuronais artificiais a problemas de avaliação do cálculo do caudal médio galgado nas estruturas marítimas, através da descrição da informação baseada na agitação marítima e na geometria das estruturas físicas.

Primeiramente, a agitação marítima vem caracterizada pelos modelos numéricos SWAN e, conseqüentemente, DREAMS, recorrendo aos parâmetros de altura significativa, H_s , período de pico, T_p , e direção média, θ_m .

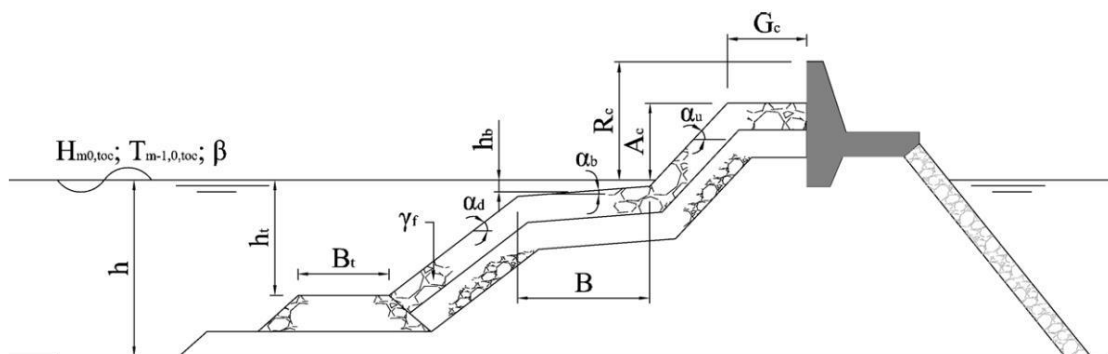


Figura 5- Parâmetros geométricos e de onda num perfil transversal tipo de um quebra-mar (adaptado de Rodrigues., 2014)

Quantos aos parâmetros geométricos, a Figura 5 indica as peculiaridades geométricas tidas em conta (adaptado de Rodrigues, 2014), onde:

- h – altura de água no pé da estrutura (m);
- h_t – altura de água na banquetta de pé do talude (m). Se não existir banquetta de fundo, $h_t=h$;
- B_t – largura da banquetta de pé do talude (m). Caso não exista esta banquetta, é nulo;
- B – largura da berma da estrutura medida na horizontal (m);
- h_b – altura da água na berma da estrutura (m);
- α_b – ângulo que a berma faz com a horizontal ($^\circ$);
- R_c – distância entre o nível de repouso da água e a cota do coroamento da parte impermeável da estrutura (m);
- A_c – distância entre o nível de repouso da água e a cota da berma de coroamento da parte permeável da estrutura (m);
- G_c – largura da berma de coroamento (m);
- α_d – ângulo que o talude imediatamente abaixo da berma faz com a horizontal ($^\circ$);
- α_u – ângulo que o talude imediatamente acima da berma faz com a horizontal ($^\circ$);
- γf – parâmetro indicativo da rugosidade e permeabilidade da estrutura. É utilizado de acordo com o tipo de material da estrutura, com γf tomando os seguintes valores (adaptado de Coeveld et al., 2005):
 - 1 – Superfície lisa e impermeável
 - 0,5 – Enrocamento

- 0,5 – Cubos (2 camadas; colocação aleatória)
- 0,52 – Cubos (1 camada; colocação aleatória)
- 0,5 – Cubos Antifer
- 0,49 – Acropodes
- 0,49 – X-Blocks
- 0,4 - Tetrápodes

2.4 Valores admissíveis de galgamento

É evidente que na fase de projeto das estruturas, estas são dimensionadas para admitirem um determinado valor de galgamento, ditado pela utilização ou função esperada para a zona onde tal galgamento poderá ocorrer. Pullen *et al.* (2007) estabeleceram valores críticos do caudal médio galgado recomendados, tendo em consideração a segurança da própria estrutura, equipamentos, envolvente, pessoas e veículos, navios, apresentando as Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4:

Tabela 1 - Valores admissíveis para o caudal médio de galgamento para a estrutura marítima (Pullen et al., 2007)

Condições e tipo de danos		Caudal médio q (L/s/m)
	Sem danos se o coroamento e o tardoz estiverem bem protegidos.	50 -200
Estrutura de defesa com talude no tardoz	Sem danos no coroamento e no tardoz de um dique de argila coberto por relva.	1 -10
	Sem danos no coroamento e no tardoz 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

Tabela 2 - Valores admissíveis do caudal médio de galgamento para navios, equipamentos e edifícios na zona abrigada da estrutura (Pullen et al., 2007)

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 - Valores do caudal médio de galgamento admissível para pessoas (Pullen et al., 2007)

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 inapropriado para se molharem, que se desloquem numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas.	0.03

(3) Estas condições não têm que ocorrer em simultâneo.

Tabela 4 - Valores do caudal médio de galgamento admissível para veículos (Pullen et al., 2007)

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.

Pullen *et al.*, (2007), refere ainda uma fórmula simples – equação 1 - para calcular o caudal efetivo de galgamento, q_x , válido apenas para distância compreendidas entre 5 e 25 metros do coroamento da estrutura galgada.

$$q_x = \frac{q}{x} \quad [1]$$

Onde q é o caudal médio de galgamento e x largura da plataforma.

2.5 Avaliação de risco de galgamento e elaboração de mapas de risco

2.5.1 Introdução

Para a avaliação de risco neste trabalho utiliza-se a metodologia simples desenvolvida no LNEC, que se baseia nos valores admissíveis de caudal médio

galgado de Pullen et al. (2007) e nos graus de consequências de Santos et al. (2011) e Fortes (2014, a,b,c).

Como qualquer tipo de metodologia de avaliação de risco, a base desta consiste no cálculo de probabilidades de ocorrência de galgamentos de acordo com os diversos parâmetros estabelecidos em Pullen et al. (2007) e consequente atribuição de grau de ocorrência. Tais graus de ocorrência são definidos de acordo com a Tabela 5:

Tabela 5 - Graus de ocorrência (Santos et al. 2011)

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

Consequentemente, torna-se necessário estabelecer graus de consequências de galgamento para os diversos pontos em estudo. Fortes (2014, a, b, c) define de forma qualitativa as consequências de galgamento para diversas situações, como apresentado na Tabela 6:

Tabela 6 - Graus de consequências, adaptado de Lourenço, 2016 (Santos et al., 2011)

Descrição	Consequências (Guia de orientação)							Grau
	Pessoas	Ambiente	Gestão portuária	Património				
				Edifícios	Equipamentos	Estrutura marítima	Veículos	
Insuficiente	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	1
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	2
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	5
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	10
Catastróficas	Muitas perdas de vida	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	25

2.5.2 Método simples de avaliação de risco

A avaliação do risco é feita pelo máximo dos produtos dos graus de ocorrência pelos graus de consequências, em cada um dos locais em estudo, seguindo a equação 2:

$$\text{Grau de risco} = \text{Grau de ocorrência} \times \text{Grau de consequência} \quad [2]$$

Consoante o grau de risco a tabela seguinte pode fornecer diretivas gerais interessantes em relação à necessidade de medidas para mitigar o risco:

Tabela 7 - Graus de risco e controlo (Fortes, 2014)

Grau de Risco		Consequências				
		1	2	5	10	25
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

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

A metodologia descrita já foi aplicada com sucesso em vários locais de Portugal: na praia de Vale do Lobo, Algarve (Raposeiro et al., 2010, 2013), na praia de São João da Caparica (Neves et al., 2013), na baía e porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, Açores (Rocha, 2012, Rocha et al., 2012, Pereira, 2013, Lourenço, 2016) e no porto de Sines (Neves et al., 2012).

3 Caso de estudo: o porto da Madalena do Pico

3.1. Introdução

A vila da Madalena (Figura 6) do Ilha do Pico da Região Autónoma dos Açores localiza-se na zona Oeste da ilha e alberga cerca de 2500 habitantes, sendo sede de um município de 149,08 km² com 6049 habitantes (Censos, INE, 2011).

A vila é o resultado do desenvolvimento populacional gerado à volta do Forte da Madalena (construído para combater a pirataria em outras épocas), e tem vindo a crescer nos últimos 50 anos devido ao seu porto. Atualmente, a vila define-se como principal eixo de comunicação com a Ilha do Faial, embora o porto apresente claras deficiências a nível de proteção marítima.

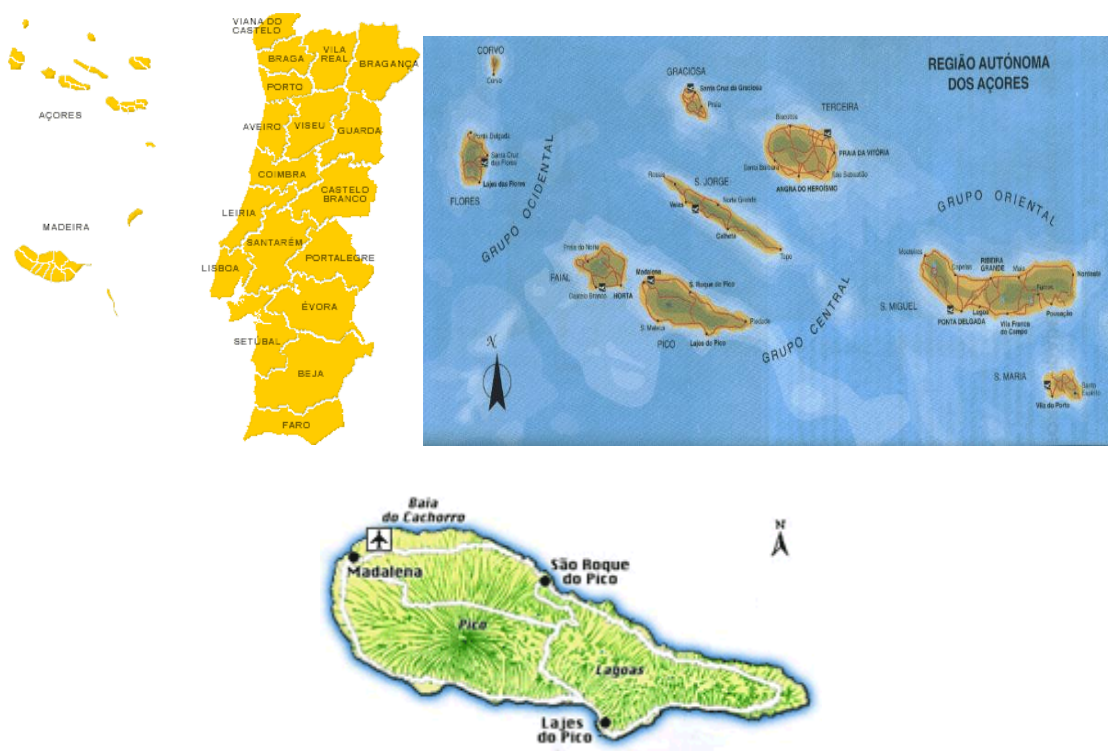


Figura 6 - Portugal e Ilhas; Arquipélago dos Açores; Ilha do Pico; Madalena do Pico

A Figura 7 mostra como era o porto da Madalena do Pico antes da implantação de um segundo quebra-mar a Oeste. O porto dispunha apenas de um molhe a Norte, protegendo as embarcações e as instalações portuárias. Não existia

nenhuma estrutura de dissipação de energia das ondas provenientes de Oeste, o que sujeitava todo o porto ao constante perigo de galgamento em toda a sua extensão.



Figura 7 - Fotografia aérea da vila de Madalena antes da implantação do quebra-mar Oeste; Porto da Madalena – Google Earth

Apesar de o molhe Norte desempenhar a função de dissipação de energia das ondas, servindo também como base para muitas operações portuárias, as suas características estruturais não eram suficientes para combater o fenómeno do galgamento - ver Figura 8.



Figura 8 - Ocorrências de galgamentos (fotografia do Porto da Madalena, 2012)

Em 2013/2014 foram realizadas obras no sentido de criar um novo molhe a Oeste, tendo-se reforçado também o molhe a Norte, implementando um farol para guia de embarcações e visibilidade no mar e modificando alguns aspetos construtivos ao longo da sua extensão, nomeadamente alteração do declive do talude e reforço do número de tetrápodes. Foi também inaugurado o novo

Terminal de Passageiros, permitindo um serviço mais eficiente no transporte de pessoas entre as ilhas do Pico e do Faial. Na Figura 9 é possível observar as zonas principais do porto.

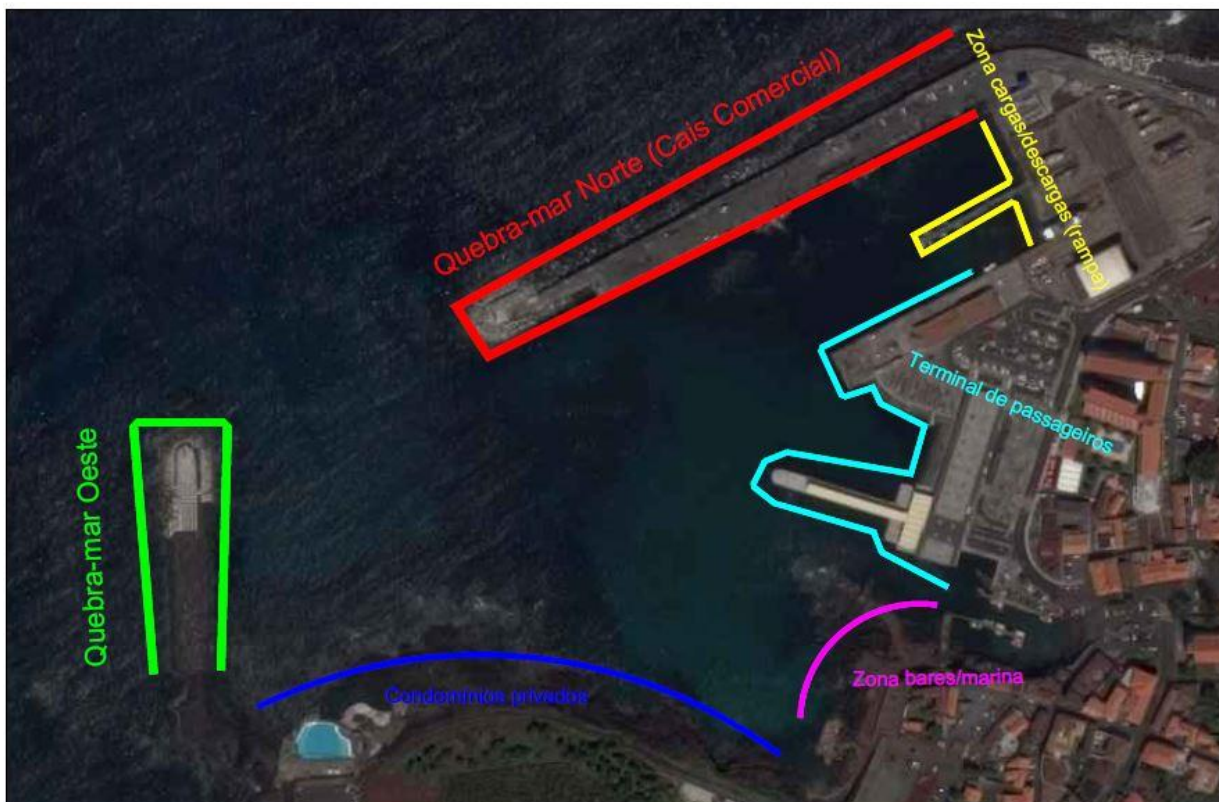


Figura 9 - Principais estruturas do Porto da Madalena (adaptado de Google Earth)

3.2 Caracterização das estruturas marítimas

3.2.1 Quebra-mar Norte (cais comercial)

O quebra-mar Norte representa a principal proteção portuária contra a ação constante do mar. Com uma extensão total de aproximadamente 530 metros, apenas cerca de 250 metros são acostáveis, constituindo a chamada “Doca da Madalena”. Na cabeça do molhe, eleva-se um farolim. Apresenta-se, na Figura 10, o esquema em planta do quebra-mar Norte.

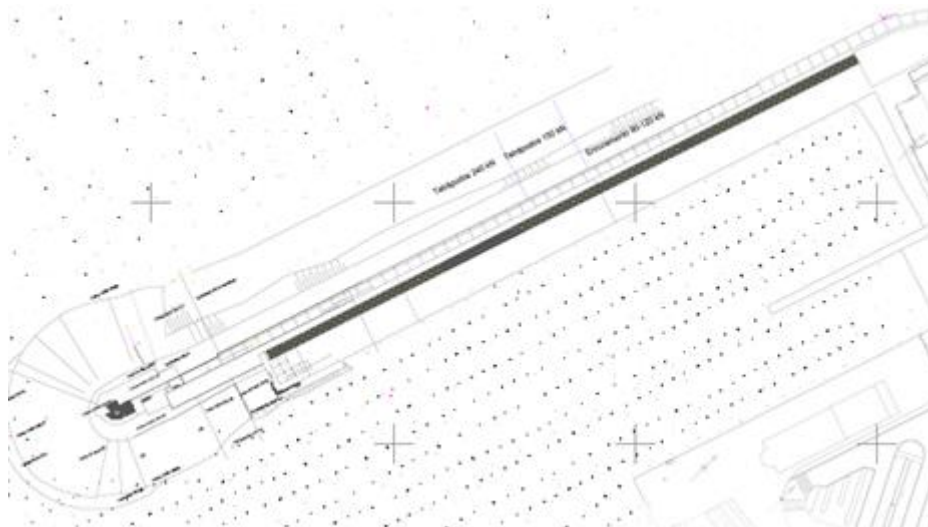


Figura 10 - Esquema em planta do quebra-mar Norte (fornecido por Porto dos Açores, S.A.)

No enraizamento do quebra-mar, encontra-se a primeira proteção contra o oceano Atlântico, com tetrápodes da ordem dos 150 kN e enrocamento entre os 90 e os 120 kN. É aqui que se encontra um pequeno stock de tetrápodes, prontos para servirem como peças de substituição em qualquer parte do porto, caso necessário, Figura 11.



Figura 11 - Tetrápodes de reserva; Vista quebra-mar Norte exterior (cedido por LNEC, 2015)

150 m após o cotovelo, o peso dos tetrápodes passa a 240 kN, estes já mais resistentes à ação do mar, e 2 camadas de enrocamento de 1 a 3 ton, no declive de 3:4 (v:h).

Já do lado interior, é possível observar na figura que a estrutura apresenta duas camadas de enrocamento de pesos distintos: a inferior, de 1 a 3 ton; a superior, de 5 a 8 ton., Figura 12.

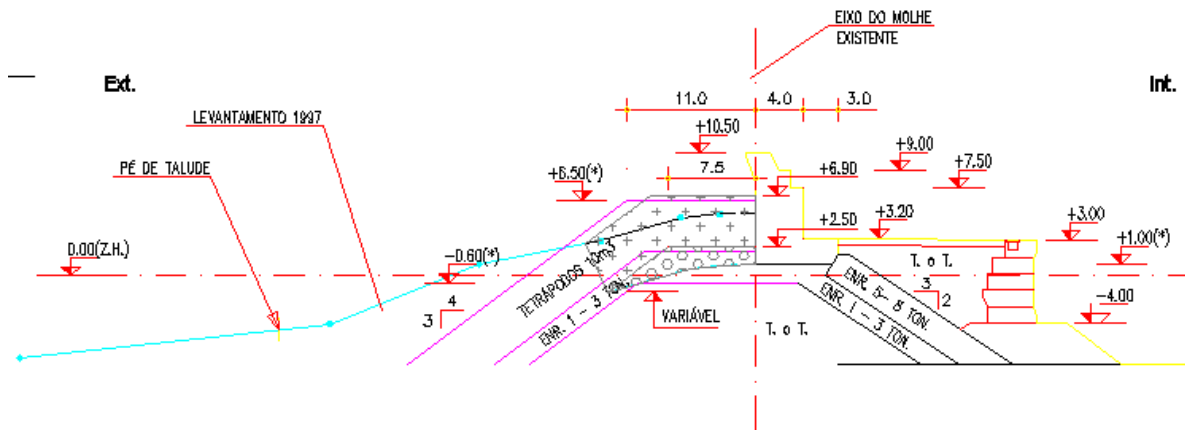


Figura 12 - Projeto atual de Perfil transversal tipo do tronco do quebra-mar Norte (Portos dos Açores, S.A.)

Esta caracterização prossegue até à secção de início da rotação da cabeça do molhe-cais, onde o perfil transversal da estrutura se altera, apresentando características presentes na Figura 13.

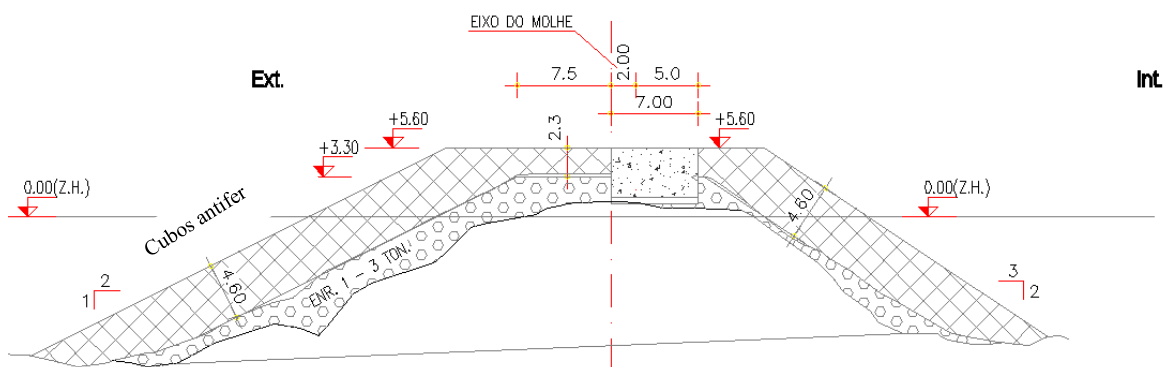


Figura 13 - Perfil Transversal da cabeça do quebra-mar Norte (Portos dos Açores S.A.)

Observa-se então que o declive do extradorso muda de 3:4 para 1:2, sendo os tetrápodes substituídos por peças mais pesadas: cubos antifer de 300 kN, contornando por completo toda a zona abrangente ao farolim. O declive de 1:2 sofre uma ligeira transformação - na zona onde os cubos já se podem considerar estar no intradorso - para 2:3.

Não presentes no projeto, existem também alguns tetrápodes de 240 kN à volta dos cubos antifer. É de se pensar que serve como uma medida adicional para a proteção contra a ação do mar.

A Figura 14 resume os materiais presentes em cada parte do molhe-cais Norte.

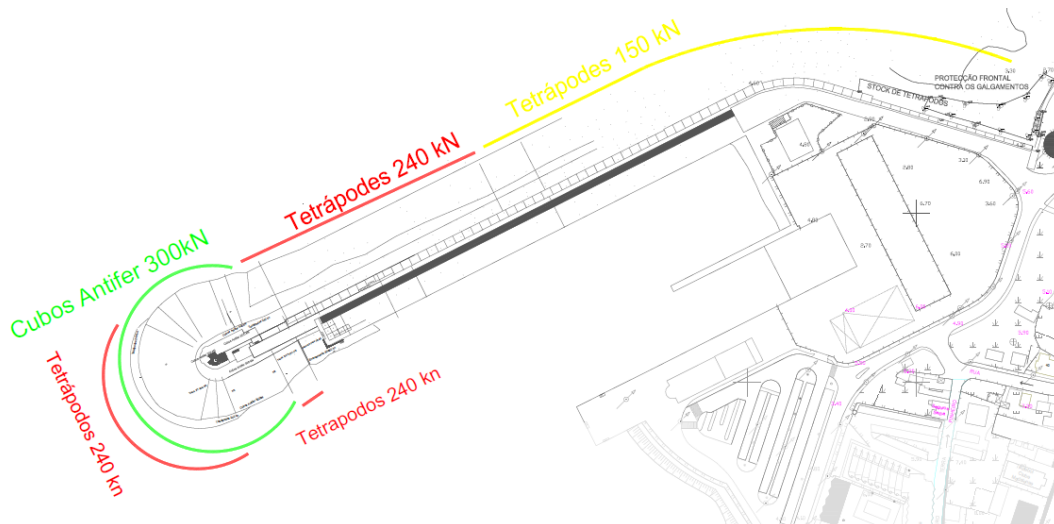


Figura 14 - Esquema de materiais presentes no manto dos taludes do quebra-mar Norte (adaptado de planos por Portos dos Açores, S.A.)

A zona do cais é constituída por betão assente em enrocamento de 200 a 500 kg, onde, na zona mais profunda, chega a atingir cotas de -6 m Z. H., Figura 15. A altura máxima da banquetta é de 9 m (desde o fundo á base da plataforma pedonal). Nesta plataforma dá-se a circulação de veículos e está não interdita a peões. A largura da zona acessível é de 17 m. Trata-se, evidentemente, da zona mais afetada pelo galgamento oceânico de todo o porto.

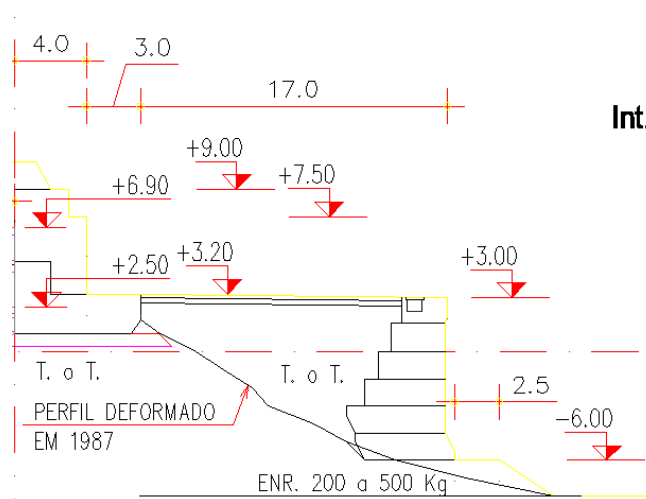


Figura 15 – Perfil transversal tipo da zona interior do quebra-mar Norte (Porto dos Açores, S.A.)

O molhe-cais serve as funções de todas a operações comerciais de carga e descarga, visível na Figura 16. Nem todas as embarcações conseguem atracar

ao longo de toda a extensão deste molhe-cais, visto que a zona junto à cabeça do molhe está fundada à cota de -6 m (Z.H.), e essa cota diminui à medida que se caminha para terra, com uma média de -4 m (Z. H.).



Figura 16 - Vista geral do intradorso do quebra-mar Norte (cedido por LNEC)

3.2.2 Rampa (zona cargas/descargas)

Esta zona serve primariamente para que as embarcações sejam transportadas para terra, por meio de reboques ou qualquer outro sistema, servindo também como zona de estacionamento de barcos que precisem de qualquer tipo de reparo ou manutenção (Figura 17).



Figura 17 - Rampa do porto (cedido por LNEC)

3.2.3 Terminal marítimo João Quaresma

Construído em 2013, o Terminal marítimo, Figura 18, foi inaugurado em março de 2014 e veio reforçar a gestão do transporte de pessoas e viaturas para a principal ligação da Madalena, que é a ilha do Faial. Desde então, o terminal tem servido para as funções para que foi concebido; não obstante, tem apresentado variadas deficiências, nomeadamente atrasos nas ligações. Têm também havido algumas queixas relativamente à instalação do Terminal e que se concretizaram em petições para alterar determinadas geometrias do porto. Citando a petição online: “não foram tomadas as medidas necessárias para evitar o caos do trânsito e do estacionamento, mal planeados e sem alternativas, com um terminal que não consegue receber autocarros por ter uma curva demasiado apertada” e “não foram tomadas medidas no plano portuário para não existirem os frequentes cancelamentos e acostagens junto ao velho terminal, obrigando os passageiros a caminhar, faça chuva ou faça sol, de armas e bagagens até ao terminal novo”.



Figura 18 - Novo Terminal de passageiros João Quaresma (à esq.; cedido por LNEC) e fotografia aérea (à dir.; portodamadalenablogspot.com)

A infraestrutura está dotada com salas de embarque e desembarque de passageiros, *check in*, posto de turismo, bar com esplanada, três balcões comerciais e uma sala de apoio à transferência de doentes (www.radiopico.com). A Figura 19 mostra a zona de embarque para navios ro-ro.



Figura 19 - Zona de embarque para navios ro-ro no terminal (cedido por LNEC)

Não muito distante do porto, situam-se alguns restaurantes e zonas turísticas, seguidas imediatamente de habitações.

3.2.4. Marina/Zona bar e restaurantes

Existe logo após o terminal de passageiros, um canto recôndito onde atracam algumas pequenas embarcações, Figura 20, mas que primariamente serve como acesso a uma zona onde se situam alguns bares e esplanadas. Não tendo informação completa sobre as estruturas, a avaliação de galgamento irá apenas focar-se naquelas sobre as quais se tem realmente informação objetiva e atual.



Figura 20 - Zona de lazer/marina da Madalena

3.2.5. Quebra-mar Oeste

O quebra-mar Oeste veio então, com as obras realizadas em 2012/2013, reforçar a diminuição de efeitos não desejáveis causados pela entrada do mar pelo porto. A agitação marítima tem 3 direções proeminentes, como se verá mais à frente na dissertação. Uma vez que o quebra-mar Norte tem como função principal a dissipação de energia (por rebentação, refração de onda, etc.), da agitação marítima proveniente principalmente de Norte, o quebra-mar Oeste responde à necessidade de travar a agitação marítima pelo lado sudOeste. A ilha do Faial cria, como se verá, um enorme obstáculo, favorável, à agitação marítima incidente no porto da Madalena do Pico; no entanto, existe uma enorme incidência vindo de sudOeste que não é “combatida” pela sombra da ilha vizinha.

A Figura 21 resume o tipo de materiais utilizados no quebra-mar Oeste.

