



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GONÇALO SEIXAS BARRETO SANTOS ROSA
Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Cálculo do galgamento em estruturas de defesa aderente.
O caso da Vagueira.

MESTRADO EM ESTRUTURAS

Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2021

Cálculo do galgamento em estruturas de defesa aderente. O caso da Vagueira.

GONÇALO SEIXAS BARRETO SANTOS ROSA
Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Orientador: Professora Doutora Maria da Graça Reis e Silva
de Oliveira Neves, FCT-UNL/LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Dr. José Nuno Varandas

Arguentes: Prof. Dr. Luís Miguel Chagas Gil

Vogais: Prof^a. Dr^a. Maria da Graça Neves

MESTRADO EM ESTRUTURAS

Universidade NOVA de Lisboa
Novembro, 2021

Cálculo do galgamento em estruturas de defesa aderente. O caso da Vagueira.

Copyright © Gonçalo Seixas Barreto Santos Rosa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação representa o término de mais uma etapa na minha vida. Os últimos 5 anos ficam marcados por inúmeros desafios a nível pessoal e académico, inclusive uma pandemia que nos obrigou a reinventarmo-nos. Desta forma gostaria de agradecer às pessoas que me apoiaram ao longo deste trajeto.

Em primeiro lugar, um agradecimento especial à minha orientadora, a professora Maria da Graça Neves pela sua disponibilidade total, pela partilha de conhecimentos e apoio prestado ao longo desta dissertação.

Aos meus colegas de curso, com quem partilhei as minhas conquistas e derrotas ao longo dos últimos anos, obrigado por todos os grandes momentos vividos.

Por fim, agradeço à minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio incondicional. Sem eles nada disto seria possível.

RESUMO

O objeto de estudo desta dissertação é o cálculo do galgamento de uma estrutura de defesa longitudinal aderente situada na praia da Vagueira, em Aveiro. Trata-se de uma zona com graves problemas de erosão, onde, em condições de agitação marítima adversas, a segurança de pessoas e bens na sua retaguarda é posta em causa.

A estrutura em estudo tem a particularidade de se encontrar numa zona de baixa profundidade, ficando por vezes totalmente emersa. Tendo em conta as suas características foram utilizadas as seguintes fórmulas para estimar o caudal de galgamento:

- Eurotop (2018)- *Main Value Approach*;
- Eurotop (2018)- *Design Approach*;
- Goda (2009);
- Goda (2009) modificado por Altomare *et al.* (2020);
- Van Gent *et al.* (2016);
- Van Gent *et al.* (2016) modificado por Altomare *et al.* (2020);
- Mase *et al.* (2013), com hb/Hm_0 segundo Kirby e Mase;
- Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm_0/0,6$.

Para o cálculo do galgamento foram utilizados dados de agitação marítima registados de 6 em 6 horas, entre 1979 e 2018, o que corresponde a um total de 58.076 casos.

A maioria das fórmulas utilizadas necessita do perfil do fundo do mar para estimar o caudal de galgamento. No caso em estudo, existe uma barra e uma fossa no perfil transversal do fundo do mar, localizadas em frente à estrutura, característica esta que tem influência no comportamento da onda. No entanto, na aplicação das fórmulas é necessário que o perfil seja sempre crescente. Por esse motivo foram criados quatro perfis diferentes, sempre crescentes, adaptados do perfil original. Ao aplicar estes perfis em todas as fórmulas utilizadas, verificou-se que a existência da barra origina caudais de galgamento superiores. Por esse motivo, deve ser tida em conta em fins de projeto e dimensionamento, uma vez que a sua inexistência pode influenciar a estimativas de galgamento inferiores às reais.

Em relação às fórmulas utilizadas, as duas abordagens de Goda foram as que originaram resultados menos consensuais, visto que estimaram caudais de galgamento muito superiores às das outras fórmulas utilizadas e não espectáveis na zona em estudo. As restantes obtiveram resultados dentro da mesma gama de valores, embora quando comparadas entre si, seja evidente alguma divergência nos resultados obtidos.

Por fim, verificou-se que os caudais máximos de galgamento são provocados por uma condição de agitação média com altura de onda significativa de 4,46m, um período de pico de 17,8s, direção de 284° e um nível do mar de 3,55m, o que associa os maiores caudais de galgamento à verificação, em simultâneo, de condições de agitação muito energéticas e níveis de mar correspondentes a preia mar.

Palavras chave: Galgamento, Defesa longitudinal aderente, Praia da Vagueira, Agitação marítima, Perfil do fundo, Goda (2009), Altomare *et al.* (2020), Van Gent *et al.* (2016), Mase *et al.* (2013).

ABSTRACT

The object of study of this dissertation is the calculation of the mean overtopping discharge of a seawall located at Vagueira beach, in Aveiro. This is an area with serious erosion problems, where, in adverse maritime conditions, the safety of people and goods in its rear is compromised.

