



**Rita Novo Pombo**

**INUNDAÇÕES COSTEIRAS: CAUDAIS DE  
GALGAMENTO E CONSEQUÊNCIAS ASSOCIADAS**





**Rita Novo Pombo**

**INUNDAÇÕES COSTEIRAS: CAUDAIS DE  
GALGAMENTO E CONSEQUÊNCIAS ASSOCIADAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

**Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes**  
Investigadora Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Agradeço,

Aos meus pais pela constante companhia, entusiasmo, confiança e compreensão.

Aos meus avós que sempre estiveram presentes e empenhados.

Ao Diogo pelo humor, paciência e tranquilidade em todas as horas.

Ao meu professor e orientador Carlos Coelho pelo acompanhamento contínuo e pela disponibilidade incessável, pela partilha de conhecimentos, pela atitude construtiva e pelas correções e melhoramentos.

Aos professores Nuno Lopes, pela prontidão na disponibilização do instrumento de medição indispensável ao trabalho de campo, e Joaquim Macedo, pelo apoio e incentivos regulares.

Aos engenheiros Alex Capel e Jan Kramer da Deltares pela elucidação e facultação da versão atualizada do modelo de cálculo utilizado.

Ao Telmo, à Márcia e ao Guimarães pela colaboração e disponibilidade sempre que foi necessário.

Ao Teixeira, ao Xico, à Centeno, ao Portugal, à Filipa e ao Luís pelos verdadeiros momentos de amizade, companheirismo e diversão.

À Catarina, ao Bruno e a todos os meus colegas sempre presentes no departamento pela companhia nos longos dias de trabalho.

Agradeço em especial à minha avó Isaura que sempre me acompanhou e que com certeza seria feliz ao partilhar este momento comigo.





## palavras-chave

Galgamento costeiro, obras longitudinais aderentes, formulações empíricas, redes neuronais, avaliação de risco.

## resumo

A dinâmica do litoral costeiro proporciona frequentemente situações de risco em estruturas costeiras, mas também nas zonas marginais às próprias obras longitudinais aderentes. Os problemas de erosão e o conseqüente recuo da posição da linha de costa, aliados à crescente pressão urbana que se impõe nestas localidades, justificam, num cenário de agitação marítima energética como acontece em Portugal, a importância para esta questão. As numerosas ocorrências registadas ao longo do tempo no concelho de Ovar demonstram os problemas sentidos atualmente e que repetidamente sucedem pela costa portuguesa.

As situações de galgamento são aquelas que, num último momento, afetam diretamente as populações provocando perdas (de vidas, de território) e danos (em estruturas, edifícios, equipamentos). Para controlar e minorar as conseqüências deste fenómeno, é necessário compreender os processos e conhecer os fatores e os parâmetros envolvidos na sua ocorrência. A análise de sensibilidade sobre o valor do caudal médio galgado permite estimar, desde logo, a influência de cada parâmetro no resultado final.

A existência de diversos métodos de cálculo para a quantificação dos caudais galgados exige ponderação na avaliação dos resultados. Do mesmo modo, a definição dos parâmetros de entrada que caracterizam a estrutura deve ser feita de forma cuidada. A reprodução das ações naturais é outro ponto de particular atenção. Neste trabalho, foram comparados diversos cenários, conjugando os diferentes fenómenos de propagação e de alteração das ondas, de forma a selecionar o que melhor representasse o caso de estudo.

A avaliação da vulnerabilidade e do risco de cada local tem por base um processo de previsão baseado na conjugação do registo histórico de eventos com os dados resultantes das metodologias utilizadas. A definição dos limites de caudais admissíveis, diretamente relacionada com as conseqüências do galgamento, possibilita a previsão das medidas necessárias para a garantia da segurança de pessoas e de bens.

A estimativa dos caudais galgados, a avaliação do risco de ocorrência dos galgamentos e a determinação das conseqüências correspondentes são dependentes de vários aspetos, pretendendo este trabalho contribuir nesse sentido, através dos pressupostos e das metodologias aplicadas ao caso das praias de Esmoriz, de Cortegaça e do Furadouro.



**keywords**

Overtopping, longitudinal revetments, empirical formulas, neural networks, risk assessment.

**abstract**

The coastal areas dynamics oftentimes provide risk situations not only in the coastal structures themselves, but also in the neighborhoods. The problems of erosion and the consequent retreat of the shoreline position, associated with the increasing urban pressure that prevails in these localities, justifies, in a situation of energetic wave agitation as it happens in Portugal, the importance for this question. The numerous occurrences recorded over time in Ovar demonstrate the problems currently felt and repeatedly occurring along the Portuguese coast.

Wave overtopping situations are those that, at the last moment, directly affect the populations causing losses (human or territory) and damages (in structures, buildings, equipment). In order to control and mitigate the consequences of this phenomenon, it is necessary to understand the processes and to know the factors and parameters involved. The sensitivity analysis allows to estimate the influence of each parameter on the final value of the mean overtopping discharge.

The existence of several calculation methods for the quantification of the overtopping discharges requires a weighing in the evaluation of the results. Likewise, the definition of the input parameters related to the structure must be done carefully. The reproduction of natural actions is another point of particular attention. In this work, several scenarios were compared, combining the different wave propagation phenomena, in order to select the one that best represents the case study.

The vulnerability and risk assessment of each site is based on the combination of historical event records and the data resulting from the methodologies used. The definition of the thresholds for the allowable mean overtopping discharge, directly related to the consequences of overtopping, enables the forecast of the necessary measures to guarantee the safety of people and goods.

The estimation of the mean wave overtopping discharges, the overtopping risk assessment and the determination of the corresponding consequences are dependent on several aspects and this work intends to contribute in that direction, through the assumptions and methodologies applied to the beaches of Esmoriz, Cortegaça and Furadouro.



---

## ÍNDICES



---

## ÍNDICE GERAL

Índice Geral	xv
Índice de Figuras	xix
Índice de Tabelas	xxiii
Lista de Abreviaturas e Acrónimos	xxvii
Lista de Símbolos	xxix
<b>1 Introdução</b>	<b>3</b>
1.1 Enquadramento do problema	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Metodologia e estrutura da dissertação	4
<b>2 Galgamento costeiro</b>	<b>9</b>
2.1 Descrição do fenómeno	9
2.2 Tipos de galgamento	10
2.3 Fatores condicionantes	11
2.3.1 Nível da superfície livre da água	11
2.3.2 Agitação marítima	12
2.3.2.1 Características das ondas	12
2.3.2.2 Propagação das ondas	14
2.3.3 Estruturas de defesa costeira	16
2.4 Ferramentas de cálculo	16
2.4.1 Redes Neurais	17
2.4.2 Formulações empíricas	18
2.4.3 Modelação numérica	19
2.4.4 Modelação física	20
2.5 Risco de galgamento	21
2.5.1 Limites de caudais admissíveis	22
2.5.2 Avaliação do risco	22

<b>3</b>	<b>Quantificação do galgamento</b>	<b>29</b>
3.1	Metodologias adotadas	29
3.1.1	Rede neuronal	29
3.1.2	Formulações empíricas	30
3.1.2.1	Fórmula de Owen	32
3.1.2.2	Fórmula de van der Meer e Janssen	34
3.1.2.3	Fórmula de Pedersen e Burcharth	34
3.1.3	Fatores de redução	34
3.1.3.1	Rugosidade da superfície	34
3.1.3.2	Existência de berma	35
3.1.3.3	Altura da coluna de água	36
3.1.3.4	Obliquidade de incidência das ondas	36
3.2	Análise de sensibilidade	36
3.2.1	Cenários de referência	37
3.2.1.1	Agitação marítima incidente	37
3.2.1.2	Geometria da estrutura	38
3.2.2	Cenários de teste	40
3.2.2.1	Estruturas de talude simples	40
3.2.2.2	Estruturas de talude com berma	42
3.2.2.3	Estruturas de talude com parede de coroamento	45
3.2.2.4	Fatores de redução	46
3.2.3	Síntese de resultados	47
3.2.3.1	Sensibilidade dos parâmetros	47
3.2.3.2	Sensibilidade das fórmulas	48
<b>4</b>	<b>Caso de estudo</b>	<b>53</b>
4.1	Caracterização do local	53
4.1.1	Enquadramento geográfico	53
4.1.2	Obras de defesa costeira existentes	55
4.1.3	Atividades e uso do solo	59
4.1.4	Histórico de eventos de dano	61
4.2	Nível de maré	63



---

4.3	Agitação marítima	65
4.3.1	Base de dados	65
4.3.2	Alturas e períodos de onda	66
4.3.3	Rumos dominantes	69
4.4	Propagação da agitação	72
4.4.1	Definição de cenários	72
4.4.2	Refração	74
4.4.3	Empolamento	75
4.4.4	Rebentação	76
4.4.5	Espraiamento	77
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>83</b>
5.1	Eventos de galgamento	83
5.2	Caudais de galgamento	85
5.3	Cenário de referência	87
5.4	Comportamento sazonal e anual	89
5.5	Período de retorno	91
5.6	Risco de galgamento	96
<b>6</b>	<b>Considerações finais</b>	<b>101</b>
6.1	Síntese de resultados e conclusões	101
6.2	Desenvolvimentos futuros	105
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>109</b>
	<b>Anexo A</b>	<b>121</b>
	<b>Anexo B</b>	<b>123</b>



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2

- Figura 2.1: Representação esquemática dos fenómenos de espraçamento e de galgamento sobre uma obra longitudinal aderente. 9
- Figura 2.2: Ilustração das diversas formas de ocorrência do galgamento. 11
- Figura 2.3: Ilustração da aplicação do modelo SPH: posição das partículas na interação entre uma onda sinusoidal e uma estrutura de tipo quebra-mar misto, num período de tempo (Didier e Neves, 2010). 19
- Figura 2.4: Ilustração da aplicação do modelo AMAZON: aspeto da superfície livre em dois instantes de cálculo, no molhe Sul do Porto da Póvoa de Varzim (Reis e Neves, 2010). 20
- Figura 2.5: Exemplo de um modelo físico: observação dos galgamentos na solução proposta para a reparação do molhe Sul do Porto da Póvoa de Varzim (Reis e Neves, 2010). 21

### Capítulo 3

- Figura 3.1: Parâmetros de entrada da ferramenta *NN\_OVERTOPPING2* (adaptado de NN Overtopping, 2015). 30
- Figura 3.2: Parâmetros geométricos do perfil transversal de cada tipo de estrutura, nas formulações empíricas (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011). 32
- Figura 3.3: Definição dos ângulos do talude equivalente,  $\alpha_{eq}$ , e do talude médio,  $\alpha$ , da equação 3.5. 35
- Figura 3.4: Caudal médio galgado em estruturas de talude simples, de acordo com a formulação de Owen, para diferentes valores da altura  $R_c$  e do declive  $V/H$ . 40
- Figura 3.5: Caudal médio galgado em estruturas de talude simples, de acordo com a formulação de van der Meer e Janssen, para diferentes valores da altura  $R_c$  e do declive  $V/H$ . 41
- Figura 3.6: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de Owen, para diferentes valores da altura  $R_c$  e do declive  $V/H$  ( $B=10m$ ,  $h_b=-1m$ ). 42

- Figura 3.7: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de Owen, para diferentes valores da largura  $B$  ( $R_c=5\text{m}$ ,  $h_b=-1\text{m}$ ). 42
- Figura 3.8: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de Owen, para diferentes valores da profundidade  $h_b$  ( $R_c=5\text{m}$ ,  $B=10\text{m}$ ). 43
- Figura 3.9: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de van der Meer e Janssen, para diferentes valores da altura  $R_c$  e do declive  $V/H$  ( $B=10\text{m}$ ,  $h_b=-1\text{m}$ ). 44
- Figura 3.10: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de van der Meer e Janssen, para diferentes valores da largura  $B$  ( $R_c=5\text{m}$ ,  $h_b=-1\text{m}$ ). 44
- Figura 3.11: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de van der Meer e Janssen, para diferentes valores da profundidade  $h_b$  ( $R_c=5\text{m}$ ,  $B=10\text{m}$ ). 45
- Figura 3.12: Caudal médio galgado em estruturas de talude com parede de coroamento, de acordo com a formulação de Pedersen e Burcharth, para diferentes valores da altura  $R_c$ , do declive  $V/H$  e da largura  $G_c$  ( $A_c=1,5\text{m}$ ). 45
- Figura 3.13: Caudal médio galgado em estruturas de talude com parede de coroamento, de acordo com a formulação de Pedersen e Burcharth, para diferentes valores da altura  $A_c$  ( $R_c=5\text{m}$ ,  $V/H=1/2$ ,  $G_c=10\text{m}$ ). 46
- Figura 3.14: Caudal médio galgado em estruturas de talude simples e de talude com berma, para diferentes valores do coeficiente de redução devido à rugosidade  $\gamma_r$  ou do produto de todos os coeficientes de redução,  $\gamma$ , ( $R_c=5\text{m}$ ,  $V/H=1/2$ ). 47
- Figura 3.15: Caudal médio galgado nos diferentes tipos de estruturas, de acordo com as diversas formulações empíricas e com a ferramenta NN\_OVERTOPPING2 ( $R_c=5\text{m}$ ,  $V/H=1/2$ ). 49

## Capítulo 4

- Figura 4.1: Localização das áreas de estudo no concelho de Ovar (SNIG, 2016). 54
- Figura 4.2: Vista das obras longitudinais aderentes em estudo (fonte: CMO, 2014). 56
- Figura 4.3: Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente de Esmoriz (DA2). 57

---

Figura 4.4: Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente de Cortegaça (DA4).	57
Figura 4.5: Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente do Furadouro (DA8).	57
Figura 4.6: Exemplo de equipamentos coletivos localizados em faixas de risco.	61
Figura 4.7: Tipos de ocorrências devidas à ação do mar (fotos CMO, 2014; baseado em Coelho <i>et al.</i> , 2015).	62
Figura 4.8: Número e tipo de ocorrências registadas desde 1857 (adaptado de Coelho <i>et al.</i> , 2015).	63
Figura 4.9: Distribuição temporal do número de ocorrências registadas desde 1857 nas praias do concelho de Ovar (adaptado de Coelho <i>et al.</i> , 2015).	63
Figura 4.10: Comparação dos registos totais das alturas de onda significativa com os registos efetuados de 3h em 3h (dados do IH para a boia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2014).	67
Figura 4.11: Distribuição mensal das alturas de onda significativa (dados do IH para a boia de Leixões, registados de 3h em 3h, recolhidos entre 1981 e 2014).	68
Figura 4.12: Comparação dos registos totais do período de onda médio com os registos efetuados de 3h em 3h (dados do IH para a boia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2014).	69
Figura 4.13: Distribuição mensal do período de onda médio (dados do IH para a boia de Leixões, registados de 3h em 3h, recolhidos entre 1981 e 2014).	69
Figura 4.14: Rosa de rumos com a representação das classes de direção de ondulação (dados do IH para a boia de Leixões, registados de 3h em 3h, recolhidos entre 1993 e 2014).	70
Figura 4.15: Distribuição da direção de ondulação ao longo dos anos (dados do IH para a boia de Leixões, registados de 3h em 3h, recolhidos entre 1993 e 2014).	71
Figura 4.16: Estimativa (%) do valor do coeficiente de refração, $k_r$ , para os diferentes locais e níveis da superfície livre da água.	74
Figura 4.17: Estimativa (%) do valor do coeficiente de empolamento, $k_s$ , para os diferentes locais e níveis da superfície livre da água.	75
Figura 4.18: Estimativa (%) do valor do espraiamento, $R_{máx}$ , em Esmoriz para os diferentes cenários de teste.	77

---

Figura 4.19: Estimativa (%) do valor do espraiamento,  $R_{m\acute{a}x}$ , em Cortegaça para os diferentes cenários de teste. 78

Figura 4.20: Estimativa (%) do valor do espraiamento,  $R_{m\acute{a}x}$ , no Furadouro para os diferentes cenários de teste. 78

## Capítulo 5

Figura 5.1: Distribuição mensal das frequências de ocorrência de galgamento em Esmoriz e no Furadouro. 90

Figura 5.2: Distribuição anual das frequências de ocorrência de galgamento em Esmoriz e no Furadouro. 91

Figura 5.3: Caudais de galgamento estimados para Esmoriz, no cenário C9. 92

Figura 5.4: Caudais de galgamento estimados para o Furadouro, no cenário C9. 93

Figura 5.5: Caudais de galgamento estimados para Esmoriz, no cenário C5. 94

Figura 5.6: Caudais de galgamento estimados para o Furadouro, no cenário C5. 95

---

## ÍNDICE DE TABELAS

### Capítulo 2

- Tabela 2.1: Graus de probabilidade de ocorrência de galgamento/inundação que excede os limiares pré-estabelecidos (Reis *et al.*, 2013). 23
- Tabela 2.2: Graus de consequências da ocorrência de galgamento/inundação que excede os limiares pré-estabelecidos (Reis *et al.*, 2013). 24
- Tabela 2.3: Graus de risco: matriz de cruzamento do grau atribuído à probabilidade de ocorrência de um evento adverso e do grau atribuído às consequências da ocorrência desse evento (Reis *et al.*, 2013). 24
- Tabela 2.4: Avaliação da aceitabilidade do grau de risco obtido (Reis *et al.*, 2013). 25

### Capítulo 3

- Tabela 3.1: Fórmulas empíricas para determinação do caudal médio galgado (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011). 31
- Tabela 3.2: Coeficientes  $a$  e  $b$  da fórmula de Owen, para estruturas de talude simples (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011). 33
- Tabela 3.3: Coeficientes  $a$  e  $b$  da fórmula de Owen, para estruturas de talude com berma (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011). 33
- Tabela 3.4: Parâmetros de caracterização da agitação marítima, para os diversos cenários em análise. 38
- Tabela 3.5: Número de Iribarren associado ao período de onda de pico ( $\zeta_{0p}$ ) e ao período de onda médio ( $\zeta_{0m}$ ), em função da inclinação do talude da estrutura. 38
- Tabela 3.6: Influência do acréscimo dos diferentes parâmetros no valor do caudal médio galgado. 48

### Capítulo 4

- Tabela 4.1: Características das obras de defesa aderente (DA) e datas de construção e de intervenções de manutenção (adaptado de Coelho *et al.*, 2015; Cruz, 2015). 55
- Tabela 4.2: Parâmetros necessários ao cálculo efetuado através das formulações empíricas, para Esmoriz, Cortegaça e Furadouro. 58

Tabela 4.3: Parâmetros necessários ao cálculo efetuado com recurso à rede neuronal, para Esmoriz, Cortegaça e Furadouro.	58
Tabela 4.4: Densidade de ocupação urbana nos aglomerados em estudo, em cada uma das faixas de risco (POC, 2015).	59
Tabela 4.5: População residente e taxa variação populacional nos aglomerados urbanos em estudo e faixas de risco (POC, 2015).	60
Tabela 4.6: Tipo de equipamentos coletivos em cada uma das faixas de risco dos aglomerados urbanos em estudo (adaptado de POC, 2015).	60
Tabela 4.7: Valores típicos de maré em Leixões (baseado em LNEC, 1996; retirado de Coelho, 2005).	64
Tabela 4.8: Correspondência entre quadrantes e o valor angular adotado para caracterização da direção média da ondulação ( $\beta_{Top}$ ).	71
Tabela 4.9: Identificação dos cenários de teste do caso de estudo e respetivas condições.	73
Tabela 4.10: Valor da altura de coroamento, $R_c$ , e da profundidade, $h$ , para cada estrutura de defesa aderente em análise, nas diferentes situações de nível de maré.	74
Tabela 4.11: Estimativa (%) do número de ondas limitadas pela rebentação nas praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro.	76

## Capítulo 5

Tabela 5.1: Estimativa do número de ondas que provocam galgamento e percentagem relativa ao número total de ondas estudadas, em cada local e para cada cenário de teste.	83
Tabela 5.2: Frequências de ocorrências para diferentes classes do caudal galgado (l/s/m) e valor médio do caudal galgado, para cada cenário de teste, em Esmoriz.	85
Tabela 5.3: Frequências de ocorrências para diferentes classes do caudal galgado (l/s/m) e valor médio do caudal galgado, para cada cenário de teste, em Cortegaça.	86
Tabela 5.4: Frequências de ocorrências para diferentes classes do caudal galgado (l/s/m) e valor médio do caudal galgado, para cada cenário de teste, no Furadouro.	86
Tabela 5.5: Número de galgamentos estimados pelas formulações empíricas (para os cenários C5 e C9), por Cruz (2015) e por Coelho <i>et al.</i> (2015).	89
Tabela 5.6: Frequências de ocorrência de galgamentos, para diferentes valores de caudal galgado, em Esmoriz e no Furadouro.	92



Tabela 5.7: Estimativa dos caudais de galgamento (l/s/m) associados a diferentes períodos de retorno. 96

Tabela 5.8: Avaliação do grau de risco de galgamento/inundação para o cenário de referência. 97

### **Anexos**

Tabela A1: Valores críticos do caudal médio galgado (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011). 121

Tabela A2: Limites de caudais admissíveis (adaptado de Pullen *et al.*, 2007). 122

Tabela B1: Eventos e ocorrências de galgamento, registados nas praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, desde 1857 até 2010 (adaptado de Pereira e Coelho, 2011). 123



---

## LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

CLASH	<i>Crest Level Assessment of coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping</i>
CMO	Câmara Municipal de Ovar
DA	Defesa Aderente
DGT	Direção-Geral do Território
IH	Instituto Hidrográfico
INE	Instituto Nacional de Estatística
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NLSW	<i>NonLinear Shallow Water</i>
NM	Nível Médio da superfície livre do mar
PAPVL	Plano de Ação de Proteção e Valorização do Litoral
POC	Programa de Orla Costeira
SC	<i>Surface Capturing</i>
SNIG	Sistema Nacional de Informação Geográfica
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
ZH	Zero Hidrográfico
ZTP	Zona Terrestre de Protecção



---

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras latinas maiúsculas

$A_c$	Altura da berma de coroamento da estrutura em relação ao nível da superfície livre da água
$B$	Largura da berma da estrutura
$B_t$	Largura do pé do talude da estrutura
$G_c$	Largura da berma de coroamento da estrutura
$H$	Altura de onda
$H_i$	Altura de onda incidente numa estrutura de defesa costeira
$H_{m0}$	Altura de onda calculada com o momento de ordem zero do espectro
$H_s$	Altura de onda significativa
$L$	Comprimento de onda
$L_{om}$	Comprimento de onda em águas profundas determinado com $T_{om}$
$L_{op}$	Comprimento de onda em águas profundas determinado com $T_{op}$
$Q$	Caudal médio galgado adimensionalizado, por metro
$R$	Bordo livre da estrutura adimensionalizado
$R_c$	Altura do coroamento da estrutura em relação ao nível da superfície livre da água (bordo livre)
$R_{máx}$	Altura de espraiamento máxima
$T$	Período de onda
$T_{Hs}$	Período de onda correspondente à média dos períodos das ondas utilizadas no cálculo da altura de onda significativa
$T_{m-1,0}$	Período de onda espectral
$T_{om}$	Período de onda médio
$T_{op}$	Período de onda de pico

Letras latinas minúsculas

$a, b$	Coefficientes empíricos relativos à geometria da estrutura
$g$	Aceleração da gravidade (9,81 m <sup>2</sup> /s)
$h$	Altura da coluna de água na frente da estrutura
$h_b$	Altura da coluna de água na berma da estrutura
$h_t$	Altura da coluna de água no pé do talude da estrutura
$k$	Número de onda, segundo a teoria linear de <i>Airy</i> ( $=2\pi/L$ )
$k_r$	Coefficiente de refração
$k_s$	Coefficiente de empolamento
$q$	Caudal médio galgado (por unidade de comprimento do coroamento da estrutura)
$s$	Declividade da onda
$s_{om}$	Declividade da onda em águas profundas determinada com $L_{om}$
$s_{op}$	Declividade da onda em águas profundas determinada com $L_{op}$

Letras gregas minúsculas

$\alpha$	Ângulo do talude médio da estrutura em relação a um plano horizontal (V/H)
$\alpha_B$	Ângulo da berma da estrutura em relação a um plano horizontal
$\alpha_d$	Ângulo do talude da estrutura localizado abaixo da berma em relação a um plano horizontal
$\alpha_u$	Ângulo do talude da estrutura localizado acima da berma em relação a um plano horizontal
$\alpha_{eq}$	Ângulo do talude equivalente da estrutura em relação a um plano horizontal
$\beta$	Ângulo entre as ortogonais à batimetria e a direção de propagação da onda
$\beta_{Top}$	Ângulo médio entre a crista da onda e a linha de costa associado ao período de pico

---

$\gamma$	Fator de redução do caudal médio galgado resultante do produto de vários fatores ( $\gamma_b, \gamma_h, \gamma_r, \gamma_\beta$ )
$\gamma_b$	Fator de redução devido à existência de berma
$\gamma_h$	Fator de redução devido à profundidade
$\gamma_r$	Fator de redução devido à rugosidade/permeabilidade da superfície
$\gamma_\beta$	Fator relativo à influência do ângulo de incidência das ondas
$\xi$	Número de <i>Iribarren</i>
$\xi_{eq}$	Número de <i>Iribarren</i> determinado com $\alpha_{eq}$
$\xi_{om}$	Número de <i>Iribarren</i> determinado com $S_{om}$
$\xi_{op}$	Número de <i>Iribarren</i> determinado com $S_{op}$
$\pi$	Número adimensional (3,14)





## Capítulo 1

---

### INTRODUÇÃO



## 1 INTRODUÇÃO

A severidade do clima de agitação marítima que caracteriza a costa portuguesa leva frequentemente a situações de emergência que põem em causa a segurança de pessoas, bens e infraestruturas, tendo consequências graves para a economia e para o ambiente (Capitão *et al.*, 2014). Merecem destaque as situações que envolvem o galgamento de estruturas costeiras pelas consequências associadas à destruição e à inundação das zonas que protegem. Trata-se, portanto, de um tema premente em Portugal e há, como refere Coelho (2005), necessidade de esclarecer e quantificar as consequências de galgamentos e inundações, em termos de perdas de vidas, perda de território ou em termos de danos nos equipamentos, edifícios e/ou infraestruturas.

### 1.1 Enquadramento do problema

O litoral representa uma importante faixa de território, tanto a uma escala planetária como também em Portugal, dada a sua relevância estratégica em termos ambientais, económicos, culturais e recreativos. De facto, as zonas costeiras concentram a grande maioria da população e apresentam um potencial produtivo que se reflete em variados aspetos, intensificando a pressão de uso, ocupação e artificialização. No entanto, o carácter particularmente adverso do regime de agitação do litoral português proporciona, com relativa frequência, situações de emergência provocadas pelo estado do mar. Esta suscetibilidade da zona costeira põe em causa a salvaguarda de pessoas e bens e reflete-se, por vezes, em perdas humanas e materiais.

Paralelamente a esta situação verifica-se também que, cada vez mais, as normas para o projeto, construção e manutenção de estruturas, bem como a sociedade em geral, exigem uma quantificação dos riscos e um aumento da fiabilidade das estruturas de engenharia, nas quais se podem incluir as estruturas marítimas. Deste modo, e como é referido no Plano de Ação de Proteção e Valorização do Litoral (PAPVL, 2012), a preocupação e a vontade de resolução dos problemas do litoral torna-se pertinente para uma utilização racional, sustentável e segura da orla costeira nacional, interessando também compreender e prever a ocorrência das situações de risco, nomeadamente na questão dos galgamentos e inundações que tantos prejuízos têm causado.

## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho incide sobre a caracterização e quantificação dos caudais de galgamento e a análise das consequências associadas a este fenómeno. Como intuito final, pretende-se classificar os riscos de inundação costeira devida a galgamentos em obras de defesa aderente, com especial incidência na zona litoral do concelho de Ovar (praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro).

Por outro lado e paralelamente aos objetivos primordiais, surge também a necessidade de compreender os fenómenos envolvidos no processo de galgamento costeiro e a sensibilidade dos valores do caudal galgado aos parâmetros intervenientes na estimativa de galgamentos, de forma a prever comportamentos e tendências evolutivas.

Em conclusão, este trabalho pretende auxiliar as entidades responsáveis na tomada de decisão sobre determinados usos e ocupações da faixa costeira analisada e também sobre as soluções de intervenção ou de alternativas de defesa costeira que potenciem a minimização de perdas, em particular nas zonas de maior vulnerabilidade e risco potencial para a ocupação humana.

## **1.3 Metodologia e estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos que sintetizam os aspetos mais relevantes associados ao tema em estudo. Neste capítulo, além de ser efetuado um breve enquadramento e de serem definidos os objetivos pretendidos, são também referidos sumariamente os conteúdos de cada capítulo.

No capítulo 2 esclarece-se inicialmente o conceito e fenómeno de galgamento e distinguem-se as diversas formas sob as quais pode surgir. Na tentativa de melhor compreender este fenómeno, são expostas as variáveis condicionantes mais frequentemente referidas na literatura e as principais abordagens disponíveis para a quantificação do caudal galgado. Por fim, depois de compreender o fenómeno de galgamento, entender a influência dos fatores condicionantes e conhecer as ferramentas disponíveis para o cálculo, é apresentada a metodologia considerada para a avaliação do risco de galgamento.

De seguida, no capítulo 3 pretende-se descrever as metodologias de cálculo adotadas e as respetivas limitações e condicionantes de aplicação. A análise de sensibilidade da estimativa de caudais galgados em função de diferentes parâmetros permite uma noção do comportamento e da influência de cada parâmetro interveniente no valor final do caudal. A analogia e comparação das diversas abordagens contribuem para a decisão sobre qual se torna a mais adequada a cada tipologia de estrutura em análise.

No quarto capítulo é apresentado o caso de estudo: três tipos distintos de obras longitudinais aderentes, localizadas nas praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, pertencentes ao litoral do concelho de Ovar. A história desta região, que se traduz pelas atividades e intervenções que o ser humano tem efetuado, representa um primeiro passo no estudo desta zona costeira. Os eventos de dano que têm sido registados nas praias do concelho devido à ação marítima são também representativos das tendências passadas e um auxiliar essencial para as tentativas de projeção do comportamento futuro. Conhecido o clima de agitação marítima válido no local em estudo, é ainda possível definir diferentes cenários de propagação que permitirão estabelecer uma relação com a evolução da frequência de galgamentos ao longo do tempo.

Com base nos cenários já definidos no capítulo 4, são depois explorados os resultados em termos do número de galgamentos e dos respetivos caudais. Este quinto capítulo permite ainda uma noção do período de retorno associado a cada local e do risco, traduzido em consequências e perigos, decorrente dos volumes galgados.

Por último, o capítulo 6 sintetiza as principais considerações, relembra os principais resultados e propõe alguns desenvolvimentos que podem vir a ser realizados no futuro para continuidade e melhoria do trabalho até aqui desenvolvido.



## Capítulo 2

---

# GALGAMENTO COSTEIRO





## 2 GALGAMENTO COSTEIRO

Pretende-se com este capítulo apresentar um enquadramento teórico relativo a diferentes assuntos relacionados com o galgamento costeiro. Inicialmente clarifica-se o conceito de galgamento, ilustram-se os diferentes tipos de galgamento que se podem distinguir e enumeram-se as principais condicionantes deste fenómeno. Para além disso, identificam-se as metodologias atualmente existentes para o seu cálculo e quantificação e faz-se referência à questão do risco de ocorrência deste acontecimento.

### 2.1 Descrição do fenómeno

O galgamento de estruturas de defesa costeira é um fenómeno que se caracteriza pelo transporte de massa de água sobre o coroamento da estrutura. Quando a onda incide numa determinada estrutura, parte da sua energia cinética é dissipada por rebentação, atrito, percolação e parte é refletida para o largo. A energia cinética excedente, após a ocorrência destes processos de interação onda-estrutura, transforma-se em energia potencial no escoamento que ocorre já sobre a estrutura (espraiamento). A cota de máximo espraiamento, inequivocamente relacionada com o conceito de galgamento, como explicam Silva *et al.* (2013), depende, em cada ponto, das características da linha de costa e, em cada momento, da soma das seguintes componentes verticais: nível do mar, determinado pela maré astronómica, acrescido da sobrelevação meteorológica, e espraiamento (*runup*) que inclui o *setup*, entendido como a sobrelevação do nível do mar devido à ação da onda, e o *swash*, ou seja o estender da onda pelo talude. Em conclusão, pode dizer-se que o galgamento ocorre quando a cota de máximo espraiamento excede a cota de coroamento da estrutura costeira, como se ilustra na Figura 2.1.

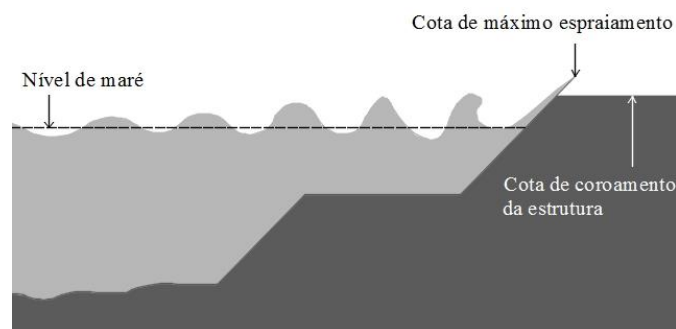


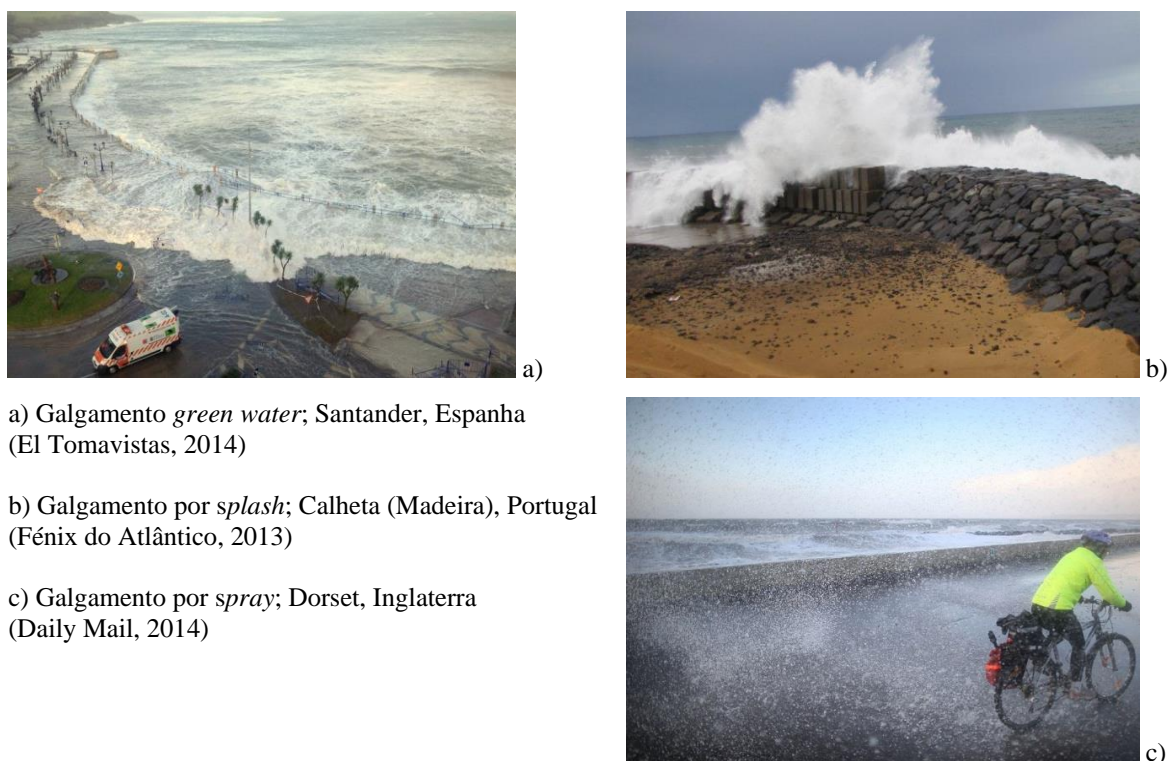
Figura 2.1: Representação esquemática dos fenómenos de espraiamento e de galgamento sobre uma obra longitudinal aderente.