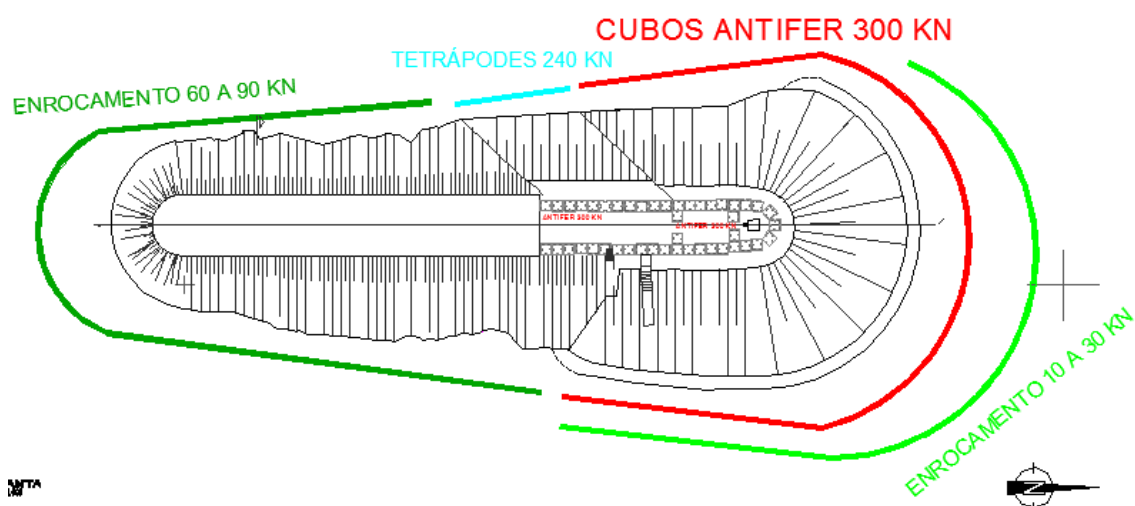


Figura 21 – Resumo do material utilizado no quebra-mar Oeste (adaptado de Portos dos Açores, S.A.)

A Figura 22 mostra o perfil transversal tipo do quebra-mar Oeste, onde é possível ver que os taludes de cubos têm uma inclinação 2:3, assentes em enrocamento de 10 a 30 kN, sob um fundo natural rochoso. A cota do coroamento do quebra-mar situa-se a 5,5 m (Z.H.), e a zona mais funda encontra-se a cerca de -10,5 m (Z.H.).

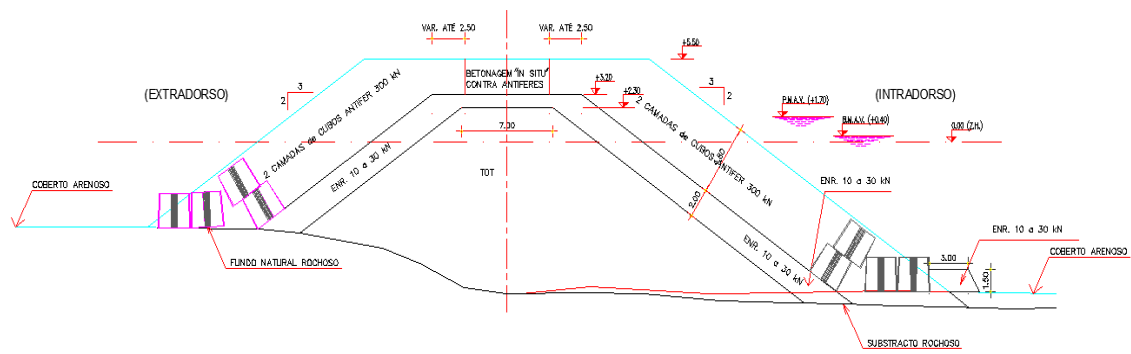


Figura 22 – Perfil transversal tipo do quebra-mar Oeste (Portos dos Açores, S.A.)

No trecho em que os cubos anti-fer são substituídos por tetrápodes de 240 kN, como mostrado na Figura 21, o talude apresenta o mesmo declive de 2:3.

Na cabeça do molhe, foram colocadas adicionais unidades de cubos anti-fer, ao longo de 50 metros, de modo a aumentar o peso da estrutura.

4 Determinação da agitação marítima no porto

4.1 Introdução

A avaliação de risco associada ao galgamento de estruturas marítimas começa com a caracterização da agitação marítima incidente, neste caso, da agitação marítima do oceano Atlântico.

Primeiramente, utilizou-se o modelo de previsão à escala oceânica WaveWatch III (Tolman 1997, 1999a, 2009, National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], U.S. Department of Commerce) como fornecedor de parâmetros caracterizadores da agitação marítima. Trata-se de um modelo de terceira geração que integra a equação da onda descrevendo o processo evolutivo da agitação marítima num espectro bidimensional. Importa referir que os resultados deste modelo não são aplicáveis para zonas pouco profundas.

É então necessário transferir as condições de agitação marítima para um domínio mais limitado, ou seja, para a envolvente da ilha do Pico.

Uma vez que existe uma boia ondógrafo na vizinhança da região, mais concretamente situada a Norte do porto da Madalena do Pico, entre as ilhas do Pico e do Faial, ela permite verificar se os resultados dos modelos de previsão estão de acordo com os dados medidos *in situ*.

Inicia-se aqui o modelo SWAN (Booji *et al.*, 1999, SWAN Team, 2008), o segundo utilizado para a caracterização da agitação marítima. Este modelo trata da transferência dos conjuntos de características descritas pelo WW III para a zona costeira alvo. No entanto, como o SWAN não tem capacidade para simular a agitação marítima para as zonas interiores do porto, é ainda necessário recorrer a um terceiro modelo, o DREAMS (Fortes, 2002).

Este é um modelo que, tendo em conta os efeitos de difração, refração e reflexão de ondas, vai utilizar os resultados do SWAN para definir os regimes de agitação marítima em 6 pontos das estruturas portuárias.

4.2 Dados utilizados

4.2.1 Introdução

Através do modelo de terceira geração WAVEWATCH III (Tolman, 1997, 1999, 2009) foram fornecidas as estimativas para a agitação marítima. Diferencia-se do seu modelo antecessor, o WW II, pelas equações regentes, modelo estrutural, método numéricos e parametrizações físicas (NOAA, U.S. Government, 2009). Tem em conta efeitos de refração e deformação das ondas ao longo de variações espaciais e temporais em profundidades e correntes médias, ações de ventos, dissipação e atrito do fundo, aproximando da realidade a geração e decaimento da agitação marítima.

No entanto, não é aplicável em águas pouco profundas pois não é capaz de estimar a rebentação induzida pela variação do fundo.

Na vizinhança da ilha existe uma boia ondógrafo que fornece registos a cada 10 minutos, aproximadamente, de altura significativa, altura máxima, período de pico e médio e direções de propagação. Estes dados serviram como base comparativa para a aplicação dos modelos de previsão de agitação marítima SWAN e que validou a aplicação deste, passando-se para o modelo DREAMS, como será visto no subcapítulo 4.4.1.

4.2.2 Caracterização da agitação marítima com o WW III

Os parâmetros caracterizadores da agitação marítima estimados pelo WW III são a altura significativa (H_s), direção média (θ_m) e o período de pico do espectro (T_p), permitindo a previsão da agitação marítima ao largo (ver Figura 23 e Tabela 8) em intervalos de 6 horas, para um período de 1 de janeiro de 2007 a 30 de dezembro de 2014. A Tabela 9 apresenta a descrição estatística da amostra.

Tabela 8 - Coordenadas de entrada para o WW III

Norte	-28; 39.5
Oeste	-29.75; 38.75
Sul	-28; 38
Este	-26.5; 38.75

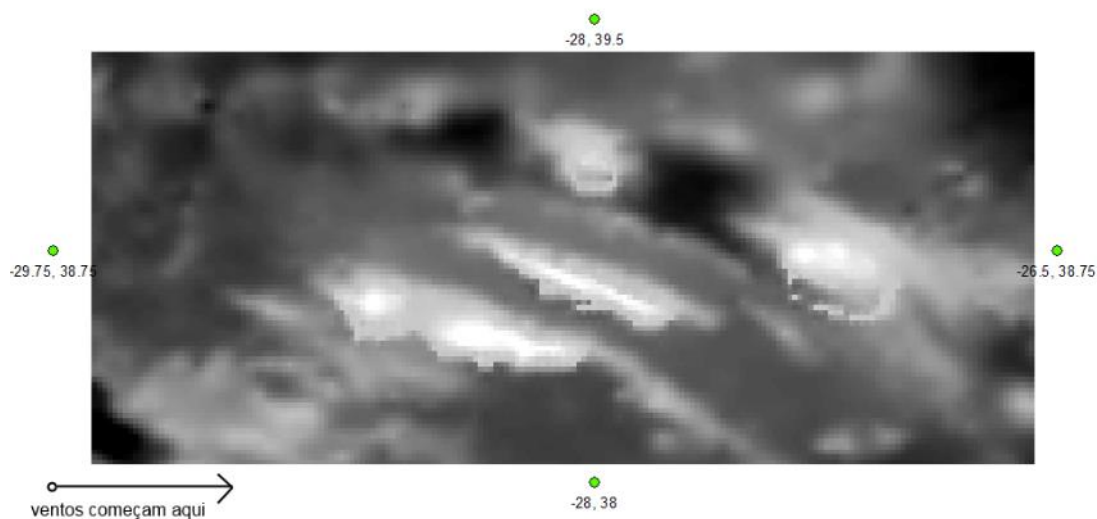


Figura 23 - Coordenadas do WWIII para a zona central do Açores

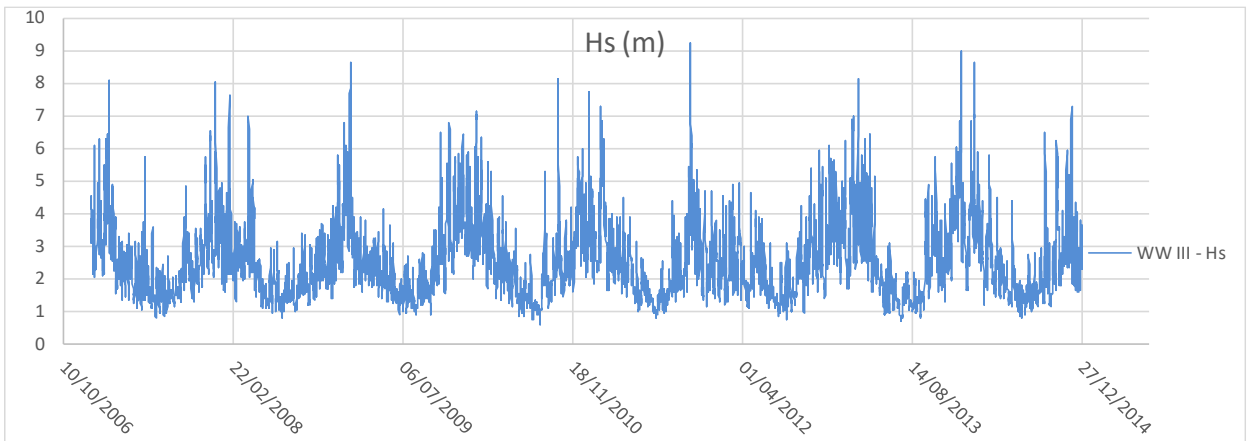
Tabela 9 - Estatística descritiva da agitação marítima no WW III

	H_s (m)	T_p (s)	θ
Média	2.52	9.08	246.78
Erro-padrão	0.01	0.02	1.01
Mediana	2.28	8.90	292.00
Moda	1.51	8.50	314.00
Mínimo	0.58	4.80	0.00
Máximo	9.25	15.50	360.00
Contagem	11684	11684	11684

É visível que a altura significativa compreende valores entre 0.58 e 9.25 m. Quanto ao período de pico, o valor máximo é 15.5 e o mínimo 4.8 s. Na direção de pico a mediana respetiva é 292°.

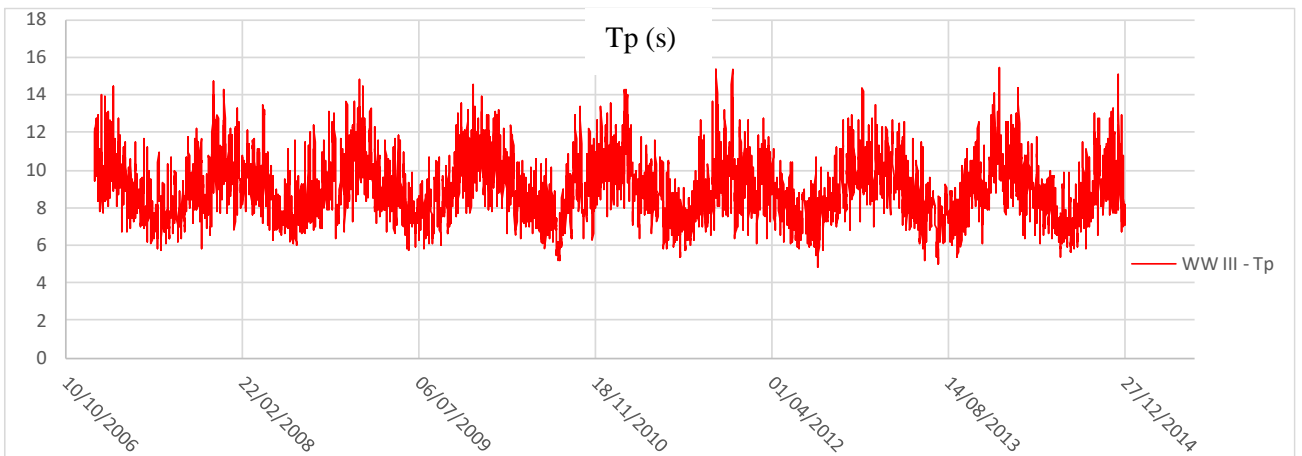
O Gráfico 1 mostra a altura significativa calculada no WW III para o período de 2007 a 2014.

Gráfico 1 - Altura significativa no modelo WW III para o período de 2007 a 2014



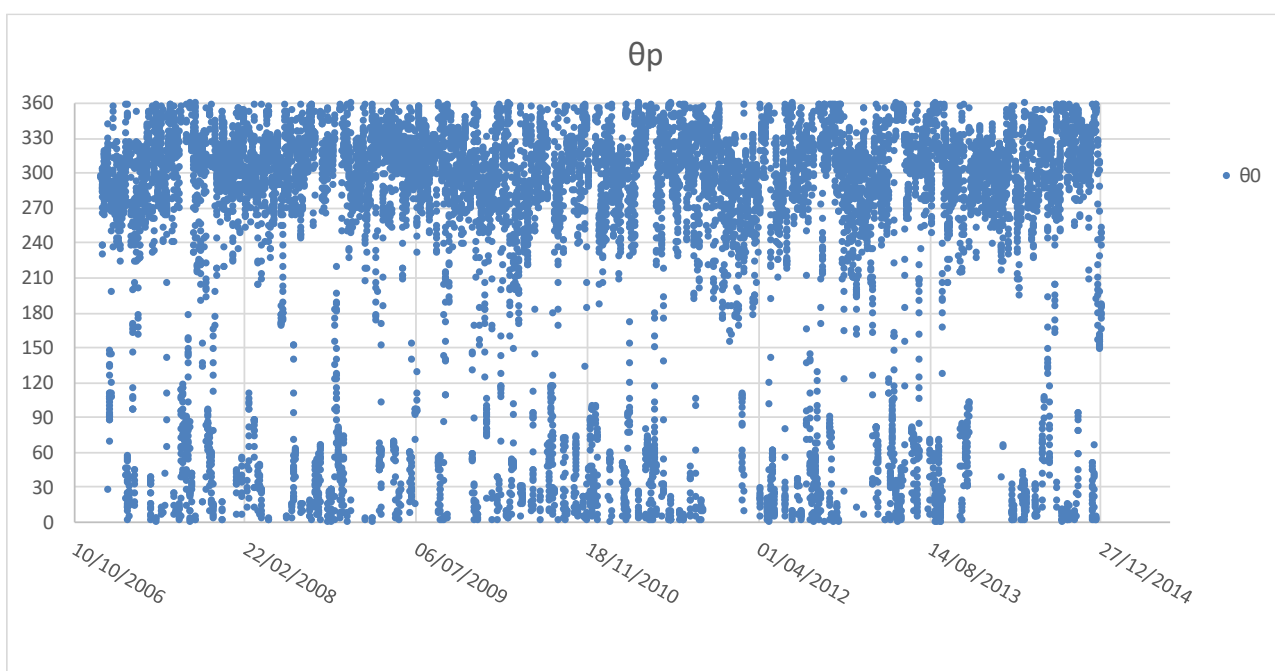
É também mostrado o período de pico para o modelo WW III, no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Período de pico no modelo WW III para o período de 2007 a 2014



Apresentam-se no Gráfico 3, os valores da direção de onda calculada no WW III, para o mesmo período.

Gráfico 3 - Direção de onda no modelo WW III para o período de 2007 a 2014



No Gráfico 3 nota-se que a maior parte das ondas se concentram na faixa dos 250° aos 360° . Mais sucintamente, 78.8% dos valores de θp são superiores a 180° , e 64.5% de todos os valores de θp são superiores a 270° , indicando que a predominância das direções da propagação da agitação marítima é de NorOeste.

4.2.3. Dados da boia ondógrafo

A boia ondógrafo está situada a $M=366088.0089\ m$ e $P=4274219.3091\ m$ para o sistema de coordenadas associado ao Grupo Central dos Açores EPSG 5015 – ITRF 93/PT RA 08 – UTM zona 26 N, na profundidade da ordem dos 123 m.

A boia fornece dados a cada 10 minutos, aproximadamente, das condições de agitação marítima traduzidas pelos parâmetros mencionados em 4.2.1. Para os anos do estudo, terá existido uma avaria na boia durante o período de 30 de outubro de 2008 e 6 de novembro de 2009, isto é, mais de 1 ano sem dados.

4.2.4 Dados de maré

É sabido que o aumento do nível do mar leva a maiores alturas de onda, e em geral, a maiores valores do caudal médio galgado nas estruturas marítimas. Daí ser importante saber, juntamente com as condições marítimas mencionadas em 4.2.2, o nível de maré (NM) para cada uma dessas previsões. O nível de maré é referenciado de acordo com o zero hidrográfico (Z.H.). Os dados de maré foram obtidos através do Instituto Hidrográfico.

Durante o período considerado neste trabalho, o nível de maré variou entre 0.63 e 2.19 m (Z.H.).

No Gráfico 4 e no Gráfico 5, apresenta-se a variação da maré nos 8 anos considerados, e para o último ano do estudo.

Gráfico 4 - Nível de maré para os anos 2007 a 2014

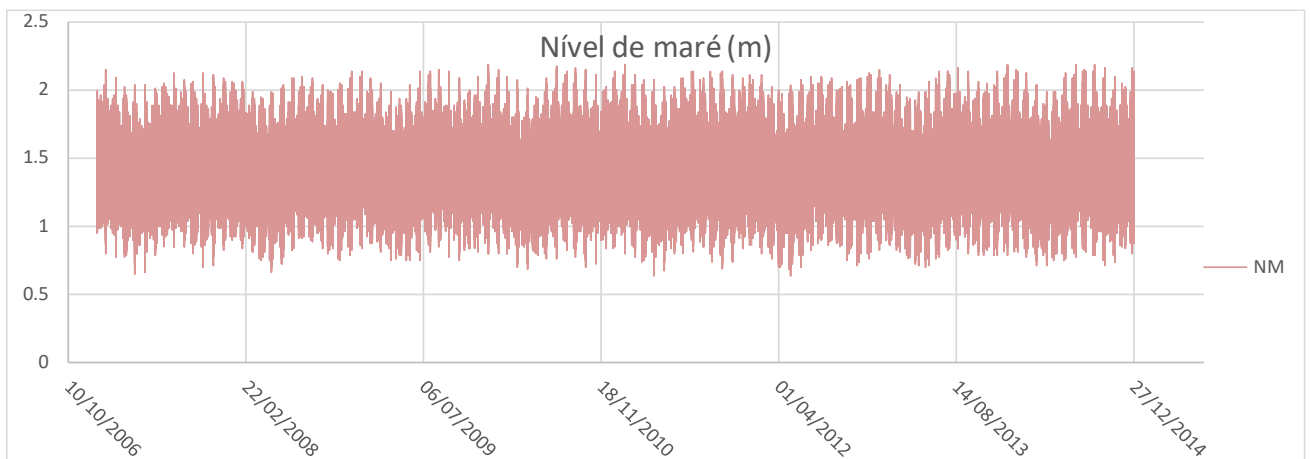
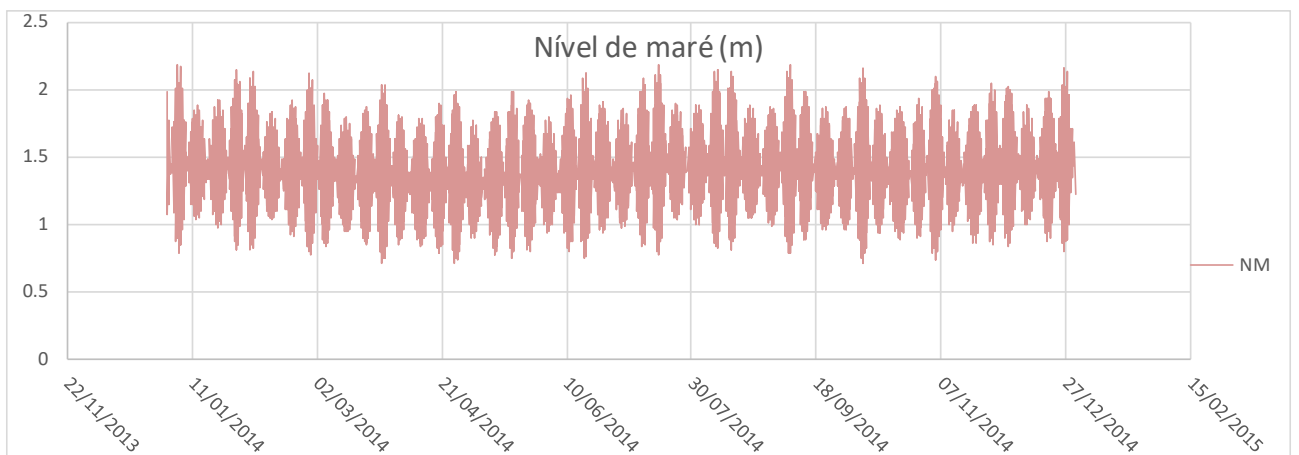


Gráfico 5 - Nível de maré no ano de 2014



4.3 Aplicação do modelo SWAN

4.3.1 Introdução

O modelo SWAN (Booji et al., 1999 e SWAN Team, 2006) é um modelo de terceira geração espectral para obtenção de estimativas realistas de parâmetros de agitação marítima em zonas costeiras. O SWAN tem como base a equação da conservação da ação de onda, sendo a propagação de ondas, empolamentos devido a variações do fundo, ações do vento nas ondas e ações de correntes.

Os dados necessários para o funcionamento devido do SWAN são as malhas batimétricas, as condições de agitação marítima nas fronteiras de entrada do domínio de cálculo e campos da velocidade do vento na zona em estudo.

Os resultados consistem em alturas significativas, períodos de pico e médio e direções médias e de pico da agitação marítima que irá incidir na zona-alvo, a costa.

O modelo SWAN não possui capacidade para calcular a propagação de estados de agitação marítima para dentro de portos, daí exportar-se a informação resultante do SWAN para o DREAMS, que já tem capacidade para o fazer.

4.3.2 Batimetria e ventos

O SWAN procede à criação de malhas de várias resoluções, onde a primeira consiste num domínio maior, resultando as seguintes da gradual diminuição deste.

As batimetrias utilizadas foram retiradas do Instituto Hidrográfico (<http://www.hidrografico.pt/>) relativamente à Zona Central dos Açores.

Os ventos foram obtidos pelo ECMWF para os anos 2007 a 2014.

4.3.3 Domínio computacional e malhas de cálculo

O domínio computacional adotado para a primeira malha, *Main*, é o indicado na Figura 24, e abrange a zona central dos Açores. A partir desta criam-se duas malhas mais pequenas. A malha *Nested* consiste numa ampliação da malha *Main* na região das ilhas do Pico e do Faial, e a malha *Nested 1*, ainda mais ampliada.

A Figura 24, Figura 25 e Figura 26 representam as malhas *Main*, *Nested* e *Nested 1*, respetivamente.

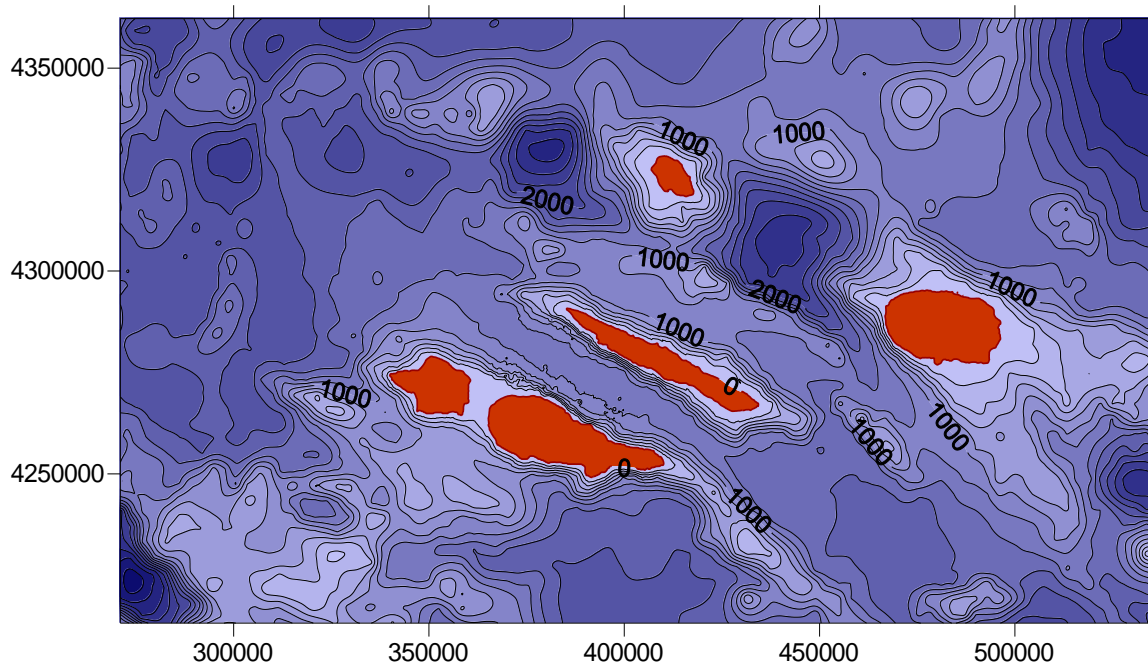


Figura 24 – Malha *Main* batimétrica da região dos Açores (Instituto Hidrográfico)

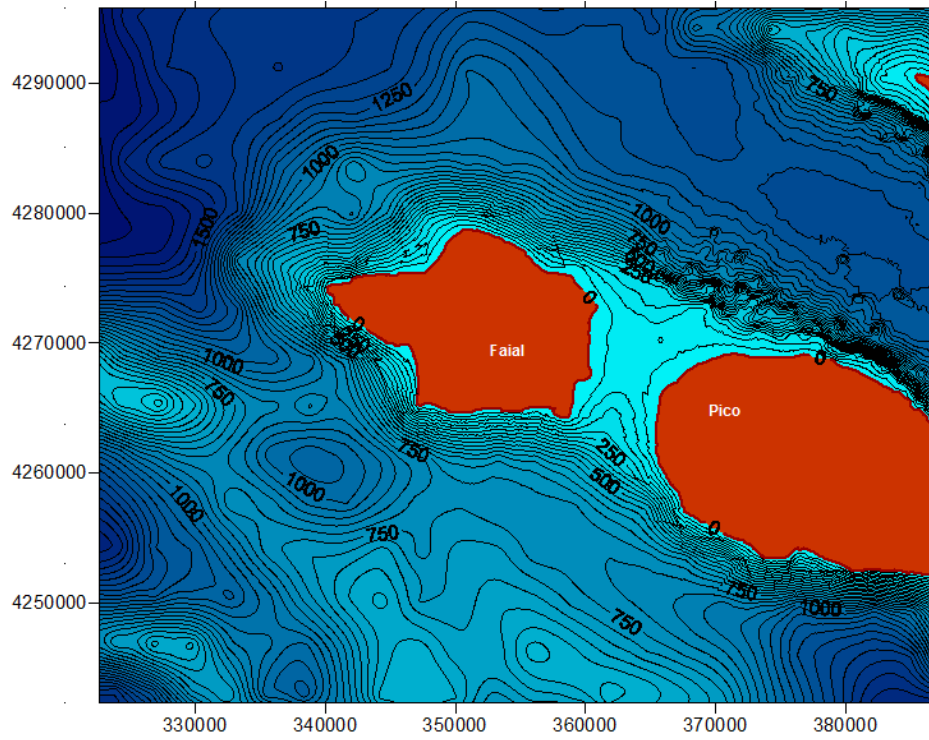


Figura 25 - Malha Nested



Figura 26 - Malha Nested1

É importante considerar a ilha do Faial para o cálculo da propagação marítima no SWAN pois a ilha desempenha um papel crucial como principal obstáculo para a agitação vinda de Oeste incidente no Pico.

A Tabela 10 resume as definições das malhas:

Tabela 10 - Parâmetros das malhas de cálculo

Main (esp.=1200m)	x_inicial=271000	x_final=536000	NºΔx=1060	Comp_x=265 km	Área_total=39485 km ²
	y_inicial=4213200	y_final=4362200	NºΔy=596	Comp_y=149 km	
Nested (esp.=400m)	x_inicial=322650	x_final=386850	NºΔx=642	Comp_x=64.2 km	Área_total=3434.7 km ²
	y_inicial=4242300	y_final=4295800	NºΔy=535	Comp_y=53.5 km	
Nested1 (esp.=50m)	x_inicial=359330	x_final=368780	NºΔx=189	Comp_x=9.45 km	Área_total=127.1025 km ²
	y_inicial=4261990	y_final=4275440	NºΔy=269	Comp_y=13.45 km	

onde $N^{\circ}\Delta x$ e $N^{\circ}\Delta y$ correspondem ao número de intervalos da malha segundo as duas direções ortogonais; o espaçamento das malhas é gradualmente reduzido, isto é, diminui a distância entre pontos da malha adjacentes.

Na malha batimétrica mais pequena, Figura 26, a Nested1, podem observar-se os pontos de entrada no SWAN, estando um deles diretamente em cima da boia. O ponto P6 é o ponto de transferência utilizado para o DREAMS. Tal será abordado no subcapítulo 4.4.2.

A localização dos pontos escolhidos baseia-se nas batimétricas nos intervalos de 50 metros, direcionadas de Norte a Sul do porto da Madalena e intercetando o local da boia.

As coordenadas para o ponto P6 são M=366185.916871 e P=4266704.40373 (m).