The structure under study has the particularity of being in a very shallow area, sometimes being completely out of water. Considering its characteristics, the following formulas were used to estimate the overtopping flow:

- Eurotop (2018)- Main Value Approach;
- Eurotop (2018)- Design Approach;
- Goda (2009);
- Goda (2009) modified by Altomare *et al.* (2020);
- Van Gent *et al.* (2016);
- Van Gent *et al.* (2016) modified by Altomare *et al.* (2020);
- Mase *et al.* (2013), with hb/Hm_0 according to Kirby and Mase;
- Mase *et al.* (2013), with $hb=Hm_0/0,6$.

To calculate the mean overtopping discharge, sea agitation data recorded every 6 hours between 1979 and 2018 were used, corresponding to a total of 58,076 cases.

Most of the formulas used need the seabed profile to estimate the overtopping. In the case under study, there is a bar and a pit in the transverse seabed profile, located in front of the structure, a characteristic that has an influence on the wave behaviour. However, in the formula application, it is necessary that the profile is always increasing. For this reason four different profiles were created, always increasing, adapted from the original profile. By applying these profiles in all the formulas used, it was found that the existence of the bar increases the mean overtopping discharge over the structure. For this reason, for design and dimensioning purposes, the bar should be taken into account, since its inexistence can lead to overtopping estimates lower than the real ones.

Regarding the formulas used, Goda's two approaches were the ones that gave rise to less consensual results, as they estimated much higher overtopping flows, not expected in that zone. The others obtained results within the same range of values, although when compared, some divergence in the results obtained is evident.

Finally, it was found that the maximum mean overtopping discharge occurred for a wave condition with significant wave height of 4.46m, peak period of 17.8s, average direction of 284° and an sea level of 3.55m. In other words, the highest mean overtopping discharge is associated to, simultaneously occurrence of strong energetic wave and a high sea level.

Keywords: Overtopping, Seawall, Vagueira beach, Sea agitation, Seabed profile, Goda (2009), Altomare *et al.* (2020), Van Gent *et al.* (2016), Mase *et al.* (2013).

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XXI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO NO TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	1
1.3. ESTRUTURA.....	2
2. CÁLCULO DO GALGAMENTO EM ESTRUTURAS DE PROTEÇÃO MARGINAL ...3	3
2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	3
2.2. PRINCIPAIS FENÓMENOS QUE OCORREM QUANDO A AGITAÇÃO MARÍTIMA ATINGE A ESTRUTURA.....	4
2.3. FÓRMULAS DE CÁLCULO DO GALGAMENTO.....	6
2.3.1. <i>Eurotop (2018)</i>	6
2.3.2. <i>NN_Overtopping</i>	8
2.3.3. <i>Goda (2009)</i>	10
2.3.4. <i>Van Gent (1999) modificado por Altomare et al. (2016)</i>	11
2.3.5. <i>Altomare et al. (2020)</i>	11
2.3.6. <i>Mase et al. (2013) e Masatoshi et al. (2021)</i>	12
3. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO	15
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	15
3.2. ESTRUTURA DE PROTEÇÃO MARGINAL	16
3.3. AGITAÇÃO MARÍTIMA E NÍVEL DO MAR.....	19
3.4. VALORES ADMISSÍVEIS DE CAUDAL DE GALGAMENTO.....	21
4. GALGAMENTO DA ESTRUTURA DE PROTEÇÃO MARGINAL DA PRAIA DA VAGUEIRA	23
4.1. DEFINIÇÃO E GEOMETRIA DO PERFIL	23
4.2. EUROTOP (2018)	25
4.2.1. <i>Inclinação do fundo (a)</i>	25
4.2.2. <i>Fator de redução devido à berma (γ_b)</i>	27
4.2.3. <i>Fator de redução devido à obliquidade das ondas incidentes (γ_β)</i>	27
4.2.4. <i>Fator de redução devido à permeabilidade e rugosidade do talude da estrutura (γ_f)</i>	27
4.2.5. <i>Fatores de redução devido à parede vertical no talude (γ_v e γ')</i>	28
4.2.6. <i>Número de Iribarren ($\xi_{m-1.0}$)</i>	28
4.2.7. <i>Cota de coroamento (R_c)</i>	28