Note-se, no entanto, que o galgamento é um processo de distribuição desigual no tempo e no espaço, uma vez que a quantidade de água transposta em cada onda é consideravelmente variável. Como facilmente se entende, ondas maiores têm capacidade de impulsionar maiores volumes de água sobre o coroamento da estrutura (Pullen *et al.*, 2007). É precisamente o carácter aleatório da agitação marítima que torna difícil controlar por completo a ocorrência dos fenómenos de galgamento. Por esta razão, admite-se usualmente no dimensionamento de obras marítimas que estas possam ser galgadas por uma determinada percentagem de ondas incidentes.

## 2.2 Tipos de galgamento

O fenómeno de galgamento pode manifestar-se de diversas formas que se distinguem em função do modo como a massa de água transpõe a estrutura. Segundo Pullen *et al.* (2007), o tipo de galgamento mais relevante no tratamento das questões costeiras é denominado de *green water* e, neste caso, a massa líquida passa continuamente sobre o coroamento da estrutura (ver Figura 2.2a). No caso particular de se tratar de uma estrutura de parede vertical pode acontecer que a incidência das ondas origine uma coluna de água também vertical que galgue igualmente a estrutura. Além desta forma primária de ocorrência de galgamento, distinguem-se ainda duas outras situações. A primeira, ilustrada na Figura 2.2b, acontece quando as ondas rebentam sobre a face exposta da obra costeira e originam um volume considerável de salpicos que passam sobre a estrutura (*splash*), quer sob o efeito da própria dinâmica, quer sob o efeito da ação do vento, ou mesmo com a conjugação dos dois. A segunda, representada pela Figura 2.2c, ocorre quando a ação do vento na crista das ondas é significativa e possui capacidade para transportar borrifos (*spray* ou *white water*). Contudo, embora esta situação possa conceber perigos diversos como, por exemplo, a redução repentina de visibilidade nas estradas costeiras, tem pouca expressão em termos quantitativos (Pullen *et al.*, 2007).

É de referir que, apesar dos efeitos do vento e a formação de borrifos não serem geralmente tidos em conta nas modelações, em galgamentos cujo caudal médio galgado seja inferior a 1l/s/m, os ventos fortes *onshore* podem aumentar o valor do caudal até 4 vezes. Este facto revela-se importante pois caudais médios até 1l/s/m podem corresponder aos limites sugeridos para condicionar acessos a pessoas ou veículos em determinadas situações (Pullen *et al.*, 2007).



a) Galgamento *green water*; Santander, Espanha (El Tomavistas, 2014)

b) Galgamento por *splash*; Calheta (Madeira), Portugal (Fénix do Atlântico, 2013)

c) Galgamento por *spray*; Dorset, Inglaterra (Daily Mail, 2014)

Figura 2.2: Ilustração das diversas formas de ocorrência do galgamento.

## 2.3 Fatores condicionantes

Vários são os fatores que condicionam a avaliação do galgamento e em particular dos volumes de água galgados. Procedeu-se à identificação dos parâmetros referidos na bibliografia e nesta secção pretende-se sumariar a influência do nível de água, da agitação marítima e das características da estrutura galgada. Os fatores que agora se referem acabam por ser explicitamente considerados na generalidade das expressões ou métodos de estimativa dos caudais galgados e serão, portanto, analisados com maior detalhe durante a posterior aplicação de modelos de cálculo.

### 2.3.1 Nível da superfície livre da água

A informação sobre o nível da superfície livre da água num determinado local pode ser obtida com base nas leituras de marégrafos, que são instrumentos que possibilitam a medição da variação do nível das águas ao longo do tempo, ou através das previsões da maré astronómica, efetuadas pelo Instituto Hidrográfico (IH), calculadas com base em análises harmónicas de séries de observações maregráficas de duração variável (IH, 2016a).

A variação do nível da superfície da água depende da influência da maré astronómica, mas também se pode referir o efeito das tempestades e das sobreelevações meteorológicas (resultantes de ventos fortes e persistentes, variações na pressão atmosférica e agitação intensa) que podem contribuir para o aumento da cota da superfície da água.

De facto, o nível da superfície livre da água condiciona fortemente o galgamento sendo em geral mais crítico nas situações em que está mais elevado. Grande parte da energia das ondas é dissipada no espraçamento que ocorre quando as ondas atingem a estrutura. No entanto, em preia-mar, a distância entre o nível de repouso da superfície da água e a cota de coroamento da estrutura é menor do que em condições de baixa-mar, o que se reflete numa menor área de talude emersa. Nesta situação, aumenta a probabilidade de ocorrência de galgamentos pois grande parte da energia não é dissipada no espraçamento.

### **2.3.2 Agitação marítima**

A agitação local difere da que se verifica ao largo devido aos fenómenos que ocorrem, por interação entre as ondas e os fundos e fronteiras sólidas, ao longo da propagação até à costa. Enquanto as características ao largo se podem assumir aproximadamente idênticas numa larga extensão, as características junto à costa são próprias de cada local, já que são influenciadas pelos fundos e pelo recorte da própria costa (Coelho, 2005). É, por isso, de grande importância a análise dos fenómenos de alteração da agitação na propagação em direção à costa, além da avaliação individual da influência de cada parâmetro de onda no galgamento. O conhecimento do clima de agitação depende da determinação das principais características das ondas, podendo ser efetuada, por exemplo, *in situ* por boias ondógrafo.

#### **2.3.2.1 Características das ondas**

A agitação marítima é caracterizada por parâmetros como a altura de onda,  $H$ , o período de onda,  $T$ , e a direção de propagação,  $\beta$ . A influência do período pode ser representada, indiretamente, através da declividade da onda,  $s$ , que relaciona a altura de onda com o comprimento de onda,  $L$ .

O comprimento de onda é referido ao largo e pode ser estimado com base no período de onda médio  $T_{om}$  ( $L_{om}$ ) ou de pico  $T_{op}$  ( $L_{op}$ ), com os quais se obtêm, respetivamente, as

declividades  $s_{om}$  e  $s_{op}$ . A declividade, por sua vez, é definida para a altura de onda local, junto à estrutura e, habitualmente, o valor utilizado é o da altura de onda significativa calculada com o momento de ordem zero do espectro,  $H_{m0}$ . As equações 2.1 e 2.2 representam, respetivamente, o comprimento de onda ao largo e a declividade.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.1)$$

$$s = \frac{H}{L} \quad (2.2)$$

Ainda sobre o período de onda, Coelho (2005) analisou a relação entre estes e as alturas de onda significativa ( $H_s$ ) para uma série de registos da boia ondógrafo de Leixões entre 1981 e 2003, obtendo por tentativas de aproximação, pelo método dos mínimos quadrados, a equação 2.3.

$$T_{H_s} = 1,21H_s + 6,92 \quad (2.3)$$

Sabendo o valor do período de onda significativo ( $T_{H_s}$ ), estimam-se os períodos de onda de pico ( $T_{op}$ ), médio ( $T_{om}$ ) e espectral ( $T_{m-1,0}$ ), de acordo com as equações 2.4, 2.5 e 2.6 apresentadas pelo NN Manual (2016).

$$T_{op} \approx 1,05 T_{H_s} \quad (2.4)$$

$$T_{om} = \frac{T_{op}}{1,2} \quad (2.5)$$

$$T_{m-1,0} \approx \frac{T_{op}}{1,1} \quad (2.6)$$

Para além dos parâmetros já mencionados, a forma como a onda rebenta sobre a estrutura também se reflete no tipo de galgamento. A ação da onda sobre a estrutura, assim como alguns dos seus efeitos, pode ser representada pelo número de *Iribarren*,  $\xi$ , que relaciona o ângulo do talude da fronteira sólida,  $\alpha$ , com a declividade da onda e, consoante se utilize  $s_{om}$  ou  $s_{op}$ , obtém-se  $\xi_{om}$  ou  $\xi_{op}$ , de acordo com a equação 2.7.

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} \quad (2.7)$$

A avaliação do tipo de rebentação não considera diferentes rugosidades ou permeabilidades do talude ou da fronteira sólida onde ocorre a rebentação da onda.

Relativamente à influência do ângulo de incidência das ondas ( $\beta$ ) no fenómeno do galgamento, geralmente, quanto maior for o ângulo menor será o galgamento porque as

ondas sofrem de forma mais pronunciada do processo de refração, reduzindo a altura de onda na propagação. Às ondas com incidência normal à estrutura corresponde um valor de  $\beta$  de  $0^\circ$ , geralmente considerado nas abordagens empíricas que estimam os caudais de galgamento por testes bidimensionais.

### 2.3.2.2 Propagação das ondas

Como referido, o conhecimento dos fenómenos de propagação possibilita a obtenção das características de onda incidentes. Como tal, analisam-se os fenómenos de refração, empolamento, rebentação e espraçamento, com implicações na avaliação do efeito do galgamento.

O primeiro fenómeno, de refração, ocorre quando a linha de crista das ondas forma um determinado ângulo com as curvas de nível do fundo do mar. Nestes casos, a parte da crista que ainda está a maior profundidade apresenta maior celeridade em relação à parte menos profunda e as ondas sofrem deformação, tendendo a alinhar-se com as curvas batimétricas. Sendo válida a lei de *Snell*, que assume que a onda se propaga sobre uma batimetria regular e paralela, o coeficiente de refração,  $k_r$ , é dado pela equação 2.8 onde  $\beta_0$  e  $\beta$  representam, respetivamente, os ângulos entre as ortogonais à batimetria e a direção de propagação das ondas ao largo e no local (após refração).

$$k_r = \sqrt{\frac{\cos(\beta_0)}{\cos(\beta)}} \quad (2.8)$$

O fenómeno designado por empolamento deve-se essencialmente à diminuição das profundidades e acontece quando uma onda se aproxima de uma praia com uma incidência perpendicular. Neste caso, o comprimento de onda vai diminuindo como consequência da diminuição da velocidade de propagação, ao mesmo tempo que a altura vai aumentando. Tomando como válida a teoria linear de *Airy*, o coeficiente de empolamento,  $k_s$ , pode ser estimado pela equação 2.9 onde  $k$  representa o número de onda e  $h$  a profundidade de fundo.

$$k_s = \frac{\cosh(kh)}{\sqrt{kh + \sinh(kh) + \cosh(kh)}} \quad (2.9)$$

A contabilização dos dois fenómenos de propagação de onda descritos, refração e empolamento, reflete-se na altura de onda significativa ao largo,  $H_s$ , através dos respetivos coeficientes, permitindo obter a altura de onda incidente,  $H_i$  (equação 2.10).

$$H_i = H_s k_r k_s \quad (2.10)$$

A rebentação também está associada à propagação das ondas sobre fundos de profundidade decrescente. Quando a profundidade,  $h$ , desce além de um determinado valor (comumente estimado como  $H_s/0,78$ ), designado por profundidade de rebentação, a onda torna-se instável e rebenta.

É habitual distinguir os casos típicos de rebentação progressiva, rebentação mergulhante e rebentação oscilatória ou oscilante. O tipo de rebentação depende da inclinação do talude e da declividade da onda e pode ser expresso através do número de *Iribarren* (equação 2.7). Declives suaves são propícios à rebentação progressiva ( $\xi < 0,5$ ), enquanto que declives acentuados favorecem a rebentação mergulhante ( $0,5 < \xi < 3,3$ ). A declividade da onda intervém no sentido de que fortes declividades favorecem a rebentação progressiva, enquanto que ondas de fraca declividade propiciam a rebentação em mergulho (Castanho, 1966).

Finalmente, o espraçamento de uma onda é o movimento ascendente do seu volume de água através da face exposta da estrutura de defesa costeira e corresponde à fase de propagação após a rebentação da onda. Segundo Pullen *et al.* (2007) designa-se por altura de espraçamento a cota medida verticalmente em relação ao nível de repouso. Esta cota depende da declividade de onda, do nível da superfície da água do mar, da batimetria de fundo e da porosidade, rugosidade, permeabilidade e inclinação do manto resistente da obra de defesa costeira. Teixeira (2014) fez uma análise e categorização de formulações distintas para cálculo do espraio baseando-se em características das estruturas existentes na costa Noroeste portuguesa, obtendo por regressão linear uma formulação empírica simplificada (equação 2.11) que relaciona, para cada onda, o número de *Iribarren* com o nível de espraçamento máximo ( $R_{máx}$ ) correspondente.

$$R_{máx} = 0,41 H_s \xi \quad (2.11)$$

### 2.3.3 Estruturas de defesa costeira

A geometria da estrutura de defesa costeira constitui outro fator determinante no controlo e redução do galgamento, nomeadamente a distância entre o coroamento da estrutura e o nível de repouso da superfície livre,  $R_c$ . Quanto maior for a altura  $R_c$ , menor será a probabilidade de galgamento. Na geometria da estrutura há ainda que salientar a inclinação do talude, expressa no cálculo de estimativa do espraçamento através do número de *Iribarren*, afetando consequentemente a ação da onda sobre a estrutura.

A dissipação da energia das ondas incidentes constitui também um objetivo essencial no controlo dos galgamentos. Para tal, é necessário ter em conta a influência da rugosidade e da permeabilidade do talude, a existência de uma eventual berma de coroamento e a configuração da superestrutura.

Relativamente à rugosidade e à permeabilidade, pode dizer-se que são características que variam em função do material que constitui o manto de proteção exterior da estrutura e em função do modo de colocação dos blocos. Embora não exista um critério específico para a aplicação de cada tipo ou forma de material, destaca-se a utilização comum dos blocos de betão (que podem adotar diversas formas) e dos blocos de enrocamento.

O efeito da existência de uma berma de coroamento reflete-se, mais uma vez, na redução do galgamento. Quanto maior for a sua largura,  $G_c$ , e quanto mais acima do nível de repouso da superfície livre da água estiver, maior é a energia dissipada e, naturalmente, menor o galgamento.

Em situações de agitação violenta pode adotar-se uma superestrutura de configuração vertical ou curva (defletor de ondas) permitindo, esta última, o retorno da onda incidente e, consequentemente, uma maior dissipação de energia.

## 2.4 Ferramentas de cálculo

A quantificação do fenómeno de galgamento pode ser expressa em função do volume de água que atravessa determinada secção ( $m^3$ ) mas é, de modo geral, efetuada através do caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura,  $q$ , cujas unidades se apresentam em  $m^3/s/m$  ou, eventualmente, em  $l/s/m$  (Pullen *et al.*, 2007).



Face ao carácter irregular da agitação marítima incidente nas estruturas, à diversidade das soluções construtivas e aos diferentes materiais empregues, a estimativa do caudal médio galgado por unidade de comprimento de determinada estrutura marítima envolve um processo complexo que deve ser efetuado levando em conta as características da geometria da estrutura, do nível de maré e da agitação nela incidente (Fortes *et al.*, 2014), já referidas na secção 2.3. Mas, como referem Reis *et al.* (2013), são várias as metodologias disponíveis para o cálculo do galgamento de uma estrutura costeira: redes neuronais, fórmulas empíricas, modelos numéricos ou modelos físicos.

Importa referir que tanto as tradicionais formulações empíricas como as redes neuronais são métodos expeditos que não fornecem indicação sobre a distribuição espacial do caudal galgado na zona atrás da estrutura (Poseiro *et al.*, 2014).

### **2.4.1 Redes Neuronais**

Como explicam Neves *et al.* (2012), a rede neuronal é uma ferramenta matemática de modelação e identificação de sistemas físicos para os quais é difícil perceber o papel das variáveis de entrada no comportamento do sistema. Partindo de conceitos associados ao funcionamento do cérebro, a aplicação de tal ferramenta a um conjunto suficientemente extenso de “pares” (variáveis de entrada, variáveis de saída) permite encontrar as conexões entre as variáveis de entrada que originam os valores observados nas variáveis de saída. Um subconjunto dos “pares” de dados é utilizado na chamada fase de “treino” da rede neuronal, em que são definidos os parâmetros e as ligações entre os neurónios da rede que vão minimizar o erro entre o valor observado e o previsto com base na rede, enquanto os pares restantes são utilizados na fase de “teste” da rede onde se confirma a bondade das previsões fornecidas pela rede.

O uso de redes neuronais tem tido um papel importante na determinação do galgamento, especialmente em fase de Estudo Prévio (Reis e Neves, 2010). Como exemplo, estes autores referem a ferramenta *NN\_OVERTOPPING2* (e.g., van Gent *et al.*, 2005), baseada na análise de redes neuronais e desenvolvida no âmbito do Programa Europeu *CLASH* (Coeveld *et al.*, 2005; van der Meer *et al.*, 2005; van Gent *et al.*, 2005). Em paralelo com o mesmo projeto, Verhaeghe (2005) desenvolveu a ferramenta neuronal *Overtopping Predictor v1.1* na Universidade de Gent, Bélgica (Fortes *et al.*, 2015). As diferenças mais

notórias entre as duas ferramentas estão relacionadas com o número de testes de galgamentos e algoritmos matemáticos usados no treino e teste das ferramentas. A principal mais-valia proporcionada pela ferramenta *Overtopping Predictor v1.1* é a sua capacidade em identificar condições de agitação marítima incidentes na estrutura que conduzem a situações de galgamento nulo (Fortes *et al.*, 2015).

Recentemente, e de acordo com Sabino *et al.* (2013), foi desenvolvida no âmbito do projeto HIDRALERTA uma outra rede neuronal do tipo ARTMAP (*Adaptive Resonance Theory*), com técnicas de *Lógica Fuzzy*, que já foi aplicada na previsão da agitação marítima transferida desde uma boia ondógrafo (Santos *et al.*, 2013a) e no estudo do galgamento de um molhe portuário (Santos *et al.*, 2013b).

#### **2.4.2 Formulações empíricas**

Entre as ferramentas mais utilizadas para determinar o galgamento de uma estrutura marítima distinguem-se as formulações empíricas (*e.g.*, Besley, 1999; Coeveld *et al.*, 2005; Pullen *et al.*, 2007; Reis *et al.*, 2008) baseadas em resultados de ensaios em modelo físico e/ou em medições em protótipo (Reis *et al.*, 2011). Através das formulações empíricas, é possível estimar a série temporal dos caudais médios galgados no trecho em estudo a partir da série temporal da agitação marítima incidente no mesmo trecho (Fortes *et al.*, 2014).

Tal como as redes neuronais, as formulações empíricas têm como base um conjunto alargado de testes em modelo físico, limitando assim o cálculo do galgamento à definição das características tanto das estruturas estudadas, como das condições de onda presentes nos ensaios em modelo físico (Fortes *et al.*, 2014).

Outro aspeto fundamental, referido por Fortes *et al.* (2014), relaciona-se com a questão das formulações empíricas ou semiempíricas considerarem, de forma explícita, alguns dos fenómenos condicionantes do galgamento, enquanto nas ferramentas baseadas em resultados de redes neuronais se dispõe apenas de um procedimento de transformação de parâmetros de entrada do problema (por exemplo, as características geométricas do perfil da estrutura e os parâmetros definidores do estado de agitação incidente naquele perfil) na variável de saída (no caso, o caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura).

### 2.4.3 Modelação numérica

Nos últimos tempos, devido à melhoria dos meios de cálculo e ao desenvolvimento de modelos numéricos cada vez mais potentes, o uso deste tipo de modelos começou a tornar-se mais atrativo, pois a modelação numérica é mais rápida e mais barata que a modelação física e, uma vez feita a calibração e validação dos modelos, estes são muito flexíveis, quer em termos de condições de agitação, quer relativamente à geometria das estruturas. No entanto, para que as simulações efetuadas sejam realistas, os modelos devem ser capazes de representar todos os fenómenos hidrodinâmicos relevantes e de modelar um número de ondas suficiente para gerar resultados consistentes (Reis e Neves, 2010).

Atualmente, embora ainda não existam modelos numéricos que sejam simultaneamente precisos e eficientes do ponto de vista computacional, os diversos tipos de modelos disponíveis reúnem, cada um, parte destes requisitos. Entre os modelos existentes podem destacar-se os baseados na teoria da onda em condições de água pouco profunda, NLSW (*NonLinear Shallow Water*) (e.g., van Gent, 1994; Hu e Meyer, 2005), os modelos VOF (*Volume Of Fluid*) (e.g., Lin e Liu, 1998; Losada *et al.*, 2008), os modelos SC (*Surface Capturing*) (e.g., Ingram *et al.*, 2002, 2004) e os modelos SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) (e.g., Dalrymple e Rogers, 2006; Didier e Neves, 2009), cuja utilização se exemplifica na Figura 2.3.

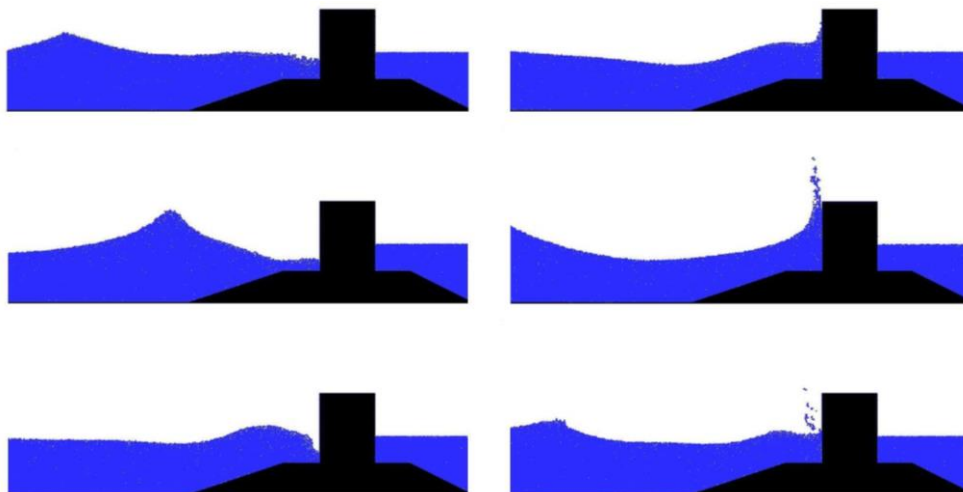


Figura 2.3: Ilustração da aplicação do modelo SPH: posição das partículas na interação entre uma onda sinusoidal e uma estrutura de tipo quebra-mar misto, num período de tempo (Didier e Neves, 2010).

De entre os modelos existentes na literatura, Didier e Neves (2010) destacam os 3 tipos distintos que se encontram atualmente em desenvolvimento ou validação no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC): o modelo AMAZON (Hu *et al.*, 2000), ilustrado na Figura 2.4, baseado nas equações não lineares de águas pouco profundas; o modelo COBRAS-UC (Lara *et al.*, 2006), baseado nas equações de *Reynolds*; e o modelo SPHysics (Dalrymple e Rogers, 2006), baseado num método Lagrangiano e no conceito SPH.

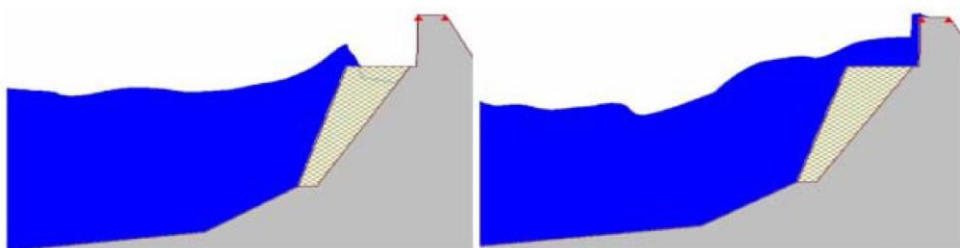


Figura 2.4: Ilustração da aplicação do modelo AMAZON: aspeto da superfície livre em dois instantes de cálculo, no molhe Sul do Porto da Póvoa de Varzim (Reis e Neves, 2010).

Apesar dos modelos mais recentes (VOF, SC e SPH) serem mais completos, como é também explicado por Reis e Neves (2010), a sua aplicação a casos práticos de Engenharia tem ainda algumas limitações, essencialmente relacionadas com o tempo elevado de cálculo que não se compadece com o pouco tempo usualmente disponível para projeto, com a necessidade de calibração de cada caso de estudo e com a representação de certas características estruturais tais como a porosidade (Neves *et al.*, 2007).

Em oposição, os modelos mais simples (NLSW), apesar das suas limitações essencialmente relacionadas com as equações de base, permitem simulações realistas e rápidas, se bem que simplificadas (*e.g.*, van Gent, 1994; Dodd, 1998; Hu, 2000; Clarke *et al.*, 2004) e estão já a ser utilizados em dimensionamento de estruturas marítimas galgáveis e na previsão de inundações, uma vez que permitem simular rapidamente 1000 (ou mais) ondas.

#### 2.4.4 Modelação física

A modelação física continua a ser o método mais fiável de determinar o galgamento, sendo os seus resultados utilizados em estudos de protótipo e no desenvolvimento, calibração e validação de outros métodos de cálculo. Contudo, a modelação física é

dispendiosa, morosa, exige infraestruturas e equipamento muito específico e requer ainda uma elevada experiência de quem realiza os ensaios e analisa os seus resultados (Reis e Neves, 2010).

Na Figura 2.5 ilustra-se a análise de galgamentos de um perfil-tipo, correspondente a ensaios realizados no LNEC, em modelo físico bidimensional, à escala geométrica de 1:50. No caso destes ensaios, como explicam Neves *et al.* (2007), reveste-se da maior importância o conhecimento dos efeitos de escala e de modelo que podem ocorrer.



Figura 2.5: Exemplo de um modelo físico: observação dos galgamentos na solução proposta para a reparação do molhe Sul do Porto da Póvoa de Varzim (Reis e Neves, 2010).

Resultados de protótipo e de ensaios em modelo físico a grandes escalas são raros e só recentemente foram efetuados vários estudos (Franco *et al.*, 2004; Geeraerts e Boone, 2004; Geeraerts e Willems, 2004; Hordijk, 2004; Kortenhaus *et al.*, 2004a; Pullen e Allsop, 2004a, 2004b) para preencher esta lacuna e permitir uma investigação desses efeitos (Kortenhaus *et al.*, 2004b, 2005; de Rouck *et al.*, 2005).

## 2.5 Risco de galgamento

As situações de emergência provocadas pelo estado do mar são frequentes, tornando clara a necessidade de prever situações de risco em zonas portuárias e costeiras, de realizar mapas de risco para apoio à decisão das entidades responsáveis e de emitir atempadamente alertas, minimizando as perdas de vidas e reduzindo os prejuízos (Neves *et al.*, 2012).

Nesta secção pretende-se definir os limites de caudais admissíveis para garantir a segurança de pessoas e bens e resumir a metodologia de avaliação do risco (associado à ocorrência de galgamentos) adotada.

### 2.5.1 Limites de caudais admissíveis

Um critério importante no dimensionamento de uma estrutura marítima ou numa avaliação de risco é o valor admissível para o caudal de galgamento (Neves *et al.*, 2012). O estabelecimento do valor crítico do caudal médio galgado depende das consequências do galgamento, da natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura, do perfil da estrutura galgada e da necessidade de garantir a segurança de pessoas e infraestruturas localizadas nessa zona.

Após a revisão da literatura encontram-se duas referências principais, apresentadas no Anexo A: a Tabela A1, adaptada de Burcharth e Hughes (2011), que apresenta intervalos de valores críticos do caudal médio galgado em função dos perigos ou danos associados, e a Tabela A2, adaptada de Pullen *et al.* (2007), que também define um limiar aceitável para diferentes níveis de galgamento. Embora as tabelas referidas sejam similares, Burcharth e Hughes (2011) apresentam valores mais conservativos e, além disso, utilizam uma gama de intervalos consecutivos de caudal médio galgado entre 0,0011/s/m a 10001/s/m, enquanto que Pullen *et al.* (2007) referem-se apenas a alguns intervalos entre 0,011/s/m e 2001/s/m.

### 2.5.2 Avaliação do risco

No sentido de avaliar os riscos associados aos efeitos da agitação marítima nas atividades costeiras e portuárias, tem vindo a ser desenvolvida no LNEC uma metodologia de avaliação do risco associado à ocorrência de galgamentos de estruturas portuárias ou defesas frontais. Segundo Reis *et al.* (2013), a metodologia é baseada na combinação entre os valores de probabilidade de ocorrência de um dado evento perigoso (por exemplo, galgamento/inundação pela ação das ondas) e os valores de consequências dessa ocorrência perigosa.

Para simplificar a determinação do grau de risco, considera-se uma escala de grau de probabilidade, associada à probabilidade de ocorrência de um acontecimento perigoso, e uma escala de grau de consequências, associada aos prejuízos desse acontecimento, conforme a equação 2.12.

$$\text{Grau de Risco} = \text{Grau de Probabilidade} \times \text{Grau de Consequências} \quad (2.12)$$

A Tabela 2.1 apresenta os graus de probabilidade de ocorrência de galgamento/inundação acima de um determinado limiar. Os limiares são definidos com base nas diretivas de Pullen *et al.* (2007), já referidas na secção 2.5.1, e levam em conta a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura, o perfil da estrutura galgada e a necessidade de garantir a segurança de pessoas e infraestruturas nessa zona.

Tabela 2.1: Graus de probabilidade de ocorrência de galgamento/inundação que excede os limiares pré-estabelecidos (Reis *et al.*, 2013).

<b>Descrição</b>	<b>Probabilidade de Ocorrência (Guia de Orientação)</b>	<b>Grau</b>
Improvável	0 – 1%	1
Raro	1 – 10%	2
Ocasional	10 – 25%	3
Provável	25 – 50%	4
Frequente	> 50%	5

A Tabela 2.2 representa uma descrição preliminar dos graus das consequências da ocorrência de um evento com valores da cota máxima de inundação e/ou valores de caudal médio de galgamento que, de forma geral, excedem limites pré-estabelecidos. O meio recetor é considerado perante a ocorrência da galgamento/inundação, tendo como objetivos a identificação de valores naturais, culturais, antrópicos e socioeconómicos. Os critérios considerados têm em conta o reconhecimento dos *habitats* com valor ecológico, a ocupação do solo, a densidade de construção e a localização das edificações em relação à proximidade do elemento potencialmente “agressor”, a permanência nas habitações e outros valores absolutamente únicos cuja perda seria irreparável (Reis *et al.*, 2013).

No âmbito da metodologia apresentada por Reis *et al.* (2013) para a obtenção do grau de risco de galgamento/inundação, os autores realizaram uma avaliação qualitativa resultante do produto dos graus atribuídos à probabilidade de ocorrência de um evento adverso (Tabela 2.1) e às consequências da ocorrência desse evento (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Graus de consequências da ocorrência de galgamento/inundação que excede os limiares pré-estabelecidos (Reis *et al.*, 2013).

Descrição	Consequências (Guia de Orientação)	Grau
Insignificantes	Locais com características geotécnicas relativamente estáveis; praias de areia natural, locais ocupados por <i>habitats</i> de reduzido valor ecológico; caminhos locais ou valas de drenagem.	1
Reduzidas	Locais com solos de características geotécnicas fracas ou possuindo alguma vegetação do tipo arbustivo ou outro que lhe confira alguma estabilidade; áreas ocupadas por <i>habitats</i> em condições fitossanitárias débeis.	2
Sérias	Locais com infraestruturas de proteção costeira; locais com estruturas para atividades económicas relevantes; locais com características geotécnicas muito fracas, pouco estáveis e de reduzida resistência à desagregação; áreas ocupadas por <i>habitats</i> com algum interesse ecológico.	5
Muito sérias	Locais com ocupação humana permanente (zonas urbanas planeadas); locais com estruturas para atividades económicas muito relevantes e permanentes; locais com características geotécnicas muitíssimo fracas, muito instáveis e de muito reduzida resistência à desagregação, sem vegetação estabilizadora; locais com elementos naturais de grande valor cuja perda seria difícil de compensar.	10
Catastróficas	Locais com ocupação humana permanente; locais absolutamente únicos e de enorme valor, e cuja perda seria irreparável; sistemas praia - duna.	25

Posteriormente, recorreram a uma matriz de cruzamento entre os dois graus, representada na Tabela 2.3, seguindo-se a Tabela 2.4, que representa uma descrição de avaliação da aceitabilidade do grau de risco obtido na tabela anterior.

Tabela 2.3: Graus de risco: matriz de cruzamento do grau atribuído à probabilidade de ocorrência de um evento adverso e do grau atribuído às consequências da ocorrência desse evento (Reis *et al.*, 2013).

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



Tabela 2.4: Avaliação da aceitabilidade do grau de risco obtido (Reis *et al.*, 2013).

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



## Capítulo 3

---

# QUANTIFICAÇÃO DO GALGAMENTO



### 3 QUANTIFICAÇÃO DO GALGAMENTO

Como ficou esclarecido no capítulo anterior, a estimativa dos caudais de galgamento pode ser efetuada seguindo diferentes abordagens de cálculo. Neste capítulo procedeu-se à seleção e ao estudo de algumas abordagens e realizou-se uma análise de sensibilidade de forma a perceber qual a influência de cada parâmetro no valor final do caudal de galgamento.

#### 3.1 Metodologias adotadas

As obras longitudinais aderentes que serão alvo de análise neste trabalho dividem-se em três tipos distintos: estrutura de talude simples, estrutura de talude com berma e estrutura com parede de coroamento. Partindo deste pressuposto e tendo em consideração as vantagens e limitações de cada metodologia de cálculo de galgamento já apresentadas, optou-se por utilizar as formulações empíricas apresentadas em Burcharth e Hughes (2011). Entre as formulações referidas, foram selecionadas as que mais se adequavam ao caso em estudo resultando por fim a fórmula de Owen (1980, 1982), a fórmula de van der Meer e Janssen (1995) e a fórmula de Pedersen e Burcharth (1992) e Pedersen (1996). Além disso, foram comparados os valores obtidos em tais formulações com os resultantes da rede neuronal *NN\_OVERTOPPING2* (e.g., van Gent *et al.*, 2005), com o intuito de compreender a eficiência e o desempenho das primeiras. De seguida descrevem-se com mais detalhe os dois tipos de metodologias adotadas, discriminando em particular as formulações empíricas aplicadas no decorrer do trabalho.

##### 3.1.1 Rede neuronal

Todas as redes neuronais utilizam 15 parâmetros de entrada que incluem informação sobre a agitação marítima e a geometria da estrutura (Figura 3.1), o que lhes confere uma maior flexibilidade de aplicação que as fórmulas empíricas/semiempíricas, limitadas pelas condições particulares a que se referem.

Para descrever a agitação marítima incidente na estrutura, são considerados 3 parâmetros: a altura de onda significativa espectral na base da estrutura ( $H_{m0}$ ), o período médio de onda espectral na base da estrutura ( $T_{m-1,0}$ ), e a direção de ataque da onda ( $\beta$ ).