4.3.4 Caraterísticas gerais das simulações

As simulações no SWAN foram feitas para o período de 2007 a 2014, em modo estacionário. Neste modo o crescimento dos estados de agitação marítima é limitado apenas pelo *white capping*. Trata-se da rebentação da onda devida ao excesso de declividade, em águas profundas. As principais caraterísticas das simulações foram:

- Versão SWAN 40.72, sem considerar interação das ondas com correntes;
- Consideraram-se fenômenos de difração para todas as malhas. Considerou-se também interação onda-onda tripla e quadrupla (apenas nas malhas *Main* e *Nested* e não na *Nested 1*);
- Consideraram-se ventos estacionários variáveis no espaço para intervalos de 13 em x e 6 para y para todas as malhas;
- O espectro direcional caracterizado por um espectro em frequência de JONSWAP de 24 intervalos, de 25 s a 2s.

4.3.5 Metodologia de aplicação do modelo SWAN

Utiliza-se a metodologia das matrizes de transferência na aplicação do modelo SWAN. Fornecendo parâmetros da agitação marítima do WW III, escolheram-se 25 pontos, de onde 1, o ponto P6, será utilizado como o ponto de transferência de resultados para o DREAMS. Na Figura 27 e na Figura 28 são mostradas as localizações da boia e do ponto P6.



Figura 27 - Localização da boia e do porto no arquipélago (adaptado de Google Earth)

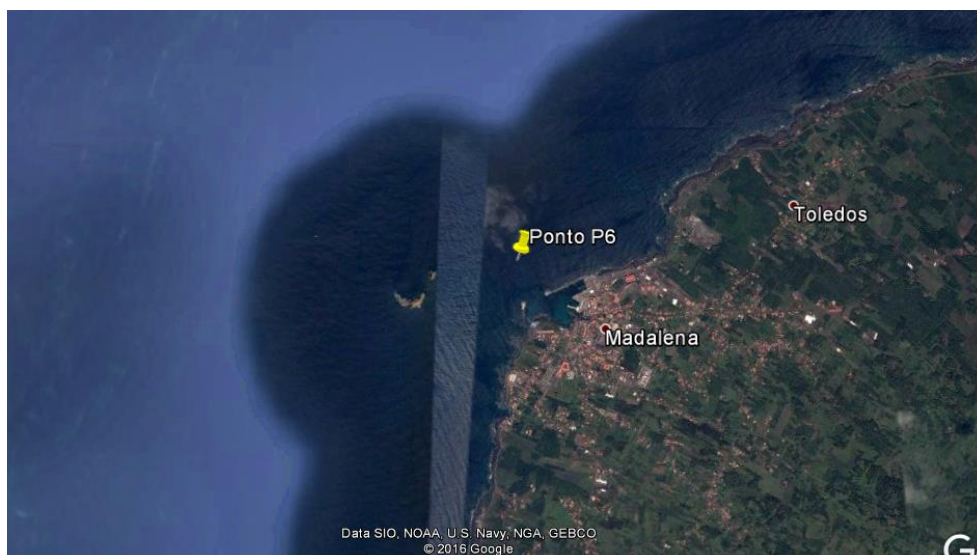
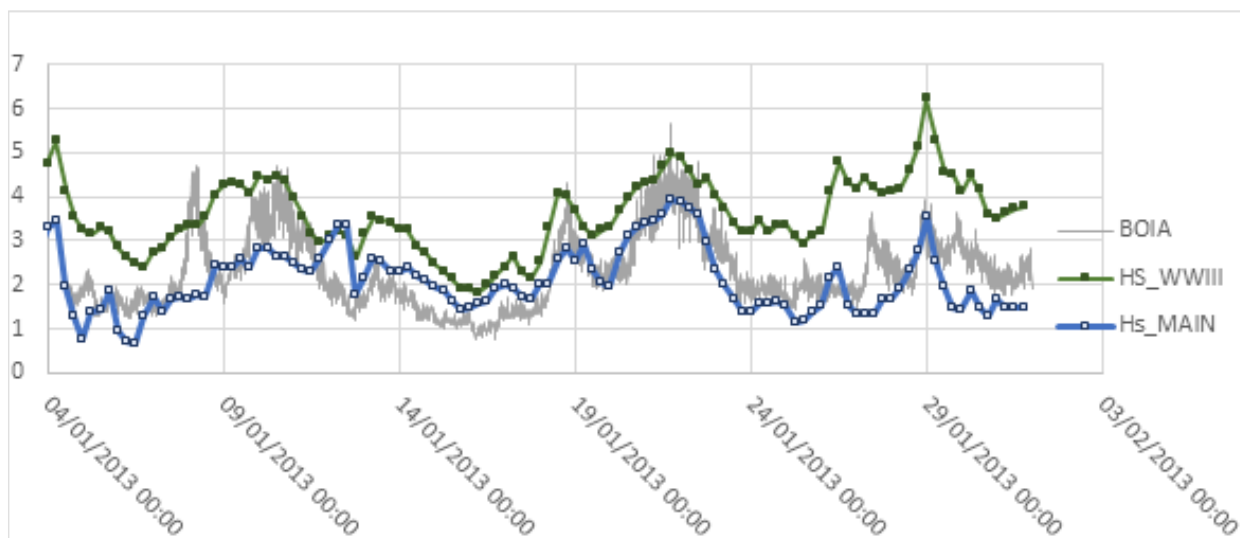


Figura 28 - Localização do ponto P6 comparativamente ao porto da Madalena (adaptado de Google Earth)

4.3.6 Resultados e comparação para o período de 1 mês: boia vs. WW III vs. SWAN

Pretendeu-se verificar se o modelo de previsão WW III, de onde se retiraria a informação da agitação marítima para correr no SWAN, seria válido para a corrida dos 8 anos. Utilizou-se então o mês de janeiro de 2013 – um período menor, no entanto representativo – como base para comparar a altura significativa entre WW III, os registos pela boia e a simulação do SWAN. Considerou-se a altura significativa como a mais representativa entre os parâmetros de agitação marítima para a comparação. Apresenta-se, então, o Gráfico 6 de comparação entre os dados de altura significativa da boia, do WW III e do SWAN (grelha Main).

Gráfico 6 - Comparação entre os dados de altura significativa do mês de janeiro de 2013 para o WW III, registo da boia, e SWAN (Main)



É possível observar que os resultados do modelo de previsão SWAN afastam-se dos valores da boia entre os dias 8 e 12 de janeiro de 2013, e também um pouco no dia 27. Apesar disso, em todo o resto do mês a aproximação é clara. A altura significativa geralmente menor no modelo SWAN pode dever-se aos efeitos de reflexão, refração e difração das ondas na ilha do Faial e possivelmente na ilha do Pico.

O WW III apresenta valores mais elevados do que a boia e o SWAN, pois este trata-se de um modelo à escala oceânica e, conseqüente, não tem capacidade para assimilar ou definir corretamente a quantidade de variáveis que possam alterar a agitação marítima localmente.

Como tal, apesar das discrepâncias entre o SWAN e boia acima mencionadas, considerou-se que a simulação no SWAN, utilizando parâmetros fornecidos pelo WW III, é aproximada da realidade. Pôde-se então proceder à execução do modelo em pleno nos 25 pontos perto da costa, para mais tarde transferir os resultados para o DREAMS.

4.3.7 Resultados SWAN de 2007 a 2014

Foram utilizados 25 pontos para caracterizar a agitação marítima. As coordenadas destes estão representadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Coordenadas M e P dos 25 pontos utilizados no SWAN

Ponto	M	P
1	366715.179957	4266698.834930
2	366598.186059	4266698.834930
3	366509.048436	4266698.834930
4	366397.623335	4266704.403730
5	366297.341973	4266704.403730
6	366185.916871	4266704.403730
7	366180.341928	4266615.266100
8	366180.341928	4266542.834870
9	366185.916871	4266442.553500
10	366185.916871	4266375.697210
11	366185.916871	4266308.847060
12	366185.916871	4266253.134510
13	366364.192116	4267562.373350
14	366275.054494	4268654.336930
15	366197.054464	4270537.413830
16	366119.060581	4271690.664900
17	365372.516089	4265735.009000
18	364581.396639	4264776.751860
19	363823.708408	4264297.626370
20	362793.032366	4263729.363250
21	361500.499959	4263110.956370
22	366074.960000	4272145.870000
23	366088.008900	4274219.309100
24	366053.544200	4274770.701500
25	366053.544200	4275080.851700

Um em particular, o ponto 6 – P6 foi escolhido como o ponto de transferência das condições de agitação marítima para o modelo numérico DREAMS, porque é o ponto que mais se aproxima da zona do porto e que toma uma posição representativa da agitação vinda tanto de Norte, como de SudOeste – observar Figura 26. Na Tabela 12, apresenta-se a análise estatística da agitação marítima para P6, definida por H_s , T_p , T_m , θ_p e θ_m .

Tabela 12 - Estatística descritiva dos resultados do SWAN para o ponto P6

	$H_s(m)$	$T_p(s)$	$\theta_p(^{\circ})$	$T_m(s)$	$\theta_m(^{\circ})$
Média	1.85	10.27	244.74	6.48	243.74
Erro-padrão	0.01	0.02	1.04	0.02	1.05
Mediana	1.67	10.07	307.50	6.46	307.67
Moda	0.74	11.14	307.50	7.25	314.79
Desvio-padrão	1.01	2.70	111.88	2.26	113.47
Variância da amostra	1.03	7.30	12516.60	5.09	12875.55
Curtose	1.76	0.28	-0.29	-0.67	-0.36
Assimetria	1.09	-0.53	-1.10	0.24	-1.08
Intervalo	7.62	15.76	345.00	12.25	359.98
Mínimo	0.11	2.71	7.50	2.13	0.02
Máximo	7.73	18.46	352.50	14.38	360.00
Contagem	11684	11684	11684	11684	11684

Resumem-se em 11684 dados de H_s , T_p , θ_p e NM (considerados iguais em todos os 25 pontos).

Contudo, é também necessário realizar uma análise comparativa entre o que se obtém do WW III e do SWAN. Aqui, o esperado é condições de agitação marítima ligeiramente inferiores no modelo SWAN, visto que este é um modelo mais “focado” no local de estudo, ao invés do WW III, tendo em conta a existências dos variados fatores que afetam a agitação marítima.

Apresenta-se o Gráfico 7 e o Gráfico 8, comparando a altura significativa e período de pico no WW III e no SWAN – esta análise foi realizada no ponto 22, P22, perto da boia.

Gráfico 7 - Comparação de alturas significativas no WW III e no SWAN para o período de 2007 a 2014 perto da boia

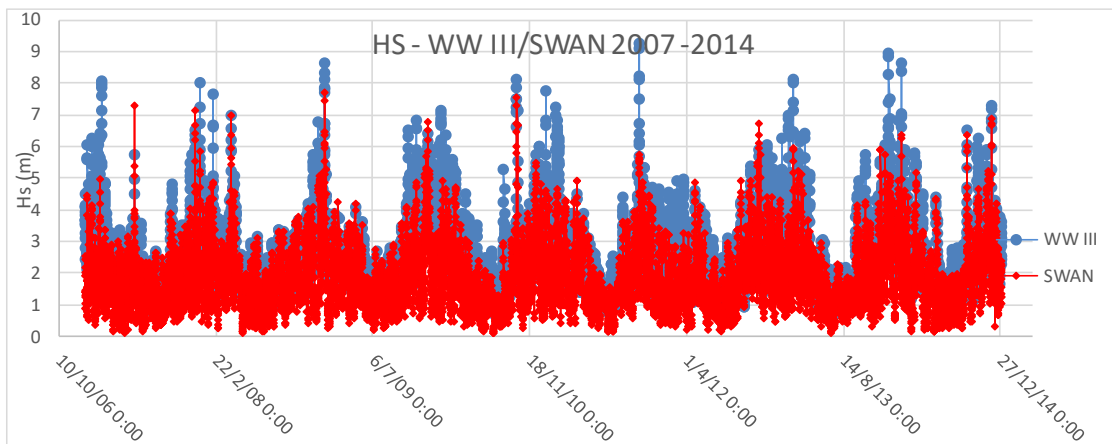
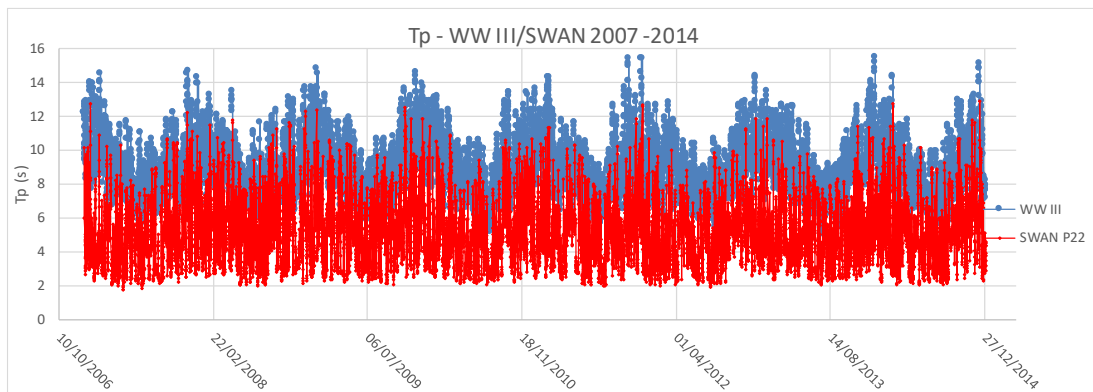


Gráfico 8 - Comparação de período de pico entre WW III e SWAN para o período de 2007 a 2014 perto da boia



Observa-se então o esperado: os resultados do SWAN são ligeiramente inferiores aos do WW III, pois aquele tem em conta efeitos de difração, reflexão, e também fronteiras físicas, nomeadamente as ilhas, melhor definidas do que no WW III.

Para completar a aplicação do SWAN sobre a zona costeira, estudaram-se as direções de propagação de ondas para três pontos distintos, P8, P14 e P19, representado na Figura 29. P14 tem como objetivo caracterizar a agitação incidente no porto vinda de Norte; P19 aquela vinda de Sudoeste; e P8 um pouco das duas direções.

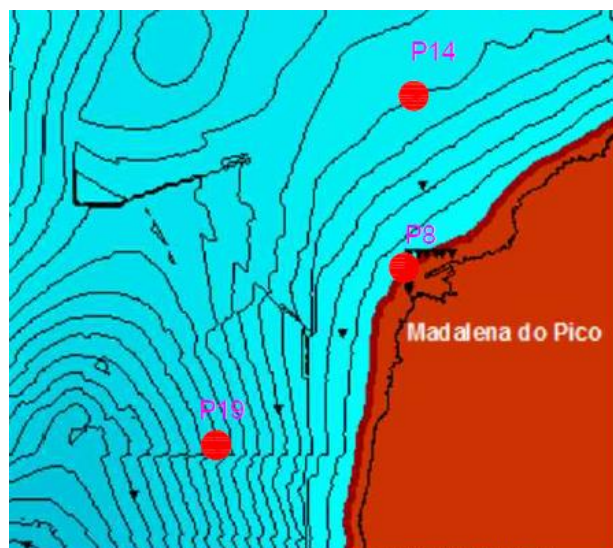


Figura 29 - Localização dos pontos P8, P14 e P19

Pela batimetria, representada na Figura 29, nota-se que a geometria do fundo do “canal” do Pico/Faial permite um “afunilamento” que pode gerar grandes alturas de onda. Como tal, tornou-se necessário avaliar a predominância das direções de onda. Tais afirmações são complementadas pelos histogramas de direções de onda para os pontos P8, P14, P19, na Figura 30, Figura 31 e Figura 32.



Figura 30 - Histograma de direções para P8 para 2007-2014

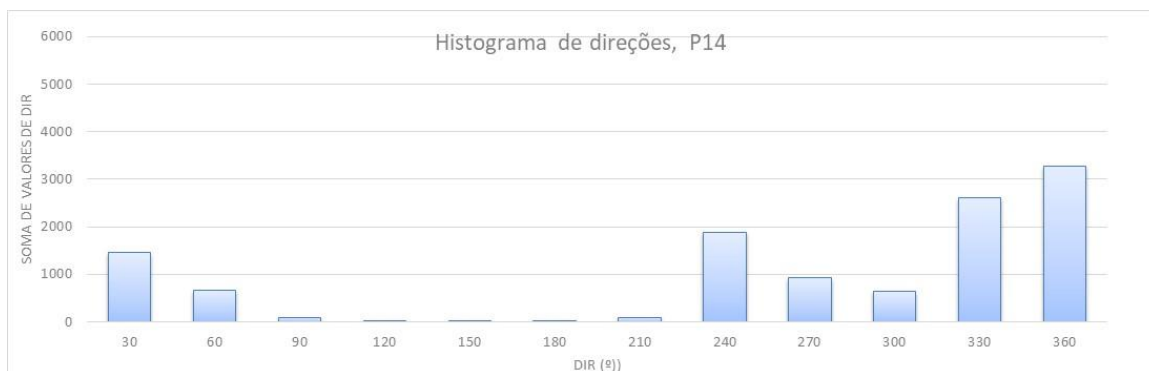


Figura 31 - Histograma de direções para P14 para 2007-2014

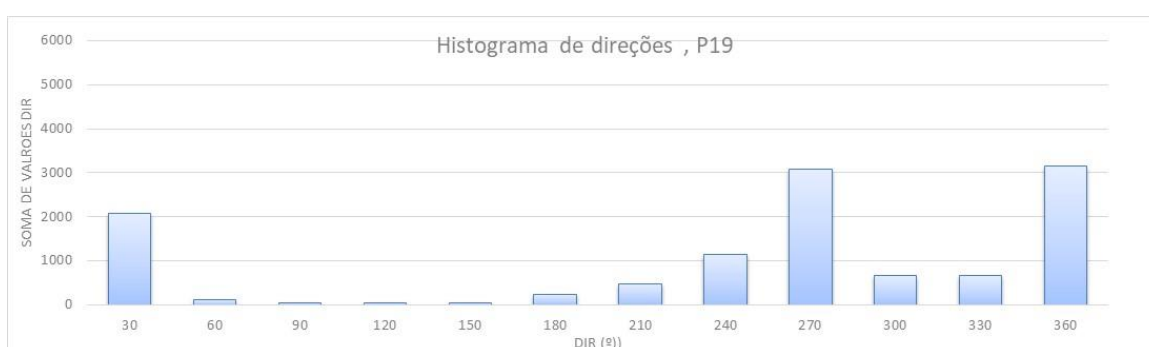


Figura 32 - Histograma de direções para P19 para 2007-2014

P8, Figura 30, que pode ser considerado o ponto representativo da agitação incidente na zona do porto, revela que a maior parte das direções de onda se situa entre os 300 e os 360° (Noroeste). Na Figura 31, P14 tem a maior parte das direções de onda vindas de Norte/Noroeste, isto é, a maior gama de direções situa-se entre 300 e 30°. Quanto a P19, Figura 32, comprova-se que a maior parte das direções se situa entre os 210 e 330° (Sudoeste a Noroeste), sendo também fortemente afetado por ondas de Norte.

Seguem-se nas Figura 33, Figura 34 e Figura 35, os histogramas referentes aos períodos de pico para os mesmos pontos.



Figura 33 - Histograma de períodos de pico para P8 para 2007-2014



Figura 34 - Histograma de períodos de pico para P14 para 2007-2014

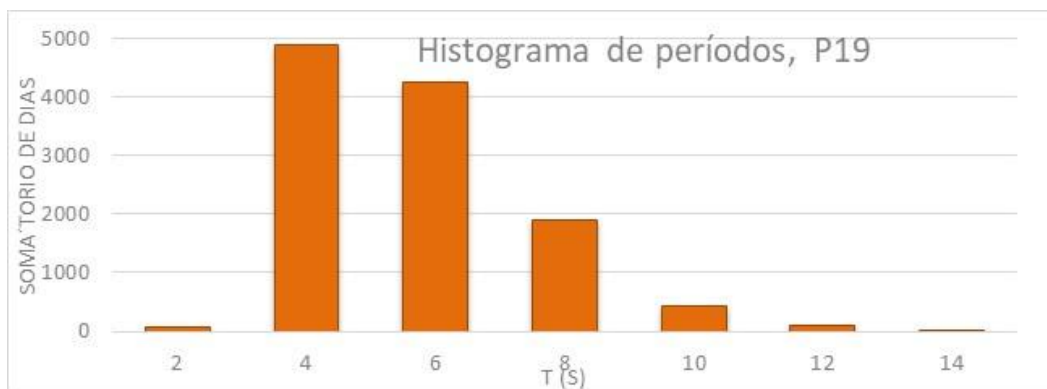


Figura 35 - Histograma de períodos de pico para P19 para 2007-2014

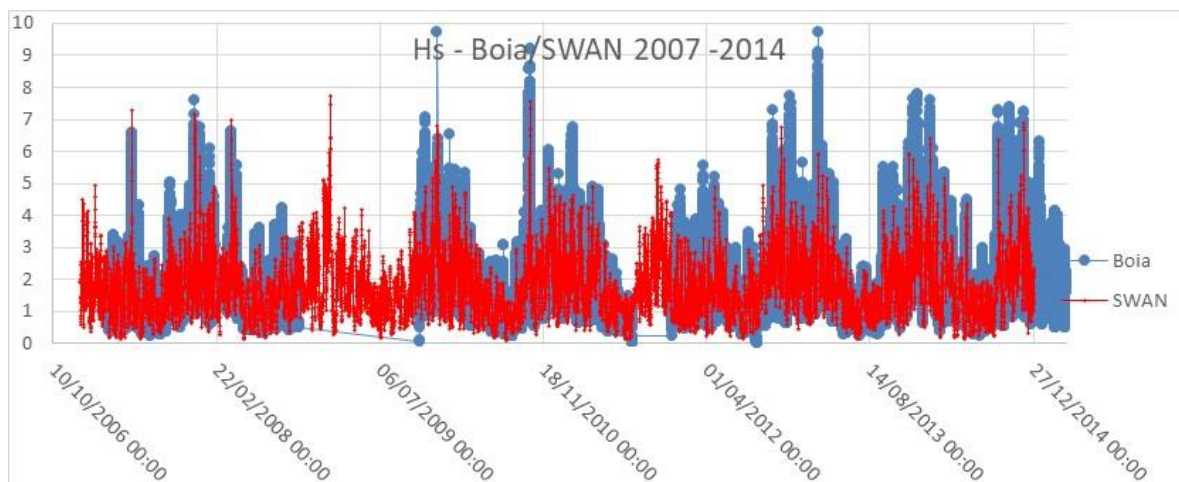
Os pontos P14 e P19 apresentam condições muito semelhantes entre si, relativamente a período de pico entre os anos 2007-2014. A predominância de valores situa-se entre os 4 e 6 s, tendo também valores altos compreendidos entre os 8 e os 14. No entanto, em P8, o ponto mais representativo da agitação marítima incidente na zona do porto apresenta valores diferentes dos seus pares. As gamas de 4 a 6 s são mais baixas, enquanto que os períodos de 8 a 12 s vão tendo mais relevo. Notam-se ainda dias onde se observam períodos de pico de 16 s.

Isto leva a concluir que a agitação marítima é realmente muito semelhante na zona a Norte do porto e na zona a Oeste/Sudoeste, agravando-se as condições de agitação marítima quando se aproxima do porto. O razão deste fenómeno será explicado mais à frente, no capítulo 4.4.4.

4.3.8 Comparação dos resultados do modelo SWAN com os dados da boia

Segue-se uma breve comparação, Gráfico 9, entre os resultados do modelo SWAN, ponto P22 (perto da boia), através da malha *Nested1*, para o período dos 8 anos, e os medidos na boia no mesmo período.

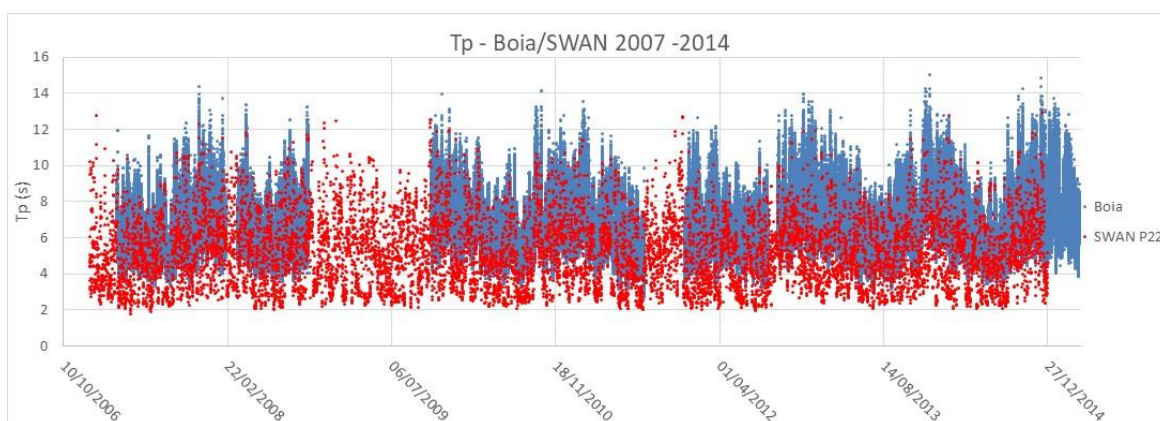
Gráfico 9 - Comparação entre Hs para SWAN e boia para o período de 2007-2014



No anexo A, são apresentados os resultados para cada ano individual, excetuando o ano de 2009 porque a boia não operou até novembro.

É também mostrado, no Gráfico 10, a comparação entre o período de pico no SWAN, P22, e a boia.

Gráfico 10 - Comparação entre período de pico na boia e no SWAN para 2007-2014



O Gráfico 9 e o Gráfico 10 tornam evidente a aproximação dos resultados fornecidos pelo SWAN, no período de 2007 a 2014, aos valores medidos na boia. O modelo SWAN apresenta, como já mencionado, valores ligeiramente inferiores aos registados, mas observa-se que os picos em ambos os gráficos são, em geral, coincidentes aos registados na boia.

Esta comparação complementada com os histogramas da agitação marítima no capítulo 4.3.7 indicam que o SWAN fornece resultados aproximados da realidade que podem ser implementados no próximo modelo, DREAMS (capítulo 4.4.).

4.4 Aplicação do modelo DREAMS

4.4.1 Introdução

O modelo numérico DREAMS (Fortes, 1993) simula a propagação e deformação de ondas marítimas lineares em zonas de fundos de inclinação suave. O modelo vem preencher a lacuna do SWAN no que toca a caracterizar estados de agitação marítima no interior do porto.

O DREAMS baseia-se na equação elíptica de declive suave, descrevendo fenómenos de refração, difração e reflexão parcial de ondas monocromáticas que se propagam em fundos suaves. Contudo, o modelo não tem capacidade para calcular efeitos de rebentação, nem correntes, nem galgamentos das estruturas marítimas.

4.4.2 Condições de aplicação

O modelo DREAMS também utiliza malhas, como o SWAN. Na fronteira destas malhas é necessário definir as direções que promovam a agitação marítima incidente no porto. Deste modo, as condições foram definidas a partir dos seguintes intervalos: 0 a 90°, 180 a 270° e 270° a 360°. Facilmente se entende que se descarta o 2º quadrante de valores, pois esse corresponde à costa. A Figura 36 mostra as direções na fronteira de entrada e de saída do modelo, isto é a fronteira onde é imposta a condição de fronteira de geração radiação.

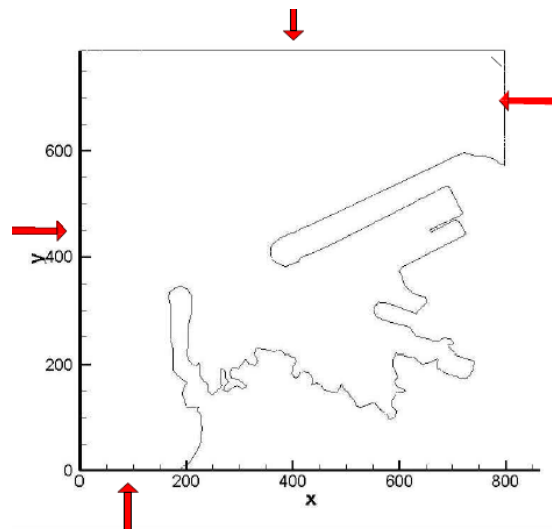


Figura 36 - Direções Geração-Radiação no porto

Quanto aos períodos de onda utilizados para caracterizar a agitação marítima incidente na região em estudo, foi tomado o intervalo compreendido entre 6 e 18 s.

Para a caracterização da agitação marítima na zona junto às estruturas é necessário conhecer coeficientes de reflexão para cada trecho do contorno do domínio de cálculo.

Já a batimetria utilizada no DREAMS foi construída com base nas informações disponibilizadas pelo Portos dos Açores, S.A. A Figura 37 engloba as informações batimétricas fornecidas pelo porto com as batimetrias retiradas do Instituto Hidrográfico.

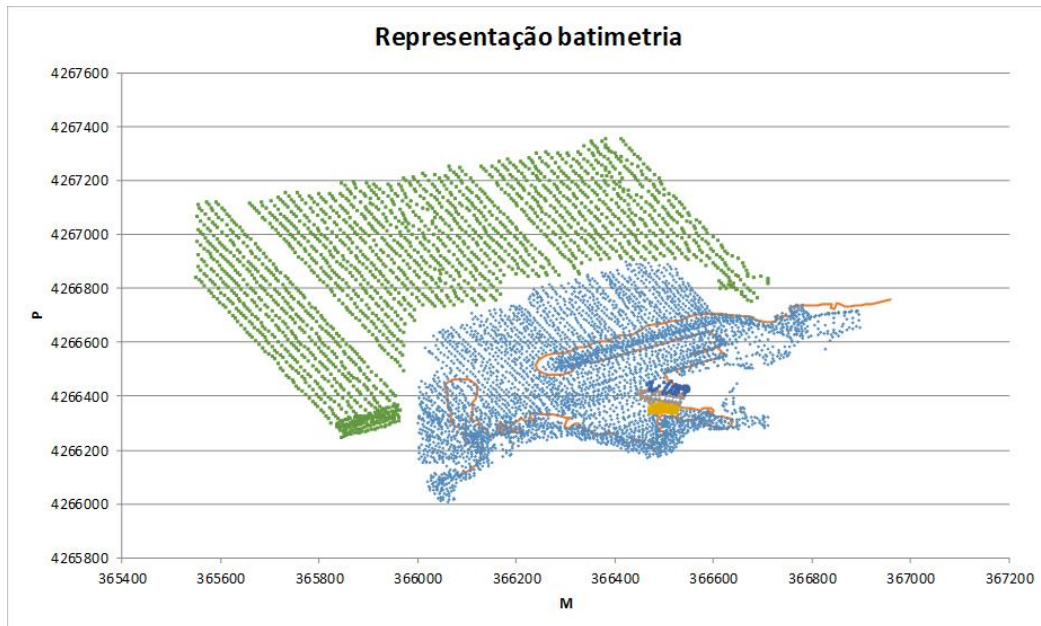


Figura 37 - Representação dos inputs referentes à batimetria

As áreas a verde representam a batimetria “exterior” ao porto, ou seja, aquelas retiradas do Instituto Hidrográfico referente à Zona Central do Açores. Os azuis são as fornecidas pelo Portos dos Açores, tratando-se das batimetrias do “interior” do porto. A laranja indica-se o limite físico do porto, desde o molhe-cais ao molhe Oeste.