4.2.8.	Resultados obtidos	28
4.3.	NN_OVERTOPPING.....	35
4.4.	GODA (2009).....	35
4.4.1.	Cota de coroamento (R_c)	35
4.4.2.	Inclinação do fundo (α)	35
4.4.3.	Profundidade no pé do talude (h_t).....	36
4.4.4.	Altura de onda no pé do talude ($H_{m0,o}$)	36
4.4.5.	Resultados obtidos	36
4.5.	VAN GENT (1999) MODIFICADO POR ALTOMARE ET AL. (2016)	40
4.5.1.	Cota de coroamento (R_c)	40
4.5.2.	Profundidade no pé do talude (h_t).....	40
4.5.3.	Número de Iribarren ($\xi_{m-1.0}$)	40
4.5.4.	Inclinação do fundo (α)	41
4.5.5.	Altura de onda no pé do talude ($H_{m0,o}$)	41
4.5.6.	Resultados obtidos	41
4.6.	ALTOMARE ET AL. (2020)	45
4.6.1.	Função de dispersão direcional (σ).....	45
4.6.2.	Profundidade no pé do talude (h_t)	46
4.6.3.	Resultados obtidos - Goda (2009) modificado por Altomare et al. (2020)	46
4.6.4.	Resultados obtidos - Van Gent et al. (2016) modificado por Altomare et al. (2020)	49
4.7.	MASE ET AL. (2013).....	53
4.7.1.	Profundidade onde ocorre a rebentação (h_b).....	53
4.7.2.	Resultados obtidos- Mase et al. (2013) com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase	54
4.7.3.	Resultados obtidos- Mase et al. (2013) com $hb=Hm0/0,6$	57
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	63
5.1.	CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO E NÍVEL DO MAR RESPONSÁVEIS PELOS GALGAMENTOS MÁXIMOS.....	63
5.2.	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	72
5.3.	INFLUÊNCIA DO PERFIL DE FUNDO.....	82
6.	CONCLUSÕES.....	87
6.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	87
6.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	88
	BIBLIOGRAFIA.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1- EXEMPLO DO PERFIL TRANSVERSAL DE UMA ESTRUTURA DE DEFESA LONGITUDINAL ADERENTE	3
FIGURA 2.2- ESQUEMA REPRESENTATIVO DO EFEITO DE REFLEXÃO DAS ONDAS NA ESTRUTURA	4
FIGURA 2.3- TIPOS DE REBENTAÇÃO DAS ONDAS (ADAPTADO DE BATTJES, 1974)	5
FIGURA 2.4- ESQUEMA REPRESENTATIVO DO EFEITO DE ESPRAIAMENTO	5
FIGURA 2.5- ESQUEMA REPRESENTATIVO DO EFEITO DE GALGAMENTO	6
FIGURA 2.6- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS PARÂMETROS (ADAPTADO DE COEVELD ET AL., 2005)	10
FIGURA 2.7- TALUDE IMAGINÁRIO (ADAPTADO DE MASE ET AL., 2013)	13
FIGURA 3.1- LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA PRAIA DA VAGUEIRA (ADAPTADO DE GOOGLE EARTH, 06/07/2021)	15
FIGURA 3.2- FOTOGRAFIA DA ESTRUTURA DE DEFESA LONGITUDINAL ADERENTE DA PRAIA DA VAGUEIRA (VISTA PARA NORTE)	16
FIGURA 3.3- FOTOGRAFIA DA ESTRUTURA DE DEFESA LONGITUDINAL ADERENTE DA PRAIA DA VAGUEIRA (VISTA PARA SUL)	17
FIGURA 3.4- FOTOGRAFIA DA ESTRUTURA DE DEFESA LONGITUDINAL ADERENTE DA PRAIA DA VAGUEIRA (TIRADA DO ESPORÃO)	17
FIGURA 3.5- PERFIL TRANSVERSAL DA ZONA SUBMERSA EM FRENTE À ESTRUTURA (2018)	18
FIGURA 3.6- LOCALIZAÇÃO DO PONTO P3 (ADAPTADO DE GOOGLE EARTH, 09/11/2021)	19
FIGURA 3.7- VARIAÇÃO ANUAL MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA DA ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA ENTRE 1979 E 2018	20
FIGURA 3.8- VARIAÇÃO ANUAL MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA DO PERÍODO DE PICO ENTRE 1979 E 2018	20
FIGURA 3.9- VARIAÇÃO ANUAL MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA DA DIREÇÃO DO NÍVEL DO MAR ENTRE 1979 E 2018	21
FIGURA 3.10- VARIAÇÃO ANUAL MÍNIMA, MÉDIA E MÁXIMA DA DIREÇÃO DAS ONDAS INCIDENTES ENTRE 1979 E 2018	21
FIGURA 4.1- PROPOSTA 1 DE ALTERAÇÃO DO PERFIL ORIGINAL	23
FIGURA 4.2- PROPOSTA 2 DE ALTERAÇÃO DO PERFIL ORIGINAL	24
FIGURA 4.3- PROPOSTA 3 DE ALTERAÇÃO DO PERFIL ORIGINAL	24
FIGURA 4.4- PROPOSTA 4 DE ALTERAÇÃO DO PERFIL ORIGINAL	25
FIGURA 4.5- PRIMEIRA ESTIMATIVA DA INCLINAÇÃO CARACTERÍSTICA DO FUNDO	26
FIGURA 4.6- SEGUNDA ESTIMATIVA DA INCLINAÇÃO CARACTERÍSTICA DO FUNDO	26
FIGURA 4.7- ESQUEMA REPRESENTATIVO DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA B	27
FIGURA 4.8- HISTOGRAMA RELATIVO AOS CAUDAIS DE GALGAMENTO OBTIDOS SEGUNDO O <i>MAIN VALUE APPROACH</i> DO EUROTOP (2018)	29
FIGURA 4.9- HISTOGRAMA RELATIVO AOS CAUDAIS DE GALGAMENTO OBTIDOS SEGUNDO O <i>DESIGN APPROACH</i> DO EUROTOP (2018)	29
FIGURA 4.10- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (<i>MAIN VALUE APPROACH</i> - EUROTOP 2018)	30
FIGURA 4.11- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (<i>DESIGN APPROACH</i> - EUROTOP 2018)	31
FIGURA 4.12- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (<i>MAIN VALUE APPROACH</i> - EUROTOP 2018)	32
FIGURA 4.13- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (<i>DESIGN APPROACH</i> - EUROTOP 2018)	32