Para descrever a forma geométrica da estrutura, são considerados os restantes 12 parâmetros: a profundidade em frente à estrutura ( $h$ ), a profundidade no pé do talude da estrutura ( $h_t$ ), a largura do pé do talude ( $B_t$ ), a rugosidade/permeabilidade do manto ( $\gamma_r$ ), o declive da estrutura abaixo da berma ( $\cot \alpha_d$ ), o declive da estrutura acima da berma ( $\cot \alpha_u$ ), a largura da berma ( $B$ ), a profundidade na berma ( $h_b$ ), o declive da berma ( $\tan \alpha_B$ ), o bordo livre da parte impermeável do coroamento da estrutura ( $R_c$ ), o bordo livre do manto permeável da estrutura ( $A_c$ ) e a largura do coroamento da estrutura ( $G_c$ ).

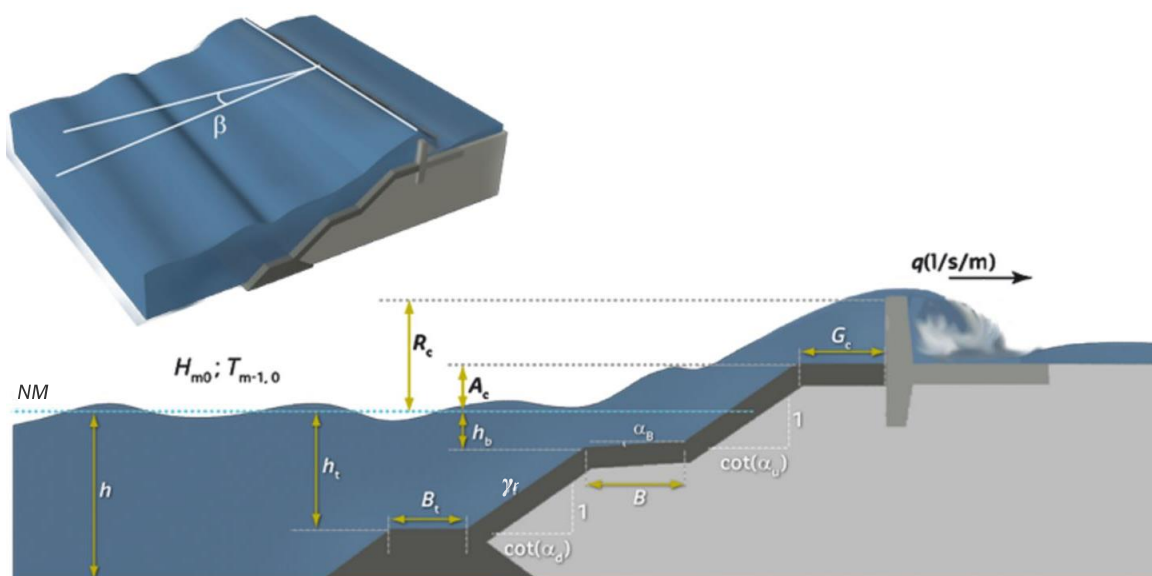


Figura 3.1: Parâmetros de entrada da ferramenta *NN\_OVERTOPPING2* (adaptado de NN Overtopping, 2015).

Assim, a aplicação de redes neurais ao cálculo do galgamento que ocorre sobre a estrutura obriga ao conhecimento de bastante informação, mas permite variantes da estrutura, reproduzindo diferentes resultados.

### 3.1.2 Formulações empíricas

As fórmulas empíricas que se expõem na Tabela 3.1 foram retiradas de Burcharth e Hughes (2011) e são as de maior interesse para o tipo de estruturas estudadas neste trabalho, distinguindo-se principalmente pelo campo de aplicação (características da estrutura e condições de agitação).

Tabela 3.1: Fórmulas empíricas para determinação do caudal médio galgado (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011).

Autores	Estruturas	Fórmula	Caudal médio adimensional, $Q$	Bordo livre adimensional, $R$
Owen (1980,1982)	Estruturas de talude impermeável, liso ou rugoso, simples ou com berma	$Q = a e^{-bR}$	$\frac{q}{g H_s T_{om}}$	$\frac{R_c}{H_s} \left(\frac{S_{om}}{2\pi}\right)^{0,5} \frac{1}{\gamma_r}$
Pedersen e Burcharth (1992)	Estruturas de talude impermeável de enrocamento, com parede de coroamento	$Q = a R$	$\frac{q T_{om}}{L_{om}^2}$	$\frac{H_s}{R_c}$
van der Meer e Janssen (1995)	Estruturas de taludes impermeáveis, lisos ou rugosos, simples ou com berma	$Q = a e^{-bR}$	$\frac{q}{\sqrt{g H_s^3}} \sqrt{\frac{S_{op}}{\tan\alpha}}$	$\frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{S_{op}}}{\tan\alpha} \frac{1}{\gamma}$
			para $\xi_{op} < 2$	para $\xi_{op} < 2$
			$\frac{q}{\sqrt{g H_s^3}}$	$\frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma}$
			para $\xi_{op} > 2$	para $\xi_{op} > 2$
Pedersen (1996)	Estruturas de taludes permeáveis de enrocamento com parede de coroamento	$Q = R$	$\frac{q T_{om}}{L_{om}^2}$	$3,2 \cdot 10^{-5} \frac{H_s^5 \tan\alpha}{R_c^3 A_c G_c}$

Estas fórmulas foram definidas tendo como base os dois tipos de formulações matemáticas apresentados nas equações 3.1 e 3.2, em que se ajustam a forma e os coeficientes de cada equação de modo a reproduzir os resultados das medições em campo ou nos modelos físicos. Nestas equações,  $Q$  representa o caudal médio adimensionalizado por metro,  $R$  é o bordo livre da estrutura adimensionalizado e, finalmente,  $a$  e  $b$  são coeficientes específicos da geometria da parte frontal da estrutura (Burcharth e Hughes, 2011).

$$Q = a e^{-(bR)} \quad (3.1)$$

$$Q = aR^{-b} \quad (3.2)$$

Algumas fórmulas apresentadas têm em consideração a redução do caudal galgado devido à influência da existência de uma berma no talude da estrutura, da rugosidade/permeabilidade da estrutura, de águas pouco profundas em frente à estrutura e

da obliquidade das ondas relativamente à estrutura. Estes fatores são considerados nas formulações dividindo  $R$  pelos respetivos coeficientes de redução ( $\gamma_b, \gamma_r, \gamma_h$  e  $\gamma_\beta$ ). O produto destes quatro fatores é representado por  $\gamma$ .

Os parâmetros da agitação marítima  $T_{om}, T_{op}, L_{om}, L_{op}, S_{om}, S_{op}, \beta$  e  $H_s$  já foram definidos na secção 2.3.2. Os parâmetros geométricos  $\alpha, R_c, A_c, G_c, B, h$  e  $h_b$  correspondem aos indicados para a rede neuronal (secção 3.1.1) e são também ilustrados na Figura 3.2. Do mesmo modo,  $\alpha$  é um parâmetro comum à rede neuronal que distingue  $\alpha_d$  e  $\alpha_u$  conforme se refira o declive abaixo ou acima da berma. Nas formulações empíricas esta distinção é feita pelo parâmetro  $\gamma_b$ , de acordo com o que será indicado posteriormente na secção 3.1.3.2. Finalmente,  $g$  representa a aceleração da gravidade.

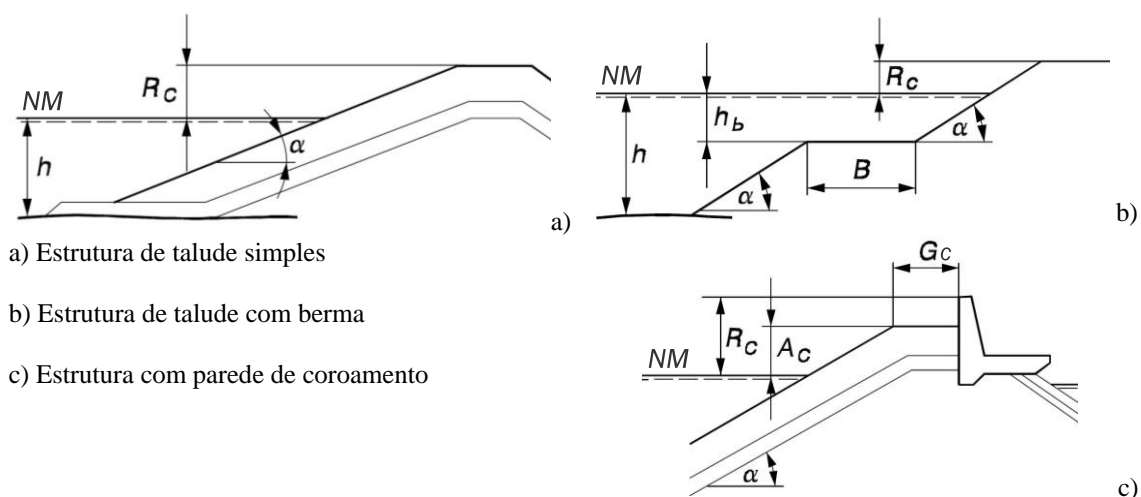


Figura 3.2: Parâmetros geométricos do perfil transversal de cada tipo de estrutura, nas formulações empíricas (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011).

Apresentadas e analisadas as formulações, referem-se de seguida alguns detalhes ou particularidades a respeito dos parâmetros intervenientes.

### 3.1.2.1 Fórmula de Owen

A fórmula de Owen (1980, 1982) é aplicável a estruturas de talude simples e a estruturas de talude com berma e para esta fórmula os coeficientes  $a$  e  $b$  são os que se apresentam nas Tabelas 3.2 e 3.3 respetivamente.



Tabela 3.2: Coeficientes  $a$  e  $b$  da fórmula de Owen, para estruturas de talude simples (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011).

Declive do talude (V/H)	$a$	$b$
1 : 1	0,008	20
1 : 1,5	0,010	20
1 : 2	0,013	22
1 : 3	0,016	32
1 : 4	0,019	47

Tabela 3.3: Coeficientes  $a$  e  $b$  da fórmula de Owen, para estruturas de talude com berma (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011).

Declive do talude (V/H)	$h_b$ (m)	$B$ (m)	$a \cdot 10^4$	$b$
1 : 1			64	20
1 : 2	-4,0	10	91	22
1 : 4			145	41
1 : 1			34	17
1 : 2	-2,0	5	98	24
1 : 4			159	47
1 : 1			48	19
1 : 2	-2,0	10	68	24
1 : 4			86	46
1 : 1			8,8	15
1 : 2	-2,0	20	20	25
1 : 4			85	50
1 : 1			3,8	23
1 : 2	-2,0	40	5,0	26
1 : 4			47	51
1 : 1			155	33
1 : 2	-1,0	5	190	37
1 : 4			500	70
1 : 1			93	39
1 : 2	-1,0	10	340	53
1 : 4			300	80
1 : 1			75	46
1 : 2	-1,0	20	34	50
1 : 4			39	62
1 : 1			12	49
1 : 2	-1,0	40	24	56
1 : 4			1,5	63
1 : 1			97	42
1 : 2	0	10	290	57
1 : 4			300	80

### 3.1.2.2 Fórmula de van der Meer e Janssen

A fórmula de van der Meer e Janssen (1995), aplicável também a estruturas de talude simples ou com berma, tem em conta a influência de todos os coeficientes de redução: a rugosidade da superfície ( $\gamma_r$ ), a existência de berma ( $\gamma_b$ ), a baixa profundidade junto à costa ( $\gamma_h$ ) e a obliquidade de incidência das ondas ( $\gamma_\beta$ ). O mínimo valor de qualquer combinação dos fatores de redução devido às características anteriores é 0,5. Os valores dos coeficientes  $a$  e  $b$  quando  $\zeta_{op}$  é inferior a 2 são 0,06 e 5,2; nos restantes casos são 0,2 e 2,6 respetivamente. Nos casos em que o valor de  $\zeta_{op}$  é inferior a 2 existe ainda uma limitação ao intervalo de aplicação desta formulação, de acordo com a equação 3.3.

$$0,3 < \frac{R_c}{H_s} \frac{\sqrt{s_{op}}}{\tan\alpha} \frac{1}{\gamma_r \gamma_b \gamma_h \gamma_\beta} < 2 \quad (3.3)$$

### 3.1.2.3 Fórmula de Pedersen e Burcharth

Na fórmula de Pedersen e Burcharth (1992) e Pedersen (1996), adequada a estruturas com uma berma na frente da parede de coroamento, há apenas que salientar a não interveniência dos fatores de redução e o facto de existir uma certa tendência conservativa para pequenos valores de caudal galgado.

### 3.1.3 Fatores de redução

Os valores e equações de cálculo dos fatores de redução são sugeridos por Burcharth e Hughes (2011) para as fórmulas empíricas e, para a rede neuronal, são os indicados em NN Manual (2016) sendo que neste caso o único fator aplicável é devido à rugosidade.

#### 3.1.3.1 Rugosidade da superfície

O fator de redução devido à rugosidade da superfície ( $\gamma_r$ ) nas formulações empíricas varia entre 0,55 e 0,60 no caso do manto resistente ser constituído por uma camada enrocamento. Estes valores, segundo Burcharth e Hughes (2011), foram retirados de de Waal e van der Meer (1992) e são válidos para  $1 < \zeta_{op} < 3-4$ . Para valores de  $\zeta_{op}$  mais elevados, o fator  $\gamma_r$  aumenta gradualmente até 1.

Quanto à rede neuronal *NN\_OVERTOPPING2*, o valor sugerido é de 0,7 para as mesmas condições, ou seja, para estruturas constituídas por uma camada de rocha.

### 3.1.3.2 Existência de berma

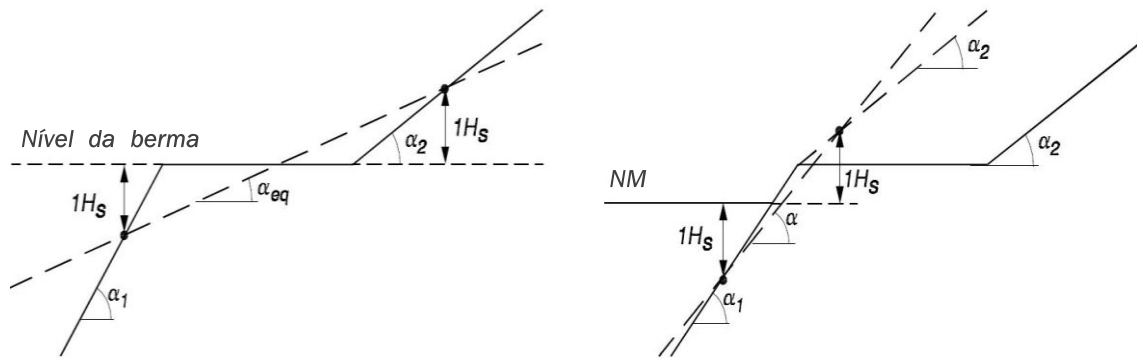
Este fator de redução serve para clarificar a influência da existência de uma berma horizontal (ou quase horizontal) no espraiamento e é obtido de acordo com a equação 3.4, onde  $\xi_{eq}$  é calculado para um talude equivalente.

$$\gamma_b = \frac{\xi_{eq}}{\xi_{op}} = 1 - r_B (1 - r_{hb}), \quad 0,6 \leq \gamma_b \leq 1,0 \quad (3.4)$$

A definição do talude equivalente e do talude médio, necessários à resolução das equações 3.5 e 3.6, ilustra-se na Figura 3.3.

$$r_B = 1 - \frac{\tan \alpha_{eq}}{\tan \alpha} \quad (3.5)$$

$$r_{hb} = 0,5 \left( \frac{h_b}{H_s} \right)^2, \quad 0 \leq r_{hb} \leq 1 \quad (3.6)$$



a) Talude equivalente,  $\alpha_{eq}$  (incluindo a berma)

b) Talude médio,  $\alpha$  (excluindo a berma)

Figura 3.3: Definição dos ângulos do talude equivalente,  $\alpha_{eq}$ , e do talude médio,  $\alpha$ , da equação 3.5.

No caso da inexistência de berma, ou seja, nas estruturas de talude simples,  $\gamma_b$  toma o valor 1. A influência da berma pode também ser desprezada quando a sua superfície horizontal está posicionada a uma distância superior a  $H_s\sqrt{2}$  abaixo da superfície livre da água. No caso da superfície horizontal da berma se encontrar a uma distância superior a  $h_b = H_s\sqrt{2}$  acima da superfície livre da água, o espraiamento pode ser calculado como  $R_{u2\%} = h_b$  se  $B/H_s \geq 2$ . A localização mais eficaz da berma corresponde à posição em que esta se encontra ao nível da superfície livre da água.

### 3.1.3.3 Altura da coluna de água

Em condições de águas profundas a distribuição de alturas de onda corresponde a uma distribuição de Rayleigh e o fator de redução ( $\gamma_h$ ) toma o valor 1. No entanto, em águas pouco profundas, algumas ondas rebentam antes de atingirem a estrutura e, por isso, as alturas de onda já não correspondem à distribuição atrás referida. De acordo com de Waal e van der Meer (1992), a influência deste fator pode ser estimada pela equação 3.7.

$$\gamma_h = \frac{H_{2\%}}{1,4 H_s} \quad (3.7)$$

Realça-se que a altura de onda significativa é referente à profundidade na base da estrutura e que  $H_{2\%}/H_s=1,4$  para uma distribuição de alturas de onda de Rayleigh, ou seja,  $\gamma_h=1,0$ .

### 3.1.3.4 Obliquidade de incidência das ondas

A influência da direção de incidência das ondas pode ser calculada pela equação 3.8.

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 1,0 & \text{para } 0^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \\ \cos^2(\beta - 10^\circ) & \text{para } 10^\circ < \beta \leq 50^\circ \\ 0,6 & \text{para } \beta > 50^\circ \end{cases} \quad (3.8)$$

Note-se que as gamas de valores indicadas referem-se já ao caso particular da fórmula de van der Meer e Janssen (1995) por ser a única fórmula, de entre as três selecionadas para este estudo, a incluir o parâmetro  $\gamma_\beta$ .

## 3.2 Análise de sensibilidade

O estudo de sensibilidade realizado aos diferentes parâmetros incide sobre a fórmula de Owen (1980, 1982) e a fórmula de van der Meer e Janssen (1995) para estruturas de talude com ou sem berma e, no caso de estruturas de talude com parede de coroamento, sobre a fórmula de Pedersen e Burcharth (1992) e Pedersen (1996). Daqui em diante, com o intuito de abreviar as designações serão apresentados nas legendas dos gráficos os códigos “Owen”, “vdM & Jan” e “Ped & Bur”.

A metodologia de análise adotada consiste na alteração do valor do parâmetro em estudo, fixando os restantes com valores de referência. Deste modo, definem-se graficamente diversas curvas correspondentes à variação do valor do caudal médio galgado em função

da altura de onda incidente, repetindo-se este processo para os diversos cenários simulados.

Além de analisar o comportamento de cada parâmetro interveniente nas diversas fórmulas, importa também compreender a eficiência e o desempenho das próprias formulações quando comparadas com outra referência de cálculo do caudal médio galgado. Esta avaliação foi feita com recurso às redes neuronais, mais precisamente, à ferramenta *NN\_OVERTOPPING2* (referida nos gráficos como “NNOvertop”).

### 3.2.1 Cenários de referência

Identificam-se primeiro os cenários de referência considerados nesta análise definidos, no caso dos parâmetros geométricos da estrutura (secção 3.2.1.2), em função das possibilidades apresentadas pela fórmula de Owen para o cálculo dos coeficientes  $a$  e  $b$  (de acordo com as Tabelas 3.2 e 3.3).

#### 3.2.1.1 Agitação marítima incidente

Existem desde logo 2 parâmetros relacionados com a caracterização das ondas que, de forma direta ou indireta, se repetem nas formulações: a altura significativa de onda ( $H_s$ ) e o período de onda ( $T$ ). As alturas significativas de onda estudadas correspondem às máximas alturas de onda calculadas em função da profundidade ( $H_s=0,78h$ ) na base da estrutura. Para os valores de profundidade ( $h$ ) foi selecionado um intervalo que varia uniformemente entre 1 e 11m, o que corresponde a 11 casos de altura de onda diferentes entre 0,78 e 8,58m. O cálculo do período de onda significativo ( $T_{H_s}$ ) foi efetuado de acordo com a equação 2.3, permitindo estimar pelas equações 2.4 a 2.6 os períodos de onda de pico ( $T_{op}$ ), médio ( $T_{om}$ ) e espectral ( $T_{m-1,0}$ ).

Estas características da agitação permitem a avaliação de outras grandezas necessárias à caracterização das ondas, como o comprimento de onda ( $L$ ), a declividade de onda ( $s$ ) e o número de *Iribarren* ( $\xi$ ), também intervenientes no cálculo dos caudais de galgamento. Todos os parâmetros agora referidos são apresentados na Tabela 3.4, para os vários cenários de análise, à exceção do número de *Iribarren* associado ao período de onda de pico ( $\xi_{op}$ ) e ao período de onda médio ( $\xi_{om}$ ) que se apresentam na Tabela 3.5, para 5 situações de declive do talude ( $V/H$ ) da obra longitudinal aderente.

Tabela 3.4: Parâmetros de caracterização da agitação marítima, para os diversos cenários em análise.

<b>h</b> (m)	<b>H<sub>s</sub></b> (m)	<b>T<sub>Hs</sub></b> (s)	<b>T<sub>op</sub></b> (s)	<b>T<sub>om</sub></b> (s)	<b>T<sub>m-1,0</sub></b> (s)	<b>L<sub>op</sub></b> (m)	<b>S<sub>op</sub></b>	<b>L<sub>om</sub></b> (m)	<b>S<sub>om</sub></b>
1	0,78	7,9	8,3	7,2	7,5	106,4	0,0073	80,5	0,0097
2	1,56	8,8	9,2	8,0	8,4	133,5	0,0117	101,0	0,0155
3	2,34	9,8	10,2	8,9	9,3	163,7	0,0143	123,8	0,0189
4	3,12	10,7	11,2	9,8	10,2	196,9	0,0158	148,9	0,0210
5	3,90	11,6	12,2	10,6	11,1	233,2	0,0167	176,3	0,0221
6	4,68	12,6	13,2	11,5	12,0	272,5	0,0172	206,1	0,0227
7	5,46	13,5	14,2	12,4	12,9	315,0	0,0173	238,1	0,0229
8	6,24	14,5	15,2	13,2	13,8	360,4	0,0173	272,5	0,0229
9	7,02	15,4	16,2	14,1	14,7	409,0	0,0172	309,3	0,0227
10	7,80	16,4	17,2	14,9	15,6	460,6	0,0169	348,3	0,0224
11	8,58	17,3	18,2	15,8	16,5	515,3	0,0167	389,6	0,0220

Tabela 3.5: Número de *Iribarren* associado ao período de onda de pico ( $\xi_{op}$ ) e ao período de onda médio ( $\xi_{om}$ ), em função da inclinação do talude da estrutura.

<b>V/H</b> <b>H<sub>s</sub> (m)</b>	$\xi_{op}$					$\xi_{om}$				
	1/1	1/1,5	1/2	1/3	1/4	1/1	1/1,5	1/2	1/3	1/4
0,78	11,68	7,79	5,84	3,89	2,92	10,16	6,77	5,08	3,39	2,54
1,56	9,25	6,17	4,63	3,08	2,31	8,05	5,36	4,02	2,68	2,01
2,34	8,36	5,58	4,18	2,79	2,09	7,27	4,85	3,64	2,42	1,82
3,12	7,94	5,30	3,97	2,65	1,99	6,91	4,61	3,45	2,30	1,73
3,90	7,73	5,15	3,87	2,58	1,93	6,72	4,48	3,36	2,24	1,68
4,68	7,63	5,09	3,82	2,54	1,91	6,64	4,42	3,32	2,21	1,66
5,46	7,59	5,06	3,80	2,53	1,90	6,60	4,40	3,30	2,20	1,65
6,24	7,60	5,07	3,80	2,53	1,90	6,61	4,41	3,30	2,20	1,65
7,02	7,63	5,09	3,82	2,54	1,91	6,64	4,42	3,32	2,21	1,66
7,80	7,68	5,12	3,84	2,56	1,92	6,68	4,45	3,34	2,23	1,67
8,58	7,75	5,17	3,87	2,58	1,94	6,74	4,49	3,37	2,25	1,68

### 3.2.1.2 Geometria da estrutura

A escolha dos valores de referência dos parâmetros geométricos tem por base os valores médios entre os que foram considerados na análise, tendo sido definidos da seguinte

forma:  $R_c=5m$ ,  $V/H=1/2$ ,  $h_b=-1m$ ,  $B=10m$ ,  $A_c=1,5m$  e  $G_c=10m$ . Interessa lembrar que quando se avaliou a influência de um determinado parâmetro, os restantes tomaram um valor fixo, correspondente à situação de referência para posterior comparação. A altura do coroamento da estrutura relativamente ao nível da superfície livre da água ( $R_c$ ) é o único parâmetro comum a todas as formulações, sem limitações de aplicabilidade e, como tal, os valores que pode tomar foram escolhidos de forma ponderada, tendo em conta a aplicação a casos reais, resultando três situações distintas:  $R_c=3m$ ,  $R_c=5m$  e  $R_c=7m$ . As opções consideradas para os restantes parâmetros serão analisadas consoante as fórmulas que afetam e, inevitavelmente, conforme as estruturas a que as fórmulas se aplicam.

### **Estruturas de talude simples**

No caso da formulação de Owen, uma vez que a variação do ângulo do talude,  $\alpha$ , influencia os coeficientes  $a$  e  $b$  referentes à geometria da estrutura, optou-se por analisar os 5 casos representados na Tabela 3.2 ( $V/H=1/1$ ,  $V/H=1/1,5$ ,  $V/H=1/2$ ,  $V/H=1/3$  e  $V/H=1/4$ ). No caso de van der Meer e Janssen, foram analisados os mesmos 5 valores que Owen disponibiliza, facilitando assim a comparação dos resultados.

### **Estruturas de talude com berma**

Na expressão de Owen, à semelhança do que acontece na análise das estruturas de talude simples, o valor dos coeficientes  $a$  e  $b$  é dependente da inclinação do talude. Além disso, depende também da profundidade da berma,  $h_b$ , e da largura da berma,  $B$ , pelo que foram consideradas todas as combinações expostas na Tabela 3.3 ( $V/H=1/1$ ,  $V/H=1/2$  e  $V/H=1/4$ ;  $h_b=-4m$ ,  $h_b=-2m$ ,  $h_b=-1m$  e  $h_b=0$ ;  $B=5m$ ,  $B=10m$ ,  $B=20m$  e  $B=40m$ ). Na fórmula de van der Meer e Janssen foram adotados os mesmos valores.

### **Estruturas de talude com parede de coroamento**

Na fórmula de Pedersen e Burcharth são considerados dois novos parâmetros sem restrições de aplicabilidade: a altura da berma de coroamento relativamente ao nível da superfície livre da água,  $A_c$ , e a largura da berma de coroamento,  $G_c$ . Neste caso, foram escolhidas três situações para  $A_c$  ( $A_c=0,5m$ ,  $A_c=1,5m$  e  $A_c=2,5m$ ) analogamente ao que foi efetuado com  $R_c$ . Quanto ao parâmetro  $G_c$ , foram considerados os mesmos valores que para  $B$  ( $G_c=5m$ ,  $G_c=10m$ ,  $G_c=20m$  e  $G_c=40m$ ). O ângulo do talude toma os mesmos 5 valores que no caso das estruturas de talude simples.

A fórmula de Pedersen e Burcharth é a única utilizada no caso das estruturas que agora se analisam pois, apesar da fórmula de Bradbury e Allsop (1988) se adequar igualmente ao cálculo de caudais de galgamento neste tipo de estruturas, o campo de aplicação é muito limitativo uma vez que os coeficientes  $a$  e  $b$  dependem de relações específicas, pré-definidas, entre os parâmetros  $H_s$ ,  $R_c$ ,  $G_c$  e  $A_c$ , tornando pouco adequada a sua utilização.

### 3.2.2 Cenários de teste

Nesta secção serão estudados os cenários definidos, analisando para cada tipo de estrutura o comportamento das formulações aplicáveis e dos fatores de redução que nelas intervêm.

#### 3.2.2.1 Estruturas de talude simples

##### Fórmula de Owen

Na fórmula de Owen, a altura  $R_c$  é inversamente proporcional ao valor do caudal médio galgado, ou seja, os maiores valores de caudal galgado correspondem à menor altura considerada (Figura 3.4a). O comportamento do caudal galgado em função da inclinação do talude da estrutura apresenta 2 tendências de comportamento opostas, representadas graficamente na Figura 3.4b.

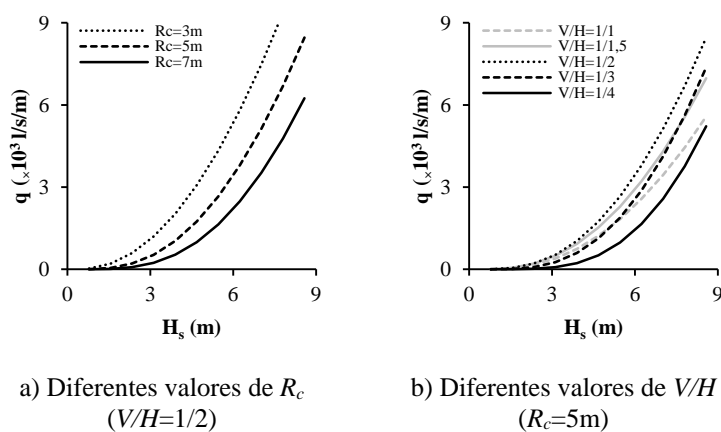


Figura 3.4: Caudal médio galgado em estruturas de talude simples, de acordo com a formulação de Owen, para diferentes valores da altura  $R_c$  e do declive  $V/H$ .

Quando se comparam os taludes 1/1, 1/1,5 e 1/2, dá-se o progressivo aumento dos valores de caudal com a diminuição da inclinação. Esta tendência inverte-se quando se analisam os taludes 1/2, 1/3 e 1/4, diminuindo os valores de caudal com a progressiva diminuição



do ângulo do talude. Existe apenas uma exceção que se reflete na comparação do talude 1/2 com o talude 1/3 em que, para o caso de  $R_c=3m$ , ainda se mantém a primeira tendência referida e, portanto, aumenta o caudal galgado para a menor inclinação.

### Fórmula de van der Meer e Janssen

A Figura 3.5a demonstra um comportamento do caudal médio galgado semelhante ao que se verificou na fórmula de Owen. No entanto, na fórmula de van der Meer e Janssen os valores de caudal são inferiores para cada valor de  $R_c$ . Para a onda com 8,58m de altura os caudais correspondem em média a 40% dos valores obtidos pela expressão de Owen e para ondas com 4,68m de altura correspondem em média a 25% sendo que estas percentagens, representativas da diferença entre os valores da fórmula de van der Meer e Janssen relativamente à fórmula de Owen, aumentam com o aumento da altura de onda.

Na Figura 3.5b expõem-se apenas 2 cenários de inclinação do talude uma vez que a fórmula de van der Meer e Janssen não depende da inclinação do talude para valores do número de *Iribarren* superiores a 2. Este facto acontece em todas as situações, exceto no caso do talude 1/4 ( $V/H$ ) para ondas com alturas superiores a 2,34m. Ainda assim, quando se comparam os caudais calculados por esta fórmula para o talude 1/4 com os restantes quatro casos de inclinação (em que o valor de caudal se mantém), a tendência é de valores de caudal galgado ligeiramente superiores para o caso da menor inclinação (declive 1/4). As duas curvas em análise são coincidentes para as ondas analisadas com alturas inferiores a 3,12m e mantêm-se próximas entre si para os restantes valores de altura de onda, com diferenças inferiores a 14%.

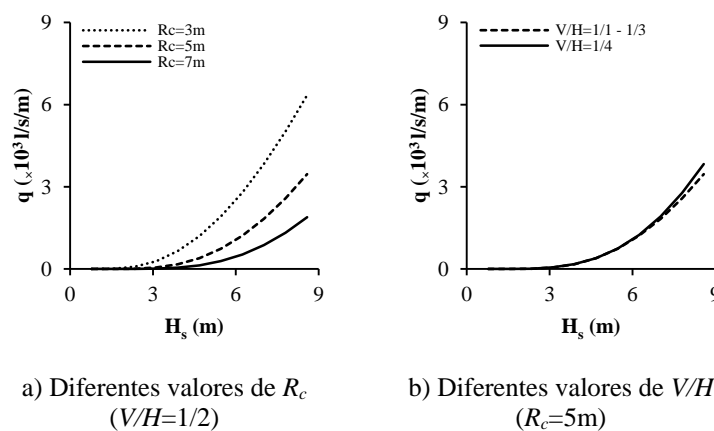


Figura 3.5: Caudal médio galgado em estruturas de talude simples, de acordo com a formulação de van der Meer e Janssen, para diferentes valores da altura  $R_c$  e do declive  $V/H$ .

### 3.2.2.2 Estruturas de talude com berma

#### Fórmula de Owen

De acordo com a Figura 3.6b, não existe uma relação de proporcionalidade direta entre a inclinação do talude e o valor de caudal, pois os maiores valores de caudal acontecem para o declive intermédio ( $V/H=1/2$ ) e os menores para o menor declive ( $V/H=1/4$ ). Este facto traduz a dependência dos resultados do valor do caudal galgado em relação aos coeficientes de regressão  $a$  e  $b$  definidos na Tabela 3.3 para cada valor de declive, bem como a importância da sua definição.

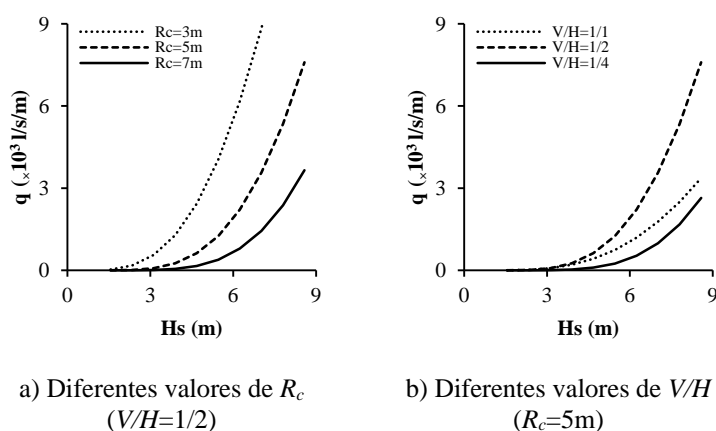


Figura 3.6: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de Owen, para diferentes valores da altura  $R_c$  e do declive  $V/H$  ( $B=10m$ ,  $h_b=-1m$ ).

À semelhança do que acontece com a altura do coroamento (ver Figura 3.6a) o aumento da largura da berma,  $B$ , faz diminuir os valores de caudal galgado (Figura 3.7).