A Figura 38 também mostra como varia a batimetria no porto da Madalena.

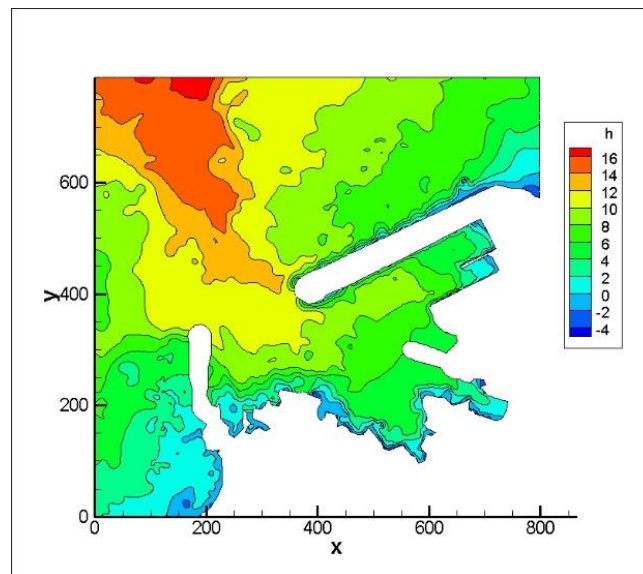


Figura 38 - Variação da batimetria no porto

Relativamente à linha de costa, esta foi dividida em vários trechos de acordo com o tipo de estrutura ou material, pois é necessário definir coeficientes de reflexão.

Quanto aos pontos a estudar, estes foram seleccionados de acordo com a importância do local que representa. A Figura 39 mostra os locais do estudo.

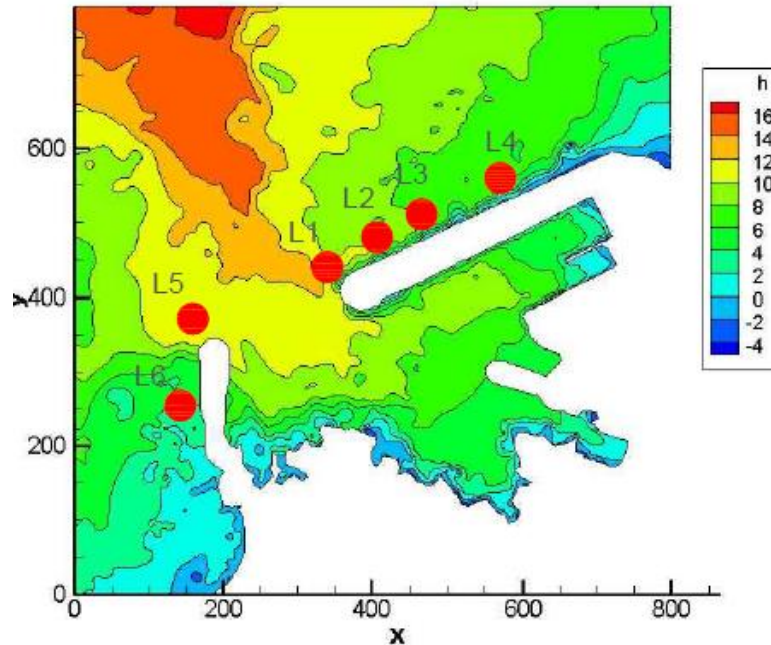


Figura 39 - Representação dos locais a estudar

Das malhas criadas foi possível definir 50 pontos, aproximadamente distanciados entre si por 50 m, que percorrem a totalidade da linha de costa, na Figura 40. Estes são os pontos do DREAMS a partir dos quais foram calculados os parâmetros da agitação marítima. Para o cálculo foram também necessárias batimetrias do interior do porto, condições de geração radiação, coeficientes de reflexão e intervalos de período de onda entre 6 e 18 s.

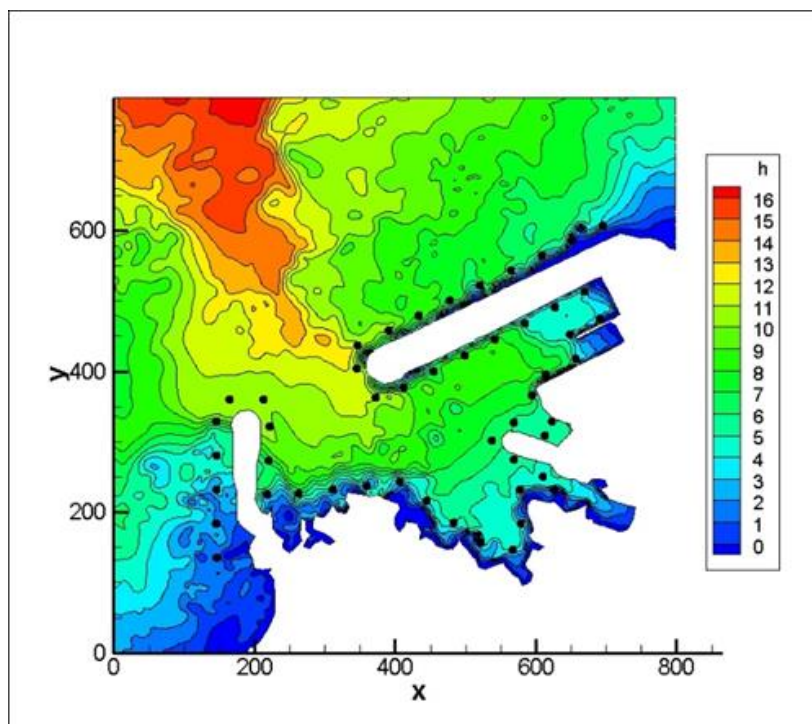


Figura 40 - Representação dos 50 pontos na malha

Destes 50 pontos, selecionaram-se 6 pontos que se julgaram ser representativos para o cálculo do galgamento. A Tabela 13 resume a correspondência entre estes. O primeiro ponto corresponde ao local mais a Norte no molhe-cais sendo o último no corpo do molhe Oeste.

Tabela 13 - Correspondências entre pontos do DREAMS com os locais a estudar

Pontos DREAMS	Pontos considerados	Local
9	L1	Molhe Norte, cabeça
8	L2	Molhe Norte, início da superestrutura
8	L3	Molhe Norte, tronco
4	L4	Molhe Norte, tronco
46	L5	Molhe Oeste, cabeça
48	L6	Molhe Oeste, tronco

4.4.3 Cálculos

Como referido no subcapítulo anterior, foi necessário dividir a linha de costa em vários trechos de acordo com o material. Num total de 20 trechos, a Tabela 14

identifica o tipo de material, começando pela extremidade mais a Norte e terminando no molhe Oeste.

Tabela 14 - Tipos de estruturas ao longo dos trechos

tipo	inclinação (v:h)	obs.
extradorso molhe Norte		enrocamentos
extradorso corpo molhe Norte	3:4	Tetrápodos de 150 kN
extradorso corpo molhe Norte	3:4	Tetrápodos de 240 kN
cabeça molhe Norte exterior	1:2	Cubos antifer 300 kN
cabeça molhe Norte exterior	2:3	Cubos antifer 300 kN
cabeça molhe Norte interior	0,82:1	Cubos antifer 300 kN
enrocamento		$\phi=1\text{m}$, 45 kN
parede vertical		
enrocamento		$\phi=1\text{m}$
parede vertical		
rampa	1:2	
parede vertical		$\phi=1\text{m}$
enrocamento		$\phi=1\text{m}$
parede vertical		
rampa		
enrocamento		
enrocamento molhe Oeste intradorso	2:3	Enrocamento 60 a 90 kN; $\phi=1\text{m}$
cabeça molhe Oeste	2:3	Cubos antifer – 300 kN
extradorso molhe Oeste	2:3	Tetrápodos de 240 kN
enrocamento		Enrocamento 60 a 90 kN; $\phi=1\text{m}$

A metodologia para cálculo dos coeficientes de reflexão é a seguinte:

- Definição de tipos de zonas para as 20 secções descritas como “praia”, “rampa”, ou “talude”, pois cada um destes conceitos obedece a diferentes tipos de cálculo de coeficientes de reflexão. Neste trabalho, como nenhuma das 2 secções se considera como “praia”, ignora-se então o cálculo para tal caso;
- Determinação de coeficientes de reflexão, identificando, para cada secção de “talude”, o tipo de material diretamente em contacto com a agitação marítima, e os parâmetros geométricos número de camadas, N, declive da estrutura, diâmetro do material do manto, altura de água no pé do talude. Este processo realiza-se para ondas de altura unitária e

inclinação do fundo nula. O cálculo do coeficiente é feito através do método de Seeling e Ahrens (1995) apresentado no anexo B.

- Para rampas inclinadas, existentes na linha da costa, o cálculo do coeficiente de reflexão é feito de acordo com Neelamani et al. (1999), para rampas não porosas, em que o coeficiente de reflexão obedece à equação 3:

$$K_r = \begin{cases} k_r^1 = e^{\frac{h \cot g(\theta)}{L} (-0.686 - 3.37 \frac{H}{L} \tanh^3(kh))} & \text{se } \mathfrak{S} \geq 4.0 \\ k_r^1 \frac{\mathfrak{S} - 2.5}{4.0 - 2.5} + k_r^2 \frac{4.0 - \mathfrak{S}}{4.0 - 2.5} & \text{se } 2.5 < \mathfrak{S} < 4.0 \\ k_r^2 = 1 - e^{(-0.06 \mathfrak{S}^{2.4} - 0.5 \frac{H}{h})} & \text{se } \mathfrak{S} \leq 2.5 \end{cases} \quad [3]$$

onde h é a profundidade local, L o comprimento de onda local, θ o ângulo que a rampa faz com a horizontal, H a altura de onda e \mathfrak{S} o número de Iribarren, dado pela equação 4:

$$\mathfrak{S} = \frac{\tan(\theta)}{H/L_0} \quad [4]$$

No anexo B mostram-se a Figura 56 e a Figura 57 referentes ao processo de cálculo dos coeficientes de reflexão para cada secção.

4.4.4 Resultados do modelo DREAMS

Os resultados de DREAMS para o período de 1 de janeiro de 2007 a 30 de dezembro de 2014 foram obtidos para os 6 pontos referidos – ver Gráfico 11, Gráfico 12, Gráfico 13, Gráfico 14 e Gráfico 15.

Gráfico 11 - Altura significativa no quebra-mar Norte

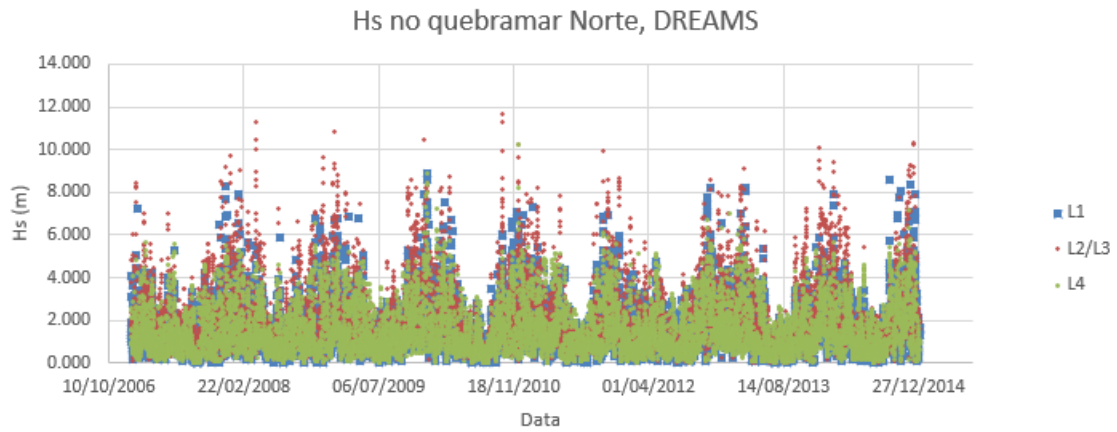


Gráfico 12 - Altura significativa no quebra-mar Oeste

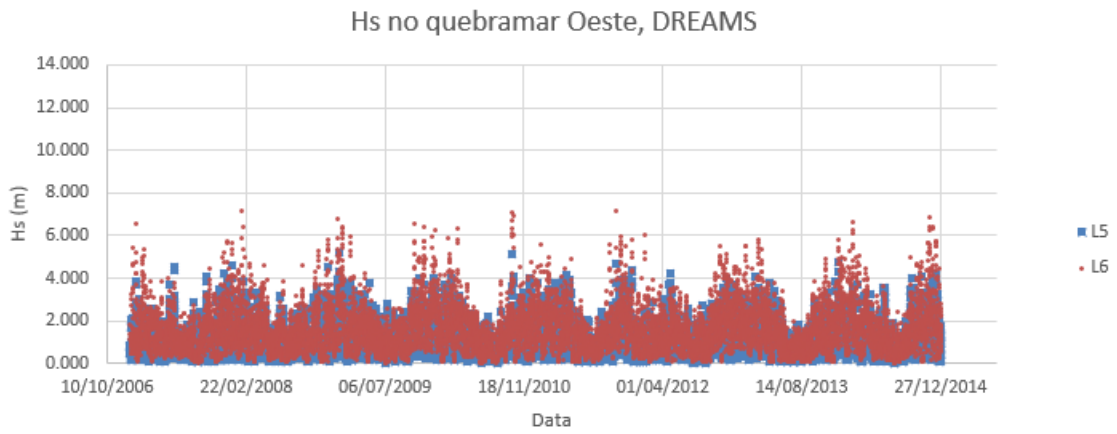


Gráfico 13 - Período médio no porto

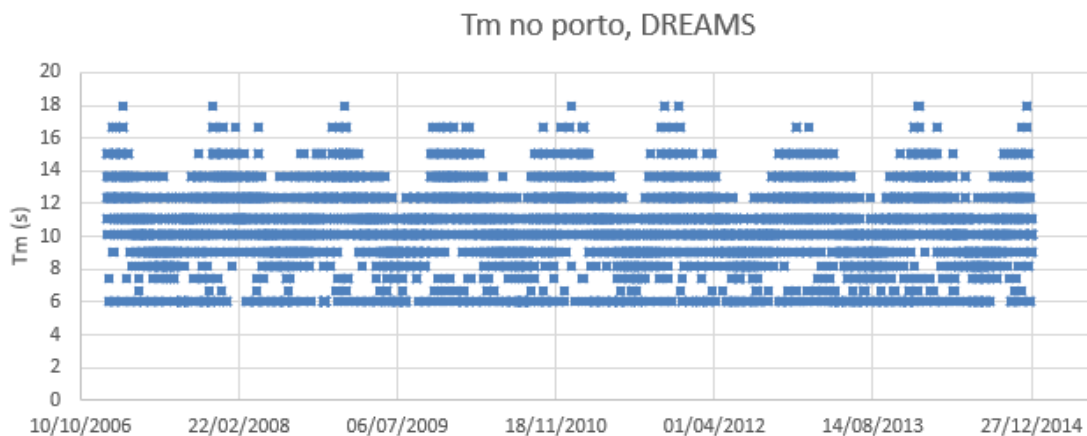


Gráfico 14 - Direção média no quebra-mar Norte

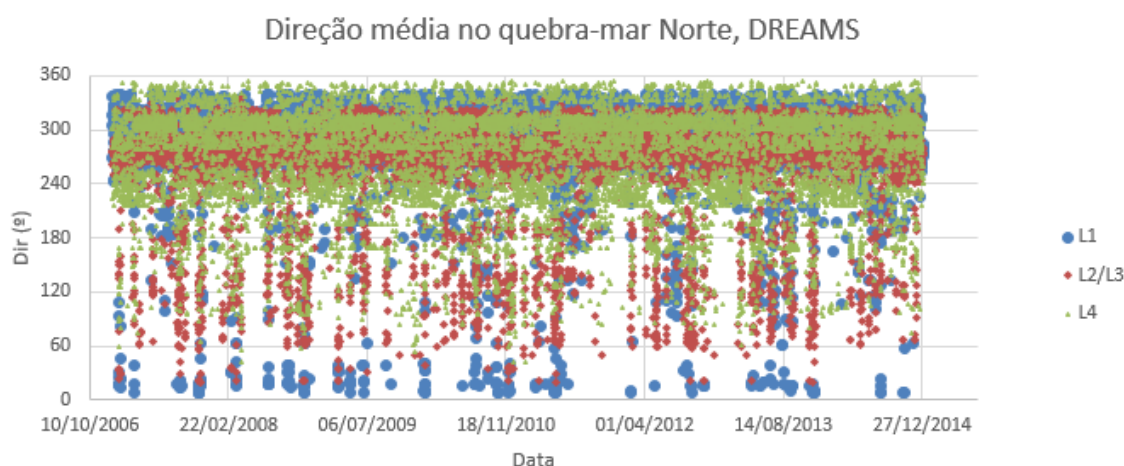
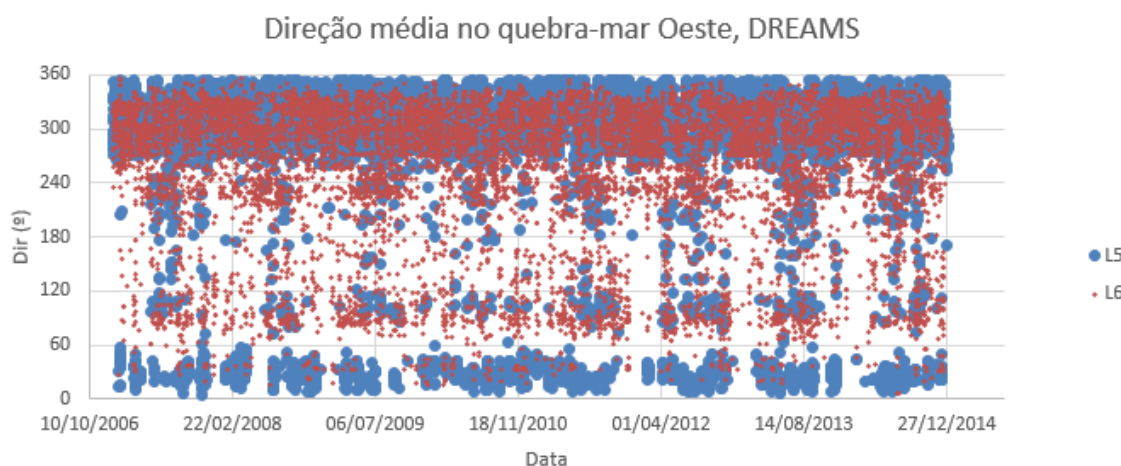


Gráfico 15 - Direção média no quebra-mar Oeste



Da análise dos resultados obtidos, verifica-se que:

- As alturas significativas estimadas com o modelo DREAMS nos pontos correspondentes ao quebra-mar Norte (L1 a L4) são ligeiramente mais elevadas do que as previstas no SWAN. Isto é explicado pelo facto do fundo da zona do porto junto ao quebra-mar Norte ser favorável ao empolamento das ondas.
- Os pontos da cabeça do molhe e do início da estrutura de coroamento no quebra-mar, nomeadamente L1 e L2/L3 apresentam os maiores valores de H_s das séries temporais. Tornam-se então os mais críticos para estudar o galgamento pois são os locais do porto onde ocorrem com mais frequências as tarefas portuárias.

- L4 é o ponto mais protegido, apresentando alturas menores no quebra-mar Norte.
- As direções de agitação no molhe Norte (L1 a L4) não apresentam diferenças em relação às estimadas para o ponto P8 (ponto imediatamente a Norte do porto).
- O molhe Oeste apresenta valores de Hs em L6 ligeiramente superiores aos de L5. Quanto às direções, estas também correspondem ao esperado, mostrando semelhanças comparativamente ao ponto P19.
- Nos pontos L2/L3, registam-se os maiores valores de altura significativa.

5 Determinação do galgamento e avaliação do risco no porto

5.1 Introdução

Como referido, a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 utiliza uma vasta gama de inputs, desde valores geométricos da estrutura a valores característicos de agitação marítima. Os parâmetros geométricos são obtidos da forma já mencionado acima. Quanto aos restantes, os valores da agitação marítima, estes provêm dos dados obtidos pelo SWAN, escolhidos num ponto, transferidos para o DREAMS, e conseqüentemente transcritos para o NN_OVERTOPPING2.

Neste trabalho, dos vários pontos indicados para cálculo no SWAN, apenas se utilizou 1 para posterior análise no DREAMS. O ponto utilizado foi o ponto 6 (Nested1), por apresentar as melhores características geográficas, isto é, o ponto situa-se relativamente perto da costa, mas mesmo assim é altamente caracterizador da agitação marítima incidente. Uma outra razão é a estrutura primária a avaliar ser o quebra-mar-cais, ou melhor, o molhe a Norte, o ponto principal do porto no que toca a abastecimento, manobras de carga e descarga e outras não menos importantes operações portuárias (excetuando a zona de embarque de passageiros, na zona do Terminal portuário).

5.2 Determinação do galgamento

5.2.1 Aplicação da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2

A aplicação da ferramenta NN_OVERTOPPING2 pressupõe o estabelecimento de 15 parâmetros (3 relacionados com a agitação marítima e 12 relacionados com a estrutura) em frente a cada uma das estruturas marítimas (ou secção distintas de cada estrutura) do porto da Madalena do Pico, para as quais se pretende conhecer o caudal médio galgado por unidade de metro linear de estrutura.

Nos pontos seguintes, descreve-se em pormenor a obtenção desses parâmetros.

5.2.2 Cálculo dos parâmetros relacionados com as condições de agitação marítima

O primeiro passo para a execução da ferramenta NN_OVERTOPPING2 é o estabelecimento das condições de agitação marítima (altura, período e direção da onda) em frente à secção da estrutura marítima a analisar, ou em particular em pontos pré-estabelecidos. Estes valores de agitação marítima resultam dos cálculos de propagação efetuados com o modelo numérico DREAMS (capítulo 4.4.), com base na série temporal de condições de agitação marítima definida no ponto P6 (*Nested1*) do modelo SWAN (capítulo 4.3).

Na Figura 40 é possível observar os 50 pontos selecionados na malha de elementos finitos adotada nos cálculos do modelo numérico DREAMS, aonde foram extraídos os valores das condições de agitação marítima necessários à aplicação da ferramenta NN_OVERTOPPING2.

Os resultados do modelo DREAMS nestes 50 pontos são a altura significativa H_s , o período de pico T_p , e a direção média de agitação marítima, θ_m . A partir destes é possível criar os 3 parâmetros necessários para o funcionamento do NN_OVERTOPPING2, nomeadamente:

- $H_{m0,toe}$ – altura de onda significativa espectral no pé da estrutura – equivalente a H_s , este valor é limitado por $H_{S_{m\acute{a}x}}$ através da profundidade (o decréscimo da profundidade afeta a altura da onda, fazendo com que esta rebente antes de atingir a costa (Lourenço, 2016)). Pela equação 5:

$$H_{S_{m\acute{a}x}} = 0.78. (NM + cota batimétrica ponto) \quad [5]$$

$$se \ H_s < H_{S_{m\acute{a}x}} \rightarrow H_{m0,toe} = H_s$$

$$se \ H_s \geq H_{S_{m\acute{a}x}} \rightarrow H_{m0,toe} = H_{S_{m\acute{a}x}}$$

- $T_{m-1, 0\ toe}$ – período médio de onda espectral no pé da estrutura – obtido através da seguinte equação 6:

$$T_{m-1,0,toe} = \frac{T_p}{1.1} \quad [6]$$

- β – ângulo entre a direção de propagação da agitação marítima incidente (θ' , medido em relação ao Norte) e o ângulo normal à estrutura marítima (α' , medido em relação ao Norte). Este ângulo β é calculado de acordo com a Figura 41.

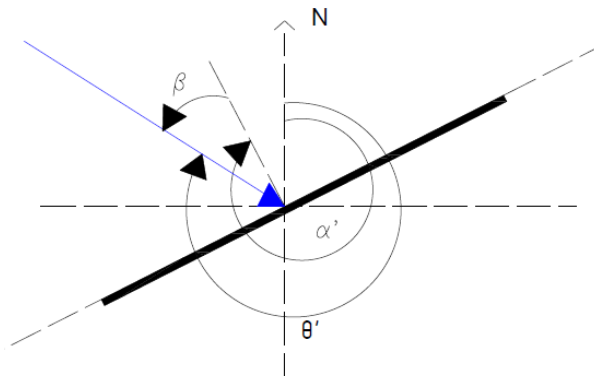


Figura 41 - Esquema de direções de ângulo de onda incidente, ângulo normal à estrutura e ângulo entre a direção de propagação e a normal

NN_OVERTOPPING2 apenas considera ângulos compreendidos entre 0° e 90° , uma vez que apenas se considera o galgamento de ondas incidentes na zona de ação da estrutura marítima. O valor de β pode apenas atingir valores máximos de 90° , sejam estes para a esquerda ou para a direita da normal à estrutura. Assim, o cálculo deste parâmetro é dado pela equação 7:

$$\text{Se } \theta' \leq \alpha' \rightarrow \beta = \alpha' - \theta' \quad [7]$$

$$\text{Se } \theta' > \alpha' \rightarrow \beta = \theta' - \alpha'$$

Idealmente, o conjunto de pontos a analisar envolveria o estudo das secções de todas as zonas do porto e em especial das zonas onde se verifica a atracação dos navios ferry, que permitem o movimento de pessoas e veículos entre a ilha do Faial e a ilha do Pico (zona do novo terminal de *ferrys*). Neste trabalho, apenas se abordam os molhes a Norte e Oeste, pois as informações relativas às restantes zonas do porto não foram disponibilizadas.

Assim, a análise do galgamento das estruturas marítimas foi efetuada apenas nos molhes Oeste e Norte e mais concretamente em 6 pontos (ver Figura 42), designados por L1 a L6. Note-se que esses 6 pontos correspondem a secções de cada uma das estruturas em análise com características geométricas diferentes.

Dos locais 1 a 4, os pontos correspondentes do DREAMS são o ponto 9, 8 (L2 e L3) e 4, respetivamente, situados no molhe Norte, começando na cabeça do molhe e continuando em direção à costa. Os locais 5 e 6 correspondem aos pontos 46 e 49, situados no molhe Oeste, na cabeça do molhe, e na zona dos tetrápodes.

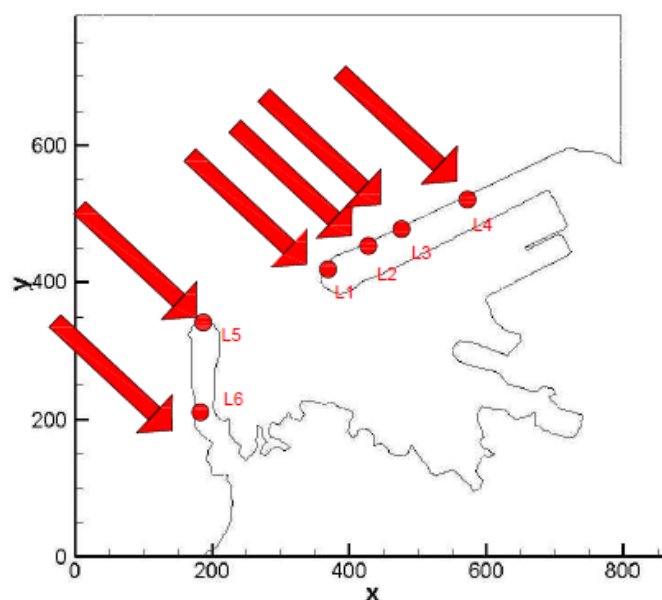


Figura 42 - Esquema geral dos locais para o estudo do galgamento

Apresentam-se nas Figura 43, Figura 44 e Figura 45 fotografias dos pontos L1 a L6 dos molhes.



Figura 43 - Fotografia no molhe Norte nos pontos L1, L2 e L3 (cedido por LNEC)

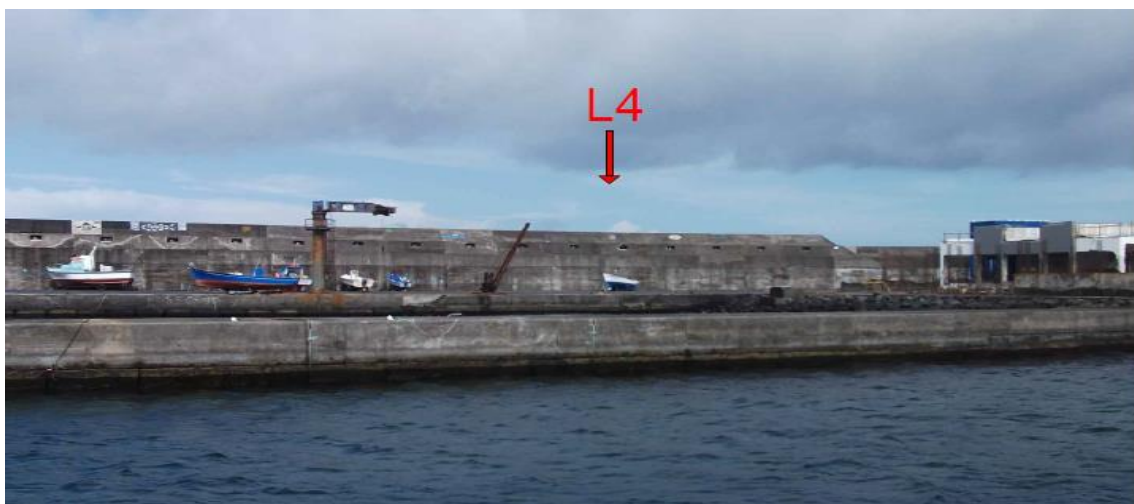


Figura 44 - Fotografia da zona do ponto L4 (cedido por LNEC)



Figura 45 - Fotografia de ambos os molhes com os pontos L1, L5 e L6 (cedido por LNEC)

Apresentam-se na Tabela 15 os ângulos das estruturas com o Norte.