FIGURA 4.14- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (<i>MAIN VALUE APPROACH - EUROTOP 2018</i>).....	33
FIGURA 4.15- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (<i>DESIGN APPROACH - EUROTOP 2018</i>)	33
FIGURA 4.16- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (<i>MAIN VALUE APPROACH - EUROTOP 2018</i>).....	34
FIGURA 4.17- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (<i>DESIGN APPROACH - EUROTOP 2018</i>)	34
FIGURA 4.18- HISTOGRAMA RELATIVO AOS CAUDAIS DE GALGAMENTO OBTIDOS SEGUNDO GODA (2009)	37
FIGURA 4.19- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA 2009)	38
FIGURA 4.20- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA 2009).....	38
FIGURA 4.21- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA 2009)	39
FIGURA 4.22- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA 2009).....	40
FIGURA 4.23- HISTOGRAMA RELATIVO AOS CAUDAIS DE GALGAMENTO OBTIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016).....	42
FIGURA 4.24- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> 2016)	43
FIGURA 4.25- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> 2016).....	43
FIGURA 4.26- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> 2016).....	44
FIGURA 4.27- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> 2016)	45
FIGURA 4.28- HISTOGRAMA RELATIVO AOS CAUDAIS DE GALGAMENTO OBTIDOS SEGUNDO GODA (2009) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)	46
FIGURA 4.29- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA (2009) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	47
FIGURA 4.30- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA (2009) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)).....	48
FIGURA 4.31- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA (2009) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)).....	48
FIGURA 4.32- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA (2009) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)).....	49
FIGURA 4.33- HISTOGRAMA RELATIVO AOS CAUDAIS DE GALGAMENTO OBTIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020).....	50
FIGURA 4.34- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)).....	51
FIGURA 4.35- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)).....	51
FIGURA 4.36- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) ALTERADO PO ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)).....	52
FIGURA 4.37- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT (2016) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)).....	53
FIGURA 4.38- HISTOGRAMA RELATIVO AOS CAUDAIS DE GALGAMENTO OBTIDOS SEGUNDO MASE <i>ET AL.</i> (2013) COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE.....	54