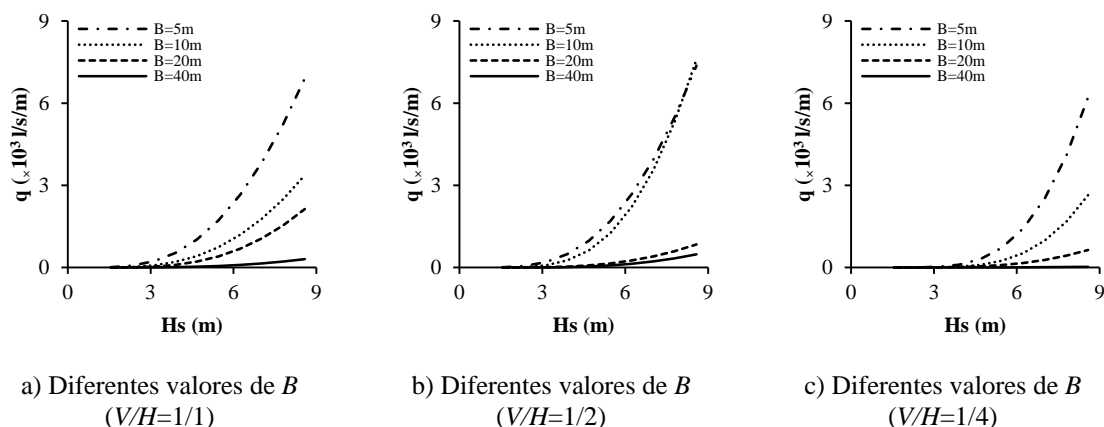


Figura 3.7: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de Owen, para diferentes valores da largura  $B$  ( $R_c=5m$ ,  $h_b=-1m$ ).

Há, porém, uma exceção que ocorre no caso do declive 1/2 em que para a máxima altura de onda ( $H_s=8,58\text{m}$ ), a berma com a largura de 10m é a que provoca os maiores caudais galgados (em oposição ao que acontece nos restantes casos, em que seria a berma com 5m de largura a correspondente aos máximos caudais). Esta situação é pontual e reflete novamente a influência e a importância dos parâmetros  $a$  e  $b$ .

Na Figura 3.8 é possível identificar uma tendência de valores de caudal mais elevados para a maior profundidade da berma ( $h_b=-4\text{m}$ ) e valores mais baixos para a menor profundidade ( $h_b=0$ ) em todas as situações, exceto no talude com inclinação 1/2 ( $V/H$ ) que origina tendências pouco nítidas devido ao crescimento mais acentuado das curvas correspondentes às menores profundidades.

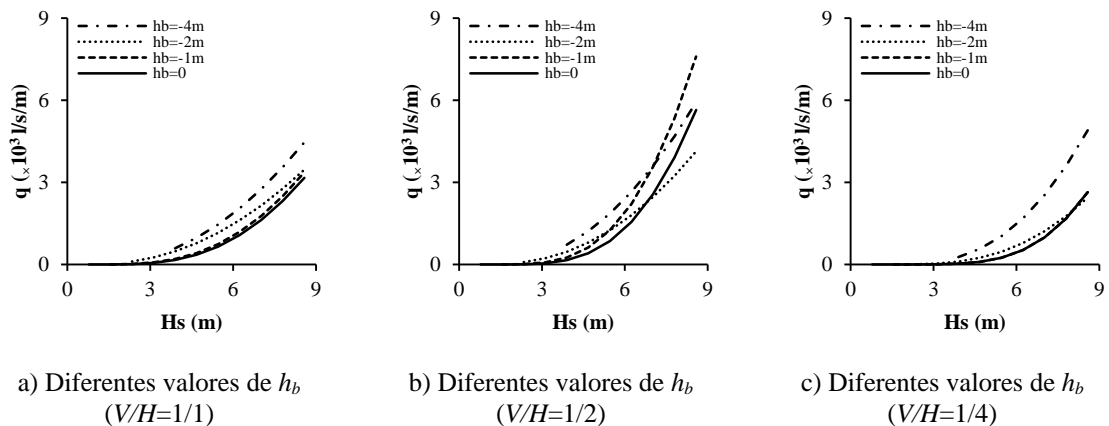


Figura 3.8: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de Owen, para diferentes valores da profundidade  $h_b$  ( $R_c=5\text{m}$ ,  $B=10\text{m}$ ).

### Fórmula de van der Meer e Janssen

Para a fórmula de van der Meer e Janssen, o comportamento das curvas representativas do caudal galgado em função da variação do parâmetro  $R_c$  (Figura 3.9a) é análogo aos casos anteriores e portanto as conclusões repetem-se. O aumento da inclinação do talude conduz à diminuição do caudal galgado (Figura 3.9b). À semelhança do que acontece nas estruturas de talude simples, os valores do número de *Iribarren* são sempre superiores a 2 exceto no caso do declive 1/4 o que representa, na fórmula de van der Meer e Janssen, a não consideração do ângulo do talude. Apesar disso, a existência da berma reflete-se no valor do parâmetro de redução  $y_b$  cujo cálculo depende, por sua vez, do declive da estrutura (ver secção 3.1.3.2), promovendo a ocorrência de diferentes valores de caudal para os declives 1/1 e 1/2.

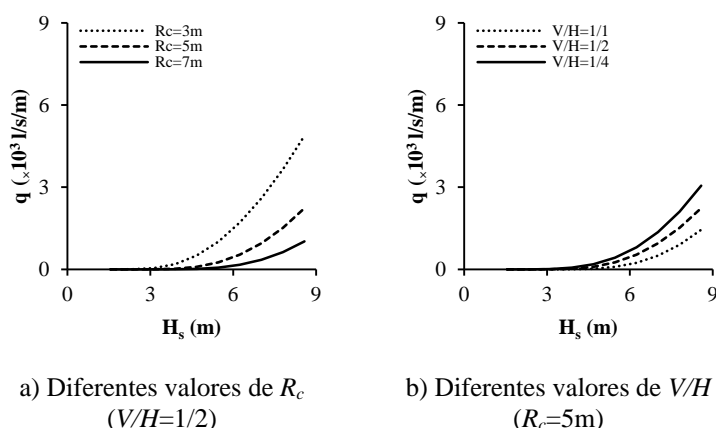


Figura 3.9: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de van der Meer e Janssen, para diferentes valores da altura  $R_c$  e do declive  $V/H$  ( $B=10m$ ,  $h_b=-1m$ ).

A influência da largura da berma (Figura 3.10) também está de acordo com o esperado: quanto maior a largura da berma, menor o caudal galgado. Com a diminuição da inclinação, as curvas aproximam-se e o valor do caudal aumenta para cada valor de  $B$ .

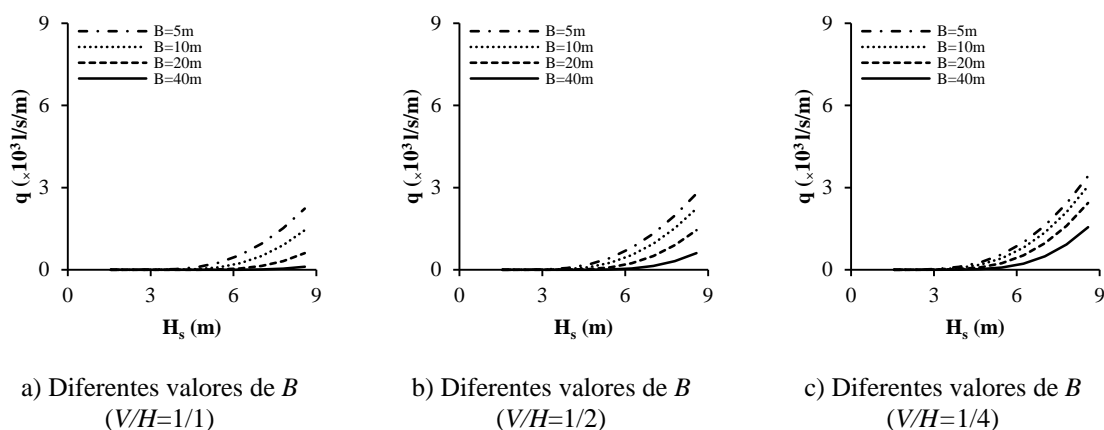


Figura 3.10: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de van der Meer e Janssen, para diferentes valores da largura  $B$  ( $R_c=5m$ ,  $h_b=-1m$ ).

Por fim, relativamente à profundidade da berma confirmam-se as conclusões conseguidas pela análise dos resultados da fórmula de Owen: quanto maior for a profundidade da berma, maiores são os valores do caudal médio (ver Figura 3.11). Neste caso, as curvas correspondentes às quatro situações de  $h_b$  estão praticamente sobrepostas: refere-se por exemplo que, para a maior altura de onda analisada, ocorrem diferenças máximas entre curvas de 10%, 4% e 2% nos taludes com declive 1/1, 1/2 e 1/4, respetivamente.

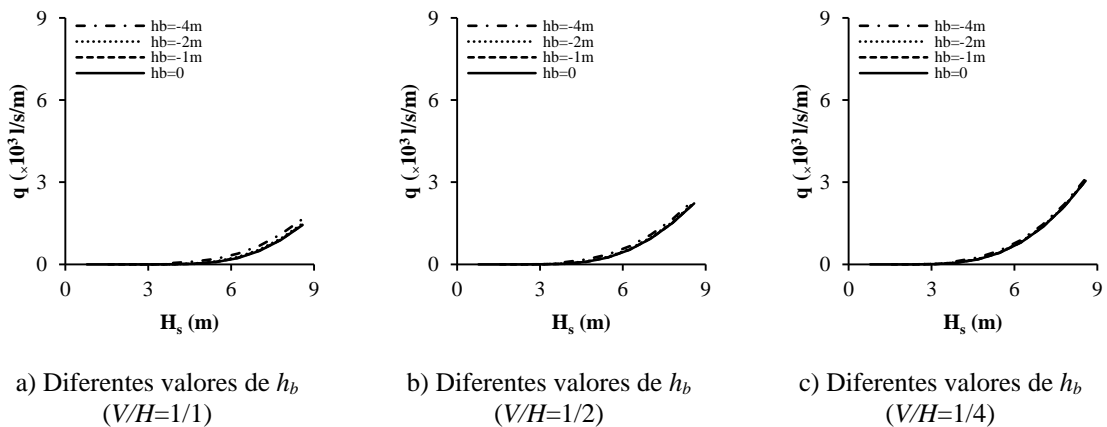


Figura 3.11: Caudal médio galgado em estruturas de talude com berma, de acordo com a formulação de van der Meer e Janssen, para diferentes valores da profundidade  $h_b$  ( $R_c=5m$ ,  $B=10m$ ).

### 3.2.2.3 Estruturas de talude com parede de coroamento

#### Fórmula de Pedersen e Burcharth

O aumento do valor dos parâmetros  $R_c$  e  $G_c$  provoca a diminuição do caudal galgado, como se visualiza nas Figuras 3.12a e 3.12c, respetivamente. Pelo contrário, o aumento do declive provoca o aumento do caudal galgado (facto visível na Figura 3.12b).

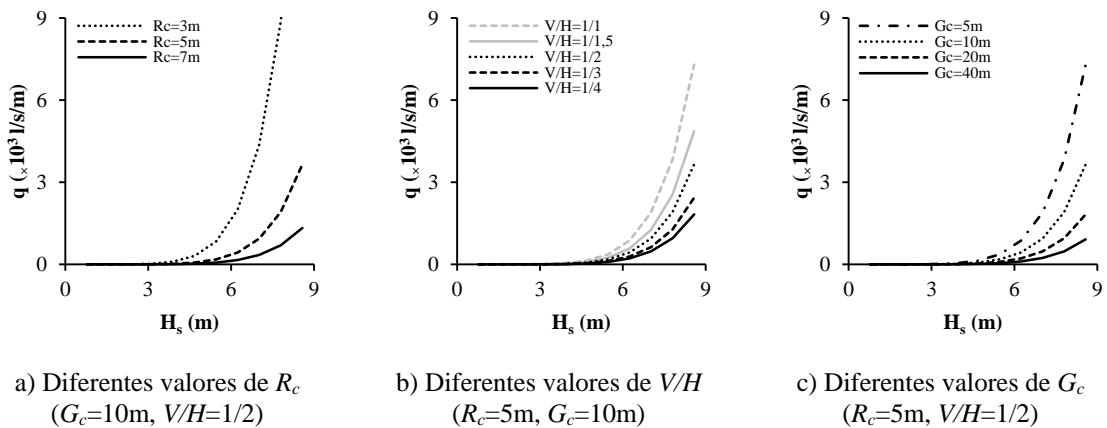


Figura 3.12: Caudal médio galgado em estruturas de talude com parede de coroamento, de acordo com a formulação de Pedersen e Burcharth, para diferentes valores da altura  $R_c$ , do declive  $V/H$  e da largura  $G_c$  ( $A_c=1,5m$ ).

A altura da berma de coroamento,  $A_c$ , tem uma influência análoga à dos parâmetros  $R_c$  (altura do coroamento) e  $G_c$  (largura da berma de coroamento), ou seja, o seu aumento corresponde a menores valores de caudal galgado (Figura 3.13).

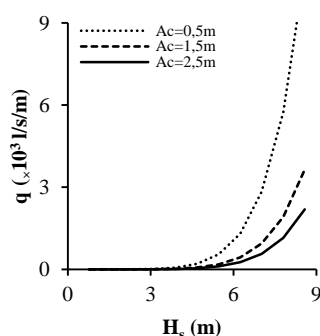


Figura 3.13: Caudal médio galgado em estruturas de talude com parede de coroamento, de acordo com a formulação de Pedersen e Burcharth, para diferentes valores da altura  $A_c$  ( $R_c=5m$ ,  $V/H=1/2$ ,  $G_c=10m$ ).

### 3.2.2.4 Fatores de redução

#### Fórmula de Owen

Na fórmula de Owen o único fator de redução interveniente, e portanto com interesse de análise, é o fator associado à rugosidade da superfície ( $\gamma_r$ ). Para tal, foram mantidos todos os parâmetros geométricos com os valores tomados anteriormente como referência e fez-se variar o valor do fator de redução. Como já foi referido na secção 3.1.3.1, no caso do manto resistente ser constituído por uma camada única de rocha, o fator de redução devido à rugosidade da superfície pode ter o valor de 0,6 nas formulações empíricas e de 0,7 na aplicação da rede neuronal. Quando é então considerada a rugosidade da superfície (Figuras 3.14a e 3.14b), o valor do caudal galgado é reduzido, como seria expectável. Para estruturas de talude simples e para o maior valor de altura de onda analisado, ocorrem reduções de 40% no caso de se considerar  $\gamma_r=0,6$  quando comparado com a não consideração deste fator ( $\gamma_r=1,0$ ). Para estruturas de talude com berma ocorrem reduções de 70%. Quando se analisa o valor aplicável às rede neuronal  $NN\_OVERTOPPING2$  ( $\gamma_r=0,7$ ), as percentagens anteriores passam a ser de 28% e 54%.

#### Fórmula de van der Meer e Janssen

De entre as fórmulas analisadas, a fórmula de van der Meer e Janssen é a única que tem em consideração o efeito dos quatro fatores de redução. Para compreender a influência do produto de todos os fatores de redução ( $\gamma$ ), foram comparadas 2 situações extremas (Figura 3.14c): uma primeira em que o produto  $\gamma$  está inferiormente limitado a 0,5 por condições de imposição da fórmula (ver secção 3.1.2.2), e uma outra em que o produto de todos os coeficientes corresponde ao valor máximo de 1,0. Quando o parâmetro  $\gamma$  toma o

valor mínimo de 0,5 verificam-se reduções significativas do caudal galgado relativamente à situação de  $\gamma=1,0$ . No caso da máxima altura de onda as reduções observadas são de 78% (em termos relativos).

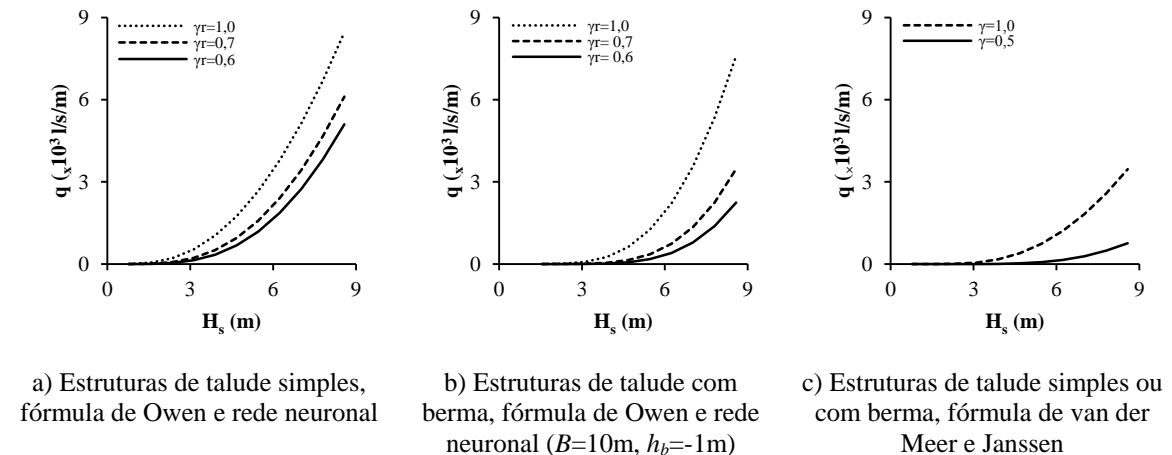


Figura 3.14: Caudal médio galgado em estruturas de talude simples e de talude com berma, para diferentes valores do coeficiente de redução devido à rugosidade  $\gamma_r$  ou do produto de todos os coeficientes de redução,  $\gamma$ , ( $R_c=5\text{m}$ ,  $V/H=1/2$ ).

### 3.2.3 Síntese de resultados

Após a análise individual dos diferentes cenários projetados, pretende-se fazer uma síntese das considerações e dos resultados conseguidos. Além disso, faz-se a avaliação do desempenho de cada formulação utilizada, comparando com a rede neuronal.

#### 3.2.3.1 Sensibilidade dos parâmetros

Apresenta-se na tabela seguinte um pequeno resumo ilustrativo da tendência de comportamento do caudal médio galgado, em função da influência dos diversos parâmetros anteriormente discutidos, distinguindo-se o tipo de estrutura em análise bem como a formulação de cálculo aplicada.

Da análise da Tabela 3.6 conclui-se que os parâmetros  $H_s$  e  $R_c$  (os únicos que são comuns a todas as fórmulas) apresentam a mesma influência sobre o valor do caudal galgado. O parâmetro  $B$ , aplicável apenas às estruturas de talude com berma, demonstra a mesma tendência para diferentes fórmulas; o mesmo acontece com  $h_b$ . A influência dos parâmetros  $G_c$  e  $A_c$  não é passível de comparação entre fórmulas mas pode dizer-se que, na fórmula de Pedersen e Burcharth, apresentam ambos um comportamento bem definido (obtêm-se conclusões similares variando as imposições geométricas). As conclusões até

aqui referidas estão de acordo com os resultados previstos na secção 2.3.3. Por fim, a inclinação do talude é o único parâmetro analisado com tendências opostas de fórmula para fórmula e até na mesma fórmula (facto que sucede na fórmula de Owen).

Tabela 3.6: Influência do acréscimo dos diferentes parâmetros no valor do caudal médio galgado.

Tipo de estrutura	Talude simples		Talude com berma		Talude com parede de coroamento
	Owen	van der Meer e Janssen	Owen	van der Meer e Janssen	Pedersen e Burcharth
<b>Parâmetro</b>					
$H_s$	↑	↑	↑	↑	↑
$R_c$	↓	↓	↓	↓	↓
$\alpha$	*	↓**	***	↓	↑
$B$	-	-	↓	↓	-
$h_b$	-	-	↑	↑	-
$G_c$	-	-	-	-	↓
$A_c$	-	-	-	-	↓

(-) A fórmula não depende do parâmetro em causa.

(\*) A inclinação do talude da estrutura impõe duas tendências opostas no valor de caudal galgado.

(\*\*) A tendência de diminuição do valor do caudal refere-se apenas à comparação entre os resultados obtidos para os declives 1/1, 1/1,5 e 1/2 (em que o valor do caudal não se altera com o declive) com a situação de  $V/H=1/4$ .

(\*\*\*) Não existe uma relação de proporcionalidade direta entre este parâmetro e o valor de caudal.

### 3.2.3.2 Sensibilidade das fórmulas

A ferramenta *NN\_OVERTOPPING2* foi considerada como referência na avaliação do desempenho das diferentes fórmulas de cálculo do caudal médio galgado. Constata-se que a fórmula de van der Meer e Janssen apresenta uma tendência de proximidade de valores relativamente aos obtidos pela ferramenta neuronal. Nas estruturas de talude simples (Figura 3.15a) a diferença entre os resultados obtidos por estas 2 metodologias, para  $H_s=8,58\text{m}$ , é de 12% e nas estruturas com berma (Figura 3.15b) é de 13%. Em contraste, para a fórmula de Owen as diferenças tomam os valores de 64% e 66%, respetivamente. Quanto às estruturas com parede de coroamento, para ondas com alturas inferiores a 7,02m, a curva correspondente à fórmula de Pedersen e Burcharth desenvolve-se sob a curva de referência. Esta tendência inverte-se quando a altura de onda é igual a 7,02m ou superior, verificando-se ainda um afastamento progressivo entre curvas.



A principal conclusão refere-se à semelhança dos resultados obtidos pela ferramenta *NN\_OVERTOPPING2* e pela fórmula de van der Meer e Janssen que, por este motivo, se considera adequada ao cálculo das estruturas de talude com e sem berma já que a fórmula de Owen, para os mesmos cenários, apresenta valores muito superiores. No caso das estruturas de talude com parede de coroamento, a fórmula a usar terá que ser a única analisada (fórmula de Pedersen e Burcharth) e que apresenta um comportamento semelhante ao da rede neuronal para ondas até 7m, aproximadamente (Figura 3.15c).

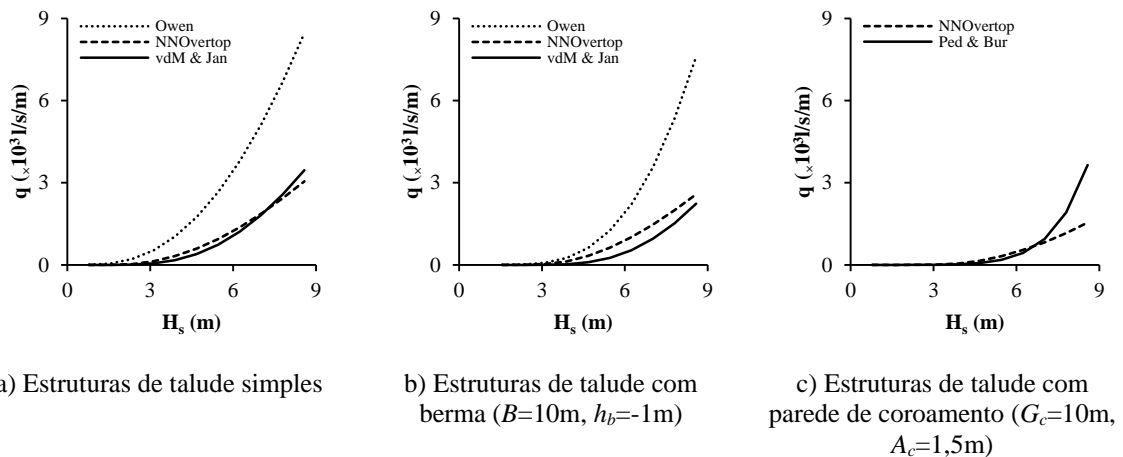


Figura 3.15: Caudal médio galgado nos diferentes tipos de estruturas, de acordo com as diversas formulações empíricas e com a ferramenta *NN\_OVERTOPPING2* ( $R_c=5\text{m}$ ,  $V/H=1/2$ ).

Existem vantagens na adoção da fórmula de van der Meer e Janssen para efetuar os cálculos do caudal galgado em estruturas de talude simples ou com berma que se relacionam com a definição dos parâmetros  $a$  e  $b$ . Nesta fórmula, os parâmetros dependem apenas do número de *Iribarren*, não havendo necessidade de fazer interpolação para as estruturas costeiras do caso de estudo cujas características geométricas não se enquadram com as apresentadas nas Tabelas 3.2 e 3.3 referentes à fórmula de Owen.

Tendo em conta as formulações empíricas selecionadas para a análise que se irá efetuar, a tendência é de valores de caudal mais elevados para a rede neuronal, para ondas com alturas inferiores a 7m. Esta tendência repete-se, no caso das estruturas com berma, para qualquer valor de altura de onda.



## **Capítulo 4**

---

### **CASO DE ESTUDO**



## **4 CASO DE ESTUDO**

Neste capítulo indicam-se alguns dos aspetos fundamentais à descrição do caso de estudo considerado na estimativa de caudais de galgamento, a zona litoral do concelho de Ovar. É apresentada uma caracterização sumária desta região costeira e das obras longitudinais aderentes que a compõem, são analisados os níveis de maré e a agitação marítima incidente e, por fim, são projetados diversos cenários de ondulação.

A escolha deste local resulta do desafio que a faixa costeira em análise constitui para o litoral nacional em termos de gestão integrada de recursos e atividades e de minimização de riscos sobre pessoas e bens, já que foi identificado como sendo um dos locais com elevada vulnerabilidade e risco costeiro (Coelho *et al.*, 2015). Para além da sua riqueza ecológica, da elevada concentração populacional e da qualidade das praias, este território distingue-se pela forte fragilidade geológica que, aliada a uma agitação marítima de rumos muito abertos e elevada energia, origina um dos processos erosivos mais intensos da orla costeira europeia (POC, 2015), decorrendo daí o evidente interesse para o estudo dos fenómenos de galgamentos.

### **4.1 Caracterização do local**

A caracterização da zona de estudo é fundamental para compreender a história da dinâmica local, relacionada com a morfodinâmica e a hidrodinâmica. Para tal, foi analisado o contexto geográfico e foram também identificadas as estruturas de proteção existentes, as atividades desenvolvidas nas zonas abrigadas e os eventos de dano que têm vindo a fragilizar, ao longo do tempo, as praias em análise.

#### **4.1.1 Enquadramento geográfico**

O concelho de Ovar, pertencente ao distrito de Aveiro, localiza-se no litoral Norte de Portugal, aproximadamente a meia distância dos portos de Aveiro e de Leixões, apresentando uma área territorial de cerca de 148km<sup>2</sup> (DGT, 2015) com mais de 55 mil habitantes (INE, 2011).

Neste concelho seleccionaram-se 3 áreas de estudo (ver Figura 4.1), Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, por se considerarem representativas em termos de características da secção transversal das obras longitudinais aderentes que serão alvo de análise.

A extensão de frente urbana de cada local, diretamente relacionável com a sua vulnerabilidade, e a densidade populacional de cada aglomerado urbano, importante para a classificação do risco humano, são também aspetos que justificaram a escolha deste caso de estudo.



Figura 4.1: Localização das áreas de estudo no concelho de Ovar (SNIG, 2016).

### 4.1.2 Obras de defesa costeira existentes

O litoral do concelho de Ovar está artificializado por obras de defesa costeira para proteção das frentes urbanas dos eventos energéticos de agitação marítima.

As principais malhas urbanas litorais do concelho (Esmoriz, Cortegaça e Furadouro) desenvolvem-se numa extensão de 17km (Silva *et al.*, 2014) e estão defendidas atualmente por 8 obras longitudinais aderentes e 6 esporões, números que evidenciam a vulnerabilidade desta região à erosão e à ação do mar.

Na Tabela 4.1 apresenta-se um resumo das características atuais das obras de defesa aderente (DA) existentes e as datas em que têm sido realizadas intervenções de manutenção destas estruturas que recorrentemente sofrem danos. As datas de intervenção de manutenção revelam que, em Ovar, as obras de defesa são frequentemente sujeitas à reparação e manutenção. Esmoriz merece particular destaque por possuir uma extensa defesa frontal em enrocamento. Também já existia no Furadouro, em 1959, uma pequena defesa frontal que veio a ser progressivamente prolongada, unindo hoje o enraizamento dos 2 esporões existentes e prolongando-se ainda um pouco para norte e para sul.

Tabela 4.1: Características das obras de defesa aderente (DA) e datas de construção e de intervenções de manutenção (adaptado de Coelho *et al.*, 2015; Cruz, 2015).

<b>Obra</b>	<b>Localização</b>	<b>Extensão</b>	<b>Construção</b>	<b>Intervenções de manutenção</b>
DA1	Esmoriz	≈140m	1978	1996, 2008
DA2	Esmoriz	≈850m	1977	1985, 1986, 1989, 1991, 1992, 1995, 1996, 1997, 2008
DA3	Esmoriz	≈600m	-	1990, 1991, 1995, 1996, 1997, 1999, 2001, 2008
DA4	Cortegaça	≈600m	1975/79	1987, 1988, 1994, 1996, 1997, 1999, 2001, 2002, 2008
DA5	Cortegaça	≈500m	2015	
DA6	Furadouro	≈100m	-	2003, 2009
DA7	Furadouro	≈215m	1959	1984, 1987, 1995, 1996, 1997, 2003
DA8	Furadouro	≈215m	1982	1991, 1995, 1996, 1997, 2003

Em alguns casos, e ainda segundo Coelho *et al.* (2015), as intervenções realizadas têm caráter de emergência, como é exemplo o que ocorreu no período entre 1995 e 2011, em que foram realizadas 18 intervenções de emergência: 8 na praia de Esmoriz, 6 em

Cortegaça e 4 na praia do Furadouro. Estes dados indicam que o sistema de defesa costeiro implantado não tem impedido a ação do mar sobre as frentes urbanas.

Com o intuito de compreender o comportamento das diferentes intervenções de defesa costeira face aos eventos de galgamento, foram seleccionadas 3 obras longitudinais aderentes, visíveis na Figura 4.2, cada uma localizada na área mais vulnerável de cada frente urbana, ou seja, nas zonas em que o registo de eventos de dano é maior ou mais gravoso. A seleção das zonas mais vulneráveis aos galgamentos em cada praia foi efetuada de acordo com a interpretação dos registos históricos existentes, referenciados no Anexo B. As obras de defesa escolhidas correspondem às designações DA2, DA4 e DA8 (Figura 4.1 e Tabela 4.1).



Figura 4.2: Vista das obras longitudinais aderentes em estudo (fonte: CMO, 2014).

Não tendo sido possível o acesso ao projeto das obras, o levantamento das características geométricas das obras e da topografia do local foi efetuado no dia 23 de Janeiro de 2016 às 8:30h, valor horário correspondente à baixa-mar, e novamente às 14:30h, correspondente à preia-mar, em que a altura da maré, segundo IH (2016a), seria de +0,60m (ZH) e +3,29m (ZH), respetivamente. Para tal foi utilizado um medidor de distâncias a *laser Bosch GLM 80*.

Nas Figuras 4.3 a 4.5 representam-se as características da secção transversal das diferentes tipologias de obras aderentes obtidas no levantamento, com cotas altimétricas referidas ao Zero Hidrográfico (ZH). Em Esmoriz a cota de coroamento é superior à cota da via pública no tardo; em Cortegaça a obra aderente tem dois patamares intermédios e uma superestrutura em betão armado (indicando, desde já, uma maior robustez); e no Furadouro não existem patamares intermédios e o coroamento está ao nível da via pública (Cruz, 2015).



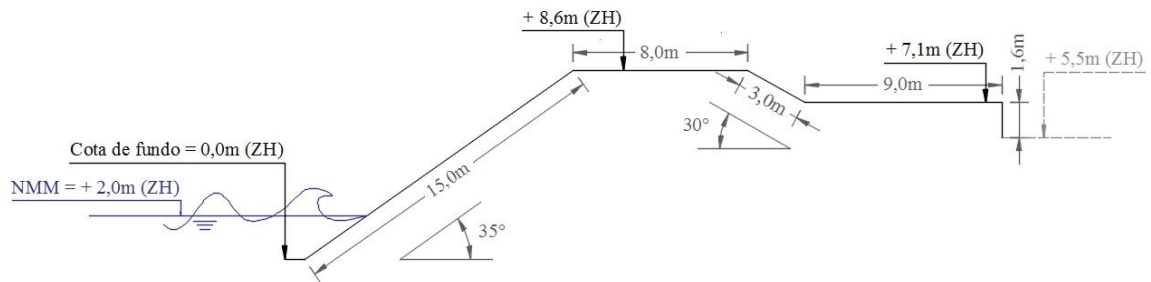


Figura 4.3: Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente de Esmoriz (DA2).

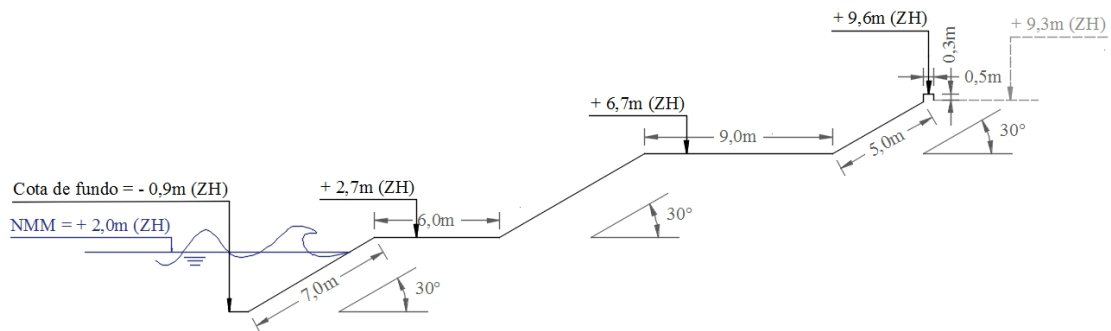


Figura 4.4: Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente de Cortegaça (DA4).

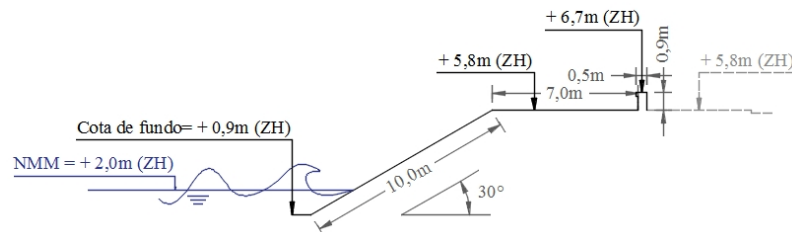


Figura 4.5: Corte transversal esquemático da obra longitudinal aderente do Furadouro (DA8).

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam-se, de forma sumária, os parâmetros de cálculo intervinientes nas duas metodologias utilizadas na estimativa de caudais de galgamento (formulações empíricas e rede neuronal) correspondentes às características da geometria de cada estrutura. Os parâmetros  $h$ ,  $h_t$ ,  $h_b$ ,  $R_c$  e  $A_c$  referem-se à situação de nível médio da superfície livre da água. Na Tabela 4.2 os traços (-) correspondem a parâmetros não aplicáveis à respetiva fórmula, de acordo com o que já foi avaliado na secção 3.1.2.

Em Cortegaça a berma com 9m foi desconsiderada para efeitos da definição da geometria da estrutura DA4 na rede neuronal. Em NN Manual (2016) refere-se que a berma está sempre localizada na parte central da estrutura, tendo sido por isso considerada a berma com 6m de largura. Por outro lado, se a berma estiver muito acima da parte central da estrutura, deve ser considerada como coroamento (como acontece em Esmoriz).

No entanto, o coroamento efetivo da estrutura DA4 está localizado à cota +9,6m (ZH), ou seja, a uma distância maior do nível da superfície livre da água do que se fosse considerado na berma de 9m de largura, que está à cota de +6,7m (ZH).