Tabela 15 - Ângulo da estrutura com o Norte

Local	Ângulo da estrutura com o norte (°)
Molhe Norte	243°
Molhe Oeste	0°

5.2.3 Cálculo dos parâmetros relacionados com as características da estrutura

O ponto L1 tem o seguinte perfil, Figura 46:

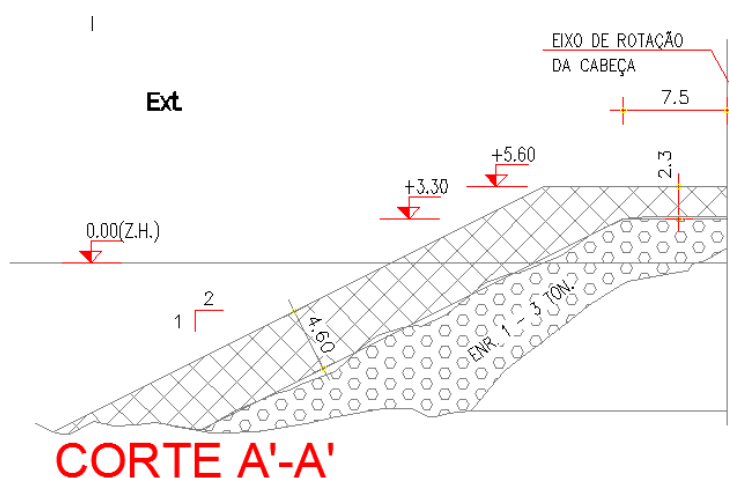


Figura 46 - Ponto L1, Corte A'-A'

No local L1 está situado o farolim do cais, e nesta zona não existe qualquer tipo de estrutura de coroamento. É então esperado que se deem eventos de galgamento de ondas frequentemente, devido às seguintes condições geométricas: a zona da cabeça não possui superestrutura e a largura da berma de coroamento é 13.2 m até ao eixo de rotação do perfil. Além das condições geométricas da estrutura, há que dar conta que na direção Noroeste da cabeça

do molhe se verifica que a batimetria apresenta uma configuração “peculiar”, com cotas batimétricas profundas próximo da costa (à semelhança do canhão da Nazaré), como mostrado na Figura 40. Esta configuração batimétrica proporciona que as ondas ao se propagarem sobre esse fundo, se apresentem com elevadas alturas até muito próximo da costa, o que conduzirá a situações de galgamentos acentuados. Tal afirmação será comprovada no subcapítulo 5.2.4.

Os dados introduzidos no NN_OVERTOPPING2 referentes aos parâmetros geométricos deste tipo de estrutura, que praticamente não varia em toda a extensão dos quebra-mares Norte e Oeste, são relativamente simples, pois em nenhum ponto se encontram bermas submersas.

Seguidamente, o local L2, representado na Figura 47, é o local crítico na avaliação de risco de galgamento. Neste local já ocorreram graves danos na estrutura, afetando operações portuárias e pondo em risco embarcações e a vida dos funcionários do porto. Importa referir que o perfil L2 possui já uma superestrutura, que se estende até ao início do molhe. A cota de coroamento é de 10.15 m (Z.H.), e a largura da berma de coroamento de 8.97 m.

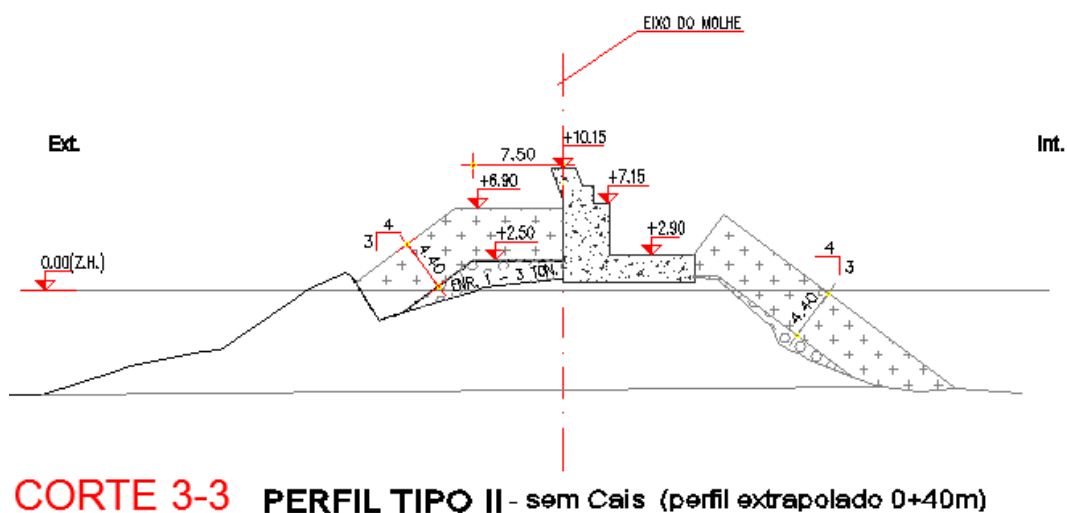
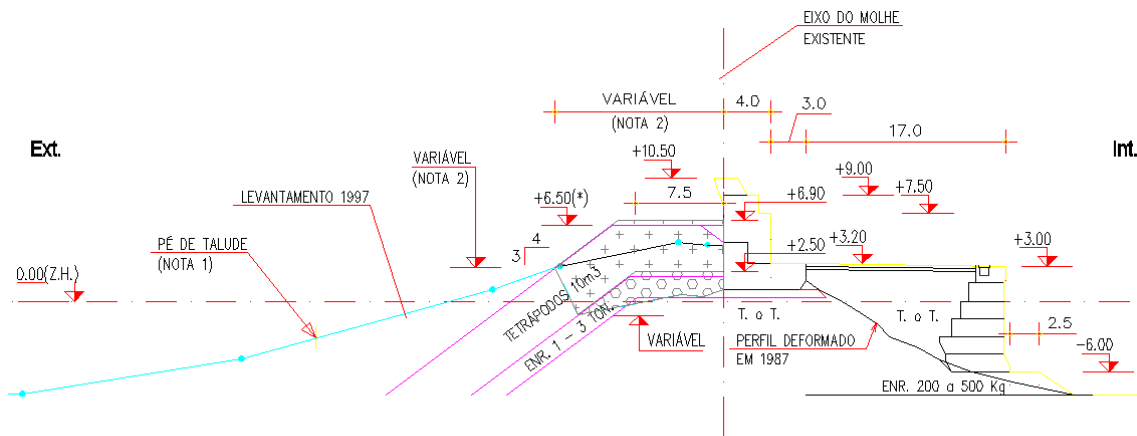


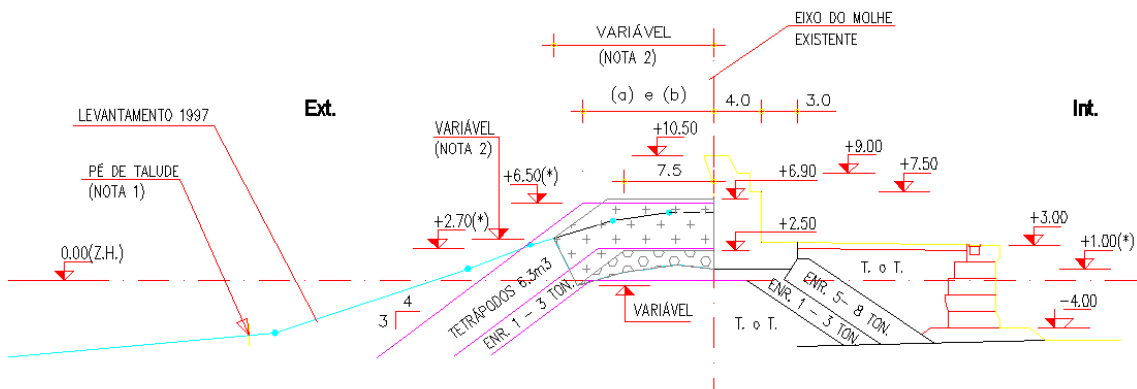
Figura 47 - Ponto L2, Corte 3-3

O Local L3 situa-se 50 m à direita de L2, e tomando como as características da agitação marítima as mesmas que L2, ele apenas se diferencia geometricamente. Estas diferenças geométricas são evidenciadas na altura de água do pé da estrutura, h (m) que vai gradualmente diminuindo de L2 para L4. A cota de coroamento mantém-se em 10.15 m (Z.H.), assim como a largura da berma (ver Figura 48, Figura 49).



CORTE 6-6 (PERFIL TIPO I - 0+100m - cais a -6,0 m ZH)

Figura 48 - Ponto L3 - Corte 6-6



CORTE 11-11 (PT-3 - 0+200m - perfil extrapolado)

Figura 49 - Ponto L4, corte 11-11

Os locais L5 e L6 são referentes ao quebra-mar Oeste (ver Figura 50 e Figura 51). Este tem como principal função amenizar e travar condições marítimas adversas vindas de Oeste e Sudoeste. Contudo, a cabeça do molhe está severamente reforçada por cubos antifere, pois também é alvo de ondas vindas de Norte. Seguidamente, apresentam-se na Figura 50 e na Figura 51 os perfis para L5 e L6.

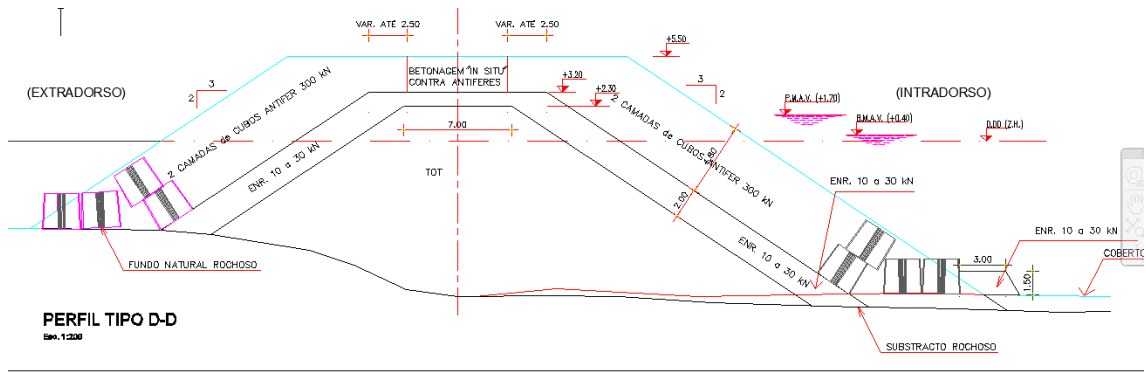


Figura 50 – Ponto L5, corte D-D

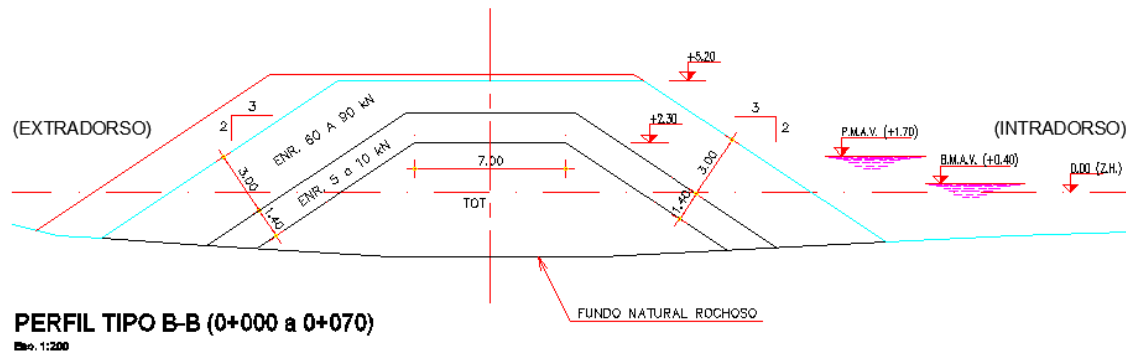


Figura 51 – Ponto L6, corte B-B

Os parâmetros considerados nos diferentes locais L1 a L6 são apresentados nas Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16 - Parâmetros de entrada para o NN_OVERTOPPING2

Local	H (m)	Ht (m)	Bt (m)	γ_f	Cotad	cotau
L1	12.27+NM	12.27	0	0.5	2:1	2:1
L2	8.86+NM	8.86+NM	0	0.4	4:3	4:3
L3	8+NM	8+NM	0	0.4	4:3	4:3
L4	6.5+NM	6.5+NM	0	0.4	4:3	4:3
L5	5.61+NM	5.61+NM	0	0.5	3:2	3:2
L6	1.8+NM	1.8+NM	0	0.5	3:2	3:2

Tabela 17 - Parâmetros de entrada para o NN_OVERTOPPING2 (continuação)

Local	Rc (m)	B (m)	hb (m)	Tanα	Ac (m)	Gc (m)
L1	5.6 - NM	0	0	0	5.6 - NM	13.2
L2	10.15-NM	0	0	0	6.9-NM	8.97
L3	10.5-NM	0	0	0	6.9-NM	9
L4	10.5-NM	0	0	0	6.9-NM	11
L5	5.5-NM	0	0	0	5.5-NM	10.96
L6	5.2-NM	0	0	0	5.2-NM	7.1

5.2.4 Resultados e análise dos casos em estudo

Os resultados da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 para cada secção da estrutura marítima, definida com base em 12 parâmetros geométricos, e considerando as condições de agitação marítimas incidentes nessa secção são os valores de caudais médios galgados em intervalos de confiança por quartis de 2.50%, 5%, 25%, 50 %, 75%, 95% e 97.5%. Consideram-se apenas os quartis 2.50% (ou 97.5%) por serem os mais indicativos para consideração de caudal.

Note-se que a ferramenta neuronal não é adequada para identificar caudais adimensionais muito baixos, nomeadamente valores inferiores a 10^{-6} . No ficheiro de output, o programa indica números de observação relativamente a cada cálculo, compreendidos entre 0 e 7, cada um deles correspondendo a determinadas condições de galgamento ou a sua inexistência. Para os casos de caudais adimensionais inferiores a 10^{-6} , recorre-se à equação 8 para estimar o caudal médio de galgamento.

$$Q = q / \sqrt{gH_s^3} \quad [8]$$

Na Tabela 18 apresenta-se para cada local os valores de altura significativa, H_s , período médio de onda, $T_{m-1,0}$, e direção relativa de onda, β .

Relativamente aos locais analisados para avaliação do galgamento, é esperado que as zonas mais propícias a galgamentos sejam L1 e L2. Tal deve-se às razões já mencionadas no subcapítulo anterior. A Tabela 18 mostra a análise estatística desses valores.

Tabela 18 - Estatística descritiva de agitação marítima para L1 e L2

L1	H_s (m)	$t_{m-1,0}$ (s)	β (°)
Média	1.58	9.73	36.12
Erro-padrão	0.01	0.02	0.20
Mediana	1.27	10.13	29.94
Moda	0.75	10.13	90.00
Desvio-padrão	1.16	2.10	21.63
Variância da amostra	1.35	4.42	467.65
Curtose	3.47	-0.03	-0.44
Assimetria	1.56	-0.01	0.63
Intervalo	8.85	10.91	89.98
Mínimo	0.01	5.45	0.02
Máximo	8.86	16.36	90.00

L2	H_s (m)	$t_{m-1,0}$ (s)	β (°)
Média	2.00	9.73	58.21
Erro-padrão	0.01	0.02	0.19
Mediana	1.54	10.13	59.07
Moda	1.11	10.13	90.00
Desvio-padrão	1.56	2.10	20.52
Variância da amostra	2.44	4.42	420.90
Curtose	2.43	-0.03	-0.41
Assimetria	1.53	-0.01	-0.21
Intervalo	8.46	10.91	89.90
Mínimo	0.01	5.45	0.10
Máximo	8.47	16.36	90.00
Contagem	1168	11684	11684

Pela Tabela 18 acima observa-se o seguinte:

- L2 possui valores de altura de onda com médias superior a L1, mesmo tendo superestrutura. Apesar de L1 apresentar valores máximos de altura de onda superiores, a moda é superior em L2;
- A média de valores da direção de onda é de 36,12 ° em L1 e 58, 21° em L2, comprovando que a configuração do fundo, nomeadamente o

afunilamento perto da zona da costa, leva a uma concentração de energia nesse local, vindo as ondas segundo essa direção.

Tal descrição estatística foi também feita para os restantes pontos L3 e L4, na Tabela 19 .

Tabela 19 - Estatística descritiva da agitação marítima para os pontos L3 e L4

L3	Hs (m)	tm-1,0 (s)	B (°)
Média	1.99	9.73	58.21
Erro-padrão	0.01	0.02	0.19
Mediana	1.54	10.13	59.07
Moda	1.11	10.13	90.00
Desvio-padrão	1.54	2.10	20.52
Variância da amostra	2.37	4.42	420.90
Curtose	1.95	-0.03	-0.41
Assimetria	1.44	-0.01	-0.21
Intervalo	7.90	10.91	89.90
Mínimo	0.01	5.45	0.10
Máximo	7.91	16.36	90.00

L4	Hs (m)	tm-1,0 (s)	β (°)
Média	1.57	9.73	51.80
Erro-padrão	0.01	0.02	0.29
Mediana	1.24	10.13	45.20
Moda	0.46	10.13	90.00
Desvio-padrão	1.18	2.10	31.55
Variância da amostra	1.40	4.42	995.68
Curtose	0.79	-0.03	-1.58
Assimetria	1.10	-0.01	0.07
Intervalo	6.61	10.91	89.94
Mínimo	0.01	5.45	0.06
Máximo	6.61	16.36	90.00
Contagem	11684	11684	11684

Nota-se, logicamente, que a média e o máximo das alturas de onda vão diminuindo à medida que se percorre os pontos. Tal é justificado pela diminuição da altura da água no pé da estrutura e das condições de agitação marítima nos pontos definidos.

A Tabela 20 é referente ao quebra-mar Oeste, L5 e L6.

Tabela 20 - Estatística descritiva da agitação marítima para os pontos L5 e L6

L5	Hs (m)	tm-1,0 (s)	β (°)
Média	1.08	9.73	49.01
Erro-padrão	0.01	0.02	0.25
Mediana	0.88	10.13	50.12
Moda	0.39	10.13	90.00
Desvio-padrão	0.75	2.10	26.94
Variância da amostra	0.56	4.42	725.68
Curtose	1.48	-0.03	-1.15
Assimetria	1.22	-0.01	0.02
Intervalo	5.21	10.91	90.00
Mínimo	0.02	5.45	0.00
Máximo	5.23	16.36	90.00

L6	Hs(m)	tm-1,0(s)	β (°)
Média	1.42	9.73	45.98
Erro-padrão	0.01	0.02	0.25
Mediana	1.39	10.13	44.28
Moda	2.22	10.13	90.00
Desvio-padrão	0.75	2.10	27.11
Variância da amostra	0.56	4.42	735.06
Curtose	-1.06	-0.03	-1.00
Assimetria	0.08	-0.01	0.27
Intervalo	3.08	10.91	90.00
Mínimo	0.02	5.45	0.00
Máximo	3.10	16.36	90.00

Como esperado, os valores máximos de altura significativa de onda nos locais 5 e 6 são bem menores comparativamente ao quebra-mar Norte. Neste trabalho, foi utilizado apenas um ponto de transferência de condições de agitação marítima do SWAN para o DREAMS. Este ponto encontra-se a Noroeste do porto da Madalena, logo a grande maioria das direções da agitação marítima transferidas do DREAMS para o NN_OVERTOPPING2 são de Noroeste, incluindo as ondas incidentes no quebra-mar a Oeste. Quer isto dizer que nos gráficos referentes a direções de onda existem discrepâncias com o que acontece na realidade, porque o quebra-mar a Oeste não é atingido maioritariamente por ondas vindas de Noroeste. As direções de ondas, traduzido pela média dos valores, assumem valores de 49.01° e 45.98°, respetivamente. Isto porque o local de projeção das condições de agitação marítima está a Norte/Noroeste dos quebra-mares, dando informações que não podem ser

consideradas representativas da agitação incidente no quebra-mar, mas, mesmo assim, podem ser consideradas como caracterizadoras.

Não obstante, pode-se considerar que os dados relacionados com alturas de onda, períodos de pico/médios e valores de galgamento são caracterizadores da agitação marítima incidente no molhe. Tal caso deve, evidentemente, ser alvo de um estudo pormenorizado e detalhado, representando a projeção de ondas para o porto através do ponto do SWAN a Oeste deste e acompanhado, sempre que possível, de modelos físicos para complementar modelos de previsão.

Dada a importância e o histórico de eventos de galgamentos, procedeu-se a uma estatística descritiva do quartil 90% das ondas significativas para L2, Tabela 21.

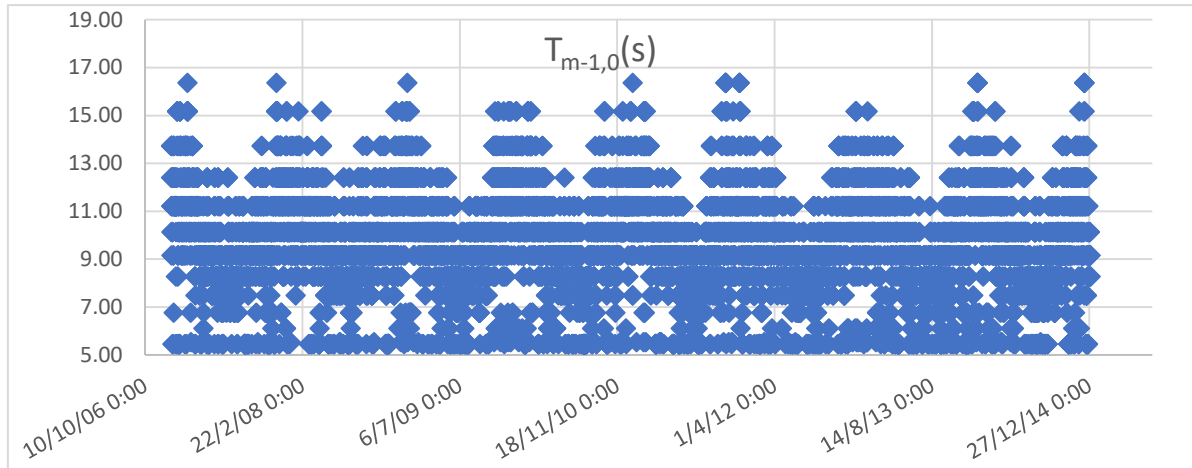
Tabela 21 - Estatística descritiva para o percentil 90% de Hs para L2

L2	Hs (m)
Média	5.63
Erro-padrão	0.03
Mediana	5.30
Moda	5.59
Desvio-padrão	1.17
Variância da amostra	1.37
Curtose	-0.59
Assimetria	0.74
Intervalo	4.30
Mínimo	4.17
Máximo	8.47

É de notar que 90% das ondas incidentes entre o período avaliado têm alturas de onda significativas de valores entre 4.17 e 8.47 m, cuja média é 5.63 m.

Em seguida, apresenta-se o gráfico correspondente ao período médio de onda para as estruturas para a série temporal em estudo, Gráfico 16:

Gráfico 16 - Período médio de agitação (s)



É de notar que a agitação marítima incidente chega a tomar valores aproximados de 16 s, fator que somado a grandes alturas significativas de onda provocam galgamento.

O Gráfico 17 e o Gráfico 18 mostram as alturas significativas em L1 e L2.

Gráfico 17 - Altura significativa para L1

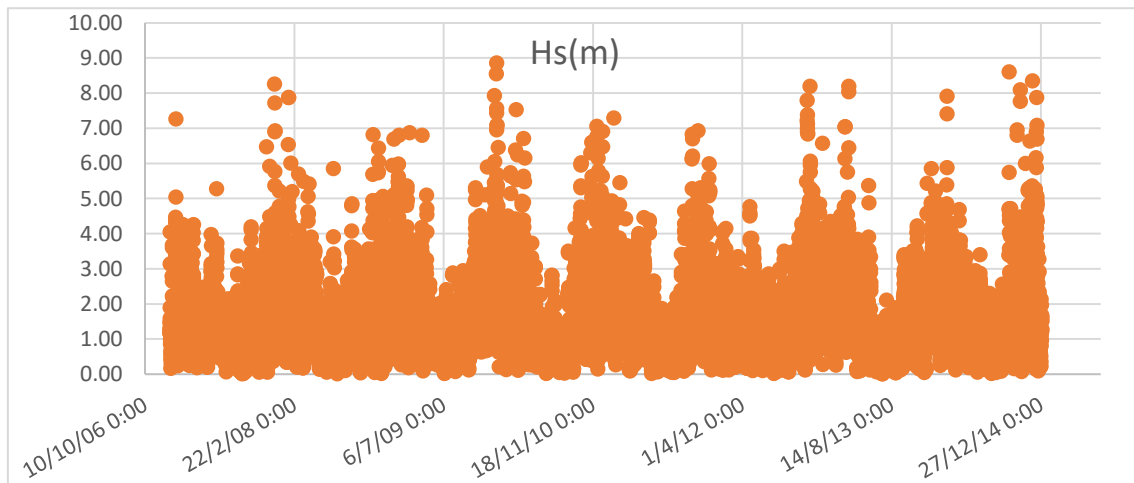
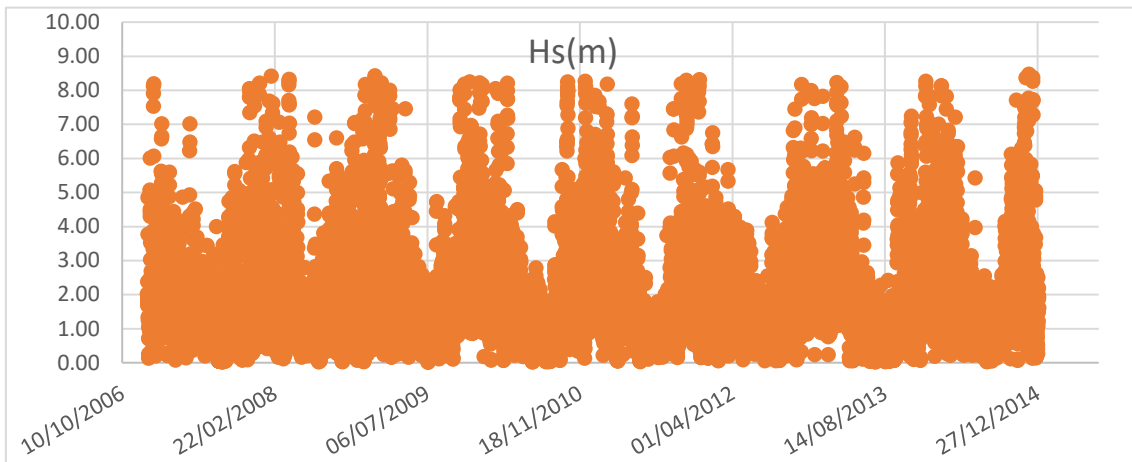


Gráfico 18 - Altura significativa para L2



Sendo a zona do porto mais exposta à agitação marítima, as alturas em L1 e L2 chegam a ultrapassar os 8 m. É de notar que L2 regista maiores valores de Hs de forma mais consistente do que L1.

Apresentam-se em seguida as alturas para L3 e L4, Gráfico 19 e Gráfico 20.

Gráfico 19 - Altura significativa para L3

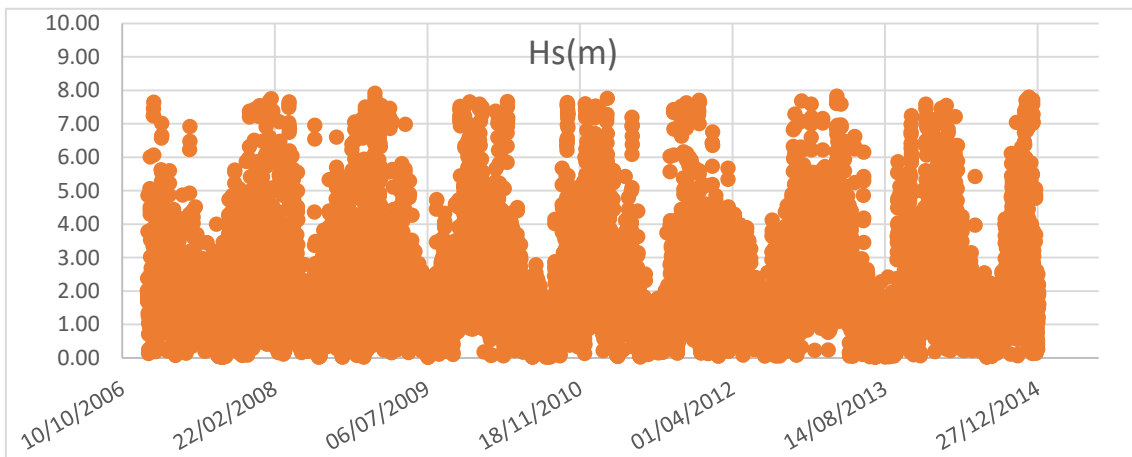
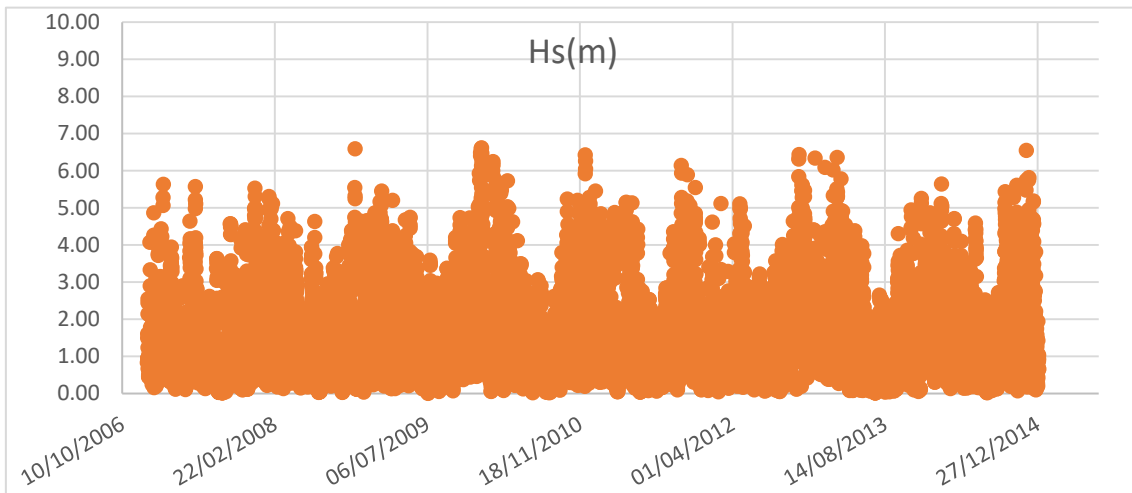


Gráfico 20 - Altura Significativa para L4



L3 toma comportamento semelhante a L2, visto possuir o mesmo índice de agitação marítima, mas diferenciando-se nos aspetos geométricos. Sublinha-se a diminuição gradual das alturas à medida que se avança para terra.

Em seguida apresentam-se o Gráfico 21 e o Gráfico 22 das alturas significativas para L5 e L6 (molhe Oeste).