FIGURA 4.39- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM HB/Hm0 SEGUNDO KIRBY E MASE).....	55
FIGURA 4.40- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM HB/Hm0 SEGUNDO KIRBY E MASE).....	56
FIGURA 4.41- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM HB/Hm0 SEGUNDO KIRBY E MASE).....	56
FIGURA 4.42- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM HB/Hm0 SEGUNDO KIRBY E MASE).....	57
FIGURA 4.43- HISTOGRAMA RELATIVO AOS CAUDAIS DE GALGAMENTO OBTIDOS SEGUNDO MASE ET AL. (2013) COM HB=Hm0/0,6	58
FIGURA 4.44- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM COM HB=Hm0/0,6).....	59
FIGURA 4.45- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM COM HB=Hm0/0,6).....	59
FIGURA 4.46- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM COM HB=Hm0/0,6).....	60
FIGURA 4.47- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM COM HB=Hm0/0,6)	61
FIGURA 5.1- PREVISÃO MÁXIMA DE GALGAMENTO EM TODOS OS PERFIS DO EUROTOP (2018), TRÊS PRIMEIROS PERFIS DE VAN GENT ET AL. (2016) E DOIS PRIMEIROS PERFIS DE VAN GENT ET AL. (2020).....	65
FIGURA 5.2- PREVISÃO MÁXIMA DE GALGAMENTO PARA O PERFIL 1, 2, 3 E ORIGINAL DA FÓRMULA DE MASE ET AL. (2013) COM HB/Hm0 SEGUNDO KIRBY E MASE E PERFIL 3 DE VAN GENT ET AL. (2020)	66
FIGURA 5.3- PREVISÃO MÁXIMA DE GALGAMENTO NO QUARTO PERFIL DE VAN GENT ET AL. (2016) E VAN GENT ET AL. (2020).....	67
FIGURA 5.4- PREVISÃO MÁXIMA DE GALGAMENTO DO PERFIL 1 E 3 DA MASE ET AL. (2013) COM HB=Hm0/0,6	68
FIGURA 5.5- PREVISÃO MÁXIMA DE GALGAMENTO DO PERFIL 2 DA FÓRMULA DE MASE ET AL. (2013) COM HB=Hm0/0,6.....	69
FIGURA 5.6- PREVISÃO MÁXIMA DE GALGAMENTO DO PERFIL ORIGINAL DA FÓRMULA DE MASE ET AL. (2013) COM HB=Hm0/0,6	70
FIGURA 5.7- PREVISÃO MÁXIMA DE GALGAMENTO SEGUNDO GODA (2009) E GODA ET AL. (2020).....	71
FIGURA 5.8- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO EUROTOP (2018) COM OS DE GODA (2009)	73
FIGURA 5.9- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO EUROTOP (2018) COM OS DE GODA (2020)	74
FIGURA 5.10- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA (2009) COM OS DE VAN GENT ET AL. (2016).....	74
FIGURA 5.11- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA (2009) COM OS DE VAN GENT ET AL. (2020).....	74
FIGURA 5.12- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA (2009) COM OS DE MASE ET AL. (2013), COM HB/Hm0 SEGUNDO KIRBY E MASE.....	75
FIGURA 5.13- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA (2009) COM OS DE MASE ET AL. (2013), COM HB=Hm0/0,6.....	75
FIGURA 5.14- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA ET AL. (2020) COM OS DE VAN GENT ET AL. (2016).....	75
FIGURA 5.15- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA ET AL. (2020) COM OS DE VAN GENT ET AL. (2020).....	76

FIGURA 5.16- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA <i>ET AL.</i> (2020) COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE	76
FIGURA 5.17- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA <i>ET AL.</i> (2020) COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6.....	76
FIGURA 5.18- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO GODA (2009) COM OS DE GODA <i>ET AL.</i> (2020).....	77
FIGURA 5.19- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO EUROTOP COM OS DE VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016)	78
FIGURA 5.20- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO EUROTOP COM OS DE VAN GENT <i>ET AL.</i> (2020)	78
FIGURA 5.21- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO EUROTOP COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE.....	79
FIGURA 5.22- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO EUROTOP COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6.....	79
FIGURA 5.23- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) COM OS DE VAN GENT <i>ET AL.</i> (2020).....	80
FIGURA 5.24- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE	80
FIGURA 5.25- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2020) COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE	81
FIGURA 5.26- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6	81
FIGURA 5.27- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2020) COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6	81
FIGURA 5.28- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE, COM OS DE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6.....	82
FIGURA 5.29- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO O PERFIL 1 COM OS DO PERFIL 2- EUROTOP, 2018 (ESQUERDA) E VAN GENT <i>ET AL.</i> , 2016 (DIREITA).....	83
FIGURA 5.30- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO O PERFIL 1 COM OS DO PERFIL 2- MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY (ESQUERDA) E MASE MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6 (DIREITA).....	83
FIGURA 5.31- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO O PERFIL 1 COM OS DO PERFIL 3- EUROTOP, 2018 (ESQUERDA) E VAN GENT <i>ET AL.</i> , 2016 (DIREITA).....	84
FIGURA 5.32- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO O PERFIL 1 COM OS DO PERFIL 3- MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE (ESQUERDA) E MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6 (DIREITA)	84
FIGURA 5.33- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO O PERFIL 1 COM OS DO PERFIL 4- EUROTOP, 2018 (ESQUERDA) E VAN GENT <i>ET AL.</i> , 2016 (DIREITA).....	85
FIGURA 5.34- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO O PERFIL 1 COM OS DO PERFIL 4- MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE (ESQUERDA) E MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6 (DIREITA)	85
FIGURA 5.35- COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS SEGUNDO O PERFIL 1 COM OS DO PERFIL ORIGINAL- MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE (ESQUERDA) E MASE <i>ET AL.</i> (2013), COM HB=HM0/0,6 (DIREITA)	86