Tabela 4.2: Parâmetros necessários ao cálculo efetuado através das formulações empíricas, para Esmoriz, Cortegaça e Furadouro.

Fórmula	Local	$\alpha$ (°)	$\gamma$	$R_c$ (m)	$A_c$ (m)	$G_c$ (m)
van der Meer e Janssen	Esmoriz	35	0,5	6,62	-	-
	Cortegaça	30	0,5	7,56	-	-
Pedersen e Burcharth	Furadouro	30	-	4,67	3,82	7,00

Tabela 4.3: Parâmetros necessários ao cálculo efetuado com recurso à rede neuronal, para Esmoriz, Cortegaça e Furadouro.

Local	$h$ (m)	$h_t$ (m)	$B_t$ (m)	$\gamma_r$	$\alpha_d$ (°)	$\alpha_u$ (°)	$R_c$ (m)	$B$ (m)	$h_b$ (m)	$\alpha_B$ (°)	$A_c$ (m)	$G_c$ (m)
Esmoriz	2,00	2,00	0,00	0,7	35	35	6,62	0	0	0	6,62	8,00
Cortegaça	2,85	2,85	0,00	0,7	30	30	7,56	6,00	-0,69	0	7,26	0,00
Furadouro	1,15	1,15	0,00	0,7	30	30	4,67	0	0	0	3,82	7,00

A definição de fatores de redução para aplicação nas formulações empíricas e na rede neuronal exige maior detalhe de descrição. O fator devido à rugosidade ( $\gamma_r$ ) a aplicar nas formulações empíricas seria, pelo lado mais conservativo, de 0,60, correspondente a estruturas com uma camada de rocha no manto resistente, e o fator devido à influência da profundidade ( $\gamma_h$ ) de 0,70, admitindo  $H_{2\%}=H_s$ . No entanto, para a formulação de van der Meer e Janssen (1995) e como foi já referido, qualquer combinação dos valores  $\gamma$  ( $\gamma=\gamma_r\times\gamma_b\times\gamma_h\times\gamma_\beta$ ) tem que ser superior a 0,5. Assim, o fator de redução devido à profundidade e à rugosidade da superfície, bem como o fator de redução devido à existência da berma e à influência da direção de incidência das ondas (variáveis, neste caso, para cada nível de maré e para cada onda, respetivamente), perdem o significado na avaliação dos fatores de redução, uma vez que o produto  $\gamma_r\times\gamma_h$  seria igual a 0,43, sendo necessário considerar o valor mínimo de  $\gamma=0,5$ . Quanto à rede neuronal, o valor do fator de redução a aplicar no cálculo devido à rugosidade é, inevitavelmente, de 0,71 para estruturas com um manto resistente constituído por uma camada única de rocha.

### 4.1.3 Atividades e uso do solo

A avaliação da natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura e do impacto do galgamento/inundação na segurança de pessoas e infraestruturas é fundamental para ter confiança na metodologia de avaliação do risco para uma dada zona de estudo (Fortes *et al.*, 2013). No caso do concelho de Ovar, é precisamente na faixa litoral que acontece a maior procura habitacional obrigando a preocupações não só em termos ambientais, mas também em termos orçamentais referentes às obras de proteção contra os galgamentos costeiros.

O trabalho desenvolvido no âmbito do processo de avaliação ambiental, respeitante à elaboração do Programa da Orla Costeira – Ovar/Marinha Grande (POC, 2015), apresenta conclusões relevantes sobre o tema agora discutido. A análise da Tabela 4.4 permite concluir que os 3 aglomerados em análise ocupam uma extensão considerável da Zona Terrestre de Proteção (ZTP, que integra a área de intervenção em espaço terrestre onde em virtude da importância dos recursos existentes, das elevadas ameaças ou da especificidade das atividades que aí decorrem se impõe a fixação de regimes de proteção determinados por critérios de salvaguarda de recurso e de valores naturais, segurança de pessoas e bens e de desenvolvimento de atividades na interface terra-mar, compatíveis com a utilização sustentável do território). Além disso, conclui-se que em Esmoriz e Cortegaça a ocupação residencial sobre ambas as faixas de risco (de erosão litoral) é elevada (ORE), verificando-se apenas para o Furadouro ocupação residencial moderada (ORM) sobre a faixa de risco muito elevado.

Tabela 4.4: Densidade de ocupação urbana nos aglomerados em estudo, em cada uma das faixas de risco (POC, 2015).

Aglomerado	Extensão da frente urbana (m)	Ocupação máxima da ZTP (m)	Faixa de risco	
			Muito elevado	Elevado
Esmoriz	1986	250	ORE	ORE
Cortegaça	681	155	ORE	ORE
Furadouro	727	400	ORM	ORE

Nota: ORE (ocupação residencial elevada); ORM (ocupação residencial moderada).

Ainda segundo o POC (2015), mas agora relativamente à população, pode dizer-se que os aglomerados da praia de Esmoriz, da praia de Cortegaça e do Furadouro estão entre os 5 aglomerados do trecho costeiro Ovar - Marinha Grande que apresentam maiores riscos devido à maior percentagem populacional exposta à faixa de risco muito elevado. É de realçar que a área de intervenção do referido Programa incide sobre 140km de costa, onde se incluem 11 concelhos entre Ovar e a Marinha Grande (totalizando 20 aglomerados estudados). Apesar de se desconhecer o incremento dos alojamentos entre 2001 e 2011 em faixa de risco considera-se, face à evolução populacional registada nos aglomerados nesta década que estes também aumentaram em Esmoriz e no Furadouro (Tabela 4.5).

Tabela 4.5: População residente e taxa variação populacional nos aglomerados urbanos em estudo e faixas de risco (POC, 2015).

Aglomerado	População total (2011)	Taxa variação populacional (%) 2001-2011	População por faixa de risco	
			Muito elevado	Elevado
Esmoriz	3359	+12,1	988	629
Cortegaça	612	-9,3	334	220
Furadouro	2513	+22,2	886	487

Importa ainda avaliar a questão dos equipamentos coletivos, refletida na Tabela 4.6, que funcionam como elementos estruturantes no território e assumem uma importante função social pois, se por um lado permitem a satisfação das necessidades básicas das populações residentes, por outro também possuem uma relevante função económica e de animação cultural. São vários os equipamentos em faixas de risco e podem agrupar-se nas seguintes classes: alojamento (hotel e parque de campismo), educação, saúde, serviços de apoio e ação social e segurança e administração pública (POC, 2015).

Tabela 4.6: Tipo de equipamentos coletivos em cada uma das faixas de risco dos aglomerados urbanos em estudo (adaptado de POC, 2015).

Aglomerado	Alojamento	Educação	Saúde	Serviços de apoio e ação social	Segurança e administração pública
Esmoriz	E		ME	E	
Cortegaça	ME; E				
Furadouro	ME; E	ME; E	ME; E		ME

Nota: ME (faixa de risco muito elevado); E (faixa de risco elevado).

De acordo com a mesma tabela, é no Furadouro que mais classes de equipamentos se inserem nas faixas de risco, tanto nas de risco muito elevado (ME) como nas de risco elevado (E). Na Figura 4.6 são apresentados exemplos da localização dos equipamentos agora referidos.



Figura 4.6: Exemplo de equipamentos coletivos localizados em faixas de risco.

#### 4.1.4 Histórico de eventos de dano

O levantamento e a avaliação cronológica da evolução do número de eventos de ação marítima sobre a zona terrestre contribui para a análise das características passadas da zona costeira, facilitando a estimativa de tendências para o futuro.

Na base de dados elaborada por Pereira e Coelho (2011) que se apresenta no Anexo B, é possível consultar o registo de eventos de galgamento ocorridos em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro desde 1857 até 2010. Para tal, foi definido evento como sendo qualquer situação que resulta da ação energética do mar, com consequência para o litoral. Considerou-se também que cada evento decorreu durante um determinado período de tempo (situações registadas na mesma semana foram consideradas no mesmo evento), mesmo que impliquem o registo de consequências em diferentes locais.

As consequências já referidas distinguem-se em 5 categorias de ocorrência, conforme ilustra a Figura 4.7. O recuo da linha de costa (RLC) corresponde a todas as ocorrências em que a posição da linha de costa recuou de forma permanente entre o início e o fim do evento que registou clima de agitação intenso. Entendeu-se como galgamento (GAL) uma ocorrência em que a água do mar atingiu cotas acima do coroamento das defesas costeiras existentes, naturais (dunas) ou artificiais (obras longitudinais aderentes), e avançou além da sua posição usual, inundando zonas vizinhas. A destruição do cordão dunar (DCD) foi considerada quando um evento de ação marítima afetou o sistema dunar, provocando a

sua destruição, mesmo que parcial. Classificou-se como destruição pela ação do mar (DAM) o evento que provocou danos ou destruição de infraestruturas, sejam estas de qualquer natureza (passeios, muros, etc.). Particulariza-se o caso das estruturas de defesa costeira, através da categoria de danos em obras de defesa costeira (DDC), pelo que danos nestas estruturas não são contabilizados na categoria anterior (Coelho *et al.*, 2015).

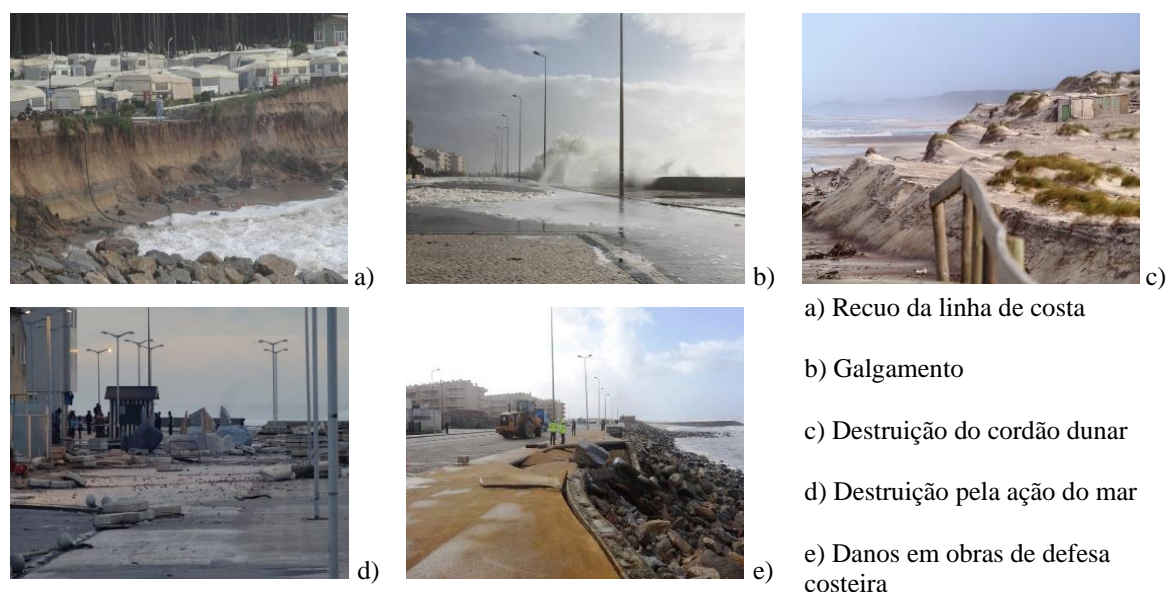


Figura 4.7: Tipos de ocorrências devidas à ação do mar (fotos CMO, 2014; baseado em Coelho *et al.*, 2015).

A Figura 4.8 apresenta a distribuição geográfica do histórico destas ocorrências, resultantes de eventos provocados pela ação energética do mar, revelando-se uma análise importante na medida em que possibilita a identificação das zonas com maior vulnerabilidade.

O Furadouro regista o maior número de eventos de galgamento, em contraste com Cortegaça que só apresenta 3 ocorrências. Acrescenta-se que Cruz (2015), após ter complementado os resultados da base de dados elaborada por Pereira e Coelho (2011), obteve para Esmoriz 11 registos de galgamento, para Cortegaça 5 (ou seja mais 2 ocorrências) e, finalmente, para o Furadouro obteve 53 registos (ou seja mais 34 eventos).

A avaliação da distribuição temporal das mesmas ocorrências (Figura 4.9) permite identificar uma tendência de aumento no número de registos de danos ao longo do tempo, sendo que desde 1990, houve um aumento significativo de registos, com particular relevância para os últimos 10 anos.

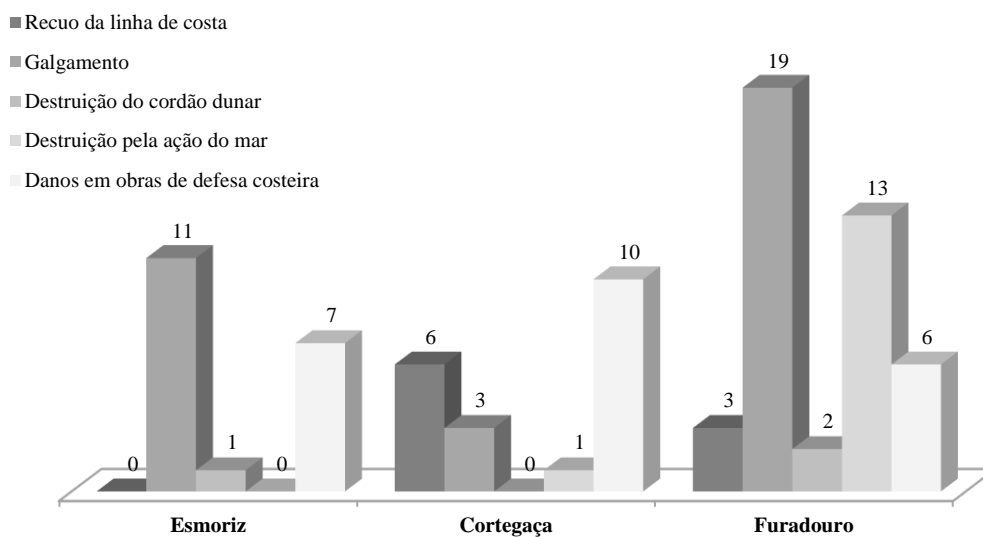


Figura 4.8: Número e tipo de ocorrências registadas desde 1857 (adaptado de Coelho *et al.*, 2015).

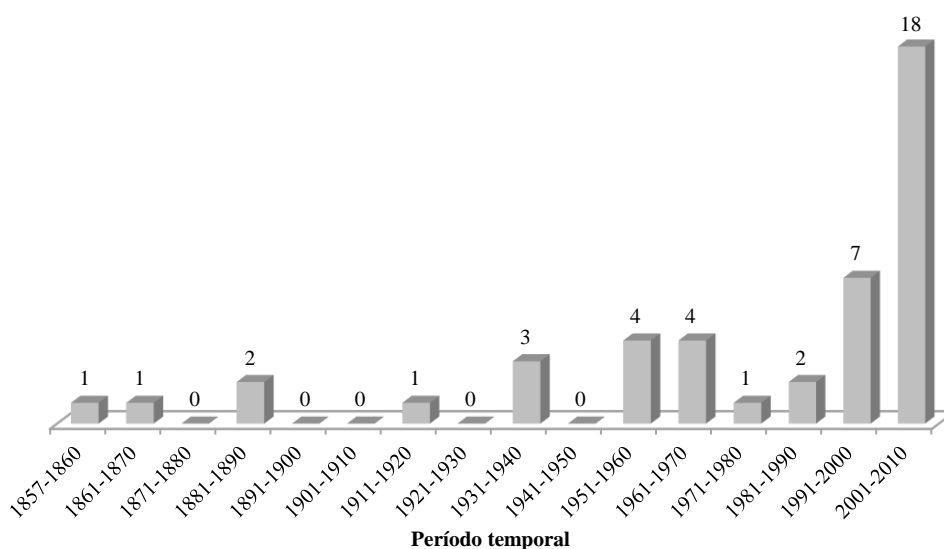


Figura 4.9: Distribuição temporal do número de ocorrências registadas desde 1857 nas praias do concelho de Ovar (adaptado de Coelho *et al.*, 2015).

## 4.2 Nível de maré

As marés exercem um importante controlo na ecologia e na morfologia das praias, configurando os seus perfis, afetando a faixa de rebentação, o movimento dos sedimentos, o tipo de rebentação, o espriamento das ondas e os fenómenos de galgamento. Em Portugal, as previsões de maré astronómica para os principais portos nacionais são efetuadas pelo Instituto Hidrográfico (IH). Em trabalho efetuado pelo LNEC (1996), referido também por Coelho (2005), é caracterizado o tipo de maré para o porto de

Leixões, tendo sido obtidos os valores apresentados na Tabela 4.7 (valores considerados também representativos do litoral do concelho de Ovar).

Tabela 4.7: Valores típicos de maré em Leixões (baseado em LNEC, 1996; retirado de Coelho, 2005).

<b>Descrição dos tipos de maré</b>	<b>Cota (m)</b>
Valor máximo teórico de preia-mar de águas vivas (PMAV):	+3,88 (ZH)
Valor médio teórico de preia-mar de águas vivas (PMAV):	+3,50 (ZH)
Valor médio teórico de preia-mar de águas mortas (PMAM):	+2,68 (ZH)
Valor médio teórico de baixa-mar de águas mortas (BMAM):	+1,32 (ZH)
Valor médio teórico de baixa-mar de águas vivas (BMAV):	+0,50 (ZH)
Valor máximo teórico de baixa-mar de águas vivas (BMAV):	+0,12 (ZH)

A sobreelevação do nível do mar de origem meteorológica é uma oscilação temporária do nível das águas do mar, que pode ocorrer durante horas ou dias, como resultado de uma diminuição da pressão atmosférica ou da ação de ventos fortes e persistentes. O estudo deste fenómeno revela-se fundamental, nomeadamente na avaliação dos riscos de inundação da costa pela ação do mar, uma vez que podem verificar-se níveis extremos associados à ocorrência simultânea de sobreelevações e marés vivas.

As marés meteorológicas, como explica Coelho (2005), foram, em geral, subestimadas nos trabalhos marítimos e de planeamento costeiro até aos trabalhos pioneiros de Morais e Abecasis (1978) e de Taborda e Dias (1992). Nesses trabalhos foram registadas subidas do nível médio do mar de 0,5m a 1,0m em alguns locais da costa Oeste portuguesa, verificados durante as tempestades de 1973, 1978 e 1981 (Gama *et al.*, 1997). No entanto, as variações na costa portuguesa devido a estas marés estão ainda pouco caracterizadas devido ao facto das séries temporais serem curtas. Na incerteza do valor a adotar, optou-se por não contabilizar o efeito das sobreelevações meteorológicas no nível de maré.

Deste modo, para a avaliação das condições da agitação local, foram comparados diferentes cenários com o nível de água correspondente ao nível médio [no caso da costa portuguesa, correspondente à cota +2,0m (ZH)], ao nível da máxima preia-mar de águas vivas típico de Leixões [aproximadamente +4,0m (ZH)] e a uma situação intermédia



[+3,0m (ZH)]. O nível de maré condiciona a cota da superfície livre da água do mar e, conseqüentemente, a propagação das ondas e a distância que define o bordo livre da estrutura de defesa costeira (condicionantes do galgamento).

### **4.3 Agitação marítima**

Tal como na avaliação do efeito das marés na estimativa dos caudais de galgamento nos locais de estudo, para diferentes características da agitação incidente há variações nos caudais galgados. A caracterização da agitação incidente faz-se de seguida, analisando os principais parâmetros de ondulação como a altura, o período e a direção de onda.

#### **4.3.1 Base de dados**

A análise do clima de agitação marítima local é essencial para estabelecer a relação entre os estados de agitação e a frequência e gravidade da ocorrência de galgamentos. O IH dispõe atualmente de 5 boias ondógrafo na costa continental portuguesa (Leixões, Nazaré, Sines, Faro costeira e Faro oceânica). Os dados analisados são registados pela boia ondógrafo de Leixões (considerada a mais próxima e representativa da zona de estudo) e referem-se ao período decorrido entre Outubro de 1981 e Dezembro de 2014.

Em condições normais de processamento e armazenamento dos dados, o intervalo entre as séries temporais de registos é de 3 horas, durante períodos de 30 minutos. Em situação de temporal, ou seja, quando a altura significativa excede 5 metros, os períodos de aquisição de 30 minutos são apenas espaçados de pequenos intervalos necessários ao processamento dos dados. Os dados são adquiridos a uma taxa de digitalização de 1,28 amostras por segundo. O limite mínimo de duração para que um conjunto de dados seja tratado é de 10 minutos (IH, 2016b). Os grupos data/hora estão referidos à hora local e correspondem ao início dos registos, ou seja, correspondem às 0:00h, 3:00h, 6:00h, 9:00h, 12:00h, 15:00h, 18:00h e 21:00 horas do dia.

As situações comuns de recolha de dados originam 240 registos mensais (oito por dia), mas facilmente se constata que é raro o mês com esse número de registos. Esta ausência transitória de dados pode ser devida à inoperacionalidade da boia, quer por motivos de reparação ou substituição induzidos por agressões naturais ou humanas, quer por dificuldades na comunicação telemétrica.

As séries mais longas de aquisição consecutiva de dados analisadas correspondem aos períodos de Outubro de 1981 a Janeiro de 1983, de Outubro de 1983 a Janeiro de 1985, de Fevereiro de 1998 a Abril de 2000, de Novembro de 2002 a Julho de 2005 e, por último, a série contínua mais extensa corresponde ao período de Fevereiro de 2010 a Dezembro de 2014 (data final do intervalo temporal considerado). Nos períodos agora referidos existiram falhas de registos em apenas alguns dias. De Fevereiro de 1985 a Junho de 1993 não se efetuaram nenhuns registos. Desde essa data, a maior paragem na aquisição de dados corresponde ao período de Agosto de 2005 a Dezembro de 2008.

Foram recolhidos os valores relativos à altura significativa ( $H_s$ ), que correspondem à média do terço mais elevado das alturas de onda de zero ascendente. Foram recolhidos também os valores do período significativo ( $T_{H_s}$ ), correspondente à média dos períodos das ondas que foram utilizadas no cálculo da altura significativa. Por fim, registaram-se desde 1993 os valores da direção média associada ao período de pico ( $\beta_{Top}$ ). As direções estão referidas ao Norte verdadeiro, tendo-se considerado os valores para a declinação magnética de 6° W entre 1993 e 1997 e de 5° W entre 1998 e 2003 (IH, 2016b).

Nos cálculos efetuados pela rede neuronal *NN\_OVERTOPPING2*, quanto a alturas de onda, os valores do parâmetro  $H_{m0}$  foram considerados iguais aos valores de  $H_s$ . Relativamente às direções de onda, os valores do parâmetro  $\beta$  consideraram-se iguais aos valores de  $\beta_{Top}$ . O período de onda espectral,  $T_{m-1,0}$ , também interveniente na aplicação da rede neuronal *NN\_OVERTOPPING2*, foi calculado a partir do conhecimento do parâmetro  $T_{H_s}$ , pelas equações 2.4 e 2.6. No caso das formulações empíricas os períodos  $T_{om}$  e  $T_{op}$  são, do mesmo modo, calculados a partir de  $T_{H_s}$  (equações 2.4 e 2.5), o valor  $\beta$  é também considerado igual ao de  $\beta_{Top}$  e, neste caso, o parâmetro referente à altura de onda é diretamente  $H_s$ .

### 4.3.2 Alturas e períodos de onda

Agruparam-se os registos de alturas de onda significativa e os correspondentes períodos de onda em classes de um metro e de um segundo, respetivamente. As Figuras 4.10 a 4.13 correspondem à representação gráfica dos registos obtidos entre 1981 e 2014 para estas duas grandezas e permitem a análise conjunta dos resultados globais e dos resultados mensais. Em particular, as Figuras 4.10 e 4.12 permitem a comparação dos registos

efetuados de 3h em 3h (41658 valores) com o total de valores registados pela boia de Leixões (71507 valores), onde se incluem os dados recolhidos em situação de temporal.

Analisando a distribuição de alturas de onda esquematizada na figura seguinte, verificam-se diferenças quando se comparam os registos de 3h em 3h com os de temporal. Neste último caso, dá-se uma translação das percentagens de frequências de ocorrência para as classes de altura de onda mais altas.

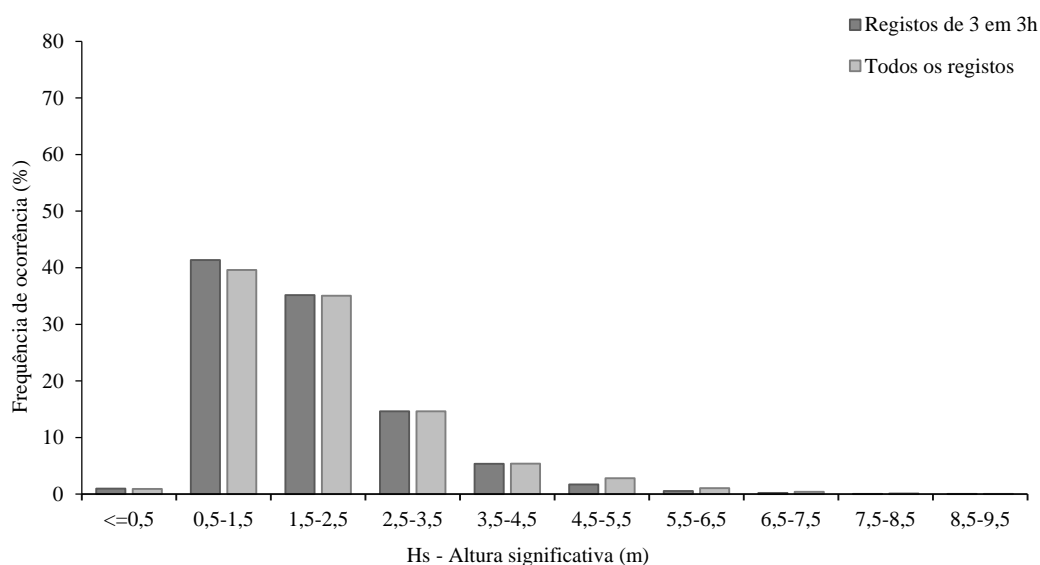


Figura 4.10: Comparação dos registos totais das alturas de onda significativa com os registos efetuados de 3h em 3h (dados do IH para a boia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2014).

A distribuição de registos por cada mês do ano é relativamente equilibrada e aos 41658 registos, corresponde uma média de cerca de 3470 registos por cada mês no período de 24 anos efetivos de análise. O mês com menor média de número de registos é Fevereiro (2838 valores) e o mês com maior número é Dezembro, com uma média de 3951 registos.

Quando se analisam os resultados mensais, verificam-se diferenças significativas nos registos dos meses considerados de Inverno (Outubro a Março), quando comparados com os registos dos meses considerados de Verão (Abril a Setembro). A média dos valores de altura significativa desce nos meses de Verão, não se verificando nenhum registo com valores superiores a 4,5m para os meses de Junho a Agosto nos registos efetuados de 3h em 3h. Se fossem considerados todos os registos, seriam ultrapassados por 20 vezes os registos de 8,5m (3 vezes em Janeiro, 1 vez em Março, 9 vezes em Outubro e 7 vezes em Dezembro), sempre no período de Inverno.

Para os meses de Janeiro e Dezembro os registos inferiores a 1,5m representam cerca de 20% do total de registos do próprio mês, enquanto para os meses de Junho, Julho e Agosto ultrapassam os 60%. O número de registos nas duas primeiras classes (alturas significativas até 1,5m) corresponde a 40% do total de registos de 3h em 3h. Quanto aos restantes valores de alturas de onda significativa, as percentagens relativas ao total de registos aumentam de um modo geral com o afastamento ao mês de Junho (onde são mínimas, 34%), tanto para o início do ano (onde são máximas, 83% em Janeiro) como para o final (onde voltam a ser máximas, 81% em Dezembro), sendo superiores a 60% nos meses de Janeiro a Abril e de Outubro a Dezembro (coincidindo praticamente com o período de Inverno).

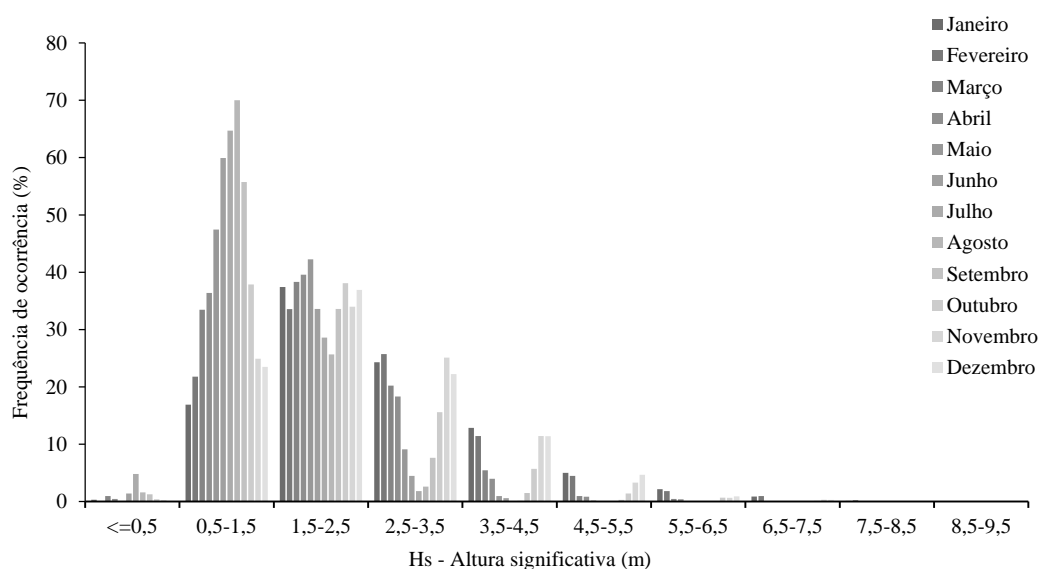


Figura 4.11: Distribuição mensal das alturas de onda significativa (dados do IH para a boia de Leixões, registados de 3h em 3h, recolhidos entre 1981 e 2014).

A distribuição dos períodos de onda segue uma lei assimétrica com o centro de gravidade ligeiramente deslocado no sentido dos menores períodos (Figura 4.12). A percentagem de registos inferiores a 8s é de 48,8% do total de registos, enquanto as classes de 8s a 12s representam 42,9% dos registos e os restantes 8,3% são distribuídos pelas classes mais elevadas. As classes mais representativas são as de 7-8s, 6-7s, 8-9s e 5-6s, respetivamente com 15,7%, 15,4%, 14,0% e 13,0% dos 71507 registos.

Analisando a distribuição mensal (Figura 4.13), observa-se a mesma descida dos valores médios do período de onda nos meses de Verão, não havendo registo de períodos superiores a 14s para os meses de Maio, Junho e Julho.

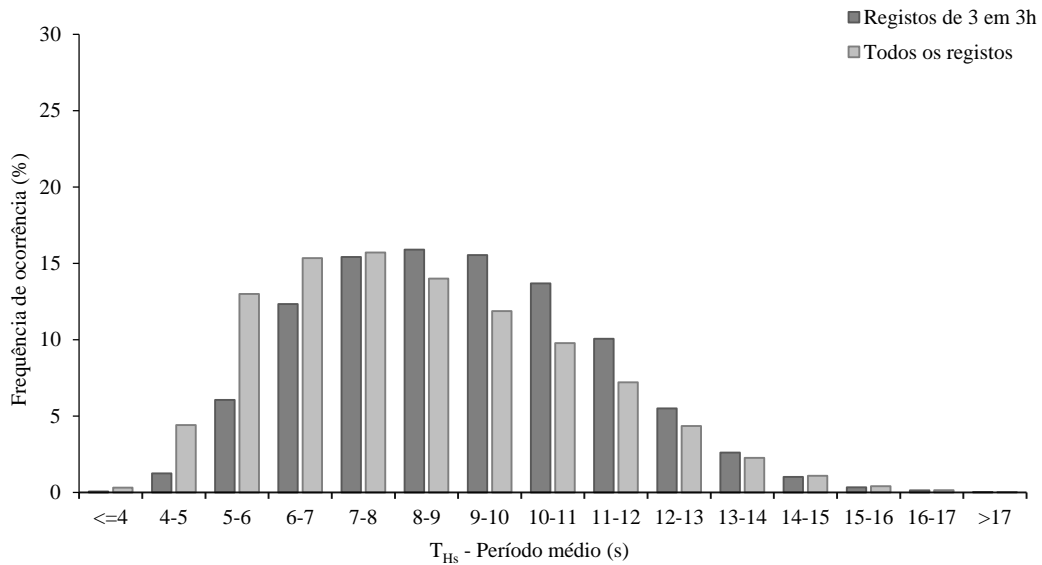


Figura 4.12: Comparação dos registos totais do período de onda médio com os registos efetuados de 3h em 3h (dados do IH para a boia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2014).

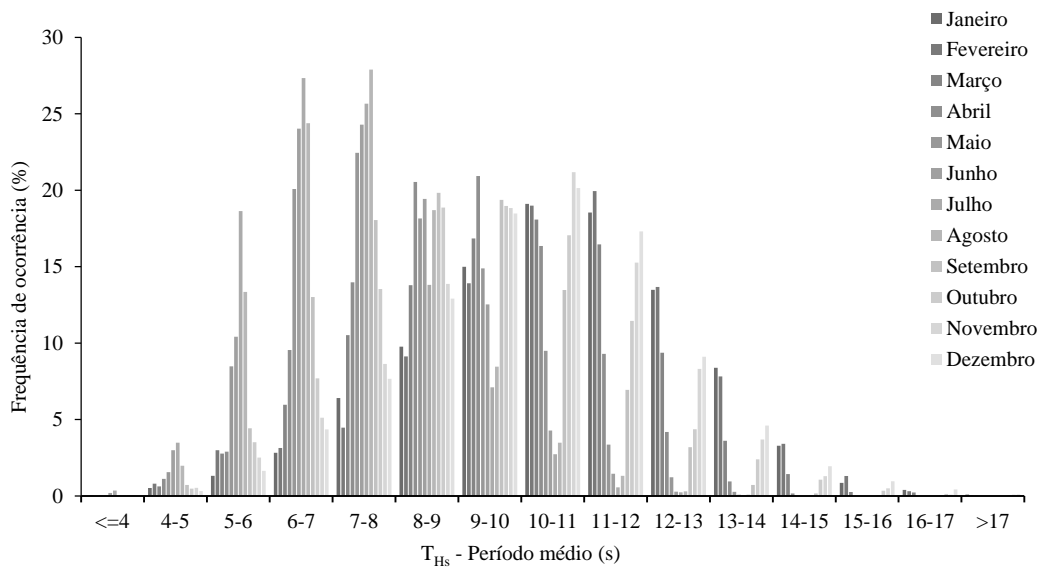


Figura 4.13: Distribuição mensal do período de onda médio (dados do IH para a boia de Leixões, registados de 3h em 3h, recolhidos entre 1981 e 2014).

### 4.3.3 Rumos dominantes

O registo do rumo da agitação nem sempre foi realizado. Estes registos começaram em 1993 e, por vezes, foram registados apenas os quadrantes de proveniência das ondas. Foram trabalhados 34854 registos de rumos correspondentes aos registos com intervalos de 3h, perfazendo uma média de 1453 valores por cada ano em análise. O ano com menor

número de dados foi o de 1995 com apenas 167 registos e 2003 foi o ano de maior número de registos com 2798 registos.

Para o tratamento da informação relativa aos rumos da ondulação foram definidas várias classes. As classes correspondem a sectores de  $22,5^\circ$  centrados na direção que dá o nome à classe, como se visualiza na Figura 4.14.