Gráfico 21 - Alturas significativas para L5

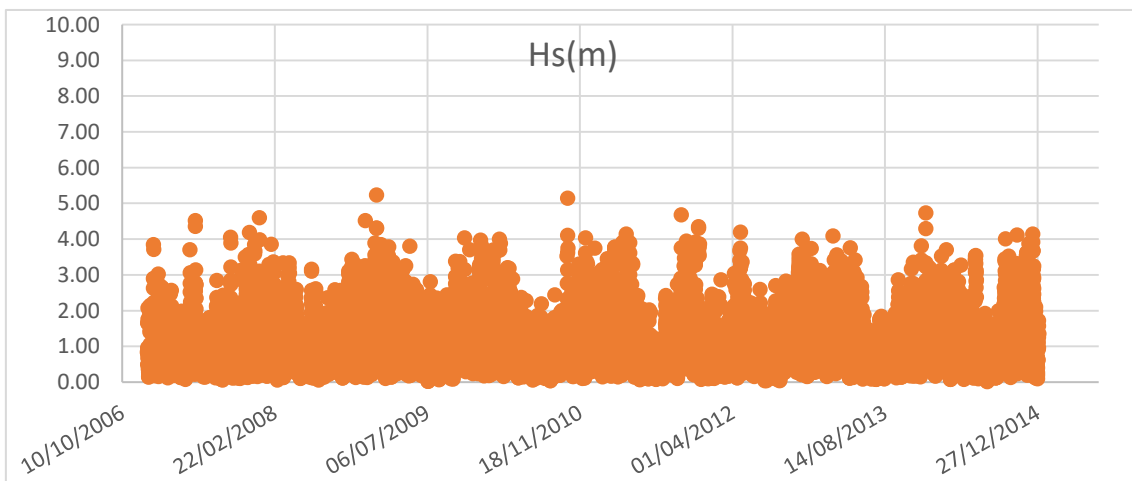
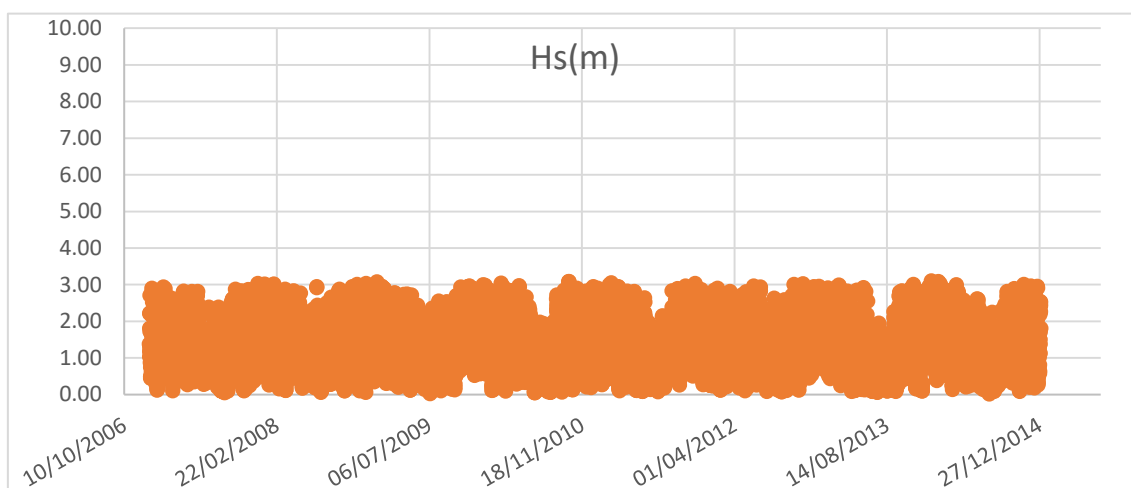


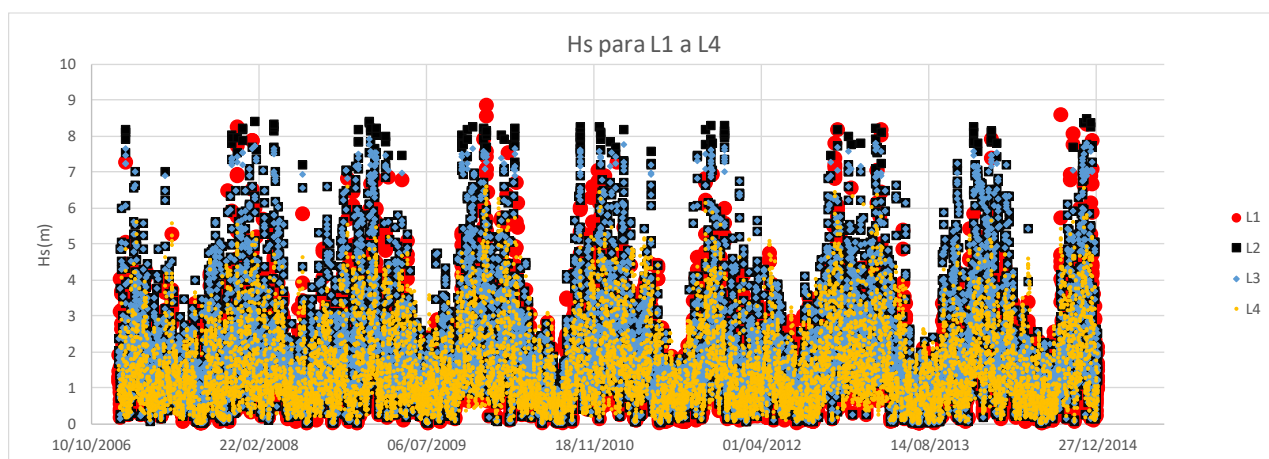
Gráfico 22 - Altura significativa para L6



Comparativamente ao molhe Norte, o molhe Oeste lida com alturas de onda já bem menores. Situando-se na gama de 3 a 5 m de altura, o tronco do quebra-mar (L6) lida com alturas de onda não superiores a 4 m, devido à rebentação da onda nesse local.

Para melhor comparação, elaborou-se o Gráfico 23, que compila as alturas de L1 a L4.

Gráfico 23 - Alturas significativas entre L1 e L4 (molhe Norte)



O Gráfico 24 mostra a relação entre o caudal médio galgado (l/s/m) e um parâmetro que inclui a altura de onda significativa e o período médio, $gHsTm$ ($m^3/s/m$). Aqui apresenta-se para L1 e L2 (ver Gráfico 26); os restantes encontram-se no anexo C. Para avaliar os valores mais elevados, limitou-se inferiormente o valor do q a 100 l/s/m (ver Gráfico 25 e Gráfico 27).

Para L1, tem-se:

Gráfico 24 - Comparação entre gHsTm e q (NN_OVERTOPPING2) para L1

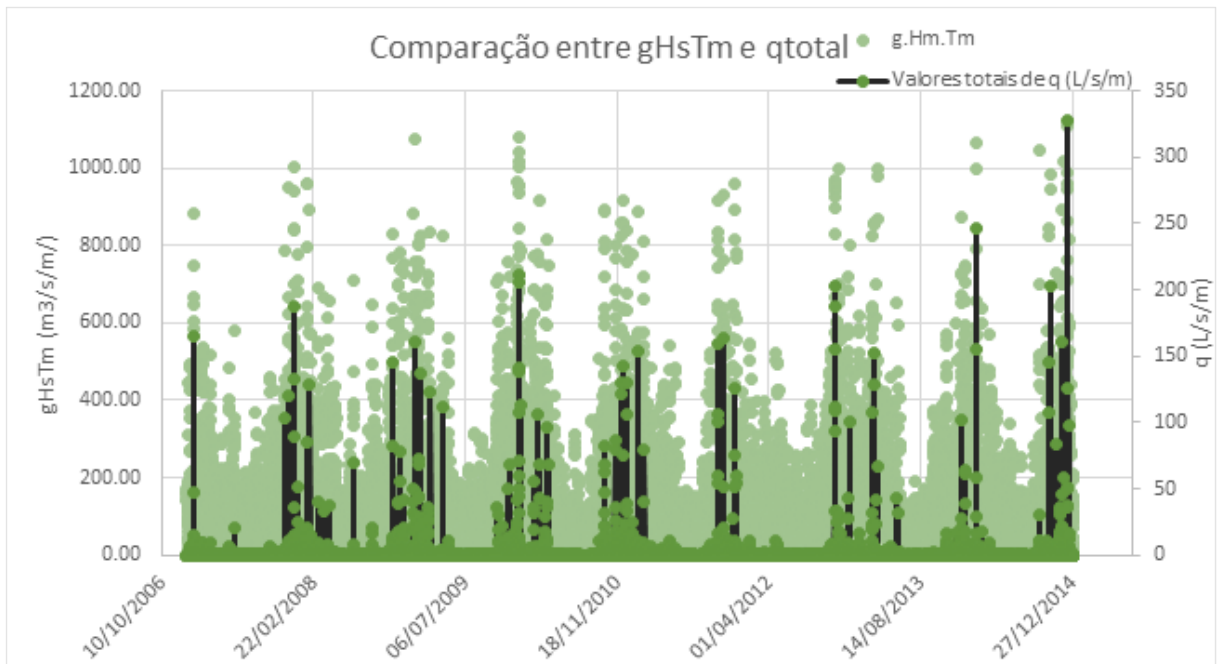


Gráfico 25 - Comparação entre gHsTm e q (q > 100 l/s/m) (NN_OVERTOPPING2) para L1

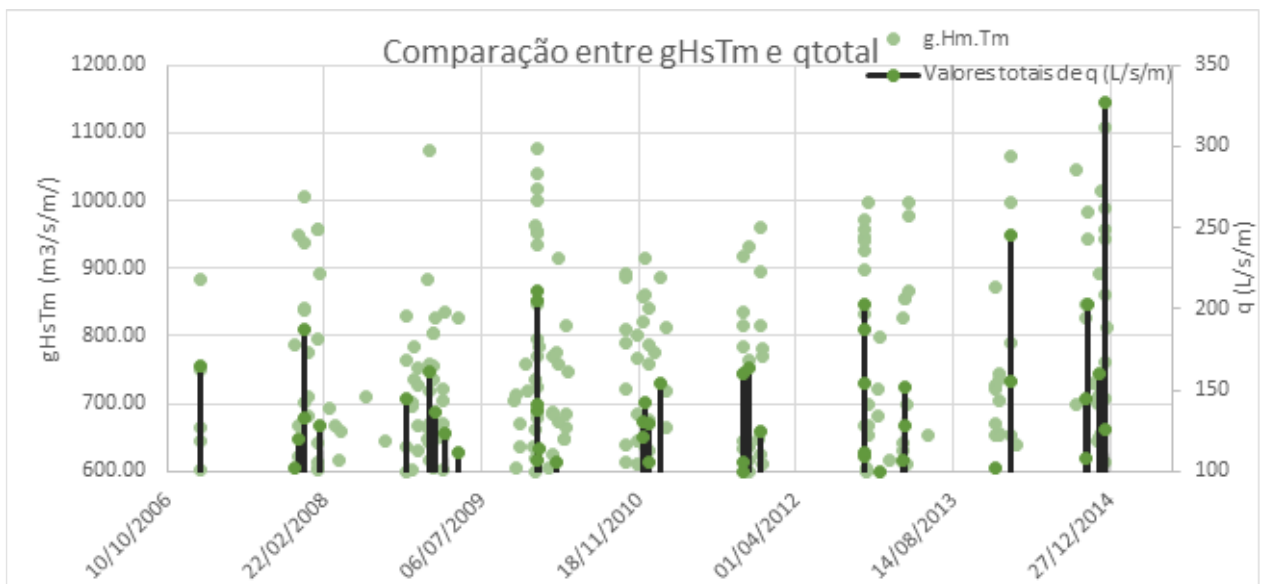


Gráfico 26 - Comparação entre gHsTm e q (NN_OVERTOPPING2) para L2

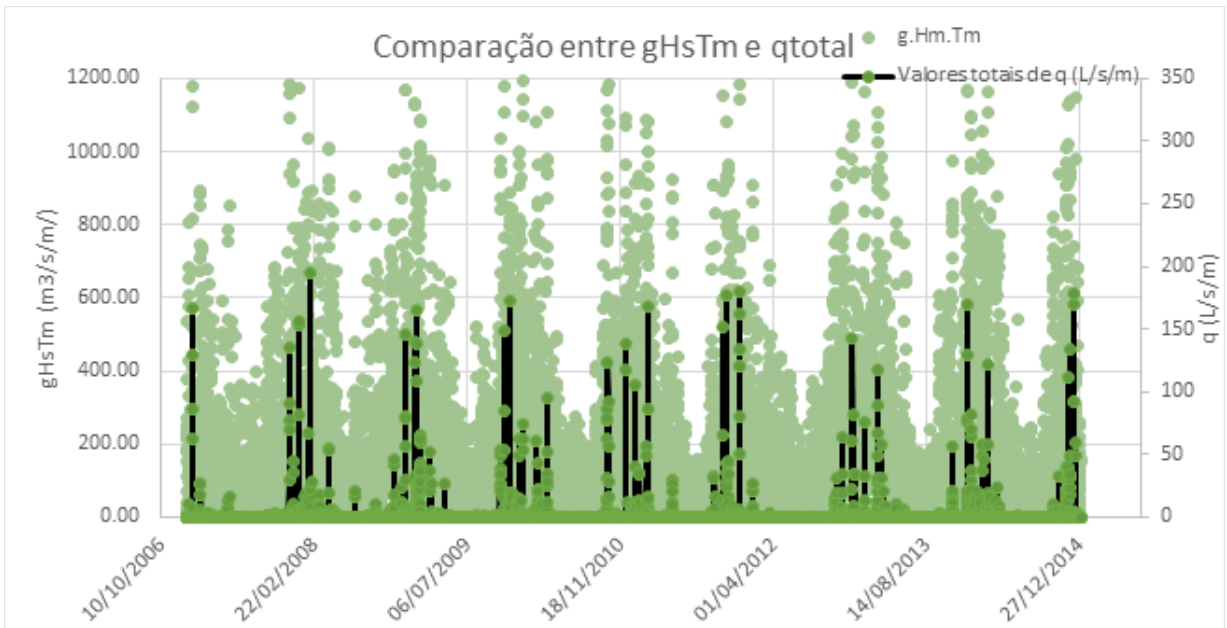
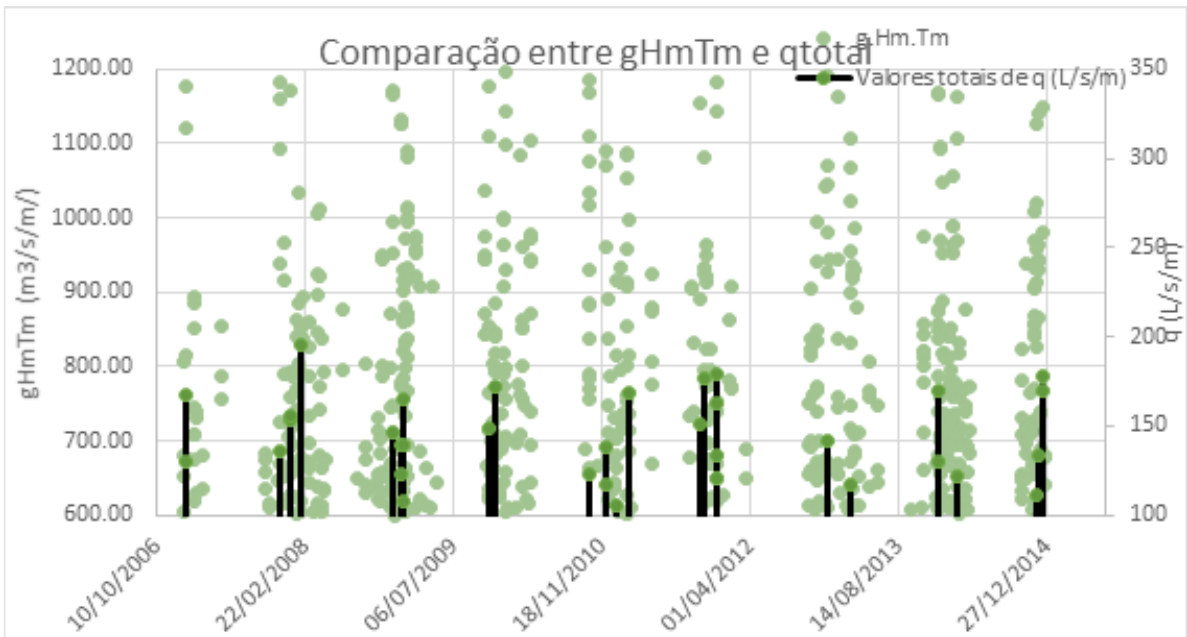


Gráfico 27 - Comparação entre gHsTm e q (q>100 l/s/m) (NN_OVERTOPPING2) para L2



É possível observar em L1 que o caudal médio galgado, q (l/s/m), apresenta valores altíssimos, com o máximo de 327 l/s/m em 11 de dezembro de 2014, 06:00 horas, para um nível de maré de 1.88 m (Z.H.). No ponto L2, o ponto mais importante a ser analisado, têm-se caudais máximos de 194.9 l/s/m. Contudo, a diferença entre valores dos caudais médios de L1 para L2 deve-se principalmente ao facto de L2 possuir superestrutura. L2 assume o valor máximo

para a data de 10 de fevereiro de 2008, 06:00 horas. Observa-se que existiram mais de 30 dias onde $q > 100$ (l/s/m), valor que se estima ser o limite de rutura da estrutura.

O nível médio de maré (NM) no dia de valor máximo de galgamento foi de 1.93 m (Z.H.).

Apresenta-se, na Tabela 22, a análise estatística dos valores de caudais médios galgados calculados no NN_OVERTOPPING2.

Tabela 22 - Estatística descritiva do caudal médio galgado para L1 e L2

Valores totais de q (L/s/m)	
Média	1.60
Erro-padrão	0.10
Mediana	0.00
Mínimo	0.00
Máximo	327.20
Contagem	11684

Valores totais de q (L/s/m)	
Média	1.34
Erro-padrão	0.09
Mediana	0.00
Mínimo	0.00
Máximo	194.90
Contagem	11684

Um aspeto interessante é que, teoricamente, os maiores valores de caudais galgados em estruturas marítimas advêm de ondas aproximadamente perpendiculares à estrutura, ou seja, quando β assume valores perto de 0° . No caso de L2, uma grande porção dos maiores valores de caudais médios galgado apresentam direções relativas de ondas no intervalo de 30° a 60° , aproximadamente, o que leva, ainda mais, a concluir que o afunilamento do fundo do mar e as características do fundo justo à costa fazem, claramente, uma grande diferença em termos da energia da onda.

Quanto a L3, L4 e L6, os resultados dos caudais médios galgados encontram-se no Anexo C.

Contudo, a Tabela 23 mostra a análise estatística para o ponto L5.

Tabela 23 - Estatística descritiva para o ponto L5

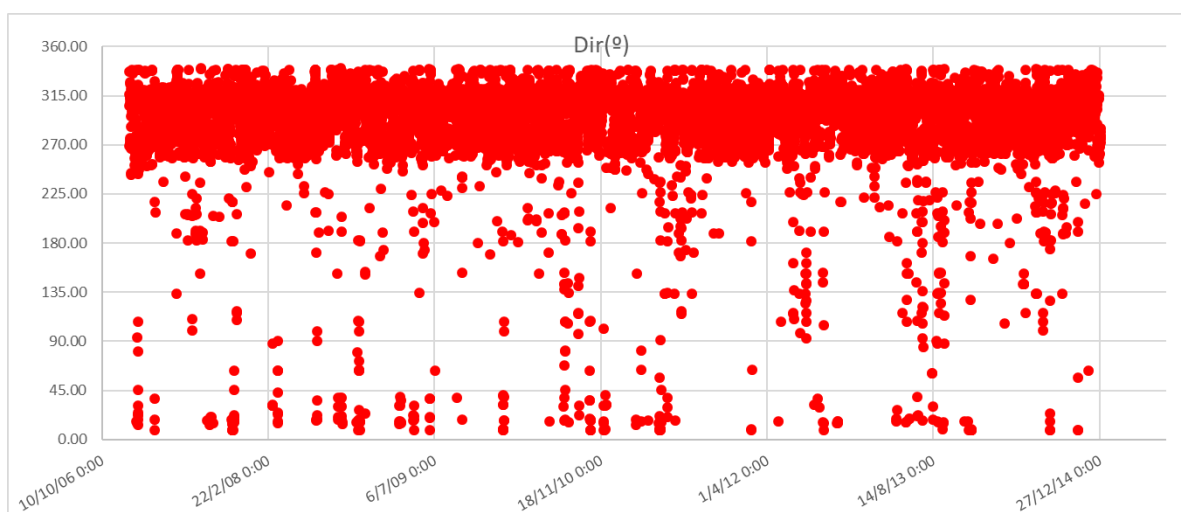
Valores totais de q (L/s/m)	
Média	0.17
Erro-padrão	0.02
Mediana	0.00
Mínimo	0.00
Máximo	114.90
Contagem	11684

Aqui verifica-se o caudal médio galgado de 114.90 l/s/m para a cabeça do molhe Oeste – novamente lembrando que o quebra-mar a Oeste não possui superestrutura

Quanto a direções médias de onda, θ_m , o Gráfico 28, mostra que grande parte da agitação marítima provem de direções compreendidas entre 270° e 360°, como seria de esperar por razões já mencionadas.

Apresenta-se a direção média da incidência de ondas para L1. Para os restantes pontos, os gráficos encontram-se no anexo C.

Gráfico 28 - Direções médias de incidência de onda em L1



Resumidamente, tem-se a seguinte tabela, para o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2014.

Tabela 24 - Resumo de caudais médios de galgamento máximos

	q (L/s/m)					
Ponto	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Média	1.60	1.34	0.90	0.06	0.17	0.44
Desvio-padrão	10.84	9.91	5.95	0.42	1.78	1.50
Máximo	327.20	194.90	110.00	29.46	114.90	49.62
Contagem	11684					

No estudo do galgamento não só é importante saber quais as condições que levaram a índices de agitação marítima e, posteriormente, a eventualidade do galgamento, mas também saber o que aconteceu a todas as estruturas durante os valores máximos de galgamento. Isto é, por exemplo, saber o que aconteceu em L2, L3, etc., quando se deu o valor máximo de 327.20 l/s/m em L1.

No anexo C, Tabela 32, apresentam-se as condições da agitação marítima no momento do galgamento em valores máximos em cada estrutura.

5.3 Avaliação do risco de galgamento

5.3.1 Valores admissíveis

A ferramenta NN_OVERTOPPING2 forneceu, como mostrado no capítulo anterior, caudais médios galgados para a série temporal de 8 anos em estudo. A partir das Tabelas 1 a 4, de Pullen et. al (2007), é possível estabelecer valores de q (l/s/m) máximos admissíveis.

Relativamente ao molhe Norte, decidiu-se o seguinte:

- Para a estrutura marítima assumiu-se a condição de “estrutura de defesa com talude no tardo – sem danos se o coroamento e o tardo estiverem bem protegidos” – $q=100$ l/s/m.
- Para embarcações assumiu-se a condição de “afundamento de barcos pequenos localizadas a 5-10 metros da estrutura” – $q=10$ l/s/m.
- Para equipamentos assumiu-se a condição de “danos em equipamento localizados a 5-10 metros da estrutura” – $q=0.4$ l/s/m.
- Para pessoas assumiu-se a condição de “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” – $q=0.1$ l/s/m. Esta decisão foi feita com o pressuposto de que praticamente em toda a extensão do molhe é dada a autorização de livre circulação aos funcionários da administração do porto, enquanto a circulação do público em geral apenas ocorrerá nos dias em que se reúnem as condições ideais.
- Finalmente, para veículos, assumiu-se a condição de “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” – $q=0.05$ l/s/m. A tomada de decisão desta condição não se deve à velocidade de circulação - porque neste local, veículos não circulam a velocidades médias nem altas, mas sim baixas -, deve-se ao tipo de galgamento e ao facto de que pode acontecer imersão de um veículo situado no cais.

Quanto ao quebra-mar Oeste, este apenas é avaliado a nível de estrutura, embarcações e equipamentos (no caso de reparações/reposição de material); as condições assumidas são as mesmas utilizadas para o molhe Norte (molhe-cais). A Tabela 25 mostra os valores admissíveis de galgamento.

Tabela 25 - Valores máximos admissíveis de caudal médio galgado para os pontos L1 a L6

Locais	Valores máximos admissíveis de caudal médio (L/s/m)				
	Estrutura	Navios	Pessoas	Veículos	Equipamentos
L1	100	10	0.1	0.05	0.4
L2					
L3					
L4				-	
L5				-	
L6				-	

É importante mencionar o porquê de o valor máximo admissível do caudal médio galgado na vertente de pessoas ser o mesmo no molhe Norte e no molhe Oeste (L5 e L6). Embora o molhe Oeste esteja isento de uma berma para deslocamento de pessoas, é possível alcançá-lo. No entanto, avaliações de risco têm que ter sempre em conta o maior número de variáveis, e se estas são diretamente traduzidas pelos caudais máximos admissíveis, então tornou-se apropriado atribuir q máximo admissível para pessoas no molhe Oeste de 0,1 l/s/m ao invés da alternativa nula.

5.3.2 Probabilidade de ocorrência

A probabilidade de ocorrência é ditada pelo quociente entre o número de registos de entre os 11684 que ultrapassam os valores máximos admissíveis definidos por Pullen et al. (2007). A Tabela 26 ilustra os limiares estabelecidos para todos os pontos e para todos os casos abordados.

Tabela 26 - Probabilidades de ocorrência por Pullen et al, 2007

	Ocorrência (%)				
	Estrutura 100 L/s/m	Navios=10 L/s/m	Pessoas=0.1 L/s/m	Veículos= 0.05 L/s/m	Equipamento s=0,4 L/m/s
L1	0.39	2.35	46.32	46.93	26.30
L2	0.30	2.54	17.81	17.82	10.67
L3	0.03	2.31	17.86	17.86	10.51
L4	0.00	0.02	10.11	10.31	3.80
L5	0.01	0.21	25.67	-	7.35
L6	0.00	0.54	42.33	-	20.28

Conseqüentemente, a cada gama de percentagem, é atribuído o grau de ocorrência, na Tabela 27.

Tabela 27 - Graus de ocorrência para os pontos L1 a L6

	Grau de ocorrência				
	Estrutura 100 L/s/m	Navios=10 L/s/m	Pessoas=0.1 L/s/m	Veículos= 0.05 L/s/m	Equipamento s=0,4 L/m/s
L1	1	2	4	4	4
L2	1	2	3	3	3
L3	1	2	3	3	3
L4	1	1	3	3	2
L5	1	1	4	-	2
L6	1	1	4	-	3

5.3.3 Conseqüências da ocorrência de galgamento

O grau de conseqüência é atribuído às demais variáveis e estruturas do porto. Santos (2011) propõe a Tabela 28 como maneira de avaliar o tipo de conseqüência do galgamento, de acordo com o tipo de estrutura, navios, pessoas, veículos e equipamentos. A Tabela 28, mostra os graus atribuídos em cada local estudado:

Tabela 28 - Graus de consequências para os pontos L1 a L6

	Consequências				
	Estrutura	Navios	Pessoas	Veículos	Equipamentos
L1	10	10	10	-	10
L2	25	25	10	25	10
L3	10	25	10	25	10
L4	2	5	1	2	2
L5	5	1	-	-	5
L6	5	1	-	-	5

5.3.4 Grau de risco

O grau de risco é calculado através do máximo dos produtos para cada uma das vertentes, Tabela 29.

Tabela 29 - Grau de risco associado ao grau de ocorrência e consequência para os pontos L1 a L6, e controlo de risco

	Grau de ocorrência	Grau de consequências	Grau de Risco	Descrição	Controlo do risco
L1	4	10	40	Inaceitável	Risco intolerável; implica proceder ao controlo de risco (p. e. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc)
L2	3	25	75	Inaceitável	Risco intolerável; implica proceder ao controlo de risco (p. e. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc)
L3	3	25	75	Inaceitável	Risco intolerável; implica proceder ao controlo de risco (p. e. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc)
L4	3	5	15	Indesejável	Risco que deve se evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é necessário a monitorização
L5	4	5	20	Indesejável	Risco que deve se evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é necessário a monitorização
L6	4	5	20	Indesejável	Risco que deve se evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é necessário a monitorização

Verifica-se que nos pontos L1, L2 e L3, o grau de risco é “Inaceitável”. Trata-se do grau mais alto desta avaliação e o controlo de risco nestas estruturas deveria ser obrigatório. Quer isto dizer que as estruturas marítimas ou operações de intervenção no fundo do mar seriam junto desses pontos, após estudo aprofundado e fundamentado, seriam as soluções para minimizar o risco de galgamento.

Já em L4, o grau de risco baixa para o nível de “Indesejável”. Neste grau, é necessário realizar análises custo-benefício de modo a saber se se torna necessário a realizações de intervenções, seja na estrutura marítima, seja no

fundo ou nos taludes, tendo em conta o balanço económico das operações e o benefício que estas proporcionarão.

L5 e L6 apresentam grau de risco “Indesejável”. Importa lembrar que os graus de probabilidade de ocorrência são altamente condicionados pelos cálculos feitos na ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2, e que os parâmetros de input derivados do DREAMS e do SWAN não são os pontos que melhor representam a agitação marítima incidente.

5.3.5 Mapa de risco

Na Figura 52 é possível observar os níveis de risco associado ao galgamento.