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1- PARÂMETROS E RESPECTIVOS INTERVALOS DE APLICABILIDADE (NN_OVERTOPPING)	9
TABELA 3.1- CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA DE DEFESA LONGITUDINAL ADERENTE	18
TABELA 4.1- NÚMERO DE EVENTOS OBTIDOS EM CADA PERFIL SEGUNDO EUROTOP (2018)	29
TABELA 4.2- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (EUROTOP 2018)	30
TABELA 4.3- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (EUROTOP 2018)	31
TABELA 4.4- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (EUROTOP 2018) ..	33
TABELA 4.5- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (EUROTOP 2018)	34
TABELA 4.6- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA 2009)	37
TABELA 4.7- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA 2009)	38
TABELA 4.8- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA 2009)	39
TABELA 4.9- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA 2009)	39
TABELA 4.10- NÚMERO DE EVENTOS OCORRIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016)	41
TABELA 4.11- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> 2016)	42
TABELA 4.12- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> 2016)	43
TABELA 4.13- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> 2016)	44
TABELA 4.14- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> 2016)	44
TABELA 4.15- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA (2009) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	47
TABELA 4.16- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA (2009) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	47
TABELA 4.17- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA (2009) ALTERADO PO ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	48
TABELA 4.18- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (GODA (2009) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	49
TABELA 4.19- NÚMERO DE EVENTOS OCORRIDOS SEGUNDO VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020)	50
TABELA 4.20- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	50
TABELA 4.21- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	51
TABELA 4.22- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT <i>ET AL.</i> (2016) ALTERADO PO ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	52
TABELA 4.23- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (VAN GENT (2016) ALTERADO POR ALTOMARE <i>ET AL.</i> (2020))	52
TABELA 4.24- NÚMERO DE EVENTOS OCORRIDOS SEGUNDO MASE <i>ET AL.</i> (2013) COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE	54

TABELA 4.25- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE).....	55
TABELA 4.26- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE).....	55
TABELA 4.27- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE).....	56
TABELA 4.28- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE).....	57
TABELA 4.29- NÚMERO DE EVENTOS OCORRIDOS SEGUNDO MASE ET AL. (2013) COM HB=HM0/0,6	58
TABELA 4.30- ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM COM HB=HM0/0,6).....	58
TABELA 4.31- PERÍODO DE PICO PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM COM HB=HM0/0,6).....	59
TABELA 4.32- DIREÇÃO DA ONDA PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM COM HB=HM0/0,6).....	60
TABELA 4.33- NÍVEL DO MAR PARA CADA INTERVALO DE CAUDAIS DE GALGAMENTO (MASE ET AL. (2013) COM COM HB=HM0/0,6).....	60
TABELA 5.1- ESTIMATIVA MÁXIMA DE GALGAMENTO - MAIN VALUE APPROACH, EUROTOP (2018)	63
TABELA 5.2- ESTIMATIVA MÁXIMA DE GALGAMENTO - VAN GENT ET AL. (2016).....	64
TABELA 5.3- ESTIMATIVA MÁXIMA DE GALGAMENTO - VAN GENT ET AL. (2020).....	64
TABELA 5.4- ESTIMATIVA MÁXIMA DE GALGAMENTO - MASE ET AL. (2013) COM HB/HM0 SEGUNDO KIRBY E MASE	64
TABELA 5.5- ESTIMATIVA MÁXIMA DE GALGAMENTO - MASE ET AL. (2013) COM HB=HM0/0,6	64
TABELA 5.6- ESTIMATIVA MÁXIMA DE GALGAMENTO- GODA ET AL. (2009) E GODA ET AL. (2020).....	65
TABELA 5.7- CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO E NÍVEL DO MAR (CASO 27990 AO 27996)	66
TABELA 5.8- CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO E NÍVEL DO MAR (CASO 39682 AO 39688)	67
TABELA 5.9- CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO E NÍVEL DO MAR (CASO 51262 AO 51268)	68
TABELA 5.10- CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO E NÍVEL DO MAR (CASO 46950 AO 46956)	69
TABELA 5.11- CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO E NÍVEL DO MAR (CASO 48482 AO 48488)	70
TABELA 5.12- CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO E NÍVEL DO MAR (CASO 51266 AO 51272)	71
TABELA 5.13- CONDIÇÕES DE AGITAÇÃO E NÍVEL DO MAR (CASO 171 AO 177)	72
TABELA 5.14- RELAÇÃO ENTRE O NÚMERO DA FIGURA E AS FÓRMULAS COMPARADAS	73