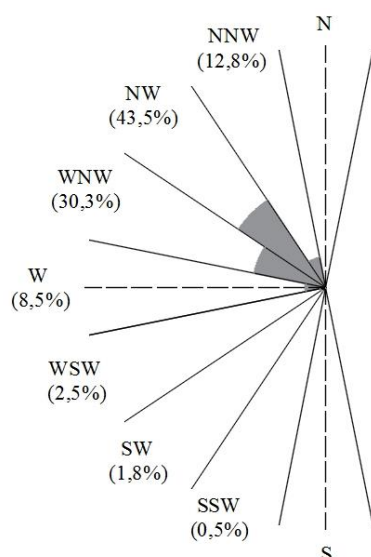


Figura 4.14: Rosa de rumos com a representação das classes de direção de ondulação (dados do IH para a boia de Leixões, registados de 3h em 3h, recolhidos entre 1993 e 2014).

O quadrante de Noroeste apresenta predominância de origem da ondulação, com 86,6% dos registos a situarem-se no intervalo de  $11,25^\circ$  a  $78,75^\circ$ . O sector NW representa 43,5% do total de registos de rumos. Todas as ondas com proveniência do quadrante de Sudoeste representam apenas 4,8% do total de registos. Quando se analisam em cada ano os valores registados de 3h em 3h, é o sector NW que apresenta maior frequência de ocorrência, com exceção dos anos de 1997 e 2003 em que foi o sector WNW (Figura 4.15). Da mesma forma, se fosse analisado o total de registos da boia de Leixões (incluindo temporais), para o mesmo período, verificava-se que a ondulação tinha origem predominantemente de NW com exceção dos anos já referidos e ainda de 2002.

De acordo com a Figura 4.15, verificam-se alguns períodos de tempo em que se nota uma ligeira rotação da tendência de proveniência de rumos mais para WNW, retirando alguma importância aos rumos de NW. Este acontecimento ocorre para o período decorrido entre 1993 e 1997, repetindo-se novamente entre 1998 e 2002 e entre 2003 e 2005 e, mais uma vez, de 2011 a 2013 em que de um modo geral diminuem as ocorrências no setor NW e

aumentam no sector WNW. Esta tendência é também referida por Coelho (2005), que analisou dados recolhidos entre 1993 e 2003 e por Baptista *et al.* (2015) que analisaram o período complementar (de 2003 a 2014).

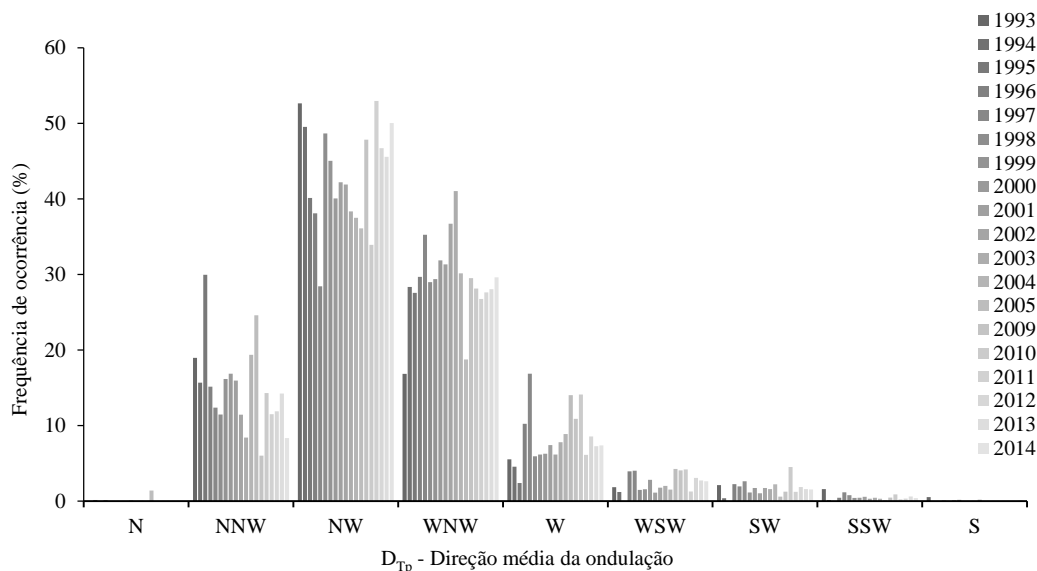


Figura 4.15: Distribuição da direção de ondulação ao longo dos anos (dados do IH para a boia de Leixões, registados de 3h em 3h, recolhidos entre 1993 e 2014).

Na análise apresentada, os registos da direção média da ondulação ( $\beta_{Top}$ ) com indicação exclusiva do quadrante foram transformados no respetivo valor angular médio do quadrante, de acordo com a Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Correspondência entre quadrantes e o valor angular adotado para caracterização da direção média da ondulação ( $\beta_{Top}$ ).

Quadrante	Ângulo (°)	Quadrante	Ângulo (°)
N	360=0	S	180
NNE	22,5	SSW	202,5
NE	45	SW	225
ENE	67,5	WSW	247,5
E	90	W	270
ESE	112,5	WNW	292,5
SE	135	NW	315
SSE	157,5	NNW	337,5

Por outro lado, o ângulo de incidência das ondas deve variar entre  $0^\circ$  (incidência perpendicular à estrutura) e  $90^\circ$  (incidência paralela à estrutura). Na ausência de dados, ou no caso de ângulos a ocorrerem fora deste intervalo (registados eventualmente por ocorrência de ventos locais incidentes na boia ondógrafo), foram consideradas ondas com incidência perpendicular por ser a situação mais desfavorável em termos de galgamentos.

A batimetria foi admitida regular e paralela entre si e à linha de costa, com curvas de nível orientadas a  $15^\circ$  com o Norte no sentido horário, para todo o trecho costeiro Esmoriz – Furadouro. Em termos práticos verificam-se ângulos entre  $\beta_{Top}=195^\circ$  e  $\beta_{Top}=360^\circ$  e entre  $\beta_{Top}=0^\circ$  e  $\beta_{Top}=15^\circ$  correspondentes às possibilidades de ocorrência da agitação tendo em atenção a orientação da costa com o Norte.

Para efeitos de aplicação das metodologias de cálculo, os ângulos agora referidos foram transformados da seguinte forma: para  $\beta_{Top}=195^\circ$  e para  $\beta_{Top}=15^\circ$  a incidência é paralela à estrutura (ou seja,  $\beta=90^\circ$ ), para  $\beta_{Top}=285^\circ$  a incidência é perpendicular à mesma estrutura (ou seja,  $\beta=0^\circ$ ); onde  $\beta$  é o parâmetro da direção da onda interveniente nas metodologias de cálculo.

#### **4.4 Propagação da agitação**

Sem pretender analisar em detalhe a propagação da agitação marítima desde o largo até à costa, interessa no entanto compreender a influência dos fenómenos de refração, empolamento, rebentação e espraçamento das ondas até atingirem a obra longitudinal aderente.

Assim, avaliam-se as principais implicações em termos de alterações da agitação para caracterizar a agitação incidente sobre a obra longitudinal aderente. Para tal, definem-se diversos cenários de agitação que representam diferentes formas de conjugação das marés e dos fenómenos de propagação em causa.

##### **4.4.1 Definição de cenários**

Na projeção de cenários a estudar optou-se por testar 9 combinações correspondentes à conjugação de 3 níveis da superfície livre da água com 3 situações distintas de propagação da agitação marítima (ver Tabela 4.9).



Relativamente ao nível da superfície livre da água, e como já foi referido na secção 4.2, analisaram-se os casos em que a situação de agitação supõe-se ocorrer em função do nível médio (+2,0m ZH), de uma situação intermédia (+3,0m ZH) e da máxima preia-mar de águas vivas (+4,0m ZH), designados posteriormente por NM, NM+1m e NM+2m, respetivamente.

Relativamente às características de agitação local (incidente sobre a estrutura) foram também considerados 3 cenários. Num caso, foi analisada a situação onde não se consideram os efeitos da propagação, ou seja, em que se adota o clima de agitação ao largo. Num outro cenário, considera-se a propagação da agitação através dos fenómenos de refração e empolamento. Por fim, foi também considerado o fenómeno de rebentação, limitando a altura de onda por efeito da profundidade a uma altura máxima de  $0,78h$ . Nesta última situação, correspondente aos cenários C7 a C9, quando as alturas de onda excedem a condição definida, foi considerado no limite que  $H=0,78h$ .

Tabela 4.9: Identificação dos cenários de teste do caso de estudo e respetivas condições.

Cenário de teste	Fenómeno considerado	Nível da superfície livre da água
C1		NM
C2	Não é efetuada a propagação da agitação marítima	NM+1m
C3		NM+2m
C4		NM
C5	Refração e empolamento	NM+1m
C6		NM+2m
C7	Refração, empolamento e rebentação	NM
C8		NM+1m
C9		NM+2m

Indicam-se na Tabela 4.10 as alturas do coroamento de cada estrutura de defesa aderente e as profundidades respetivas na frente da obra, para os diferentes níveis de maré considerados, como apoio ao processo de análise dos efeitos de cada fenómeno.

Tabela 4.10: Valor da altura de coroamento,  $R_c$ , e da profundidade,  $h$ , para cada estrutura de defesa aderente em análise, nas diferentes situações de nível de maré.

	Esmoriz		Cortegaça		Furadouro	
	$R_c$ (m)	$h$ (m)	$R_c$ (m)	$h$ (m)	$R_c$ (m)	$h$ (m)
NM	6,62	2,00	7,56	2,85	4,67	1,15
NM+1m	5,62	3,00	6,56	3,85	3,67	2,15
NM+2m	4,62	4,00	5,56	4,85	2,67	3,15

### 4.4.2 Refração

Considerando válida a lei de *Snell*, o efeito da refração, para as diferentes situações do nível de maré, foi avaliado em termos de consequências no valor da altura de onda incidente. Como tal, analisa-se o comportamento do coeficiente de refração (Figura 4.16) dividindo os valores obtidos em cinco classes; quatro delas considerando intervalos do coeficiente de 0,05 e uma classe que engloba todos os resultados inferiores a 0,80.

Quando a direção da agitação ao largo é perpendicular à linha de costa ( $\beta=0^\circ$ ), o coeficiente de refração toma o valor 1,00. Esta situação ocorre em 17% dos registos, qualquer que seja o cenário em análise, e inclui todas as ondas com direção desconhecida. As restantes situações, em que as ondas se aproximam da estrutura com orientação oblíqua, são aquelas em que efetivamente se estimou o fenómeno de refração.

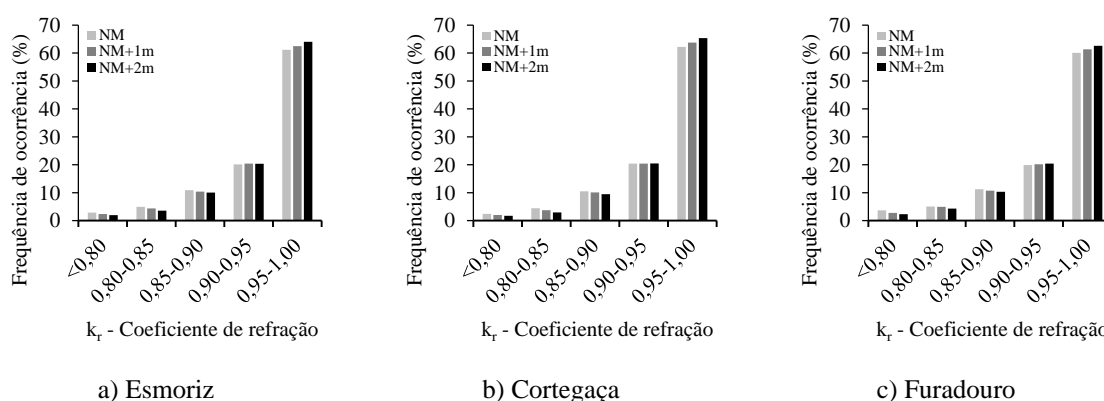


Figura 4.16: Estimativa (%) do valor do coeficiente de refração,  $k_r$ , para os diferentes locais e níveis da superfície livre da água.

O fenómeno de refração faz-se sentir de forma similar em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro. Com o aumento do nível da superfície livre da água, diminuem as frequências de ocorrência de coeficientes inferiores a 0,90. Para a classe mais elevada, a tendência é

inversa, ou seja, com o aumento da cota do nível da superfície livre da água, a refração diminui. A classe 0,90-0,95 é a única que origina tendências pouco nítidas com valores mais elevados em Cortegaça e no Furadouro para NM+2m, enquanto que em Esmoriz esta situação ocorre para o nível NM+1m. Esta classe corresponde também a uma transição de comportamento já que para a classe seguinte surge um acréscimo de ocorrências que passam a ter valores percentuais 3 vezes maiores (ou seja, se para a classe 0,90-0,95 as percentagens eram de 20%, na classe 0,95-1,00 passam a ser de 60%, aproximadamente). Da análise da Figura 4.16 refere-se ainda o evidente deslocamento das frequências no sentido dos maiores valores do parâmetro estudado.

De um modo geral, pode dizer-se que a maioria das ondas é pouco afetada pela refração já que, para qualquer cenário, em mais de 60% dos casos o coeficiente de refração é superior a 0,95, ou seja, a redução da altura de onda será igual ou inferior a 5%.

#### 4.4.3 Empolamento

O estudo do fenómeno de empolamento é feito de uma forma análoga à adotada para o fenómeno de refração considerando válida a teoria linear de *Airy*. O valor do coeficiente de empolamento também é dividido em classes, desta vez espaçadas de 0,20, adotando 2 classes extremas que englobam os valores inferiores a 0,80 e superiores a 1,60, respetivamente (ver Figura 4.17).

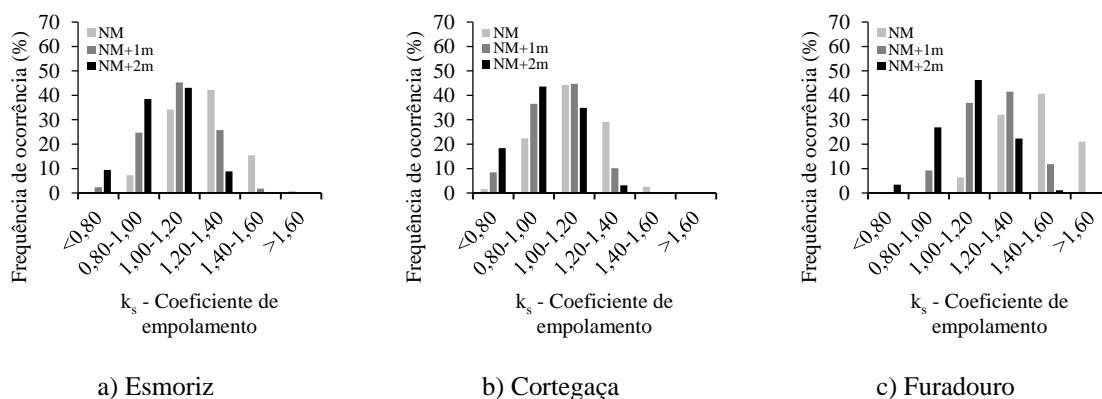


Figura 4.17: Estimativa (%) do valor do coeficiente de empolamento,  $k_s$ , para os diferentes locais e níveis da superfície livre da água.

O comportamento do coeficiente de empolamento parece seguir o mesmo padrão no caso dos 2 primeiros locais apresentados, Esmoriz e Cortegaça, concentrando o maior número de ocorrências em duas classes centrais e diminuindo as frequências, de forma gradual,

com o afastamento a estas classes. Em Esmoriz, a classe 1,00-1,20 é a que reúne o maior número de ocorrências para os dois níveis de água superiores e, para o nível mais baixo da superfície livre, é a classe 1,20-1,40 que concentra mais resultados. Em Cortegaça, para os dois níveis de água inferiores predominam as ocorrências na classe 1,00-1,20 e para o nível NM+2m é a classe inferior (0,80-1,00) que se assume como predominante.

No Furadouro, a maior dispersão nos resultados contrasta claramente com o que sucede nos restantes locais. Aqui, para cada nível de água, existe uma classe predominante diferente: para o nível mais baixo é a classe 1,40-1,60 que regista as maiores frequências de ocorrência e, para os níveis seguintes, são as classes inferiores, respetivamente, a classe 1,20-1,40 (para o nível NM+1m) e 1,00-1,20 (para o nível NM+2m). Conclui-se então que as percentagens de frequência de ocorrência do coeficiente de empolamento se deslocam para as classes de valores mais baixos com o aumento da profundidade.

A classe predominante nos 3 locais de estudo, qualquer que seja o nível de maré, apresenta sempre percentagens de ocorrência superiores a 40%. No caso de Esmoriz e do Furadouro esta situação acontece para valores de  $k_s$  superiores a 1,00. Em particular, o Furadouro é o local que apresenta maiores ocorrências nos valores mais elevados do coeficiente, registando o valor máximo de 2,13 para o nível NM. Em contraste, Cortegaça apresenta uma tendência inversa registando o valor mínimo de 0,35 para o nível NM+2m.

#### 4.4.4 Rebentação

Ainda durante a propagação da onda até à estrutura, pode ocorrer um outro fenómeno que é o da rebentação. Dada a relevância da rebentação na limitação da altura de onda incidente na estrutura, justifica-se avaliar os impactes que este fenómeno tem em função do nível de maré (Tabela 4.11). Assumiu-se neste estudo que a rebentação ocorre quando  $H=0,78h$ .

Tabela 4.11: Estimativa (%) do número de ondas limitadas pela rebentação nas praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro.

	<b>Esmoriz</b>	<b>Cortegaça</b>	<b>Furadouro</b>
<b>NM</b>	63	35	94
<b>NM+1m</b>	32	17	57
<b>NM+2m</b>	15	7	28

Quanto mais baixo está o nível da superfície livre da água e menor é a altura da coluna de água, maior é o número de ondas limitadas pela rebentação uma vez que se assume por simplificação que este fenómeno depende exclusivamente da profundidade.

Refira-se em particular a situação do Furadouro em que o número de ondas limitadas por rebentação é sempre maior que nos restantes locais porque as profundidades de fundo (já indicadas na Tabela 4.10) são também mais pequenas. Esmoriz é o local que sucede e, por fim, Cortegaça apresenta as maiores profundidades e o menor número de ondas limitadas por este fenómeno sendo, por conseguinte, previsível a incidência de ondas mais altas.

#### 4.4.5 Espraiamento

Depois de analisada a influência dos fenómenos de refração e empolamento (em termos de coeficientes a aplicar à altura de onda) e da rebentação, falta analisar a altura do máximo espraiamento, já que é esta cota que define a ocorrência do galgamento. Esta análise faz-se de acordo com as frequências de ocorrência para cada praia (Figuras 4.18 a 4.20). As 6 classes selecionadas para enquadramento dos valores obtidos relativamente à altura de espraiamento são espaçadas de 1m, existindo 2 classes extremas que agrupam os resultados inferiores a 1m e superiores a 5m.

Antes de avançar, lembra-se que nos cenários C1, C2 e C3 não se consideram os efeitos da propagação, nos cenários C4 a C6 considera-se simultaneamente o efeito da refração e do empolamento e nos 3 cenários restantes (C7 a C9) considera-se, além destes 2 fenómenos, o efeito da rebentação.

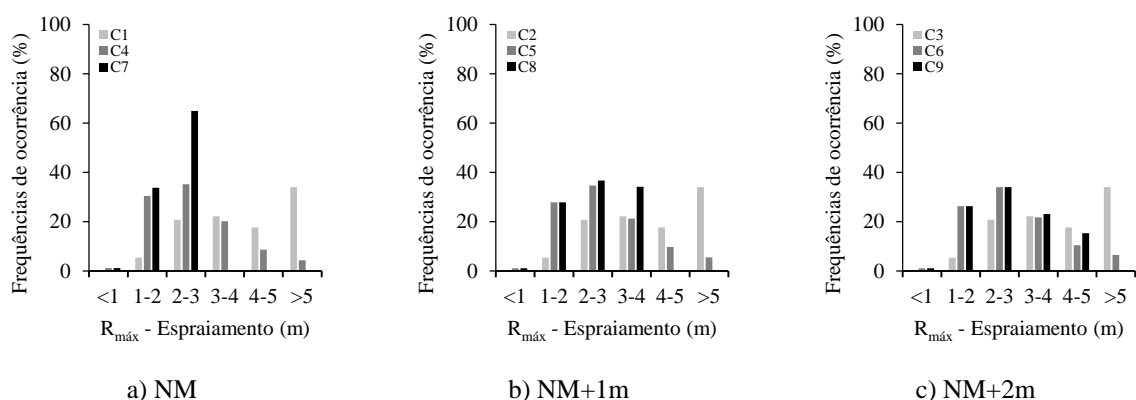


Figura 4.18: Estimativa (%) do valor do espraiamento,  $R_{máx}$ , em Esmoriz para os diferentes cenários de teste.

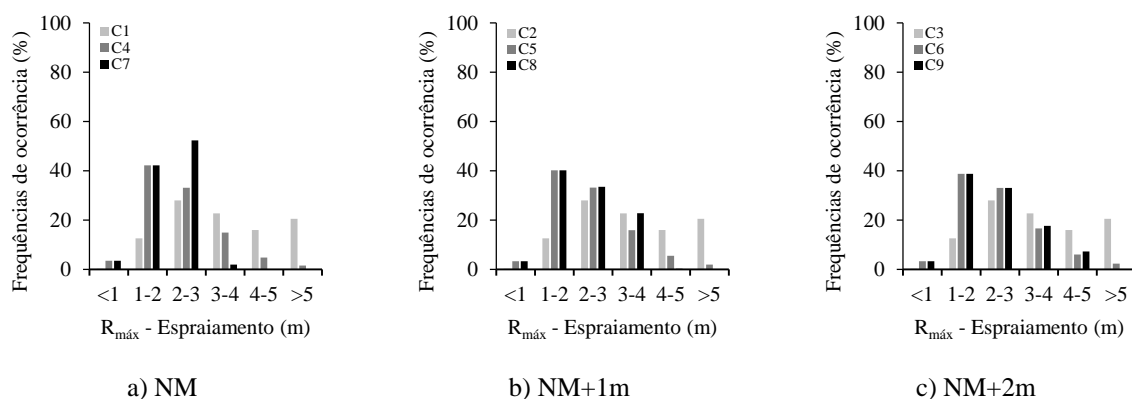


Figura 4.19: Estimativa (%) do valor do espraimento,  $R_{m\acute{a}x}$ , em Cortegaça para os diferentes cenários de teste.

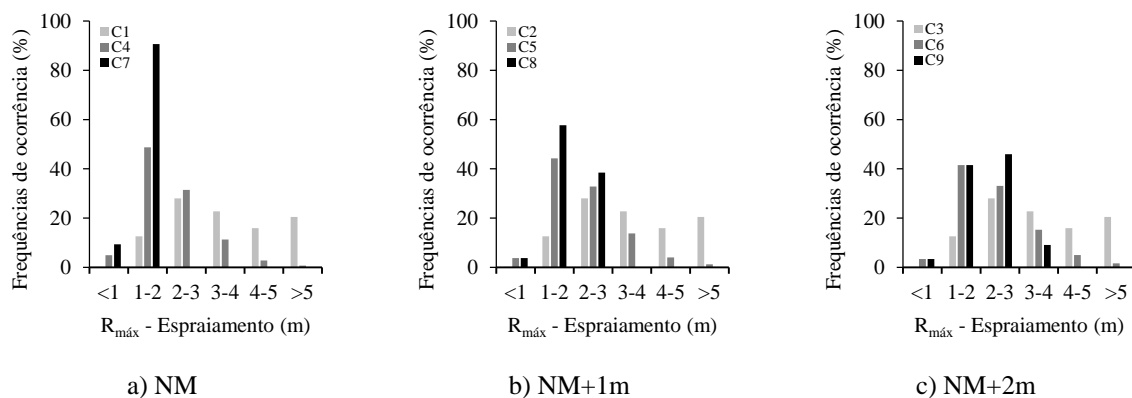


Figura 4.20: Estimativa (%) do valor do espraimento,  $R_{m\acute{a}x}$ , no Furadouro para os diferentes cenários de teste.

Nos 3 primeiros cenários (C1 a C3), ao serem consideradas as características da onda ao largo, o valor do espraimento difere apenas se a inclinação do talude da estrutura for variável. De facto, os valores de Cortegaça e do Furadouro são iguais uma vez que a inclinação do talude existente em cada um destes locais é também igual (30°). Em Esmoriz, a estrutura de defesa é constituída por um talude mais inclinado (35°) que os anteriores, apresentando. Neste local, mais de 50% das ondas ocasionam alturas de espraimento superiores a 4m, o que representa mais 15% do que nas estruturas com 30° de inclinação (Cortegaça e Furadouro).

Para os cenários C4 a C6 e para espraimentos superiores a 3m, aumentam as frequências de ocorrência com o aumento do nível da água em Esmoriz e em Cortegaça. No Furadouro as conclusões que se possam retirar não definem nenhuma tendência principal.

Para estes 3 cenários que incluem os fenômenos de refração e empolamento, as frequências decrescem para espraiaamentos superiores a 3m, em todos os locais.

Finalmente, nos últimos cenários (C7 a C9) predomina a classe 2-3m em Esmoriz, em Cortegaça são as classes 1-2m (para NM+1m e NM+2m) e 2-3m (para NM) e no Furadouro são as classes 1-2m (para NM e NM+1m) e 2-3m (para NM+2m). Neste caso, em que já se considera a rebentação, algumas das classes superiores não apresentam frequências de ocorrência pois as ondas mais altas não atingem a estrutura. Os valores de espraio máximo registados ocorrem para o nível de água mais elevado e são de 5,52m em Esmoriz, 5,16m em Cortegaça e 3,85m no Furadouro.





## Capítulo 5

---

### RESULTADOS



## 5 RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se todos os resultados práticos consequentes da aplicação das diversas metodologias de cálculo do galgamento costeiro adotadas para a análise, quantificação e avaliação de risco de galgamento nos 3 locais do caso de estudo.

### 5.1 Eventos de galgamento

Conhecida a distribuição dos valores do espraiamento para todos os cenários estudados, é possível efetuar uma previsão do número de ondas que originam galgamento quando é excedida a cota de coroamento que caracteriza a estrutura de cada local em estudo (Tabela 5.1).

Tabela 5.1: Estimativa do número de ondas que provocam galgamento e percentagem relativa ao número total de ondas estudadas, em cada local e para cada cenário de teste.

Cenário de teste	Esmoriz		Cortegaça		Furadouro	
	N.º	%	N.º	%	N.º	%
C1	6333	15,20	1426	3,42	10463	25,12
C2	10687	25,65	3034	7,28	17938	43,06
C3	16756	40,22	5907	14,18	28432	68,25
C4	238	0,57	5	0,01	523	1,26
C5	1129	2,71	78	0,19	3495	8,39
C6	3982	9,56	464	1,11	12781	30,68
C7	0	0,00	0	0,00	0	0,00
C8	0	0,00	0	0,00	0	0,00
C9	1032	2,48	0	0,00	11458	27,50

Em termos gerais e analisando o que acontece nas diferentes tipologias de estruturas, observa-se um comportamento sistemático de maior número de eventos de galgamento no Furadouro, sucedido por Esmoriz e, finalmente, menor número em Cortegaça. Naturalmente, o número de ondas a galgar as estruturas diminui no sentido do menor

nível da água. O número de galgamentos diminui também se se considerarem mais fenómenos de propagação das ondas, aproximando a avaliação ao comportamento que reproduz a realidade.

Os cenários C1 a C3 consideram a altura de onda ao largo, pelo que a ocorrência de galgamento depende da inclinação do talude da estrutura na definição do espraimento, e da altura do bordo livre. Relativamente ao ângulo do talude, é em Esmoriz que se verifica a maior inclinação ( $35^\circ$ ), justificando as maiores alturas de espraimento verificadas na secção 4.4.5. No entanto, quanto à altura de bordo livre,  $R_c$ , é no Furadouro que se propicia a situação mais favorável à ocorrência de galgamentos já que esta distância é inferior em aproximadamente 2 e 3m relativamente a Esmoriz e Cortegaça, colocando o coroamento mais próximo do nível da superfície livre do mar. Cortegaça, que simultaneamente exhibe o menor ângulo de talude e a maior altura de coroamento, apresenta características de geometria da obra aderente mais adequadas à redução do galgamento evidenciando e justificando os resultados da Tabela 5.1. Além disso, a berma com 6m de largura tem uma localização bastante eficaz (de acordo com o que tinha sido referido na secção 3.1.3.2) estando praticamente ao nível da superfície livre da água.

Nos cenários intermédios C4 a C6, o número de ondas que provocam o galgamento decresce, relativamente à situação análoga nos 3 primeiros cenários. Estes resultados estão de acordo com a diminuição das alturas de espraimento verificada na secção 4.4.5 (ou seja, em todos os locais existe uma diminuição das frequências para espraimentos superiores a 3m). Os efeitos do empolamento, além de favorecerem a ocorrência de ondas com maior altura no Furadouro, justificam também a maior expressão no número de galgamentos. Esta diferença reflete-se sobretudo na comparação com Cortegaça que apresenta maiores frequências de ocorrência, relativamente ao que acontece no Furadouro e em Esmoriz, para as classes que originam a redução da altura de onda com o empolamento ( $k_s < 1,00$ ). O fenómeno de refração, igualmente considerado, tem no entanto pouco peso nos resultados obtidos. Por um lado, o coeficiente de refração em estudo é similar em todos os locais. Por outro, como foi referido na secção 4.4.2, em mais de 60% das situações o coeficiente de refração é muito próximo de 1,00 (superior a 0,95), sendo reduzida a alteração induzida nas alturas de onda.

Na análise dos últimos cenários onde se limita a altura de onda por efeito da rebentação, destaca-se o que sucede em C7 e C8, ou seja, a ausência de galgamentos para os níveis de água inferiores porque ocorre a rebentação da onda antes desta incidir sobre a estrutura. Para o nível de máxima preia-mar de águas vivas é no Furadouro que se regista o maior número de ondas galgadas, não existindo galgamentos em Cortegaça qualquer que seja o nível de maré considerado.

## 5.2 Caudais de galgamento

A quantificação dos valores do caudal galgado em cada estrutura é apresentada em termos de frequências de ocorrência, calculadas pelas formulações empíricas, e divide-se em cinco classes, de acordo com as Tabelas 5.2 a 5.4.

A definição dos intervalos foi efetuada com base nos valores críticos definidos, de forma semelhante, por Pullen *et al.* (2007) e por Burcharth e Hughes (2011), tendo sido agora agrupadas algumas classes. Apresentam-se ainda os valores médios do caudal galgado, quantificados pelas 2 ferramentas de cálculo: formulações empíricas, FE, e rede neuronal, RN. Os cenários C7 e C8 foram omitidos por não existirem eventos de galgamento nessas condições; o cenário C9 foi também omitido em Cortegaça pelas mesmas razões.

Tabela 5.2: Frequências de ocorrências para diferentes classes do caudal galgado (l/s/m) e valor médio do caudal galgado, para cada cenário de teste, em Esmoriz.

Cenário de teste	Frequências de ocorrência (%)					q <sub>méd</sub> (l/s/m)	
	<1	1-10	10-50	50-200	>200	FE	RN
C1	71,78	20,54	5,89	1,59	0,19	4,04	0,06
C2	69,76	20,89	6,78	2,13	0,44	5,80	0,66
C3	65,01	22,28	8,61	3,20	0,90	9,44	5,69
C4	0,00	0,00	0,00	5,88	94,12	686,35	0,00
C5	0,00	0,44	16,30	49,25	34,01	247,09	0,00
C6	0,23	20,89	42,29	22,95	13,64	111,41	37,24
C9	0,87	99,13	0,00	0,00	0,00	1,55	12,47

Nota: As frequências de ocorrência referem-se aos resultados obtidos pelas formulações empíricas. FE (formulações empíricas); RN (rede neuronal).

Tabela 5.3: Frequências de ocorrências para diferentes classes do caudal galgado (l/s/m) e valor médio do caudal galgado, para cada cenário de teste, em Cortegaça.

Cenário de teste	Frequências de ocorrência (%)					q <sub>méd</sub> (l/s/m)	
	<1	1-10	10-50	50-200	>200	FE	RN
C1	42,08	40,95	13,74	3,09	0,14	7,54	0,43
C2	47,10	36,29	12,72	3,49	0,40	8,55	4,16
C3	47,22	35,20	12,78	3,96	0,85	10,90	17,30
C4	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	1254,66	0,00
C5	0,00	0,00	0,00	5,13	94,87	525,83	0,00
C6	0,00	0,00	3,66	53,23	43,10	260,05	148,00

Nota: As frequências de ocorrência referem-se aos resultados obtidos pelas formulações empíricas. FE (formulações empíricas); RN (rede neuronal).

Tabela 5.4: Frequências de ocorrências para diferentes classes do caudal galgado (l/s/m) e valor médio do caudal galgado, para cada cenário de teste, no Furadouro.

Cenário de teste	Frequências de ocorrência (%)					q <sub>méd</sub> (l/s/m)	
	<1	1-10	10-50	50-200	>200	FE	RN
C1	11,26	57,58	22,32	6,41	2,43	25,37	0,00
C2	19,67	47,58	20,84	8,07	3,85	41,97	0,84
C3	23,91	37,82	19,94	10,78	7,55	106,99	14,42
C4	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	5746,40	0,00
C5	0,00	0,00	0,00	30,53	69,47	1409,12	0,00
C6	0,00	2,93	39,88	26,38	30,81	978,02	41,57
C9	0,00	3,27	96,06	0,66	0,00	19,95	20,92

Nota: As frequências de ocorrência referem-se aos resultados obtidos pelas formulações empíricas. FE (formulações empíricas); RN (rede neuronal).

Em Esmoriz, quando são consideradas as condições de agitação marítima ao largo, mais de 65% dos galgamentos são de caudal inferior a 1l/s/m, qualquer que seja o nível da água. Do mesmo modo, a classe de caudais inferior é predominante em Cortegaça,

constituindo mais de 40% das situações. No Furadouro, a classe de maior ocorrência é, para qualquer nível de maré, a classe seguinte, com caudais entre 11/s/m e 10l/s/m.

Nos cenários intermédios dá-se um deslocamento das frequências de caudais galgados no sentido dos maiores valores. Nestes cenários também se observam os maiores valores médios de caudal galgado para os resultados das formulações empíricas. O acréscimo de frequências nos valores mais elevados está também associado à diminuição do nível da água. Este resultado indica que nas considerações destes cenários é mais difícil ocorrerem galgamentos (comparação entre o espraio e a cota de coroamento da obra longitudinal aderente) como já se tinha concluído na secção 5.1, mas quando ocorrem, registam-se caudais com valores mais elevados (estimativa pelas fórmulas empíricas).

Quando se considera a rebentação das ondas não se contabilizam eventos de galgamento em Cortegaça. Em Esmoriz e no Furadouro são as classes de 1-10l/s/m e de 10-50l/s/m que, respetivamente, concentram mais de 90% das ocorrências de galgamento.

Constatam-se diferenças importantes nos valores resultantes da aplicação das 2 metodologias de estimativa dos caudais galgados. Esta questão está relacionada com o facto da rede neuronal estimar, com maior frequência, caudais nulos. Enquanto nas formulações empíricas a condição de ocorrência de galgamento é definida em função do valor do espraio, calculado pela equação 2.11, na rede neuronal este processo é definido pela modelação intrínseca do sistema físico.