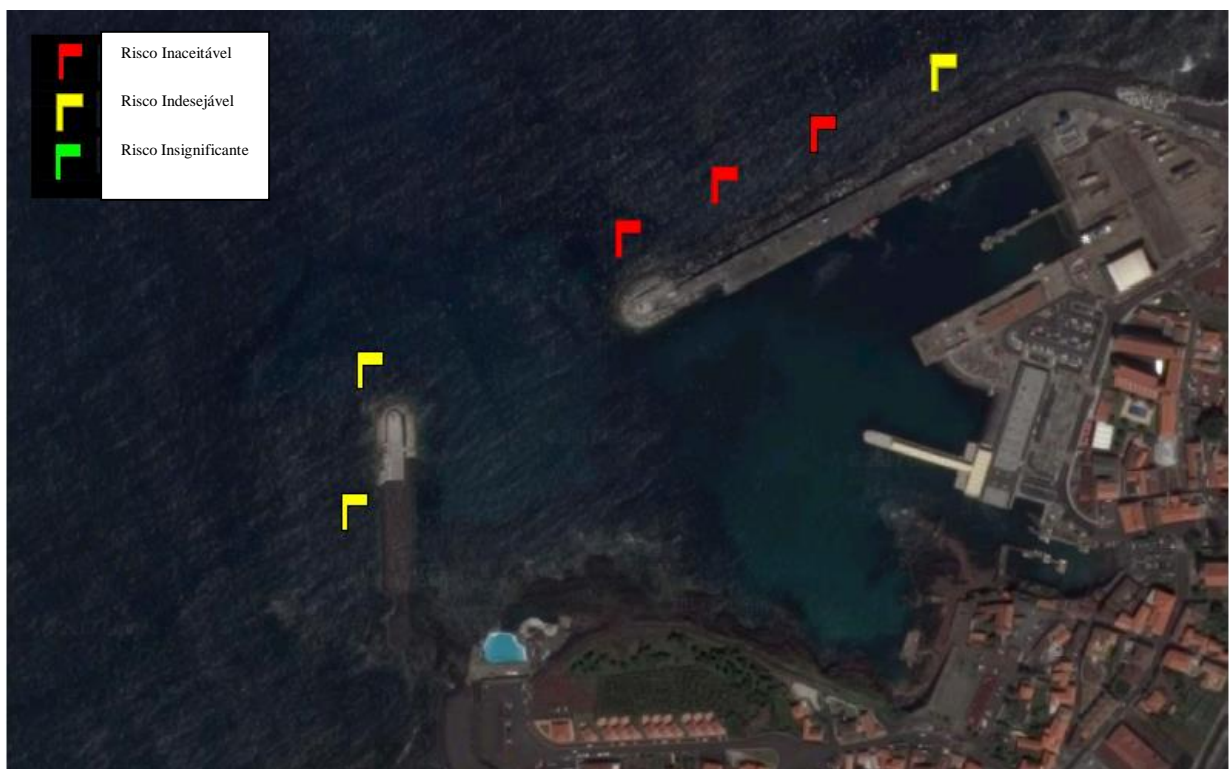


Figura 52 - Representação gráfica do grau de risco de galgamento (adaptado de Google Earth)

Observa-se que o molhe Oeste apresenta Risco indesejável, enquanto que o molhe Norte, excetuando a zona já mais próximo do enraizamento, o risco é inaceitável.

6 Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo avaliar o risco associado ao galgamento de estruturas marítimas do porto do Madalena do Pico, nos Açores.

Este estudo é a primeira abordagem ao porto da Madalena, que praticamente todos os anos é notícia nos meios de comunicação nacional, sempre pelo mesmo motivo: galgamento nas estruturas de abrigo e ocasional rutura das estruturas. Embora este trabalho trate apenas de um período de 8 anos, mesmo assim, foi possível conhecer como se processa a agitação marítima no “canal” entre a ilha do Pico e do Faial, e como é que todo o conjunto de batimetrias e velocidade de vento podem influenciar, de modo significativo, o mar junto do porto.

Através dos modelos de previsão WW III, SWAN e DREAMS foi possível parametrizar a agitação marítima e conhecer a sua propagação desde o largo à vizinhança do porto. Ficou-se a saber que os pontos L1, L2 e L3 são fortemente atingidos por estados de agitação de altura significativa muito elevada. Além disso, mesmo existindo uma superestrutura de L2 até L4, verificou-se que os valores de caudais médios galgados são enormes. Isto deve-se à existência de um afunilamento, atuando de forma semelhante ao tão conhecido canhão da Nazaré, nas batimetrias a Norte da cabeça do molhe-cais, que faz com que as ondas sofram fenómenos de empolamento e consigam ultrapassar a cota de coroamento. O galgamento das estruturas por massas de água desta dimensão causa danos permanentes às estruturas, distúrbios na gestão do porto, coloca a vida de pessoas em perigo e causa danos materiais. E, não menos importante, transmite medo à população em geral, pois não é possível haver confiança nas estruturas de abrigo quando existe galgamento tão frequentemente.

Relativamente ao modelo SWAN, apenas foi utilizado 1 ponto de transferências de parâmetros de agitação marítima para o DREAMS – ponto P6 – pois verificava-se que nos restantes pontos havia forte influência do mar vindo do Norte. Tal é mostrado no histograma do ponto P19, que se encontrava a Oeste

do porto da Madalena, e mesmo sendo alvo de direções vindas de Oeste e Sul, uma forte percentagem vinha de Norte.

Quanto ao DREAMS, a agitação marítima, H_s , T_p e θ_m , foi calculada para os 50 pontos junto à linha costa. Não se estudou o galgamento nas estruturas portuárias dentro do porto, nomeadamente na zona do terminal, na rampa, e na zona da marina, porque não foram fornecidas geometrias descritivas dessas áreas.

O mapa final permite conhecer as zonas passíveis de necessidade de intervenção. Tal como esperado, o quebra-mar Norte (L1 a L4) apresenta níveis elevados de risco de galgamento, o que torna, mais uma vez reforçando, as operações portuárias perigosas e ineficientes.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Quanto a trabalhos futuros, a principal proposta será a de se realizar um novo estudo, mais aprofundado para a zona do porto da Madalena. Neste trabalho utilizou-se uma série temporal de apenas 8 anos, sendo benéfico realizar uma nova avaliação utilizando um período não inferior a 25/30 anos. Além disto, será também altamente aconselhável utilizar mais pontos de transferência de agitação marítima do SWAN para o DREAMS e definir novas zonas de estudo no interior do porto, tendo acesso a planos (eventualmente cedidos pelos Portos do Açores, S.A.).

Além da informação debitada pelos modelos, é também importante abordar novas metodologias de avaliação de risco, nomeadamente na componente das consequências. Como exemplo cita-se a Analytic Hierarquic Process (AHP) que se tem revelado bastante eficiente e precisa noutros trabalhos semelhantes na obtenção de graus de risco para zonas portuárias e circundantes.

Referências bibliográficas

Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). *A third-generation wave model for coastal regions*, Part I, Model description and validation. *J. Geographical Research*, C4, 104, 7649-7666.

Brito, S. (2007). *Estudo do galgamento em estruturas marítimas*. Dissertação de Mestrado: Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa.

Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. A., & Pozueta, B. (2005). *Neural network manual: NN_OVERTOPPING 2*. CLASH: WP8, WL/Delft Hydraulics, Delft.

Fortes, C. J. (1993). *Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos)*. Dissertação de Mestrado em Eng. Mecânica: Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa.

Fortes, C.J.E.M. (2002). *Transformações não lineares de ondas em zonas portuárias. Análise pelo método dos elementos finitos*. Tese de doutoramento, Engenharia Mecânica, IST, Lisboa.

Fortes, C.J.E.M.; Reis, M.T.; Poseiro, P.; Capitão, R.; Santos, J.A.; Pinheiro, L.V.; Rodrigues, A.; Sabino, A.; Rodrigues, M.C.; Raposeiro, P.D.; Ferreira, J.C.; Silva, C.; Simões, A.; Azevedo, E.B. (2014). HIDRALERTA Project – A Flood Forecast and Alert System in Coastal and Port Areas. Proc. IWA World Water Congress & Exhibition, September 21-26th 2014, Lisboa

Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Poseiro, P., Santos, J. A., Capitão, R., Pinheiro, L. & Rodrigues, M. C. (2014). *Desenvolvimentos Recentes Do HIDRALERTA - Sistema De Previsão E Alerta De Inundações Em Zonas Costeiras E Portuárias*. 3as. Jornadas de Engenharia Hidrográfica, 24, 25 e 26 de junho, Instituto Hidrográfico, Lisboa.

Fortes, C. J. E. M., Reis, R., Reis, M. T., Poseiro, P., Craveiro, J., & Santos, J. A. (2014). *Aplicação do sistema HIDRALERTA na avaliação do risco associado ao galgamento no porto da praia da Vitória*. III Congresso Internacional; I Simpósio Ibero-Americano; VIII Encontro Nacional de Riscos, 5-7 de novembro,

Departamento de Geografia da Universidade do Minho. Guimarães, 2014 - Multidimensão e Territórios de Risco. Coimbra

Hidrográfico, I. (2015). Tabelas de Marés, Capítulo 3. Portugal.

Lourenço, I.F (2016). *Avaliação do risco de galgamento sobre estruturas portuárias. Caso de estudo da Praia da Vitória, Açores*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre pelo Instituto Politécnico de Lisboa.

Neves, D. R. C. B., Zózimo, A. C., Pinheiro, L. V. & Fortes, C. J. E. M. *User Interface for cOastal and MARine Modeling*. Wave regime at Sines (2009). Journal of Coastal Research, SI56, 1542-1546

Neves, D. R., Santos, J. A., Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., Simões, A., Azevedo, E. B., & Rodrigues, M. C. (2012). *Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal*. Revista de Gestão Costeira Integrada.

Pereira, D. M. F. (2013). *Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: o caso do porto de Ponta Delgada (Açores, Portugal)*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Universidade da Madeira, Funchal.

Poseiro, P., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Santos, J. A., Simões, A., Rodrigues, C., & Azevedo, E. (2013). *A methodology for overtopping risk assessment in port areas: Application to the Port of Praia da Vitória (Azores, Portugal)*. International Conference on Applied Coastal Research: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H. & Van der Meer, J.W., 2007. *EuroTop: Wave overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment manual*, Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, and Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE.

Raposeiro, P. D., Fortes, C. J., Capitão, R., Reis, M. T., Ferreira, J. C., Pereira, M. T. & Guerreiro, J. (2013). *Preliminary phases of the HIDRALERTA system: Assessment of the flood levels at S. João da Caparica beach, Portugal*. Journal of Coastal Research, SI 65, pp. 808-813.

Raposeiro, P.D., Fortes, C. J. E. M., Reis, R., Reis, M. T. & Ferreira, J. C. (2010). *Development of a methodology to evaluate the flood risk at the coastal zone In Geographic Technologies Applied to Marine Spatial Planning and Integrated Coastal Zone Management*, Calado, H. e Gil, A. (Eds.), Universidade dos Açores – Centro de Informação Geográfica e Planeamento Territorial, Agosto, pp. 129-137.

Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., Santos, J. A., Neves, D. & Vieira, A. S. (2011). *Previsão dos galgamentos na baía da Praia da Vitória para avaliação de risco e alerta*. VI Congresso Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras, Zonas Costeiras, Ilha da Boa Vista, Cabo Verde, 4 a 8 de abril.

Rocha, T.S., Fortes C.J.E.M., Reis, M.T., Santos, J.A., Neves, D., Portela, L. & Pinto, F.T. (2013). *Avaliação comparativa do risco de galgamentos na Praia da Vitória, Terceira, Açores*. Proc. V SEMENGO, Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 7 a 9 de novembro, Rio Grande, Brasil (CD-Rom).

Rocha, T. (2012). *Avaliação do Galgamento de Estruturas Portuárias – Aplicação ao Porto da Praia da Vitória, Açores*. Dissertação de Mestrado em Eng. Civil: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto.

Rodrigues, J. R. (2014). *Avaliação do risco e aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) na avaliação das consequências de galgamento em zonas costeiras e portuárias*. Dissertação de mestrado em Eng. Civil: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto (FEUP), Porto.

Santos, J. A., Reis, M. T., Neves, D., Fortes, C. J. E. M., Rodrigues, S., Azevedo, E., Rodrigues, M., Simões A., Ramalheira, J. & Raposeiro, P. (2011). *Aplicação de uma metodologia para avaliação do risco para a navegação e galgamentos no porto de Praia da Vitória*, in 7.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/ PIANC, Porto.

Seelig, W.N. & Ahrens, J.P. (1995) - *Wave reflection and energy dissipation by coastal structures. Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures*, N. Kobayashi and A. Demirbilek, eds., ASCE, New York, N.Y., 28-51.

Silva, D. M. F. (2012). *Avaliação do galgamento de estruturas portuárias. Dissertação de Mestrado* (Engenharia Civil), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Silva, D. M. F., Ferreira, J.C., Martinho, M., Sabino, A., Rodrigues, A., Poseiro, P. & Silva, C. (2012). *Aplicação do sistema Hidralerta na avaliação do risco associado ao galgamento no porto da Praia da Vitória*. LNEC, FCT UN Lisboa., Lisboa.

SWAN Team (2008). SWAN technical documentation. Delft University of Technology: The Netherlands.

Tolman, H. L., (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. NOAA/NCEP, U.S. Department.

Tolman, H.L., (1999), *User Manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. NOAA/NCEP, U.S. Department.

Tolman, H. L., (1997): *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15*. NOAA/NCEP, U.S. Department.

Van Gent, M., van den Boogaard, H, Pozueta, B. & Medina, J., 2007. *Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures*.

Sites Web:

<http://hidrografico.pt> – consultado em março de 2015

<http://portodamadalena.blogspot.com> – consultado em abril de 2015

<http://www.azores-islands.info/p/places/pico/pico.html> - consultado em março de 2015

http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=censos2011_apresentacao&xpid=CENSOS – consultado em março de 2015

www.kennisbank-waterbouw.nl/ec/ec59.htm - consultado a abril de 2017

www.skyscrapercity.com – consultado a abril de 2015

Anexo

Anexo A – Resultado no modelo SWAN

Anexo B – Ferramentas de cálculo prévio para NN_OVERTOPPING2

Anexo C – Resultados modelo NN_OVERTOPPING2

Anexo A – Resultado no modelo SWAN

Date	Time	Hs	L	Tr	Dir.	Spr.	fp	p_dir			
p_spr	h	m	s	(m)	(m)	(s)	(d.N)	(deg)	(Hz)	(d.N)	
20130101	1	0	0	3.20	10	10	319.00	10	12.40	319.00	1.11
20130101	6	0	0	3.14	10	10	314.00	10	11.60	314.00	1.88
20130101	12	0	0	3.19	10	10	292.00	10	10.50	292.00	0.99
20130101	18	0	0	3.39	10	10	258.00	10	9.70	258.00	1.80
20130102	1	0	0	3.48	10	10	245.00	10	9.80	245.00	1.02
20130102	6	0	0	3.53	10	10	245.00	10	10.10	245.00	1.96
20130102	12	0	0	3.58	10	10	245.00	10	10.30	245.00	0.94
20130102	18	0	0	4.04	10	10	233.00	10	9.90	233.00	1.85
20130103	1	0	0	4.07	10	10	228.00	10	9.90	228.00	0.99
20130103	6	0	0	4.01	10	10	226.00	10	9.80	226.00	1.98
20130103	12	0	0	4.03	10	10	221.00	10	9.60	221.00	0.96
20130103	18	0	0	4.41	10	10	212.00	10	9.20	212.00	1.83
20130104	1	0	0	4.76	10	10	210.00	10	9.30	210.00	1.04
20130104	6	0	0	5.28	10	10	210.00	10	9.60	210.00	1.91
20130104	12	0	0	4.13	10	10	230.00	10	10.40	230.00	1.06
20130104	18	0	0	3.53	10	10	245.00	10	10.70	245.00	1.73
20130105	1	0	0	3.24	10	10	257.00	10	10.90	257.00	1.17
20130105	6	0	0	3.16	10	10	262.00	10	10.70	262.00	1.75

Figura 53 - Ouput-tipo de parâmetros da agitação marítima no SWAN para o mês de teste

Date	Time	Hs	L	Tr	Dir.	Spr.	fp	p_dir			
p_spr	h	m	s	(m)	(m)	(s)	(d.N)	(deg)	(Hz)	(d.N)	
20070101	1	0	0	3.81	10	10	295.00	10	12.20	295.00	2.00
20070101	6	0	0	3.66	10	10	297.00	10	12.20	297.00	0.96
20070101	12	0	0	3.67	10	10	297.00	10	11.80	297.00	1.94
20070101	18	0	0	3.52	10	10	288.00	10	10.80	288.00	0.95
20070102	1	0	0	3.10	10	10	269.00	10	9.50	269.00	1.98
20070102	6	0	0	3.56	10	10	238.00	10	9.40	238.00	1.03
20070102	12	0	0	4.10	10	10	230.00	10	9.70	230.00	1.83
20070102	18	0	0	4.52	10	10	237.00	10	10.30	237.00	1.05
20070103	1	0	0	4.14	10	10	265.00	10	12.00	265.00	1.86
20070103	6	0	0	4.09	10	10	279.00	10	12.70	279.00	1.19
20070103	12	0	0	3.96	10	10	286.00	10	12.80	286.00	1.64
20070103	18	0	0	3.66	10	10	290.00	10	12.50	290.00	1.21
20070104	1	0	0	3.25	10	10	293.00	10	12.00	293.00	1.66
20070104	6	0	0	2.81	10	10	295.00	10	11.30	295.00	1.40
20070104	12	0	0	2.46	10	10	293.00	10	10.40	293.00	1.42
20070104	18	0	0	2.22	10	10	287.00	10	9.80	287.00	1.40
20070105	1	0	0	2.13	10	10	285.00	10	9.80	285.00	1.45
20070105	6	0	0	2.35	10	10	284.00	10	10.10	284.00	1.61
20070105	12	0	0	2.64	10	10	284.00	10	10.10	284.00	1.21
20070105	18	0	0	2.76	10	10	295.00	10	10.60	295.00	1.57
20070106	1	0	0	2.76	10	10	302.00	10	11.10	302.00	1.25
20070106	6	0	0	2.65	10	10	303.00	10	11.40	303.00	1.80

Figura 54 - Exemplo ficheiro de vetores de vento (Vx, Vy) e output-tipo de parâmetros da agitação marítima no SWAN para os 8 anos

Non Stationary Conditions		Currents Conditions		Output Specifications		Results	
Project Identification	Computational Grid	Bathymetry Grid	Spectrum Resolution	Physical Processes	Stationary Wave Conditions	Stationary Wind Conditions	

Wave conditions for single runs or for regular transfer matrices

From: To: Step:

HS (m)

TP (s)

Direction (Degrees) referred to the North

Tide level (m)

ROTATION

Read wave conditions from a file (Date, time, HS, ..., TP, TETA for a series of stationary calculations):

Boundary conditions

Choose boundaries of main grid to apply wave conditions:

North
 West East
 South

* Note that all boundaries will have the same wave conditions

Wave conditions for stationary mode:

Read wave conditions from a file (Date, time, HS, ..., TP, TETA for a series of stationary calculations):

C:\Users\jofes\Documents\Estágios\João Sengo\SWAN\Central_Pico_07_08\Agitacao\ECM*

Read wave spectrum from a file (for one stationary calculation):

Read Tidal conditions from a file (Date, time, HS, ..., TP, TETA for a series of stationary calculations):

Figura 55 - Exemplo de interface de ondas estacionárias no SWAN

Gráfico 29 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2007

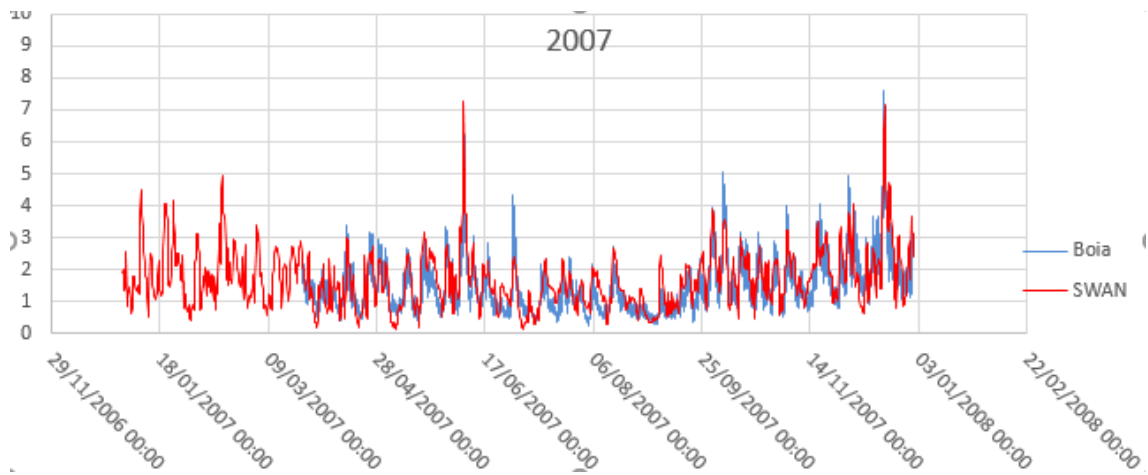


Gráfico 30 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2008

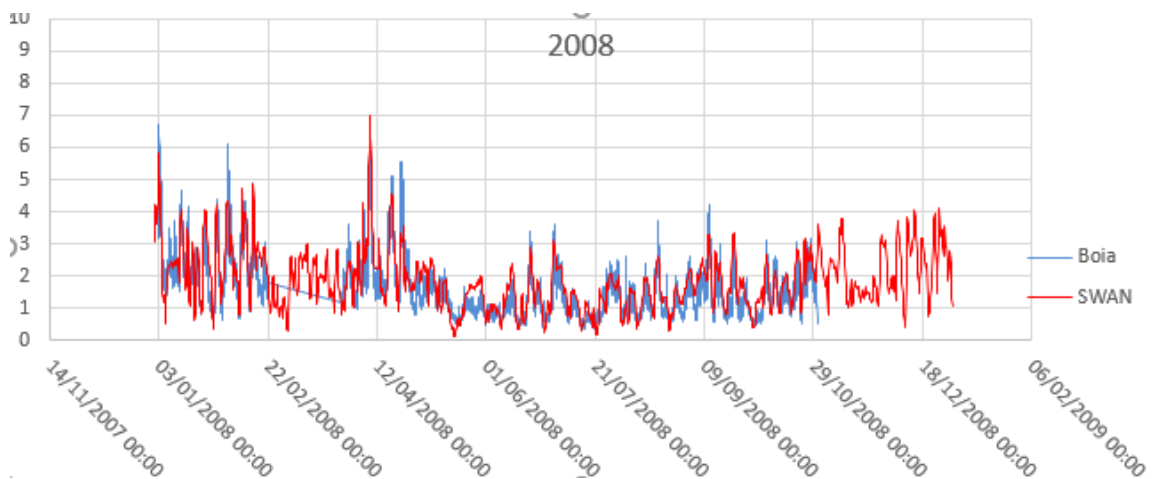


Gráfico 31 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2010

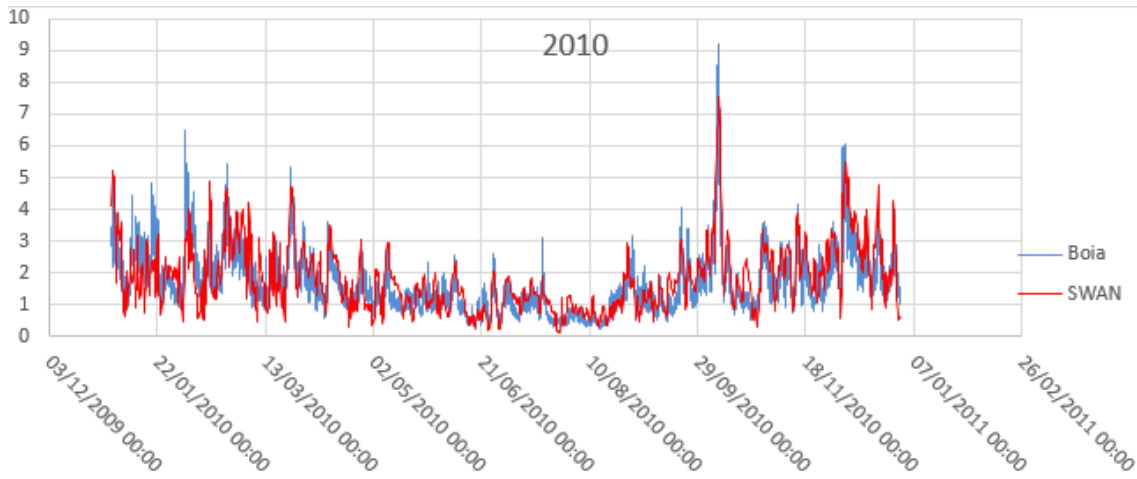


Gráfico 32 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2011

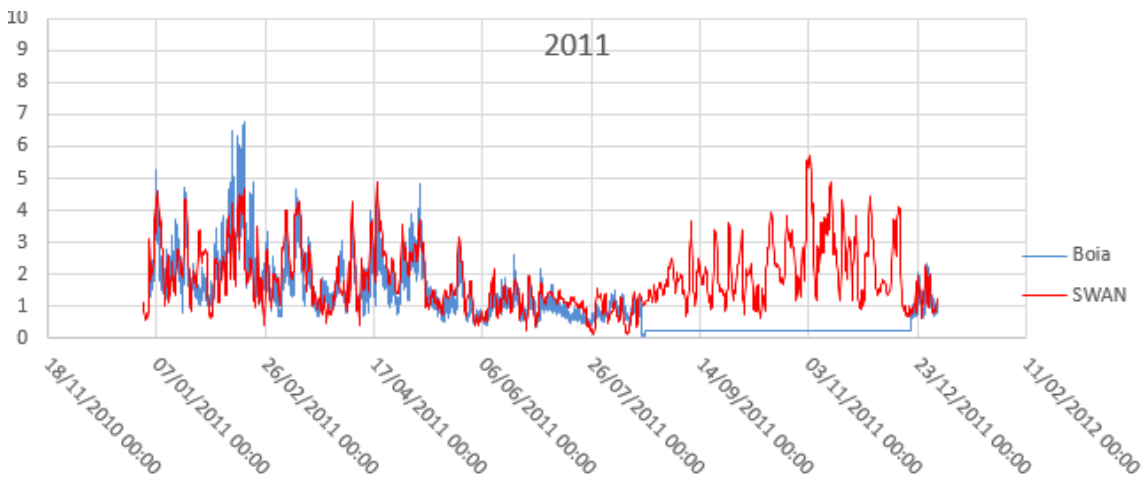


Gráfico 33 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2012

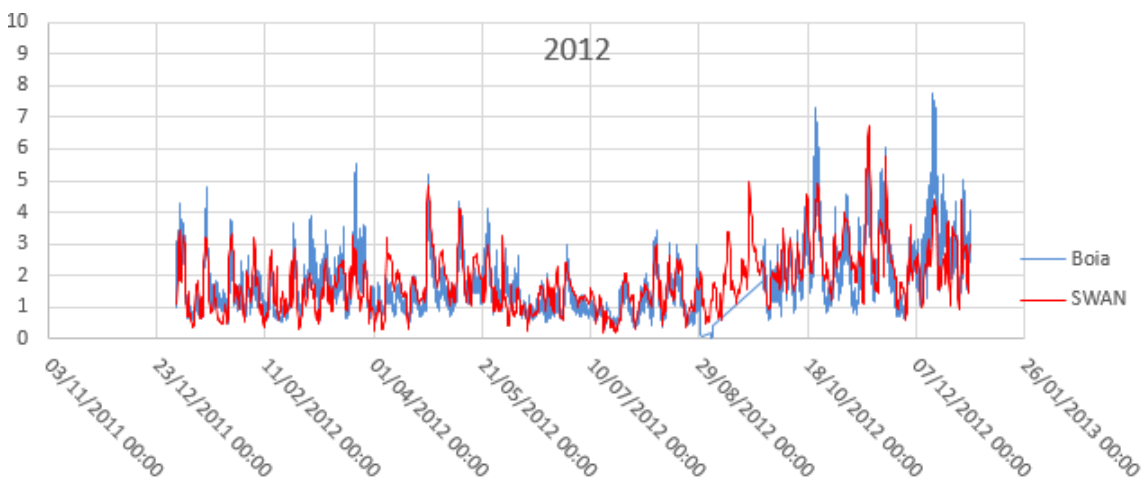


Gráfico 34 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2013

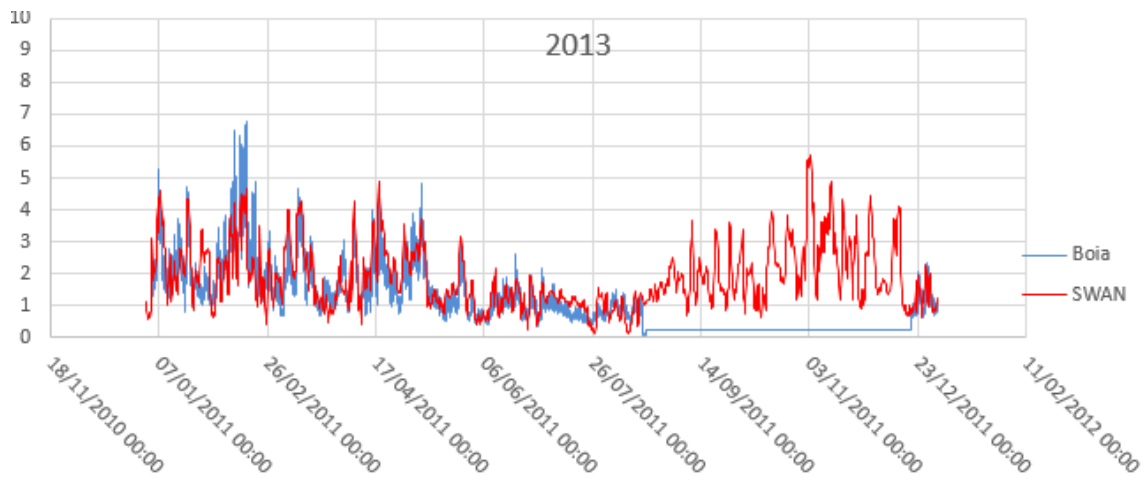
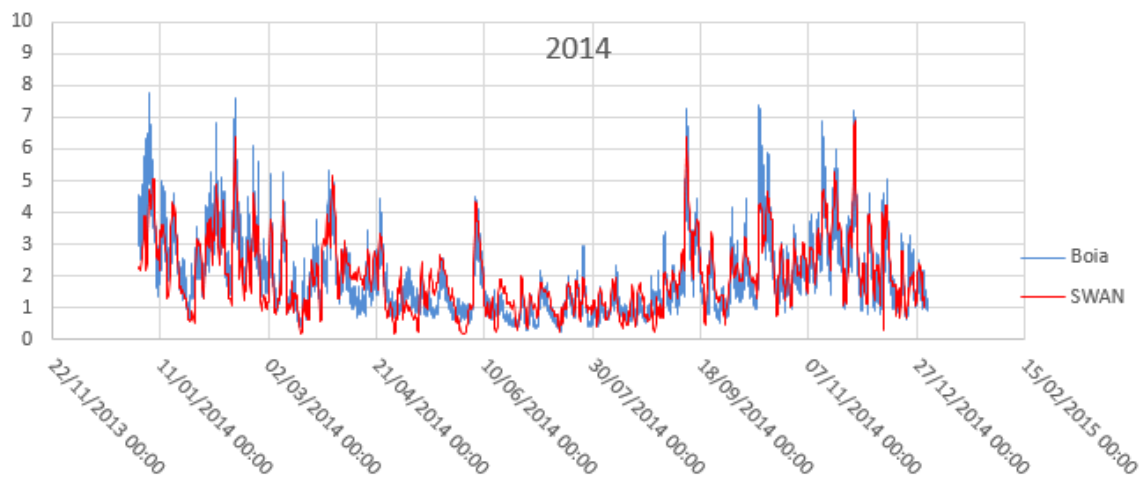