Lista de Símbolos

Letras Latinas

A_{rea}	Área da secção transversal	[m ²]
A_c	Distância entre o nível do mar e a berma	[m]
B	Largura da berma	[m]
B_t	Largura do pé da estrutura	[m]
h	Profundidade em frente à estrutura	[m]
h_{berma}	Profundidade da berma	[m]
h_b	Profundidade onde ocorre a rebentação da onda	[m]
h_t	Profundidade no pé do talude da estrutura	[m]
H_{m0}	Altura de onda significativa em frente à estrutura	[m]
$H_{m0,o}$	Altura de onda junto à estrutura	[m]
$H_{m0,t}$	Altura de onda espectral	[m]
H_s	Altura de onda significativa	[m]
g	Aceleração gravítica	[m/s ²]
G_c	Largura do coroamento da estrutura	[m]
q	Caudal médio galgado por metro de largura da estrutura	[m ³ /s/m]
$Q_{37\%}$	Caudal de galgamento não excedido por 37% das ondas incidentes	[m ³ /s/m]
$Q_{99\%}$	Caudal de galgamento não excedido por 99% das ondas incidentes	[m ³ /s/m]
L_0	Comprimento de onda em águas profundas	[m]
$L_{m-1,0}$	Comprimento de onda espectral	[m]
R_c	Cota de coroamento da estrutura	[m]
R_{max}	Nível de espraiamento máximo	[m]
$(R_{max})_{37\%,100}$	Nível de espraiamento máximo não excedido por 37% das ondas incidentes	[m]
$(R_{max})_{99\%,100}$	Nível de espraiamento máximo não excedido por 99% das ondas incidentes	[m]
R_u	Nível de espraiamento	[m]
$R_{u2\%}$	Nível de espraiamento excedido por 2% das ondas incidentes	[m]
s	Declividade da onda incidente	[-]
$S_{m-1,0}$	Declividade da onda incidente com L_0 baseado em $T_{m-1,0}$	[-]

T_p	Período de pico da onda	[s]
$T_{m-1,0}$	Período espectral	[s]

Letras Gregas

α	Inclinação do fundo	[°]
$\xi_{m-1,0}$	Número de Iribarren	[-]
β	Ângulo entre a direção da onda incidente e a direção perpendicular à estrutura	[°]
α_b	Inclinação da berma	[°]
α_d	Inclinação da estrutura a baixo da berma	[°]
α_u	Inclinação da estrutura acima da berma	[°]
γ_b	Fator de redução devido à berma	[-]
γ_β	Fator de redução devido à obliquidade das ondas incidentes	[-]
γ_f	Fator de redução devido à permeabilidade e rugosidade do talude da estrutura	[-]
γ_σ	Fator de redução devido ao espalhamento direcional das ondas	[-]
γ_v	Fator de redução devido a parede vertical no talude	[-]
γ^*	Fator de redução geral devido a parede vertical no talude ou passeio	[-]
σ	Função de dispersão direcional	[-]
θ	Inclinação do talude da estrutura	[°]
δ	Inclinação do talude imaginário	[°]

Abreviaturas e siglas

CLASH	<i>Crest Level Assessment of Coastal Structures</i>
COSMO	Programa de monitorização da faixa costeira de Portugal continental
Dirm	Direção média de incidência
ECMWF	Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologias - Universidade Nova de Lisboa
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Nmar	Nível do mar
NR	Nível do mar em Repouso
PCE	Perfil Central da Estrutura
SWAN	Modelo numérico- <i>Simulating WAves Nearshore</i>
SWASH	Modelo numérico- <i>Simulating WAves till SHore</i>

1. Introdução

1.1. Enquadramento no tema

A costa ocidental portuguesa é submetida à ação da agitação marítima caracterizada por recorrentes tempestades de elevado potencial energético, que colocam em risco zonas urbanas, infraestruturas e áreas de significativo valor ecológico. Para além disso, toda a zona costeira e, em particular, a zona litoral de Aveiro tem sofrido nas últimas décadas profundas alterações morfológicas, devido à erosão persistente. Este processo está relacionado com o reduzido volume de sedimentos disponível neste segmento costeiro, a ação dos temporais, as ações antropogénicas e a subida do nível médio do mar (Maia *et al.*, 2015). A sua relevância a nível social, ambiental e económico para as comunidades locais e para o futuro de Portugal, obriga a que sejam definidos planos de intervenção na tentativa de proteger a linha de costa, minimizando o impacto da ação do mar. Para a eficácia deste plano, é indispensável que exista um profundo conhecimento técnico e científico dos processos naturais em curso, bem como das possíveis soluções a aplicar (Pereira *et al.*, 2013).

De forma a solucionar os problemas anteriormente mencionados é comum recorrer-se à construção de estruturas de proteção costeira. Estas podem ser de diferentes tipologias, dependendo da sua função principal. As mais comuns são esporões, quebra-mares destacados e estruturas de defesa longitudinal aderente. O seu dimensionamento é feito recorrendo a fórmulas empíricas e semi-empíricas e depende das suas características, da função que irá desempenhar durante a sua vida útil e das condições de agitação marítima presentes no local.

O objetivo desta dissertação é o cálculo do galgamento da estrutura de defesa longitudinal aderente da praia da Vagueira, em Aveiro. O galgamento consiste na passagem de água sobre o coroamento da estrutura pela ação da agitação marítima e é um dos fenómenos com maior impacto na integridade da estrutura e na segurança da zona por ela protegida (Bairrão *et al.*, 2016). As estruturas de defesa longitudinal aderente são construídas paralelamente à linha de costa e têm como principal função mitigar o galgamento do mar, de forma a evitar inundações na sua retaguarda, garantindo assim a segurança de pessoas e bens. A sua permeabilidade, material utilizado e características geométricas variam consoante a utilização, condições do mar e local de implantação. Este tipo de estrutura deve ser dimensionado de forma a suportar um caudal de galgamento admissível que varia consoante a importância da zona a proteger. A diminuição do caudal de galgamento é normalmente sinónimo do aumento da cota de coroamento da estrutura, por isso é fundamental encontrar o equilíbrio entre o custo económico da estrutura e os benefícios que ela proporciona.