Os valores médios do caudal galgado obtidos pela rede neuronal são, por isso, sempre inferiores aos valores das formulações empíricas, à exceção dos cenários C9 em Esmoriz e no Furadouro (em que o número estimado de galgamentos é coincidente para as 2 estruturas, evidenciando a ocorrência de caudais mais elevados na rede neuronal, de acordo com o que tinha sido visto na análise de sensibilidade efetuada) e do cenário C3 em Cortegaça (em que o número de galgamentos estimados por estas metodologias difere em apenas 7%, evidenciando novamente a tendência de caudais médios mais elevados para a rede neuronal).

### **5.3 Cenário de referência**

A partir deste ponto do trabalho os valores de caudal analisados e indicados serão relativos ao cálculo efetuado exclusivamente pelas formulações empíricas, que foram a

principal metodologia abordada e que têm, portanto, interesse na análise detalhada do cenário de referência a que se irá proceder.

Para concretizar a avaliação de risco de galgamento, considera-se que de entre os 9 cenários analisados existe a necessidade de selecionar o que melhor se ajusta à situação conhecida nos locais de estudo. Numa primeira análise, evidenciam-se os resultados de 2 dos cenários estudados, por razões distintas. O primeiro cenário ponderado na caracterização do risco é o cenário C5, que representa uma situação intermédia, tanto em termos de fenómenos de propagação considerados, como em termos do nível da superfície livre da água. Por outro lado, o cenário C9 também parece adequado uma vez que representa um número maior de fenómenos de propagação das ondas existentes na natureza (inclui-se a rebentação). Neste último caso, optou-se pelo nível máximo de maré estudado já que para os cenários C7 e C8 não existem galgamentos em nenhuma praia.

A decisão sobre qual o cenário mais adequado baseia-se numa comparação entre os cenários projetados e o número aproximado de registos de galgamento conhecidos nos locais em estudo. Esta comparação recorre à base de dados disponível (já apresentada na secção 4.1.4 para as 3 praias) e revela dados apenas sobre o número de ocorrências de galgamento registadas, não tendo sido efetuada a quantificação do caudal galgado em cada evento. Apesar dos frequentes galgamentos que se registam atualmente no Furadouro, os valores estimados superam neste local o que é realmente observado.

Na Tabela 5.5 apresenta-se o número de galgamentos registados segundo Cruz (2015) e Coelho *et al.* (2015), referentes ao período entre 1857 e 2015, e que representam o caso real, e segundo o trabalho aqui efetuado, referente ao período compreendido entre 1981 e 2014, representando os 2 cenários selecionados (C5 e C9). Indica-se também o número de galgamentos distribuído pelas diversas classes de caudal (já que anteriormente foram apresentados apenas os valores totais para cada local) e ainda uma estimativa do número total de eventos se fosse considerado apenas 1 registo em cada dia ao contrário dos 8 registos por dia adotados (correspondentes aos dados obtidos de 3h em 3h). Em Cruz (2015) e em Coelho *et al.* (2015) foi admitido que num só evento possam existir diversas ocorrências. Importa também ter em conta que quanto mais antigo for o evento, maior a dificuldade em encontrar registos. Além disso, quando o dano não afeta diretamente a população (situação possivelmente correspondente aos menores caudais galgados),



podem não existir relatos e, dada a menor ocupação demográfica no passado, podem não ter sido identificados alguns eventos.

Tabela 5.5: Número de galgamentos estimados pelas formulações empíricas (para os cenários C5 e C9), por Cruz (2015) e por Coelho *et al.* (2015).

Local	Cenário de teste	q (l/s/m)					Total		Cruz (2015)	Coelho <i>et al.</i> (2015)
		<1	1-10	10-50	50-200	>200	ondas	dias		
Esmoriz	C5	0	5	184	556	384	1129	141	11	11
	C9	9	1023	0	0	0	1032	129		
Cortegaça	C5	0	0	0	4	74	78	10	5	3
	C9	0	0	0	0	0	0	0		
Furadouro	C5	0	0	0	1067	2428	3495	437	53	19
	C9	0	375	11007	76	0	11458	1432		

Da análise da Tabela 5.5, identifica-se uma tendência comum em todos os casos: a praia do Furadouro regista o maior número de galgamentos, sendo sucedida por Esmoriz e é em Cortegaça que o número de eventos é menor ou mesmo nulo.

Apesar de não ser clara a decisão a tomar, o cenário C5 parece mais distante da situação real porque estima que em Cortegaça e no Furadouro todos os galgamentos sejam de caudal superior a 50l/s/m, excluindo a hipótese provável de ter existido no período em análise (período entre 1981 e 2014) galgamentos com caudais inferiores. O mesmo acontece para Esmoriz em que se estima pelo cenário C5 que mais de 80% dos eventos de galgamento tenham caudal superior a 50l/s/m. Assim, é adotado o cenário C9 como representativo dos 3 locais de estudo e como referência na análise do risco de galgamento. De acordo com o cenário escolhido, não ocorreram galgamentos na defesa aderente localizada em Cortegaça e, portanto, este local não será alvo de estudo nos pontos seguintes do capítulo.

## 5.4 Comportamento sazonal e anual

A análise da distribuição mensal e anual dos galgamentos estimados para Esmoriz e para o Furadouro foi efetuada de acordo com os registos de agitação desde o ano 1981 até

2014, mas admitindo as características geométricas atuais de cada estrutura, bem como uma profundidade na frente da obra constante (parâmetros definidos na secção 4.1.2).

As Figuras 5.1 e 5.2 representam o comportamento mensal e anual da frequência de ocorrência de eventos de galgamento (número de ondas que registam galgamento, em cada mês ou ano, em relação ao número total de ondas do local em análise – 1032 ondas em Esmoriz e 11458 no Furadouro), para o cenário de referência escolhido (C9).

Como esperado, da análise dos resultados da Figura 5.1, verifica-se uma clara predominância de ocorrências de galgamento no período de Inverno (Outubro a Março) relativamente ao período de Verão, tal como acontecia com a altura e com o período de onda para as classes mais elevadas. Este comportamento sazonal reflete-se numa distribuição de percentagens pelos dois períodos (Inverno e Verão) de 97% e 3% no caso de Esmoriz e de 81% contra 19% no caso do Furadouro. Em Esmoriz existem ainda três meses (Junho, Julho e Agosto) sem registo de ocorrências. No Furadouro é o mês de Julho que apresenta menor número de eventos (96 registos), seguido do mês de Agosto (com 110 registos), apresentando em ambos os meses uma frequência de ocorrência de apenas 1%. Relativamente a valores máximos, em Esmoriz verificam-se 251 registos no mês de Janeiro (equivalentes a 24% do registo total de ondas neste local), enquanto que no Furadouro o número máximo é de 1910 registos ocorridos em Dezembro (equivalendo, no entanto, a apenas 17% do total de registos).

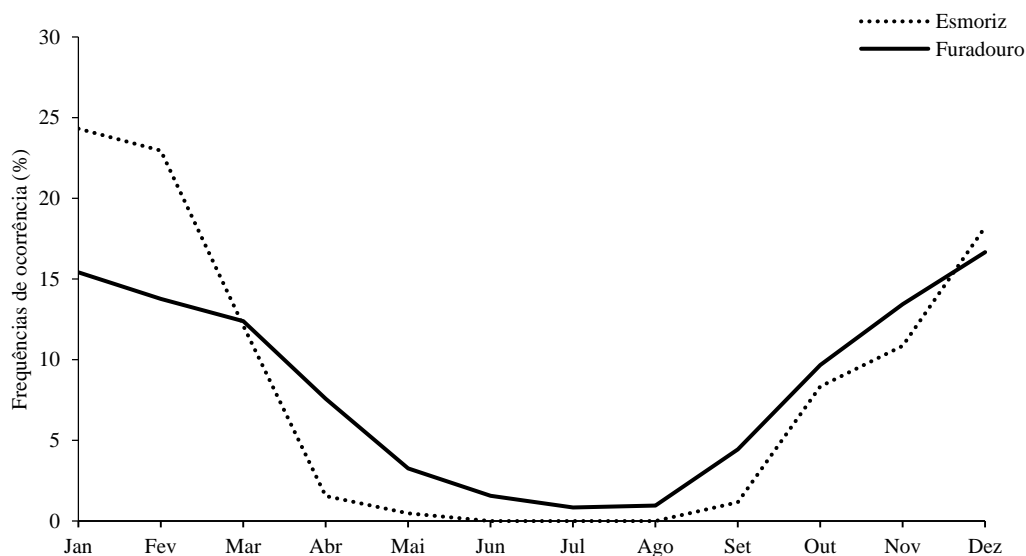


Figura 5.1: Distribuição mensal das frequências de ocorrência de galgamento em Esmoriz e no Furadouro.

A distribuição anual de registos de galgamento (Figura 5.2) é irregular, embora semelhante quando se comparam os dois locais, terminando em 2014 com uma tendência de crescimento. O ano de 2014 é aquele que representa, para ambos os locais, a maior frequência de ocorrência; no caso de Esmoriz verificam-se 115 galgamentos (11%) e no caso do Furadouro verificam-se 1017 (9%). Pelo contrário, o ano de 1985 é aquele que representa a menor frequência de ocorrência com 2 registos em Esmoriz e 52 no Furadouro. Em particular, e no caso de Esmoriz, verifica-se ainda que no ano 2004 também ocorreram apenas 2 galgamentos e no ano de 1995 ocorreram 3. As lacunas de resultados existentes representam a falta de registos nos anos de 1986 a 1992 e de 2006 a 2008.

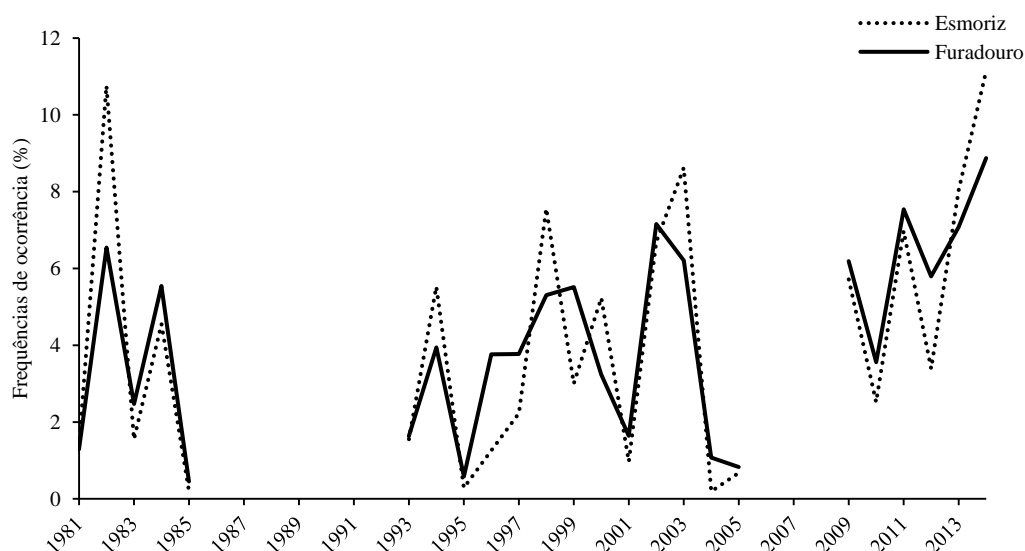


Figura 5.2: Distribuição anual das frequências de ocorrência de galgamento em Esmoriz e no Furadouro.

## 5.5 Período de retorno

Com base na análise das frequências de ocorrência de galgamentos do cenário de referência, fez-se uma estimativa do número de ondas galgadas em cada ano e do número de dias por ano associados a esses galgamentos (Tabela 5.6). Nesta análise foram apenas considerados os caudais de valor superior a 11l/s/m e foram também distinguidos os eventos de galgamento com caudal superior a 10l/s/m e 50l/s/m, de acordo com os limites de classes de caudais de galgamento anteriormente avaliados.

Tabela 5.6: Frequências de ocorrência de galgamentos, para diferentes valores de caudal galgado, em Esmoriz e no Furadouro.

		<b>q (l/s/m)</b>		
		>1	>10	>50
<b>Esmoriz</b>	Total	1023	-	-
	N.º ondas galgadas	72	-	-
	N.º dias com galgamento / ano	9	-	-
<b>Furadouro</b>	Total	11458	11083	76
	N.º ondas galgadas	803	777	5
	N.º dias com galgamento / ano	100	97	1

Em Esmoriz, a probabilidade de ocorrência de galgamentos é de 9 dias em cada ano decorrido e no Furadouro essa estimativa passa para 100, para a menor classe de caudais considerada. No Furadouro, existe a possibilidade de ocorrência de caudais superiores a 10l/s/m em 97 dias do ano (correspondente a aproximadamente 3 meses) e caudais superiores a 50l/s/m em apenas 1 dia por cada ano.

Complementarmente, analisaram-se também as séries classificada e cronológica de todos os valores de caudal estimados. Para a estimativa dos valores de caudal associados a um determinado período de retorno, foram analisadas as séries classificadas dos caudais máximos anuais (correspondentes a 24 anos efetivos de registos) e foram definidas as respetivas linhas de tendência. A Figura 5.3 mostra o resultado para Esmoriz e a Figura 5.4 para o Furadouro.

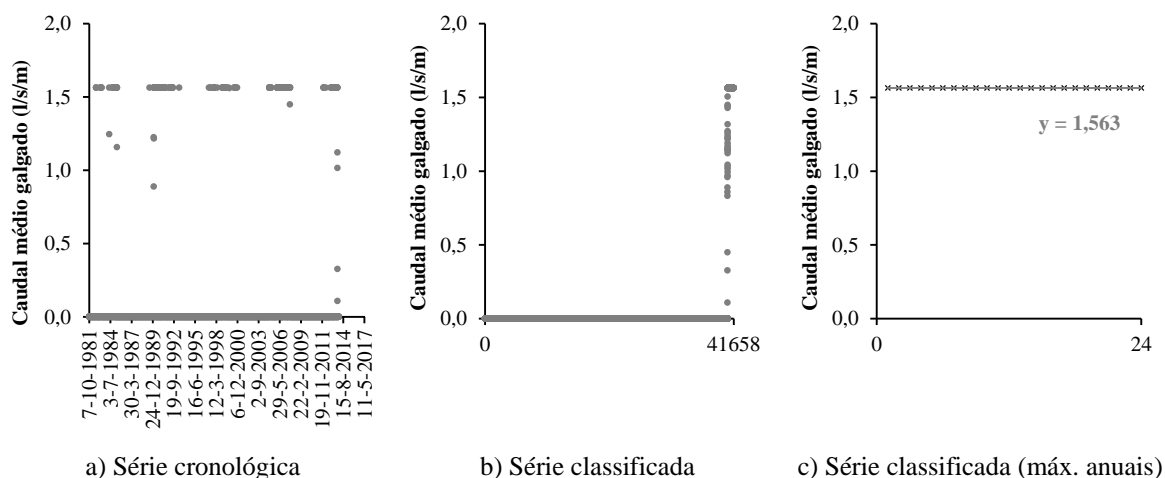


Figura 5.3: Caudais de galgamento estimados para Esmoriz, no cenário C9.

Em Esmoriz, uma vez que os valores máximos de caudal são iguais em todos os anos ( $q=1,56l/s/m$ ), a função é linear (Figura 5.3c) e no Furadouro admite-se que a distribuição dos máximos anuais pode ser representada por uma função exponencial (Figura 5.4c).

Para compreender a tendência de comportamento verificada em Esmoriz, analisaram-se as alturas de onda incidentes consideradas na estimativa dos caudais de galgamento no cenário C9. De facto, neste cenário 15% das ondas são limitadas pela rebentação (ou seja, existem 6172 ondas limitadas pela altura máxima de  $H=3,12m$ ) e destas, verifica-se que apenas 16% geram caudais com o valor máximo de  $1,56l/s/m$ . Nas restantes situações, o caudal é nulo porque os períodos de onda são menores e, conseqüentemente, são também menores os espriamentos correspondentes, que acabam por não ser suficientemente elevados para ultrapassar o coroamento da estrutura.

Na Figura 5.3a confirma-se a existência de poucos registos entre os patamares de caudal nulo e de caudal máximo, sendo que esses 31 casos correspondem a ondas com alturas inferiores a  $3,12m$  mas com períodos de onda superiores (aos que anteriormente correspondiam às máximas alturas de onda mas que originavam caudais nulos) conseguindo, desse modo, gerar espriamentos com altura superior ao coroamento da estrutura.

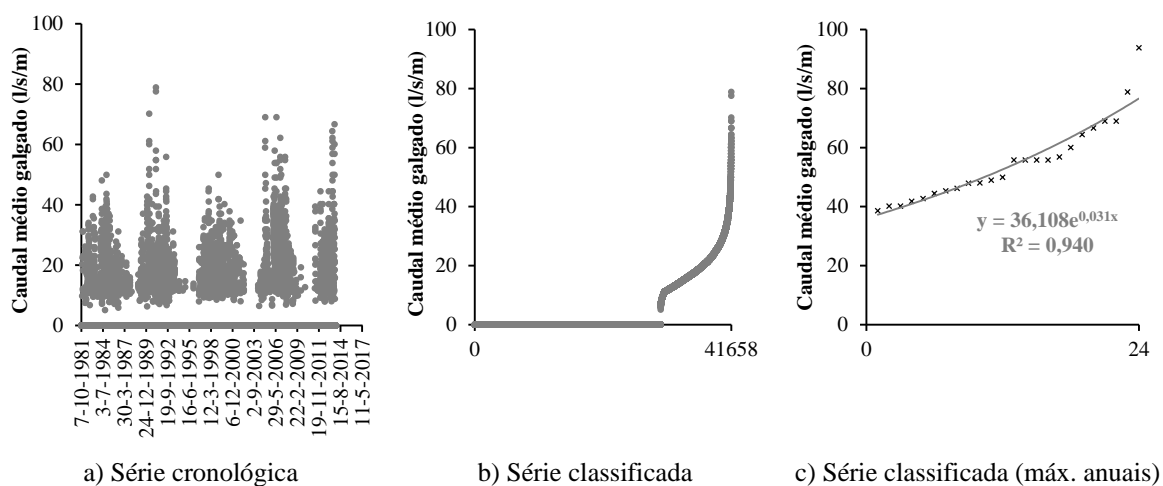


Figura 5.4: Caudais de galgamento estimados para o Furadouro, no cenário C9.

No Furadouro os valores de caudal de galgamento atingem o valor máximo de  $93,86l/s/m$ . Observa-se uma lacuna de registos entre os valores mais baixos de caudal (Figuras 5.4a e 5.4b). O menor valor observado (diferente de zero) é de  $5,09l/s/m$  e ocorre

para uma onda com 1,70m de altura e para um valor de espraio de 2,67m, ou seja, correspondente ao limite da altura de bordo livre ( $R_c=2,67m$ ). Por outro lado, apesar das alturas de onda estarem condicionadas pela rebentação, verificam-se valores de caudal elevados, sendo que o valor máximo ocorre também para o máximo valor de altura de onda limitada pela rebentação ( $H=2,46m$ ) e de espraio ( $R_{máx}=3,85m$ ).

Nas condições do cenário de referência escolhido anteriormente, assume-se que a profundidade na frente da obra é constante e que as ondas estão limitadas, por condições de rebentação, a essa profundidade. Num cenário mais pessimista, assumindo processos erosivos generalizados e os efeitos da reflexão na frente da obra, existiria um aprofundamento do terreno e o conseqüente aumento da profundidade na proximidade da estrutura. Neste caso, adotando as condições do cenário C5, em que não existe limitação das alturas de onda por rebentação, observam-se os resultados representados nas Figuras 5.5 e 5.6.

No cenário C5, a distribuição dos caudais máximos anuais no Furadouro foi aproximada, pela função exponencial (Figura 5.6c). Como em Esmoriz no ano de 2001 não existiram galgamentos e o máximo caudal anual é portanto nulo, foi eliminado este registo resultando a linha de tendência da Figura 5.5c, também exponencial. As principais diferenças em relação ao cenário anterior correspondem à continuidade de valores observada nas séries classificadas e à grandeza dos valores de caudal, naturalmente superiores aos que se estimaram para o cenário C9, porque agora não existem as limitações à altura de onda que condicionava, por sua vez, os caudais galgados.

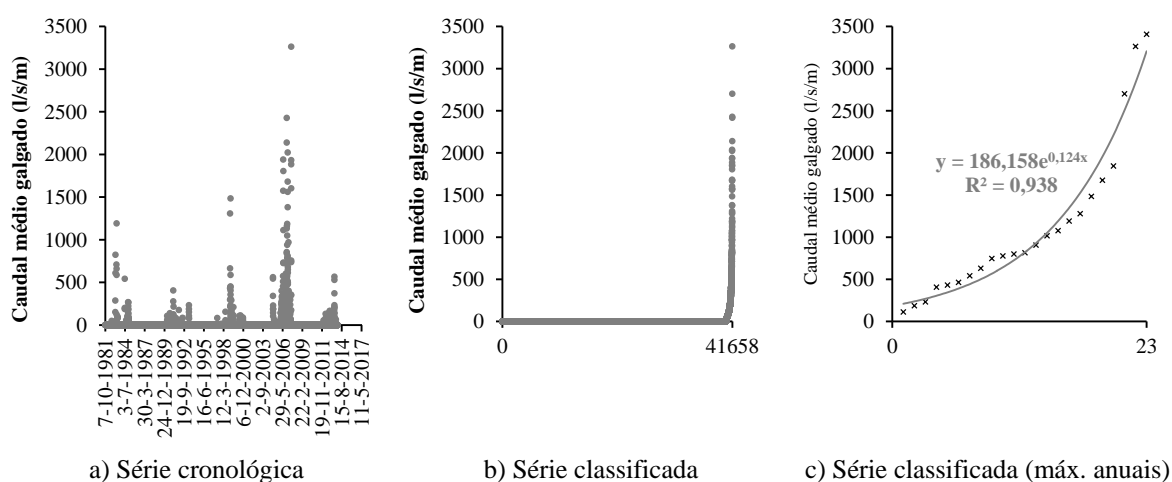


Figura 5.5: Caudais de galgamento estimados para Esmoriz, no cenário C5.

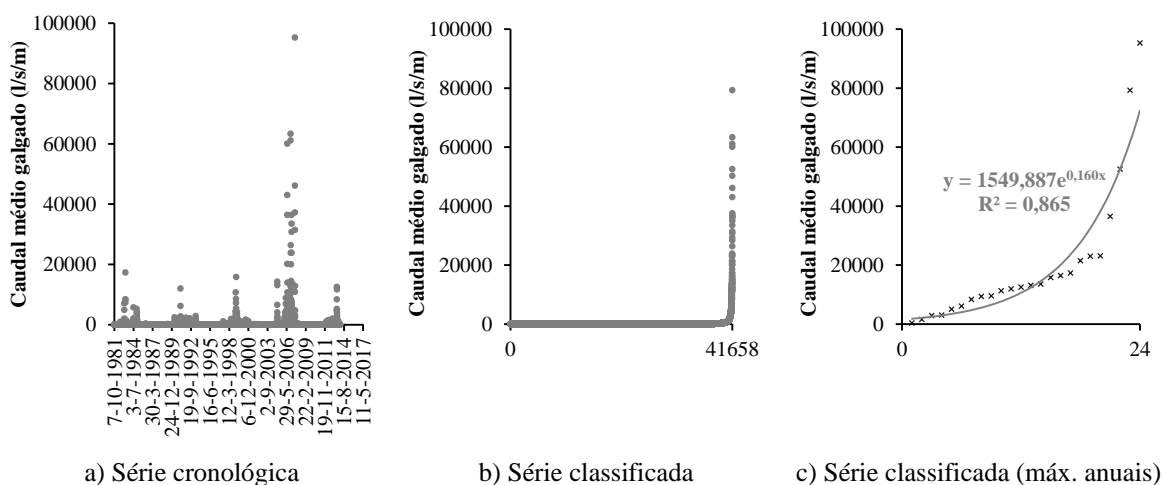


Figura 5.6: Caudais de galgamento estimados para o Furadouro, no cenário C5.

A escolha de um único cenário representativo das condições reais verificadas em cada local é difícil e discutível. Nesta secção foram inicialmente analisados os resultados referentes ao cenário de referência anteriormente selecionado.

Apesar disso, devido a alguns comportamentos relacionados com resultados discretos, por efeito das considerações de cálculo relacionadas com a altura de onda e períodos correspondentes, surgiu a necessidade de comparar tais resultados com os que poderiam suceder associados a outras condições, tais como o aumento da profundidade na frente da obra ao longo do tempo. Neste caso, quando não se limitam os valores de altura de onda por efeito da rebentação podem surgir caudais de galgamento muito elevados e descontextualizados da situação realmente observada no local.

Na Tabela 5.7 apresentam-se os valores de caudal associados aos períodos de retorno de 1 e 10 anos. Com base nos resultados do cenário C9, estima-se que para Esmoriz, qualquer que seja o período de retorno, enquanto forem mantidas as condições na frente da obra, o máximo caudal que pode ocorrer é de 1,56l/s/m e no Furadouro pode, por exemplo, ocorrer um caudal de, aproximadamente, 50l/s/m a cada 10 anos.

No cenário C5, assumindo que não haja restrições à agitação incidente sobre a estrutura longitudinal aderente, estimam-se caudais de galgamento elevados, que obrigariam a alterações na obra de defesa existente.

Tabela 5.7: Estimativa dos caudais de galgamento (l/s/m) associados a diferentes períodos de retorno.

Período de retorno (anos)	Cenário C9		Cenário C5	
	Esmoriz	Furadouro	Esmoriz	Furadouro
1	1,56	37,24	211	1819
10	1,56	49,23	641	7677

## 5.6 Risco de galgamento

A avaliação de risco foi efetuada com base na metodologia desenvolvida pelo LNEC que se rege, relativamente a valores críticos de caudal, pelas diretivas de Pullen *et al.* (2007). No entanto, serão também comparados os resultados com as diretivas de Burcharth e Hughes (2011) presentes, do mesmo modo, no Anexo A.

Os valores de probabilidade de ocorrência de galgamento nas condições do cenário C9 são agora discriminados e detalhados para todas as classes necessárias à aplicação da metodologia.

Relativamente ao grau de consequências da ocorrência de galgamento foi definido, para ambos os locais, o grau de risco intermédio 5 correspondente, como tinha já sido visto na secção 2.5.2, a consequências “sérias”. Relembra-se que o grau 5 é indicado para locais com infraestruturas de proteção costeira (como é o caso das defesas aderentes e dos esporões existentes em cada local), características geotécnicas pouco estáveis (decorrentes da fragilidade geológica) e com estruturas para atividades económicas relevantes (como é o caso de alguns equipamentos indicados na secção 4.1.3 deste trabalho).

De seguida, para a obtenção do grau de risco, realizou-se uma avaliação qualitativa resultante do produto dos graus atribuídos à probabilidade de ocorrência de galgamento/inundação e às consequências da ocorrência desse mesmo evento (ver Tabela 5.8). Posteriormente, recorreu-se à matriz de cruzamento (apresentada na secção 2.5.2) entre os dois graus que permitiu fazer uma avaliação da aceitabilidade do grau de risco obtido.



Tabela 5.8: Avaliação do grau de risco de galgamento/inundação para o cenário de referência.

Valores críticos de caudal (l/s/m)	Esmoriz			Furadouro		
	Probabilidade de ocorrência (%)	Grau de probabilidade de ocorrência	Gau de risco	Probabilidade de ocorrência (%)	Grau de probabilidade de ocorrência	Gau de risco
0,0001-0,001	0,00	1	5	0,00	1	5
0,001-0,004	0,00	1	5	0,00	1	5
0,004-0,01	0,00	1	5	0,00	1	5
0,01-0,02	0,00	1	5	0,00	1	5
0,02-0,03	0,00	1	5	0,00	1	5
0,03-0,1	0,00	1	5	0,00	1	5
0,1-1	0,87	1	5	0,00	1	5
1-2	99,13	5	25	0,00	1	5
2-10	0,00	1	5	3,27	2	10
10-20	0,00	1	5	56,56	5	25
20-50	0,00	1	5	39,50	4	20
50-100	0,00	1	5	0,66	1	5
100-200	0,00	1	5	0,00	1	5
>200	0,00	1	5	0,00	1	5

A análise da Tabela 5.8 permite concluir que no caso geral o grau de risco tem o valor 5, equivalendo a um risco reduzido, ou seja, a um risco que pode ser considerado aceitável caso se selecione um conjunto de medidas para o seu controlo, podendo ocorrer danos materiais de pequena dimensão. Existem, no entanto, casos pontuais com grau de risco mais elevado. Em Esmoriz existe uma classe com grau de risco 25 e no Furadouro existe uma classe com o mesmo grau e outra com o valor 20. Nestas situações, em que o grau de risco de galgamento/inundação é 20 ou 25, o risco é considerado indesejável e deve ser evitado, se tal procedimento for razoável em termos práticos. Para tal, é essencial uma

monitorização e deve ser também efetuada uma investigação mais detalhada, complementada por uma análise de custo-benefício.

É ainda possível definir alguns aspetos relevantes associados aos diferentes valores críticos de caudal que ocorrem. Sabendo que o caudal máximo em Esmoriz é de 1,56l/s/m e no Furadouro é de 93,86l/s/m indicam-se alguns perigos e danos que podem ocorrer para estes caudais.

Tendo como base as diretivas estabelecidas em Pullen *et al.* (2007), refere-se a possibilidade de ocorrência em Esmoriz de danos em edifícios ou em equipamentos localizados entre 5 a 10m da estrutura, associada a galgamentos projetados com grande velocidade ou a jatos de água a cair na via podendo emergir os veículos e condicionar a circulação para uma velocidade moderada. No Furadouro, que apresenta uma situação de risco mais gravosa, a circulação de veículos fica condicionada a baixa velocidade, podem também ocorrer danos em edifícios e equipamentos, existe o perigo de queda para o mar e a hipótese dos pedestres ficarem molhados e perturbados ou assustados com o fenómeno de galgamento.

Quando se analisam os valores de caudal de acordo com os limites estabelecidos em Burcharth e Hughes (2011) destaca-se a possibilidade de ocorrência de danos em zonas de circulação não pavimentadas no Furadouro, além dos danos já referidos. Quanto ao tráfego, podem suceder situações de insegurança para veículos a qualquer velocidade e situações de elevada perigosidade para pedestres, em ambos os locais, evidenciando consequências mais gravosas que as diretivas Pullen *et al.* (2007) para os mesmos valores de caudal.

## Capítulo 6

---

### CONSIDERAÇÕES FINAIS



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo pretende sumariar todo o trabalho desenvolvido, destacar as principais conclusões e projetar desenvolvimentos futuros.

Nesta dissertação foram estimados os caudais de galgamento para as obras longitudinais aderentes localizadas nas praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, pertencentes ao concelho de Ovar, com base em registos de agitação marítima realizados desde Outubro de 1981 a Dezembro de 2014. Procedeu-se à comparação de metodologias de cálculo, foram testadas tendências de comportamento dos diferentes parâmetros envolvidos em cada formulação, avaliaram-se características locais e projetaram-se cenários distintos, considerados representativos do estudo pretendido. Foi ainda efetuada uma avaliação de risco, designadamente para conhecimento dos perigos e danos, ou seja, para averiguação das consequências associadas à ocorrência de galgamento (e inundação) nas diferentes estruturas de defesa dos locais de estudo.

### 6.1 Síntese de resultados e conclusões

Após o capítulo inicial, onde é contextualizada a situação da orla costeira portuguesa relativamente às consequências da severidade do clima de agitação e à necessidade urgente de atuação, no sentido da proteção e prevenção de danos e perdas, foram apresentados 4 capítulos que serão agora alvo de análise nesta secção.

No capítulo 2 é efetuada uma apresentação do estado da arte no que respeita ao fenómeno de galgamento. Apesar de existirem 3 tipos diferentes de galgamento identificados, a forma mais relevante acontece quando a onda passa continuamente sobre o coroamento (*green water*) devido ao espraçamento que ocorre na face exposta da estrutura costeira. Além disso, o galgamento por *splash* tem também a capacidade de transpor um volume considerável de salpicos, originados pela rebentação da onda no talude da obra aderente, e o galgamento por *spray* pode afetar as condições de segurança na vizinhança da estrutura.

Para que seja possível estimar e avaliar com fundamentação os galgamentos existentes em cada local, é essencial um bom conhecimento dos fatores condicionantes deste fenómeno e das diferentes metodologias disponíveis para estimativa dos caudais galgados. Descreveram-se, portanto, as condicionantes relativas ao nível da água (intrinsecamente

relacionadas com a distância do bordo livre, tão decisiva na descrição do espraiamento/galgamento), ao clima de agitação (indissociável da interferência nos fenómenos de alteração e propagação das ondas até à costa) e à configuração geométrica das estruturas (com um papel essencial no controlo dos galgamentos).

Foram ainda exploradas as metodologias de cálculo existentes e selecionadas as que se poderiam aplicar de forma adequada e de acordo com os objetivos pretendidos no trabalho. Foi pormenorizada a metodologia de avaliação de risco adotada, correspondente à proposta desenvolvida pelo LNEC que, através da definição da probabilidade de ocorrência de galgamentos e das consequências deste evento nos locais em análise, permite concluir sobre o risco e a sua aceitação.

No capítulo seguinte, apresentaram-se as ferramentas adotadas neste estudo e esclareceram-se as condicionantes e as limitações de aplicação destas formulações e metodologias. A variedade de parâmetros intervenientes nos cálculos originou a necessidade de compreender a sensibilidade de cada formulação à variação dos fatores. É de salientar a similaridade de comportamentos dos métodos para todos os parâmetros (que fazem corresponder, como esperado, os menores valores de caudal às condições geométricas que conferem maior robustez à estrutura), com exceção da inclinação do talude que apresenta tendências irregulares e, por vezes, opostas para as diferentes formulações e para os diversos tipos de estrutura.

Em relação às metodologias escolhidas, após a comparação entre formulações empíricas é evidente a maior aproximação de resultados da fórmula de van der Meer e Janssen à rede neuronal *NN\_OVERTOPPING2*, para estruturas de talude simples e com berma, relativamente aos resultados obtidos pela fórmula de Owen. Para estruturas com parede de coroamento, a curva de Pedersen e Burcharth é também próxima da que representa a rede neuronal, para ondas com alturas inferiores a 7m.

No quarto capítulo é descrito o caso de estudo desta dissertação. Dada a elevada concentração populacional, a riqueza ecológica, a qualidade das praias e a fragilidade geológica do território em estudo, surge o interesse da aplicação do estudo ao concelho de Ovar. Para tal, há necessidade de conhecer a localização, a extensão e a configuração geométrica das estruturas de proteção costeira das frentes urbanas, além de conhecer

também os usos do solo e as atividades desenvolvidas na zona abrigada das mesmas estruturas.

Conclui-se que o litoral do concelho de Ovar está artificializado, quer pelas obras de defesa aderente, quer pelos esporões, que têm sido alvo de reparação e manutenção relativamente constantes ao longo do tempo. Evidencia-se desde logo a robustez da obra longitudinal aderente em Cortegaça que possui 2 patamares intercalados em 3 taludes e um coroamento mais alto relativamente ao nível da superfície livre do mar, indiciando maior proteção à ação marítima do que as outras estruturas.