Gráfico 35 - Comparação de resultados entre boia e SWAN, P22, ano 2014



Anexo B – Ferramentas de cálculo prévio para NN_OVERTOPPING2

CÁLCULO DO COEFICIENTE DE REFLEXÃO PARA QUEBRAMARES NÃO GALGÁVEIS (e considerando transmissão nula)

Seeling, W.N. And J.P. Ahrens (1995) - Wave reflection and energy dissipation by coastal structures

Dados: Secção 6

cot (θ)	0.67	declive da estrutura		P	Manto	Filtro	TOT	Peso do material do manto		
D₅₀	2.18	diâmetro do material do manto		0.35	1 camada	D ₅₀ /2.0, espessura: 0.5°D ₅₀	D ₅₀ /5.3	Kn	ρ_s (Kg/m³)	D₅₀ (m)
N	2.00	n. de camadas do manto		0.10	2 camadas	D ₅₀ /4.5, espessura: 0.5°D ₅₀	impermeavel	75	2.65	1.42
d_s	4.87	altura de água a pé de dique		0.40		D ₅₀ /2.0, espessura: 0.5°D ₅₀	D ₅₀ /5.3	240	2.35	2.18
T_p	10.00	período de pico		0.50	não existe	D ₅₀ /4.0		Material		
H_o	1.00	altura de onda		0.60	todo manto	—	—	Enr.	ρ_s (Kg/m³)	
m	0.00	inclinação do fundo					Betão	2.3 a 2.4		

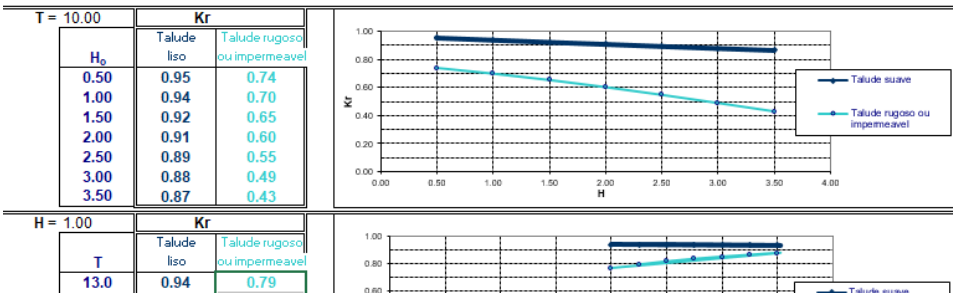


Figura 56 - Exemplo interface de cálculo de coeficientes de reflexão, no Excel

Kr	T	GR1	GR2	GR3	GR4	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
6.0	0	0	0	0	0	0.52	0.41	0.46	0.32	0.34	0.26	0.58	0.9	0.58	0.30	0.90	0.30	0.58	0.30	0.90	0.58	0.39	0.36	0.45	0.39
7.0	0	0	0	0	0	0.61	0.43	0.48	0.41	0.43	0.34	0.66	0.9	0.66	0.30	0.92	0.30	0.66	0.30	0.92	0.65	0.48	0.45	0.53	0.48
8.0	0	0	0	0	0	0.67	0.58	0.55	0.49	0.50	0.42	0.71	0.9	0.71	0.30	0.93	0.30	0.71	0.30	0.93	0.71	0.55	0.52	0.60	0.55
9.0	0	0	0	0	0	0.72	0.62	0.61	0.55	0.56	0.48	0.76	0.9	0.76	0.30	0.94	0.30	0.76	0.30	0.94	0.76	0.61	0.58	0.65	0.61
10.0	0	0	0	0	0	0.76	0.67	0.66	0.61	0.62	0.54	0.79	0.9	0.79	0.30	0.94	0.30	0.79	0.30	0.94	0.79	0.66	0.63	0.70	0.66
11.0	0	0	0	0	0	0.79	0.71	0.70	0.65	0.66	0.58	0.82	0.9	0.82	0.30	0.95	0.30	0.82	0.30	0.95	0.82	0.70	0.68	0.74	0.70
12.0	0	0	0	0	0	0.82	0.74	0.74	0.69	0.70	0.63	0.85	0.9	0.85	0.30	0.95	0.30	0.85	0.30	0.95	0.84	0.73	0.71	0.77	0.73
13.0	0	0	0	0	0	0.84	0.77	0.76	0.72	0.73	0.67	0.86	0.9	0.86	0.30	0.96	0.30	0.86	0.30	0.96	0.86	0.76	0.74	0.79	0.76
14.0	0	0	0	0	0	0.86	0.79	0.79	0.75	0.76	0.70	0.88	0.9	0.88	0.30	0.96	0.30	0.88	0.30	0.96	0.88	0.79	0.77	0.81	0.79
15.0	0	0	0	0	0	0.87	0.81	0.81	0.77	0.78	0.73	0.89	0.9	0.89	0.30	0.96	0.30	0.89	0.30	0.96	0.89	0.81	0.79	0.83	0.81
16.0	0	0	0	0	0	0.88	0.83	0.83	0.79	0.80	0.75	0.90	0.9	0.90	0.30	0.96	0.30	0.90	0.30	0.96	0.90	0.82	0.81	0.85	0.82
17.0	0	0	0	0	0	0.89	0.85	0.84	0.81	0.82	0.77	0.91	0.9	0.91	0.30	0.97	0.30	0.91	0.30	0.97	0.91	0.84	0.83	0.86	0.84
18.0	0	0	0	0	0	0.90	0.86	0.86	0.83	0.83	0.79	0.92	0.9	0.92	0.30	0.97	0.30	0.92	0.30	0.97	0.92	0.85	0.84	0.87	0.85

Ks	T	GR1	GR2	GR3	GR4	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
6.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.31277	0.41997	0.42926	0.51276	0.49562	0.58958	0.26289	0.05263	0.26289	0.05263	0.04998	0.05263	0.26289	0.05263	0.04998	0.26680	0.44230	0.46978	0.38041	0.44230	
7.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.24463	0.33912	0.34744	0.41604	0.40226	0.48759	0.20663	0.05263	0.20663	0.05263	0.04244	0.05263	0.20663	0.05263	0.04244	0.20923	0.35551	0.38050	0.30624	0.35551	
8.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.19712	0.27902	0.28633	0.34334	0.33208	0.40756	0.16637	0.05263	0.16637	0.05263	0.03690	0.05263	0.16637	0.05263	0.03690	0.16848	0.29160	0.31373	0.25132	0.29160	
9.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.16239	0.23345	0.23984	0.28805	0.27361	0.34497	0.13672	0.05263	0.13672	0.05263	0.03268	0.05263	0.13672	0.05263	0.03268	0.13872	0.24355	0.26296	0.20980	0.24355	
10.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.13631	0.19920	0.20378	0.24523	0.23771	0.29554	0.11433	0.05263	0.11433	0.05263	0.02930	0.05263	0.11433	0.05263	0.02930	0.11617	0.20661	0.22363	0.17775	0.20661	
11.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.11622	0.17043	0.17532	0.21146	0.20434	0.25599	0.09704	0.05263	0.09704	0.05263	0.02657	0.05263	0.09704	0.05263	0.02657	0.09894	0.17763	0.19259	0.15256	0.17763	
12.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.10040	0.14818	0.15249	0.18436	0.17804	0.22393	0.08342	0.05263	0.08342	0.05263	0.02431	0.05263	0.08342	0.05263	0.02431	0.08519	0.15448	0.16769	0.13241	0.15448	
13.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.08770	0.13009	0.13331	0.16230	0.15680	0.19760	0.07251	0.05263	0.07251	0.05263	0.02241	0.05263	0.07251	0.05263	0.02241	0.07424	0.13569	0.14742	0.11606	0.13569	
14.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.07736	0.11519	0.11858	0.14408	0.13891	0.17574	0.06363	0.05263	0.06363	0.05263	0.02079	0.05263	0.06363	0.05263	0.02079	0.06533	0.12023	0.13070	0.10261	0.12023	
15.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06873	0.10272	0.10576	0.12887	0.12413	0.15739	0.05631	0.05263	0.05631	0.05263	0.01939	0.05263	0.05631	0.05263	0.01939	0.06193	0.07577	0.10735	0.11674	0.09141	0.10735
16.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.06193	0.09221	0.09494	0.11602	0.11166	0.14183	0.05021	0.05263	0.05021	0.05263	0.01816	0.05263	0.05021	0.05263	0.01816	0.05621	0.06850	0.10496	0.08193	0.09650	
17.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05549	0.08323	0.08570	0.10508	0.10104	0.12853	0.04507	0.05263	0.04507	0.05263	0.01708	0.05263	0.04507	0.05263	0.01708	0.04863	0.06727	0.09493	0.07400	0.08727	
18.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.05025	0.07549	0.07772	0.09567	0.09191	0.11707	0.04069	0.05263	0.04069	0.05263	0.01613	0.05263	0.04069	0.05263	0.01613	0.04420	0.07936	0.08632	0.06714	0.07936	

Figura 57 - Exemplo de tabelas de cálculo de coeficientes de reflexão, Excel

Figura 58 - Input-tipo para cálculo do NN_OOVERTOPPING2

Anexo C – Resultados modelo NN_OVERTOPPING2

Gráfico 36 - Comparação entre gHsTm e q médio galgado (NN_OVERTOPPING2) para L3

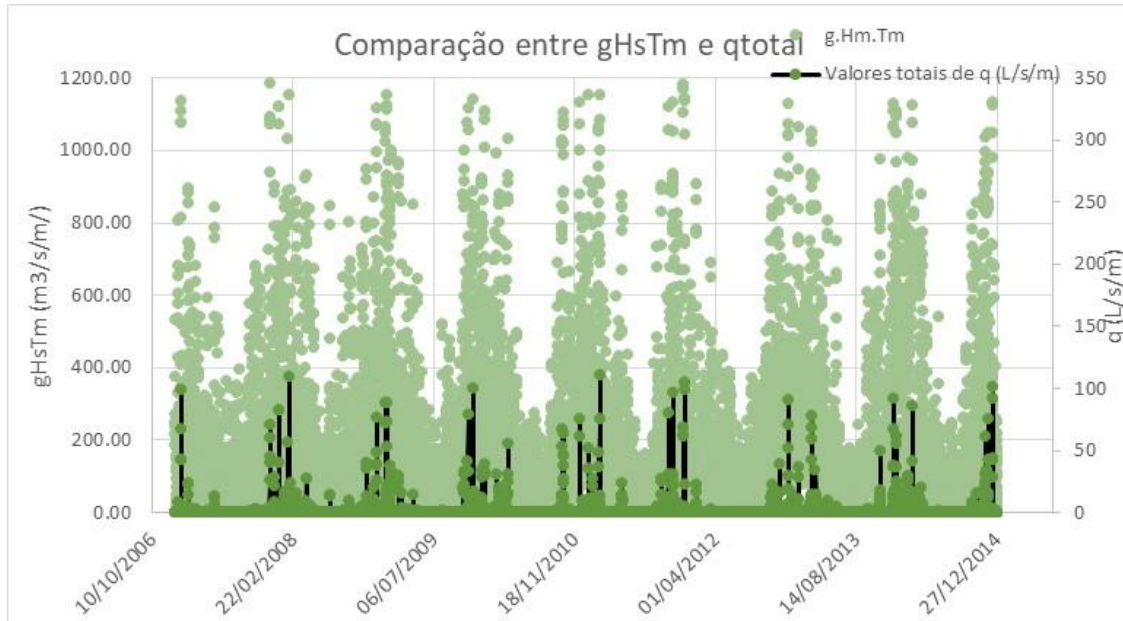


Gráfico 37 - Comparação entre gHsTm e q médio galgado ($q > 100$ l/s/m) (NN_OVERTOPPING2) para L3

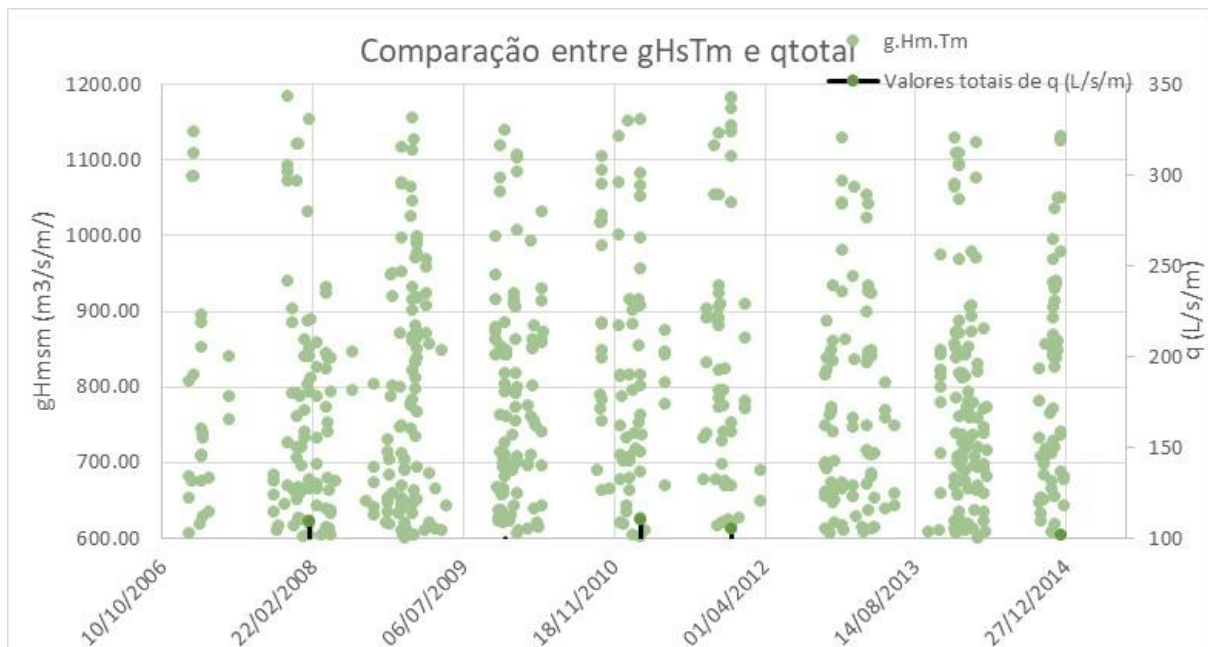


Gráfico 38 - Estatística descritiva para q médio galgado para L3

Valores totais de q (L/s/m)	
Média	0.90
Erro-padrão	0.06
Mínimo	0.00
Máximo	110.00
Contagem	11684

Gráfico 39 - Comparação entre gHmTm e q médio galgado (NN_OVERTOPPING2) para L4

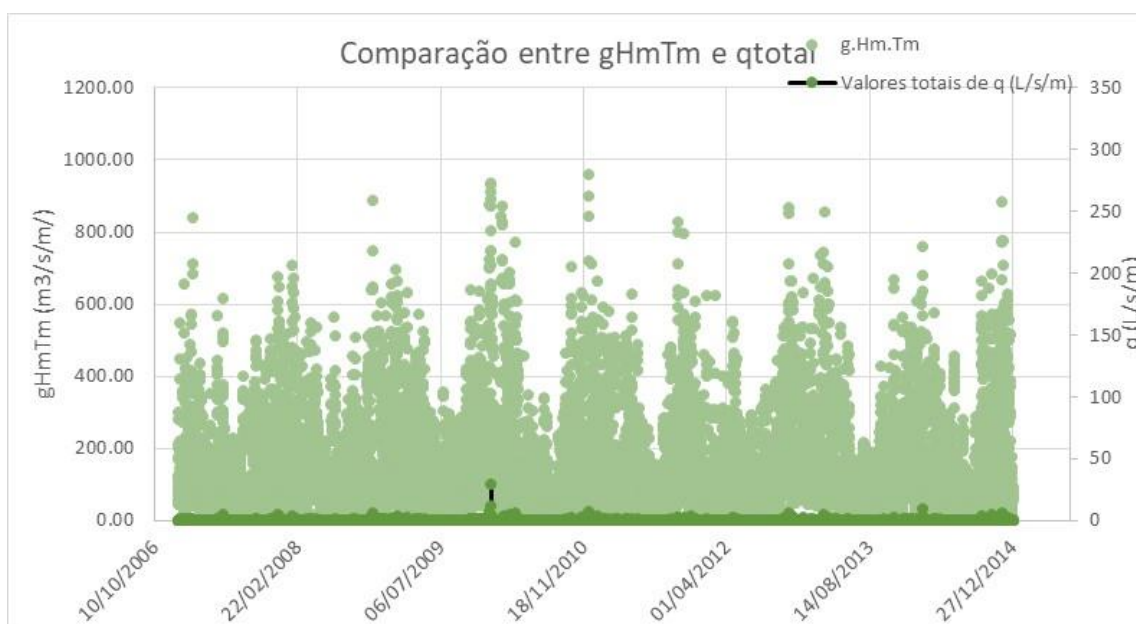


Tabela 30 - Estatística descritiva para q caudal médio galgado para L4

Valores totais de q (L/s/m)	
Média	0.06
Erro-padrão	0.00
Mediana	0.00
Mínimo	0.00
Máximo	29.46
Contagem	11684

Gráfico 40 - Comparação entre gHsTm e q médio galgado (NN_OVERTOPPING2)

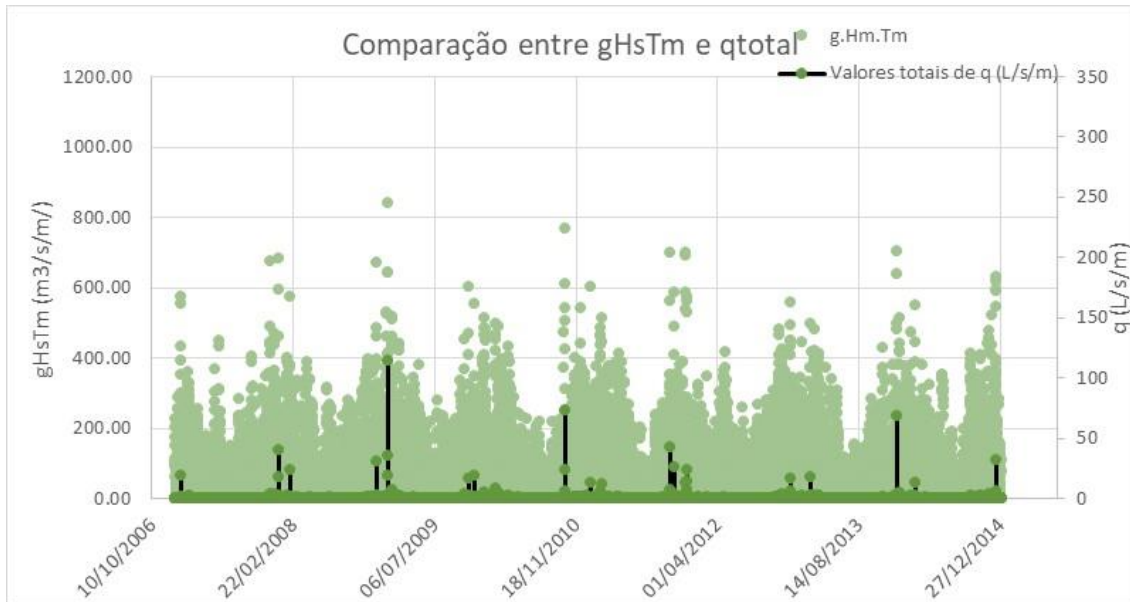


Gráfico 41 - Estatística descritiva para q médio galgado, para L5

Valores totais de q (L/s/m)	
Média	0.17
Mínimo	0.00
Máximo	114.90
Soma	1999.12
Contagem	11684

Gráfico 42 - Comparação entre gHmTm e q médio galgado (NN_OVERTOPPING2) para L6

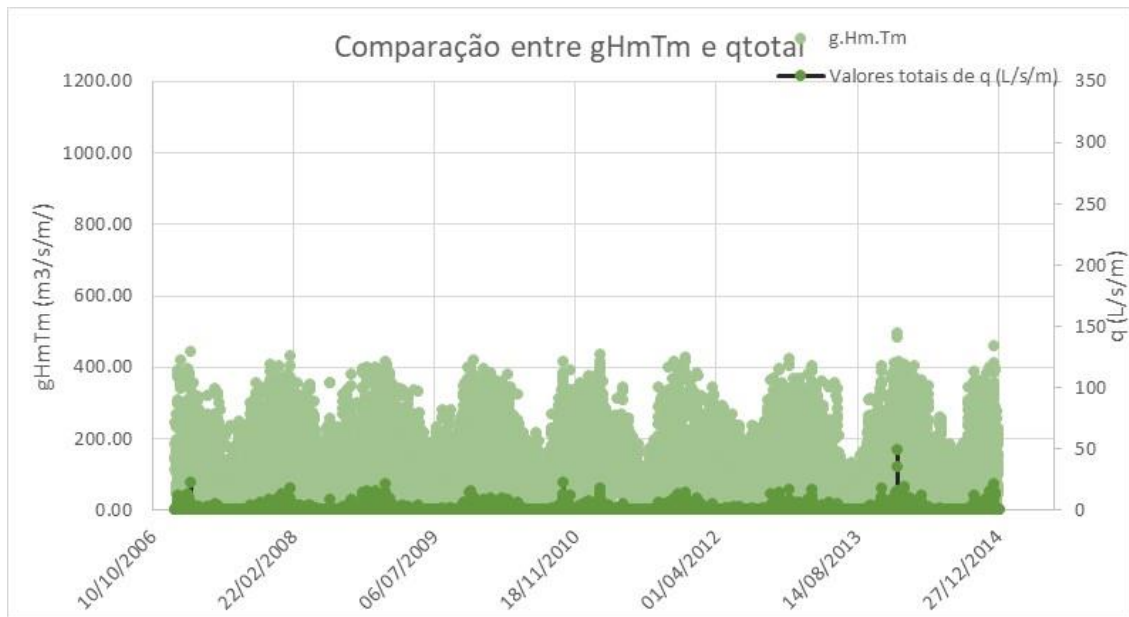


Tabela 31 - Estatística descritiva para q médio galgado, para L6

Valores totais de q (L/s/m)	
Média	0.44
Mínimo	0.00
Máximo	49.62
Contagem	11684

Gráfico 43 - Direção da agitação marítima no ponto L2

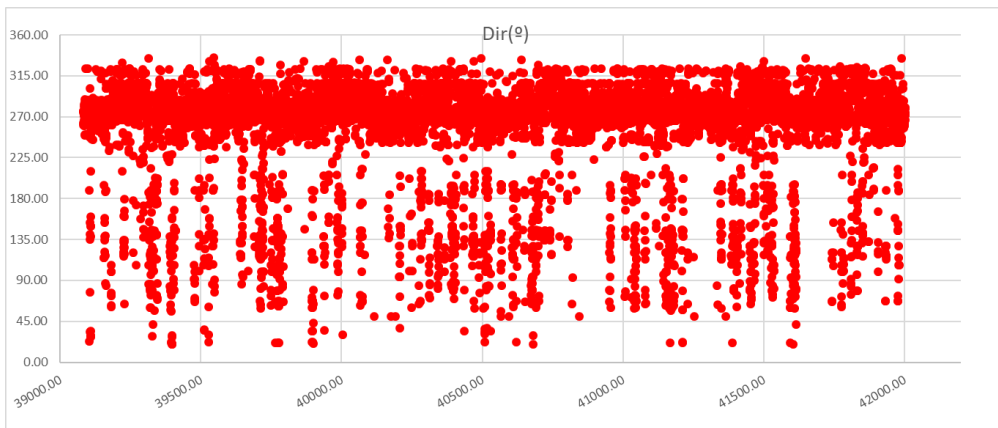


Gráfico 44 - Direção da agitação marítima no ponto L3

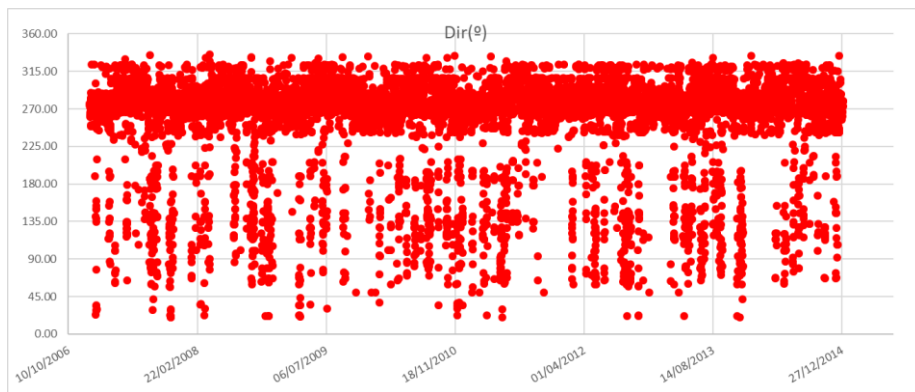


Gráfico 45 - Direção da agitação marítima no ponto L4

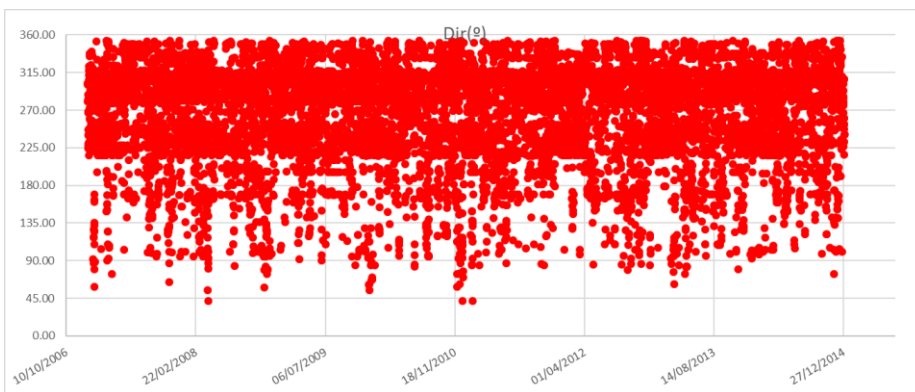


Gráfico 46 - Direção da agitação marítima no ponto L5

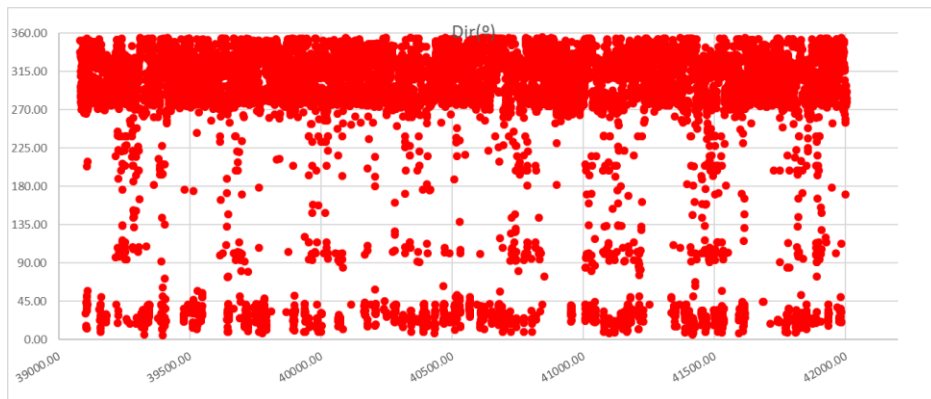


Gráfico 47 - Direção da agitação marítima no ponto L6

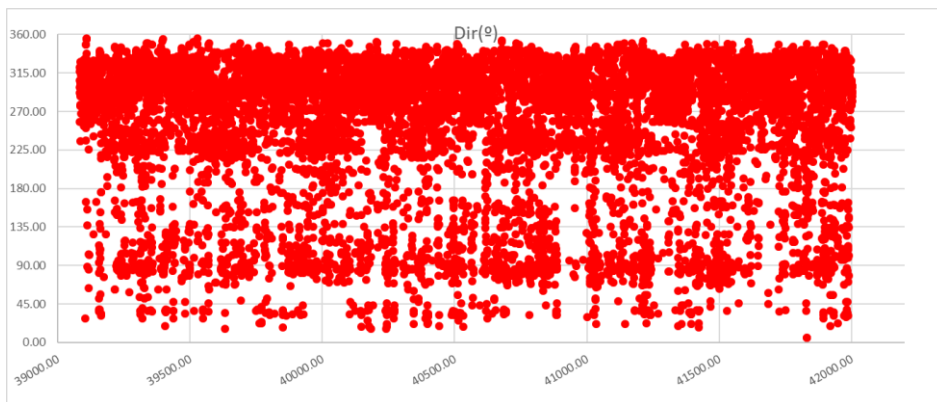


Tabela 32 - Correspondências entre galgamentos máximos em cada estrutura e verificação nas restantes

Pontos	L1	L2	L3	L4	L5	L6
qmáx (L/s/m)	327.2	194.9	110	29.46	114.9	49.62
Data	11/dez/14	10/fev/08	16/fev/11	30/dez/09	20/jan/09	06/jan/14
NM (m Z.H.)	1.88	1.93	1.94	2.04	1.22	2.17
Hs (m)	6.9	8.42	7.75	6.6	5.23	3.1
β (°)	37.69	56.38	56.54	17.95	28.09	49.23
q (L/s/m) em L1		128	78.8	0	161.4	64.62
H (m) em L1		6	5.45	8.55	6.69	4.59
β (°) em L1		41.18	41	6.52	49.67	19.5
q (L/s/m) em L2	177.8		168.7	0	108.1	70.1
H (m) em L2	8.38		8.18	3.78	7.86	6.81
β (°) em L2	67.74		56.54	82.89	61.02	65.78
q (L/s/m) em L3	101.5	109.8		0	53.19	60.78
H (m) em L3	7.71	7.75		3.8	7.19	6.81
β (°) em L3	67.74	56.38		84.17	61.02	65.78
q (L/s/m) em L4	0	0.1076	0.08		0.4221	0
H (m) em L4	2.67	2	1.81		3.6	2.19
β (°) em L4	90	61.98	61.9		48.72	90
q (L/s/m) em L5	0	23.76	12.27	2.13		2.385
H (m) em L5	3.7	3.86	3.46	3.08		2.37
β (°) em L5	84.5	56.43	57.48	68.43		72.36
q (L/s/m) em L6	21.04	17.35	18.05	0	2.23	
H (m) em L6	2.87	2.91	2.92	3	2.36	
β (°) em L6	51.63	57.03	56.74	90	64.52	
	11609	1625	6034	4380	3007	10253