A densidade populacional inserida em faixas de risco elevado ou muito elevado é predominante em Esmoriz e menor em Cortegaça, sendo no Furadouro que se encontra um maior número de equipamentos localizados nas faixas de risco muito elevado, designadamente na área do alojamento, educação, saúde, segurança e administração pública, tão importantes na estruturação do território e na satisfação da população residente.

Uma breve perceção do histórico de eventos de galgamento, apresentado detalhadamente no Anexo B, permite compreender as rotinas de galgamento que têm acontecido ao longo dos anos nas 3 praias do concelho de Ovar, facilitando também o confronto e o paralelismo com os resultados estimados empiricamente. Neste ponto do trabalho, e de acordo com as fontes citadas, foram evidenciadas as vulnerabilidades à ação do mar. O Furadouro apresenta-se como o local onde é maior o registo de galgamentos, seguido de Esmoriz e por fim Cortegaça onde o número de galgamentos é menor. Relativamente à distribuição temporal (anual) de ocorrências relativas a danos nas praias do concelho, verifica-se uma tendência crescente desde 1971, com um acentuado crescimento na década de 2001 a 2010.

A análise das características da base de dados de registos de ondulação ao largo resultou em valores médios semelhantes a outras referências encontradas. De seguida, na tentativa de reproduzir a alteração ocorrida em cada onda desde a zona de geração até à zona de rebentação, foram projetados diferentes cenários onde se supõem diferentes níveis de maré e onde se consideram diferentes grupos de fenómenos de propagação. O fenómeno de empolamento modifica a altura de onda ao largo para valores predominantemente superiores, enquanto os coeficientes de refração são mais próximos da unidade,

favorecendo a conservação das alturas de onda. A rebentação condiciona em maior escala as ondas propagadas para o Furadouro e o espraçamento atinge, de modo geral, maiores alturas em Esmoriz.

O capítulo 5 reúne os resultados práticos da aplicação de todas as metodologias e pressupostos já antes enunciados. Inicialmente estudaram-se 9 cenários que conjugam níveis de maré e características da agitação. Sobre os eventos de galgamento estimados, mantém-se a tendência da base de dados existente, ou seja, são predominantes no Furadouro e minoritários em Cortegaça. A relação entre caudais galgados é similar, ocorrendo galgamentos com maior caudal no Furadouro. Com base nos resultados obtidos, adotou-se um cenário de referência que considera a inexistência de galgamentos para Cortegaça no período de estudo. Para este cenário avaliou-se a distribuição mensal e anual dos potenciais galgamentos, resultado do cálculo através das formulações empíricas. Verifica-se uma clara predominância de ocorrências no período de Inverno e, em termos anuais, uma distribuição principalmente aleatória com uma ténue tendência de crescimento.

Nas condições do cenário de referência escolhido, assume-se que a profundidade na frente da obra é constante e que as ondas estão limitadas, por condições de rebentação, a essa profundidade. Nesta situação, estima-se que para Esmoriz, qualquer que seja o período de retorno, enquanto forem mantidas as condições na frente da obra, o máximo caudal que pode ocorrer é de 1,56l/s/m e no Furadouro pode, por exemplo, ocorrer um caudal de, aproximadamente, 50l/s/m a cada 10 anos. Num cenário mais pessimista, assumindo processos erosivos generalizados e os efeitos da reflexão na frente da obra, existirá um aprofundamento do terreno e o conseqüente aumento da profundidade na proximidade da estrutura. Neste caso, assumindo que não haja restrições à agitação incidente sobre a estrutura longitudinal aderente, estimam-se caudais de galgamento elevados, que obrigariam a alterações na obra de defesa existente. Relativamente aos períodos de recorrência, em Esmoriz a probabilidade de ocorrência de galgamentos é de 9 dias em cada ano decorrido e no Furadouro essa estimativa passa para 100 dias, para galgamentos com caudal superior a 1l/s/m.

A avaliação de risco perspetiva uma situação aceitável face à maioria dos galgamentos ocorridos, se forem tomadas medidas paralelas de controlo para mitigação do efeito dos



galgamentos. Existem situações pontuais com risco mais elevado, consideradas indesejáveis e que devem ser evitadas adotando procedimentos de monitorização e de investigação e análises de custo-benefício face à realização de novas intervenções de proteção. Relativamente a consequências, podem surgir situações de insegurança para veículos e pedestres e danos em edifícios, em equipamentos e em zonas de circulação localizadas no tardo das estruturas, designadamente no Furadouro, onde sucedem os eventos mais gravosos. Estes resultados estão de acordo com o registo histórico local analisado, que já antevia os mesmos efeitos embora sem conhecimento da quantificação do caudal galgado em cada evento.

Neste trabalho foi efetuada uma análise com base nas características geométricas atuais das estruturas de defesa aderente, não tendo sido avaliado o desempenho de cada estrutura face à agitação marítima incidente, de acordo com a geometria correspondente em cada instante.

## **6.2 Desenvolvimentos futuros**

As inundações costeiras têm consequências em diversos aspetos e exigem por isso o melhoramento da capacidade de previsão e de projeção de cenários de forma a possibilitar a tomada de decisões suportadas e fundamentadas, numa perspetiva de redução de prejuízos e de custos a longo prazo. No entanto, e não tendo sido possível aprofundar alguns dos tópicos abordados neste trabalho, devido à complexidade dos fenómenos envolvidos na dinâmica do litoral e ao conseqüente volume de incertezas associado, existem alguns aspetos no âmbito deste estudo que poderiam ser explorados e desenvolvidos no futuro, dando continuidade ao trabalho apresentado.

A multiplicidade de ferramentas desenvolvidas para apoio ao cálculo dos caudais galgados confirma a dificuldade de previsão, conduzindo à necessidade de uma análise comparativa entre metodologias. Nesta dissertação, foi experimentada a aplicação de algumas formulações empíricas, tendo sido também explorados, embora com menor detalhe, os resultados da rede neuronal *NN\_OVERTOPPING2*. A futura comparação de resultados de estimativa de caudais galgados entre os diversos métodos seria um contributo no conhecimento podendo, eventualmente, permitir a comprovação de comportamentos mais específicos. Refere-se nomeadamente a modelação física, capaz de

simular comportamentos hidráulicos e estruturais que não são possíveis de reproduzir nos métodos empíricos, já que estes últimos representam uma maior simplificação da realidade. De facto, as formulações empíricas só permitem a introdução de 7 parâmetros de entrada, não incluindo a profundidade na frente da estrutura de defesa, e as redes neuronais, apesar de serem testadas com um maior número de ensaios e de utilizarem 15 parâmetros de entrada, estão também limitadas à simulação de situações específicas, exigindo a calibração e validação com outros métodos de cálculo para uma análise mais cuidada.

Sugere-se ainda um trabalho mais aprofundado relativamente à identificação da suscetibilidade do litoral aos galgamentos costeiros, numa tentativa de mapeamento mais rigoroso de todos os elementos expostos. A avaliação das áreas inundadas em situações concretas de ocorrência de galgamentos costeiros pode também contribuir para o mapeamento das zonas de risco e a melhor definição dos impactos dos galgamentos. A análise das velocidades do escoamento durante o galgamento é outro aspeto que poderia permitir inferir com maior rigor sobre os riscos associados a cada evento.

Refere-se a importância, como elemento de apoio ao trabalho realizado, do manual EurOtop (anteriormente citado como Pullen *et al.*, 2007). No entanto, em Outubro do presente ano foi publicada uma versão atualizada que poderá merecer uma outra análise, com maior profundidade, para confirmar os resultados obtidos ou testar novas metodologias de avaliação e, eventualmente, novos pressupostos.

---

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Baptista, P.; Romão, S.; Cunha, T.; Bernardes, C.; (2015);** “Clima de Agitação Marítima: Comparação de Dados Simulados com Dados Medidos pela Boia Ondógrafo de Leixões”; *Poster da 3ª Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira - MEC2015*, Universidade do Algarve, Faro.
- Besley, P.; (1999);** *Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual*; HR Wallingford Ltd, R&D Technical Report W 178, Bristol, U. K., 51 p.
- Bradbury, A.; Allsop, N.; (1988);** “Hydraulic Effects of Breakwater Crown Walls”; *Proceedings of the Breakwaters Conference '88*, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing, London, U. K., pp. 385-396 (citado por Burcharth e Hughes, 2011).
- Burcharth, H.; Hughes, S.; (2011);** “Fundamentals of Design”; *Coastal Engineering Manual*, Part VI, Chapter 5, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Capitão, R.; Fortes, C.; Reis, M.; Poseiro, P.; Santos, J.; Pinheiro, L.; Craveiro, J.; Rodrigues, A.; Sabino, A.; Silva, S.; Ferreira, J.; Raposeiro, P.; Silva, C.; Rodrigues, M.; Simões, A.; Azevedo, E.; Reis, R.; (2014);** “HIDRALERTA Project - A Flood Forecast and Alert System in Coastal and Port Areas”; *International Water Association – World Water Congress and Exhibition*, Lisboa, 8 p.
- Castanho, J.; (1966);** “Rebentação das Ondas e Transporte Litoral”; *Memória n.º 275*, Ministério das Obras Públicas, LNEC, Lisboa, 278 p. (citado por Coelho, 2005).
- Clarke, S.; Dodd, N.; Damgaard, J.; (2004);** “Modelling Flow In and Above a Porous Beach”; *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130(5):223-233 (ISSN: 0733-950X).
- CMO (2014);** Fotografias disponibilizadas pela Câmara Municipal de Ovar.

**Coelho, C.; (2005);** “Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira”; *tese de doutoramento*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, 440 p.

**Coelho, C.; Pereira, C.; Costa, S.; Lima, M.; (2015);** “A Erosão Costeira, as Tempestades e as Intervenções de Defesa Costeira no Litoral do Concelho de Ovar, Portugal”; *Ressacas do mar / Temporais e gestão costeira*, Ed. Paula e Dias, pp. 331-367.

**Coeveld, E.; van Gent, M.; Pozueta, B.; (2005);** *Neural Network. Manual for NN\_OVERTOPPING Program*; Delft University of Technology, Delft, Netherlands, URL: <http://repository.tudelft.nl/view/hydro/uuid%3Abf81b442-f3ed-4a6f-9b62-0c1dbb1e4c6c/> (última consulta em Novembro de 2015).

**Cruz, T.; (2015);** “Análise Custo-Benefício de Obras Longitudinais Aderentes”; *tese de mestrado*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 196 p.

**Daily Mail; (2014);** “Stormy: A Cyclist Gets Soaked as Sea Spray is Blown Towards the Land off the Dorset Coast as Yet Another Storm Hits Britain”; *Daily Mail Online*, January 2014, URL: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2532595/Swathes-Britain-remain-flooded-waterlogged-storms-Governments-Cobra-emergency-committee-meets.html> (última consulta em Novembro de 2015).

**Dalrymple R.; Rogers, B.; (2006);** “Numerical Modeling of Water Waves With the SPH Method”; *Coastal Engineering*, 53(2-3), pp. 141-147 (citado por Didier e Neves, 2010).

**de Rouck, J.; Geeraerts, J.; Troch, P.; Kortenhaus, A.; Pullen, T.; Franco, L. (2005);** “New Results on Scale Effects for Wave Overtopping at Coastal Structures”; *Proceedings of the ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford, London, pp. 29-43.

- de Waal, J.; van der Meer, J.; (1992);** “Wave Run-up and Overtopping on Coastal Structures”; *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, Volume 2, pp 1758-1771.
- DGT; (2015);** “Áreas das Freguesias, Concelhos e Distritos da Carta Administrativa Oficial de Portugal (CAOP)”; Direção-Geral do Território, URL: [http://www.dgterritorio.pt/cartografia\\_e\\_geodesia/cartografia/carta\\_administrativa\\_oficial\\_de\\_portugal\\_\\_caop\\_/caop\\_em\\_vigor/](http://www.dgterritorio.pt/cartografia_e_geodesia/cartografia/carta_administrativa_oficial_de_portugal__caop_/caop_em_vigor/) (última consulta em Abril de 2016).
- Didier, E.; Neves, M.; (2009);** “Wave Overtopping of a Typical Coastal Structure of the Portuguese Coast Using a SPH Model”; *Journal of Coastal Research*, Special Issue 56:496-500 (ISSN: 0749-0208).
- Didier, E.; Neves, M.; (2010);** “Modelação de Estruturas Marítimas Usando um Modelo Numérico Smoothed Particle Hydrodynamics”; *Atas do 4<sup>o</sup> Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil.
- Dodd, N.; (1998);** “Numerical Model of Wave Run-Up, Overtopping and Regeneration”; *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 124(2):73-81 (ISSN: 0733-950X) (citado por Reis e Neves, 2010).
- El Tomavistas; (2014);** “Temporal – Sardinero”; *Fotoblog El Tomavistas de Santander*, Marzo 2014, URL: <http://eltomavistasdesantander.com/wp-content/uploads/2014/03/temporal-sardinero-ola-rotonda-santander.jpg> (última consulta em Novembro de 2015).
- Fénix do Atlântico; (2013);** “Mau Tempo - Praia Artificial de Areia Amarela da Calheta”; *Blog Fenix do Atlântico*, Luís Calisto, Março de 2013, URL: [http://fenixdoatlantico.blogspot.pt/2013/03/mau-tempo\\_5.html](http://fenixdoatlantico.blogspot.pt/2013/03/mau-tempo_5.html) (última consulta em Novembro de 2015).
- Fortes, C.; Reis, M.; Poseiro, P.; Capitão, R.; Sabino, A.; Rodrigues, M.; Raposeiro, P.; Ferreira, J.; Silva, C.; Simões, A.; Azevedo, E.; (2013);** “O projeto HIDRALERTA - Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e

Portuárias”; *Atas das 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, LNEC, Lisboa.

**Fortes, C.; Reis, M.; Santos, J.; Capitão, R.; Neves, D.; (2014);** “Avaliação da Probabilidade de Ocorrência de Galgamentos Não Admissíveis no Posto 2 do Terminal de Granéis Líquidos do Porto de Sines”; *Revista Territorium*, Número 21, pp. 95-113.

**Fortes, C.; Poseiro, P.; Reis, M.; Santos, J.; Reis, R.; (2015);** “Risco de Galgamento nas Estruturas Marítimas da Praia da Vitória: Resultados do Sistema HIDRALERTA”; *Revista Territorium*, Número 22, pp. 103-117.

**Franco, L.; Briganti, R.; Bellotti, G.; (2004);** *D32 Ostia Site: Report on Full Scale Measurements (2<sup>nd</sup> Full Winter Season)*. CLASH WP3 - Report (citado por Neves *et al.*, 2007).

**Gama, C.; Taborde, R.; Dias, J.; (1997);** “Sobreelevação do Nível do Mar de Origem Meteorológica (“Storm Surge”), em Portugal Continental”; *Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal*, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 131-149.

**Geeraerts, J.; Boone, C.; (2004);** *D31 Report on Full Scale Measurements – Zeebrugge: 2<sup>nd</sup> Full Winter Season*, CLASH WP3 - Report (citado por Neves *et al.*, 2007).

**Geeraerts, J.; Willems, M.; (2004);** *D35 Final Report on Laboratory Measurements – Ostia*, CLASH WP4 – Report (citado por Neves *et al.*, 2007).

**Hordijk, D.; (2004);** *D37 Report on Field Measurements – Petten Sea Defence: Storm Season 2003-2004*. CLASH WP3 - Report (citado por Neves *et al.*, 2007).

**Hu, K.; (2000);** “High-Resolution Finite Volume Methods for Hydraulic Flow Modelling”; *PhD Thesis*, Centre for Mathematical Modelling and Flow Analysis, Manchester Metropolitan University, Manchester, U. K., 194 p. (citado por Reis e Neves, 2010).



- Hu, K.; Mingham, C.; Causon, D.; (2000);** “Numerical Simulation of Wave Overtopping of Coastal Structures Using Non-Linear Shallow Water Equations”; *Coastal Engineering*, 41, pp. 433-465 (citado por Didier e Neves, 2010).
- Hu, K.; Meyer, D.; (2005);** “The Validity of the Nonlinear Shallow Water Equations for Modelling Wave Runup and Reflection”; *Proceedings of ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford, Londres, Reino Unido, pp. 195-206 (citado por Reis e Neves, 2010).
- IH; (2016a);** “Instituto Hidrográfico - Previsão de Marés - Leixões”; Instituto Hidrográfico, URL: <http://www.hidrografico.pt/previsao-mares.php?prodid=1&prodarea=1> (última consulta em Janeiro de 2016).
- IH; (2016b);** “Instituto Hidrográfico - Agitação Marítima - Bóias ondógrafo”; Instituto Hidrográfico, URL: <http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php> (última consulta em Abril de 2016).
- INE; (2011);** “Censos 2011”; Instituto Nacional de Estatística, URL: [https://www.ine.pt/bddXplorer/htdocs/widget\\_CensosGet.jsp](https://www.ine.pt/bddXplorer/htdocs/widget_CensosGet.jsp) (última consulta em Abril de 2016).
- Ingram, D.; Causon, D.; Mingham, C.; Zhou, J.; (2002);** “Numerical Simulation of Violent Wave Overtopping”; In: J.M. Smith (ed.), *Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, World Scientific, Singapore, pp. 2286-2298 (citado por Reis e Neves, 2010).
- Ingram, D.; Causon, D.; Gao, F.; Mingham, C.; Troch, P.; Li, T.; de Rouck, J.; (2004);** *Free Surface Numerical Modelling of Wave Interactions with Coastal Structures*, CLASH WP5 – Report, Manchester Metropolitan University and University of Gent, Manchester, U. K., 53 p.
- Kortenhaus, A.; Medina, J.; Gonzalez-Escrivá, J.; Garrido, J.; (2004a);** *D34 Laboratory Measurements on the Zeebrugge Breakwater*. CLASH WP4 – Report (citado por Neves *et al.*, 2007).

**Kortenhaus A.; Oumeraci, H.; Geeraerts, J.; de Rouck, J.; Medina, J.; González-Escrivá, J.; (2004b);** “Laboratory Effects and Further Uncertainties Associated with Wave Overtopping Measurements”; *Proceedings of the 29<sup>th</sup> International Coastal Engineering Conference*, J.M. Smith (Ed.), World Scientific, Singapore, pp. 4456-4468 (citado por Neves *et al.*, 2007).

**Kortenhaus A.; Van der Meer, J.; Burchart, H.; Geeraerts, J.; Pulen, T.; Ingrand, D.; Troch, P.; (2005);** *D40 Report on Conclusions of Scale Effects*. CLASH WP7 – Report (citado por Neves *et al.*, 2007).

**Lara, J.; Garcia, N.; Losada, I.; (2006);** “RANS Modelling Applied to Random Wave Interaction with Submerged Permeable Structures”; *Coastal Engineering*, 53(5-6), pp. 395-417 (citado por Didier e Neves, 2010).

**Lin, P.; Liu, P.; (1998);** “A Numerical Study of Breaking Waves in the Surf Zone”; *Journal of Fluid Mechanics*, 359:239-264 (ISSN: 0022-1120).

**LNEC (1996);** “Instalação de uma Monobóia para Descarga de Petróleo Bruto para a Refinaria do Porto, Caracterização das Condições Naturais – Relatório Final”; *Relatório 172/96 – NPP*, LNEC, Lisboa, Confidencial (citado por Coelho, 2005).

**Losada, I.; Lara, J.; Guanche, R.; Gonzalez-Ondina, J.; (2008);** “Numerical Analysis of Wave Overtopping of Rubble Mound Breakwaters”; *Coastal Engineering*, 55(1):47-62 (ISSN: 0378-3839) (citado por Reis e Neves, 2010).

**Morais, C.; Abecasis, F.; (1978);** “Storm Surge Effects at Leixões”; *Memória n.º 503*, LNEC, Lisboa, 23 p.

**Neves, M.; Reis, M.; Hedges, T.; Keming, H.; (2007);** “Aplicação do Modelo Numérico AMAZON ao Cálculo do Galgamento de Estruturas Costeiras e Portuárias”; *Atas das 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa.

**Neves, D.; Santos, J.; Reis, M.; Fortes, C.; Rodrigues, S.; Simões, A.; Azevedo, E.; (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*, 12 (3), pp. 291-312.

**NN Manual (2016)**; “Overtopping Prediction by Neural Network”; *Help File*, URL: <http://v-das001.deltares.nl/Overtopping/helppage.aspx> (última consulta em Janeiro de 2016).

**NN Overtopping; (2015)**; Overtopping Neural Network, Delft Hydraulics, Deltares, URL: <http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx> (última consulta em Janeiro de 2016).

**Owen, M.; (1980)**; “Design of Seawalls Allowing for Wave Overtopping”; *Report n. 924*, Hydraulics Research Station, Wallingford, U. K.

**Owen, M.; (1982)**; “The Hydraulic Design of Seawall Profiles”; *Proceedings of the Coastal Protection Conference*, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford Publishing, London, U. K., pp. 185-192 (citado por Burcharth e Hughes, 2011).

**PAPVL (2012)**; “Plano de Ação de Proteção e Valorização do Litoral 2012-2015”; *Recursos hídricos*, APA (Agência Portuguesa do Ambiente) e MAMAOT (Ministério da Agricultura, do Mar, do Ambiente e do Ordenamento do Território), 98 p.

**Pedersen, J.; Burcharth, H.; (1992)**; “Wave Forces on Crown Walls”; *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, Volume 2, pp. 1489-1502.

**Pedersen, J.; (1996)**; “Experimental Study of Wave Forces and Wave Overtopping on Breakwater Crown Walls”; *Series paper 12*, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark (citado por Burcharth e Hughes, 2011).

- Pereira, C.; Coelho, C.; (2011);** “Base de Dados da Ação Marítima sobre o Litoral: Trechos Esmoriz-Furadouro e Vagueira-Mira”; Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (não publicado).
- POC (2015);** “Avaliação Ambiental Estratégica do Programa de Orla Costeira Ovar - Marinha Grande”; *Relatório Ambiental*, 188 p.
- Poseiro, P.; Fortes, C.; Reis, M.; (2014);** “Avaliação do Risco de Galgamentos e Inundação: Integração de um Método Expedito de Inundação no Sistema HIDRALERTA”; *Multidimensão e Territórios de Risco*, III Congresso Internacional, I Simpósio Ibero-Americano, VIII Encontro Nacional de Riscos, Guimarães, pp. 431-436.
- Pullen, T.; Allsop, N.; (2004a);** *D36 Final Report on Laboratory Measurements – Samphire Hoe*. CLASH WP4 – Report (citado por Neves *et al.*, 2007).
- Pullen, T.; Allsop, N.; (2004b);** *D33 Report on Full Scale Measurements – Samphire Hoe*. CLASH WP3 – Report (citado por Neves *et al.*, 2007).
- Pullen, T.; Allsop, N.; Bruce, T.; Kortenhaus, A.; Schüttrumpf, H.; van der Meer, J.; (2007);** *EurOtop Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*; Expertise Netwerk Waterkeren, Netherlands, 193 p.
- Reis, M.; Hu, K.; Hedges, T.; Mase, H.; (2008);** “A Comparison of Empirical, Semiempirical, and Numerical Wave Overtopping Models”; *Journal of Coastal Research*, 24 (2B), pp. 250-262, doi: 10.2112/05-0592.1.
- Reis, M.; Neves, D.; (2010);** “Estudo do Galgamento de Estruturas Marítimas utilizando um Modelo Numérico Baseado na Teoria da Onda em Condições de Água Pouco Profunda”; *Revista Gestão Costeira Integrada*, 10 (4), pp. 397-417.
- Reis, M.; Neves, M.; Lopes, M.; Hu, K.; Silva, L.; (2011);** “Rehabilitation of Sines West Breakwater: wave overtopping study”; *Maritime Engineering Journal*, 164/MA1 (ISSN: 1741-7597), pp. 15-32

- Reis, M.; Neves, P.; Poseiro, P.; Fortes, C.; Capitão, R.; Antunes do Carmo, J.; Raposeiro, P.; Ferreira, J.; (2013);** “Aplicação da Metodologia de Avaliação do Risco de Inundação/Galgamento na Praia de São João da Caparica”; *Atas das 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, LNEC, Lisboa.
- Sabino, A.; Fortes, C.; Reis, M.; Poseiro, P.; Capitão, R.; Rodrigues, M.; Raposeiro, P.; Ferreira, J.; Silva, C.; Simões, A.; Azevedo, E.; (2013);** “O Projeto HIDRALERTA - Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias”; *Atas das 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, LNEC, Lisboa, 24 p.
- Santos, F.; Reis, M.; Fortes, C.; Lotufo, A.; Maciel, G.; (2013a);** “ARTMAP Artificial Neural Networks with Fuzzy Logic. Their Application to Study the Wave Conditions at Sines Port, Portugal”; *Proceedings of the 6<sup>th</sup> SCACR - International Short Course/Conference on Applied Coastal Research*, LNEC, Lisboa.
- Santos, F.L., Reis, M.T., Fortes, C.J., Lotufo, A.D.P. e Maciel, G.F. (2013b);** “Estudo de Galgamentos Utilizando Redes Neurais Artificiais do Tipo Artmap com Lógica Fuzzy”; *8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, LNEC, Lisboa (citado por Sabino *et al.*, 2013).
- Silva, A.; Taborda, R.; Lira, C.; Andrade, C.; Silveira, T.; Freitas, M.; (2013);** “Determinação e Cartografia da Perigosidade Associada à Erosão de Praias e ao Galgamento Oceânico”; *Entregável 1.3.2.a, Projeto de Consultoria para a Criação e Implementação de um Sistema de Monitorização do Litoral abrangido pela área de Jurisdição da Administração Regional Hidrográfica do Tejo*, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Silva, P.; Cardoso, C.; Jardim, M.; (2014);** “A Perceção Local de Erosão Costeira no Concelho de Ovar”; Poster, CLIMA 2014 - IV Congresso Nacional sobre Alterações Climáticas, URL: <http://clima.apea.pt/scid/subapea/defaultarticleViewOne.asp?categorySiteID=531&articleSiteID=393> (última consulta em Abril de 2016).

**SNIG; (2016);** “Sistema Nacional de Informação Geográfica – Visualizador”; URL: <http://snig.dgterritorio.pt/geoportalMapView/> (última consulta em Maio de 2016).

**Taborda, R.; Dias, J.; (1992);** “Análise da Sobreelevação do Nível do Mar de Origem Meteorológica Durante os Temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981”; *Geonovas n.º 1 Especial Geologia e Ambiente*, pp. 89-97.

**Teixeira, N.; (2014);** “Estudo do limite de espraiamento das ondas”; *tese de mestrado*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro, 186 p.

**van der Meer, J.; Janssen, W.; (1995);** “Wave Run-Up and Wave Overtopping at Dikes”; *Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures*; Kobayashi & Demirbilek (Eds.), American Society of Civil Engineers, pp. 1-27 (citado por Burcharth e Hughes, 2011).

**van der Meer, J.; van Gent, M.; Pozueta, B.; Verhaeghe, H.; Steendam, G.; Medina, J.; (2005);** “Applications of a Neural Network to Predict Wave Overtopping at Coastal Structures”; *Proceedings of ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford Publishing, London, U. K., pp. 259-268.

**van Gent, M.; (1994);** “The Modelling of Wave Action On and In Coastal Structures”; *Coastal Engineering*, 22:311-339 (ISSN: 0378-3839).

**van Gent, M.; Pozueta, B.; van den Boogaard, H.; Medina, J.; (2005);** *D42 Final Report on Generic Prediction Method*, CLASH WP8 – Report, Delft, Netherlands, 33 p.

**Verhaeghe, H.; (2005);** “Neural Network Prediction of Wave Overtopping at Coastal Structures”; *PhD Thesis*, Universiteit Gent, Belgium (citado por Fortes *et al.*, 2015).

---

**ANEXOS**





## ANEXO A

O Anexo A é composto pela Tabela A1, adaptada de Burcharth e Hughes (2011), que apresenta intervalos de valores críticos do caudal médio galgado em função dos perigos ou danos associados, e pela Tabela A2, adaptada de Pullen *et al.* (2007), que também define um limiar aceitável para diferentes níveis de galgamento.

Tabela A1: Valores críticos do caudal médio galgado (adaptado de Burcharth e Hughes, 2011).

$q$ ( $m^3/s/m$ )	Segurança do tráfego		Segurança estrutural			$q$ ( $l/s/m$ )
	Veículos	Pedestres	Edifícios	Obras de defesa com talude no tardoiz	Diques relvados	
$10^0$	Inseguros a qualquer velocidade	Muito perigoso	Danos estruturais	Danos mesmo se totalmente protegidas	Danos	Danos mesmo em zonas de circulação pavimentadas
$10^{-1}$				Danos no tardoiz não protegido		Danos em zonas de circulação não pavimentadas
				Danos em coroamento não protegido		
$10^{-2}$	Inseguro estacionar em quebra-mares mistos	Perigos em quebra-mares verticais	Perigos em diques relvados e quebra-mares mistos	Sem danos	Início de danos	Sem danos
$10^{-3}$						
$10^{-4}$	Inseguros a alta velocidade	Desconfortáveis mas sem perigo	Pequenos danos em equipamentos e revestimentos	Sem danos	Sem danos	Sem danos
$10^{-5}$						
$10^{-6}$	Seguros a qualquer velocidade	Molhados mas não desconfortáveis	Sem danos	Sem danos	Sem danos	Sem danos
$10^{-7}$						

Tabela A2: Limites de caudais admissíveis (adaptado de Pullen *et al.*, 2007).

<b>Tipos de perigos e razões</b>	<b>Caudal médio galgado (l/s/m)</b>
<u><i>Pedestres</i></u>	
Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com perceção de que se pode molhar, 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. <sup>(1)</sup>	0,1
Pessoas desprevenidas, sem visão clara do mar, que ficam facilmente perturbadas ou assustadas, que não estão vestidas de forma apropriada para se molharem, que se deslocam numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas.	0,03
<u><i>Veículos</i></u>	
Circulação a baixa velocidade, galgamento gera escoamentos de pouca altura ( <i>pulsating overtopping</i> ), sem jatos de água a cair na via, veículo não imerso.	10-50 <sup>(2)</sup>
Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projetado com grande velocidade ( <i>impulsive overtopping</i> ) ou com jatos de água a cair na via que podem imergir o veículo.	0,01-0,05 <sup>(3)</sup>
<u><i>Edifícios, navios e equipamentos</i></u>	
Danos significativos ou afundamentos de grandes navios.	50
Afundamentos de navios pequenos localizados a 5-10m da estrutura. Danos em grandes navios.	10 <sup>(4)</sup>
Danos em edifícios.	1 <sup>(5)</sup>
Danos em equipamento localizado a 5-10m da estrutura.	0,4 <sup>(4)</sup>
<u><i>Estruturas marítimas:</i></u>	
<i>Estruturas de defesa com talude no tardo</i>	
Sem danos se o coroamento e o tardo estiverem bem protegidos.	50-200
Sem danos no coroamento e no tardo de um dique de argila coberto por relva.	1-10
Sem danos no coroamento e no tardo mesmo se não estiverem protegidos.	0,1
<i>Defesas frontais</i>	
Danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa frontal.	200
Danos em zonas de circulação relvadas ou levemente protegidas.	50

(1) Estas condições não têm que se verificar em simultâneo.

(2) Estes limites estão relacionados com o galgamento efetivo obtido na via de circulação.

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

(4) Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima.

(5) Estes limites estão relacionados com o galgamento efetivo obtido no edifício.

## ANEXO B

Tabela B1: Eventos e ocorrências de galgamento, registados nas praias de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, desde 1857 até 2010 (adaptado de Pereira e Coelho, 2011).

Evento			Ocorrência
Data	Local		
1912	Fev.	Furadouro	Avanço de cerca de 200m entre a capela velha do Senhor da Piedade e o sítio denominado de Boldim. Derrocada de 18 palheiros.
1950	Nov.	Furadouro	Avanço do mar até cerca de 5m da capela nova.
1957	Dez.	Furadouro	O mar atingiu os alicerces da capela-mor.
1958	Ago.	Furadouro	O mar destrói 150m de esplanada a partir da avenida central, provocando um corte profundo na avenida marginal. Estragos na parte sul da praia.
1969	Out.	Furadouro	Enormes prejuízos causados pelos avanços do mar. Desaparecimento de grandes quantidades de areia.
	Nov.	Furadouro	O mar entra na avenida central e sul da praia.
1971	Jan.	Furadouro	Grande avanço do mar e destruição. O esporão de defesa, frente ao hotel, cedeu, ficando desmantelado em dois sítios.
1981	Dez.	Furadouro	Mar atinge a avenida marginal.
1984	Mar.	Furadouro	Mar atinge a avenida marginal.
1994	Jan.	Cortegaça	Forte temporal. Entrada do mar junto ao parque de campismo.
1995	Fev.	Furadouro	Galgamentos, destruição dos esporões e erosão dunar.
1996	Jan.	Esmoriz	Destruição de habitações do bairro dos pescadores e do cordão dunar. Rotura a norte do esporão norte.
1997	Dez.	Esmoriz	Galgamento da defesa frontal e conseqüente instabilidade.
1998	Dez.	Furadouro	Rotura pontual na defesa aderente a sul do esporão central e galgamentos a sul do último esporão, que fica soterrado.
2000	Dez.	Furadouro	A cerca de 1km a sul do Furadouro ocorreu destruição do cordão dunar numa extensão de 70m e galgamentos, com entrada do mar cerca de 50m.
2001	Fev.	Esmoriz	Galgamentos na obra aderente a norte do esporão sul e invasão do bairro dos pescadores.
	Set.	Esmoriz	Galgamentos na obra aderente junto ao parque de campismo.
2002	Mar.	Cortegaça	Arriba de erosão a sul e destruição da defesa frontal.

2003	Jan.	Furadouro	Destruição a norte do muro, no tardo da incipiente obra aderente, avançando cerca de 3m para a frente urbana. Descalçamento da obra aderente a norte numa extensão de 80m. Galgamentos a norte do esporão central.
2005	Nov.	Esmoriz	Avanço do mar no bairro piscatório de Esmoriz.
2006	Jan.	Furadouro	Galgamentos na marginal do Furadouro.
2008	Ago.	Esmoriz	Galgamentos e instabilidade da defesa aderente.
		Cortegaça	Galgamentos e instabilidade da defesa aderente.
2009	Out.	Esmoriz	Galgamentos no dia 07-10-2009, das 4:29h até às 09:45h.
		Furadouro	Galgamentos no dia 07-10-2009, das 8:09h até às 19:50h.
	Nov.	Esmoriz	Galgamentos no dia 15-11-2009, das 14:59h até às 21:30h.
2010	Jan.	Esmoriz	Galgamentos no dia 12-01-2010, das 08:04h até às 13:30h.
		Furadouro	Estragos na avenida marginal devido aos galgamentos.
2010	Fev.	Furadouro	Desaparecimento de praticamente todo o areal em frente à avenida central. Danos provocados pela ação do mar.
	Out.	Esmoriz	Galgamento.
		Furadouro	Galgamentos na marginal.
	Nov.	Esmoriz	Vagas de 6 a 7m, com ventos de noroeste. Marés vivas. Ondas inundaram durante a madrugada e tarde (preia-mar) o bairro dos pescadores.
		Furadouro	Vagas de 6 a 7m, com ventos de noroeste. Marés vivas. Ondas inundaram durante a madrugada e tarde (preia-mar) as ruas do Furadouro.