1.2. Objetivos e metodologia

Esta dissertação tem como finalidade o cálculo do galgamento da estrutura de defesa longitudinal aderente da praia da Vagueira, localizada em Aveiro (costa oeste portuguesa). A estrutura em estudo tem a particularidade de se encontrar numa zona de profundidades muito baixas, ficando por vezes completamente emersa. Tendo isso em conta, foram

selecionadas as fórmulas disponíveis na literatura que são compatíveis com as características da estrutura, de forma a calcular o caudal de galgamento, utilizando os dados de agitação marítima registados entre 1979 e 2018, assim como os respetivos níveis do mar. Como a maioria das fórmulas utilizadas necessitam do perfil transversal do fundo com profundidade decrescente do mar para a costa para estimar o galgamento, foram utilizados quatro perfis adaptados do perfil original, que tem um perfil do tipo barra-fossa, de profundidade nem sempre decrescente no sentido da costa.

O plano de trabalho realizados ao longo desta dissertação consta de:

- Revisão da literatura inerente aos assuntos a desenvolver;
- Análise dos dados de agitação marítima disponíveis na zona em estudo e respetivos níveis do mar;
- Análise das fórmulas aplicáveis ao caso de estudo;
- Criação de 4 perfis de fundo adaptados do perfil original para aplicação das fórmulas;
- Aplicação das fórmulas escolhidas para os 39 anos de dados e os 4 perfis selecionados;
- Análise e comparação dos resultados obtidos pelas diferentes fórmulas e perfis utilizados;
- Análise das condições de agitação e nível do mar responsáveis pelos maiores caudais de galgamento.

1.3. Estrutura

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos.

O capítulo 1 corresponde ao enquadramento geral do tema da dissertação, bem como apresentar os objetivos e metodologias utilizadas neste trabalho.

O capítulo 2 divide-se em 3 secções: na primeira são descritos os tipos de estruturas de proteção marginal existentes, na segunda são apresentados os fenómenos que ocorrem quando a agitação marítima atinge a estrutura e no último são apresentadas as fórmulas utilizadas nesta dissertação.

O capítulo 3 é dedicado ao caso de estudo. Divide-se em 4 secções onde é feito um enquadramento geográfico e demográfico da zona de interesse, é feita uma caracterização da estrutura em estudo, são analisados os dados de agitação marítima e níveis de mar utilizados e por fim apresentados os valores de galgamento admissíveis.

O capítulo 4 divide-se em 7 secções. Na primeira são apresentados os perfis de fundo utilizados e as restantes secções destinam-se à aplicação das fórmulas ao caso de estudo e apresentação dos resultados obtidos.

No capítulo 5 é efetuada a análise e comparação dos resultados obtidos. São comparadas as diferentes fórmulas e perfis de fundo utilizados e são analisadas as condições de agitação responsáveis pelos caudais de galgamento máximos.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões retiradas ao longo do trabalho que foi desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros.

2. Cálculo do galgamento em estruturas de proteção marginal

2.1. Considerações gerais

As estruturas de proteção marginal têm como objetivo atenuar os efeitos da incidência da agitação marítima ao longo da linha de costa protegendo pessoas e bens nas suas imediações.

Nos últimos anos, com o agravamento do aquecimento global, a diminuição dos sedimentos que chegam ao litoral por consequência das barragens entre outras, e a destruição de algumas defesas naturais, associadas a uma ocupação excessiva da zona litoral, levaram à necessidade da construção de diferentes estruturas de proteção costeira, cujo objetivo é reduzir os efeitos da erosão na zona litoral. Estas estruturas são classificadas de acordo com o seu posicionamento relativamente à linha de costa e podem ser divididas em três grupos:

- Esporões- Transversais à linha de costa;
- Quebra-mares destacados- afastados de terra e normalmente paralelos à costa;
- Estruturas de defesa longitudinal aderente.

As estruturas de defesa longitudinal aderente ou também designadas por estruturas de proteção marginal, são um tipo especial de estruturas costeiras que têm como objetivo não o controle da erosão, mas a redução da inundação, ou seja, reduzir o efeito da inundação, devido ao galgamento, na zona por elas protegidas. As estruturas de proteção aderente ou marginal são construídas longitudinalmente à linha de costa e apresentam um perfil transversal semelhante ao que se encontra na Figura 2.1 e são normalmente construídas com recurso a enrocamento e betão.

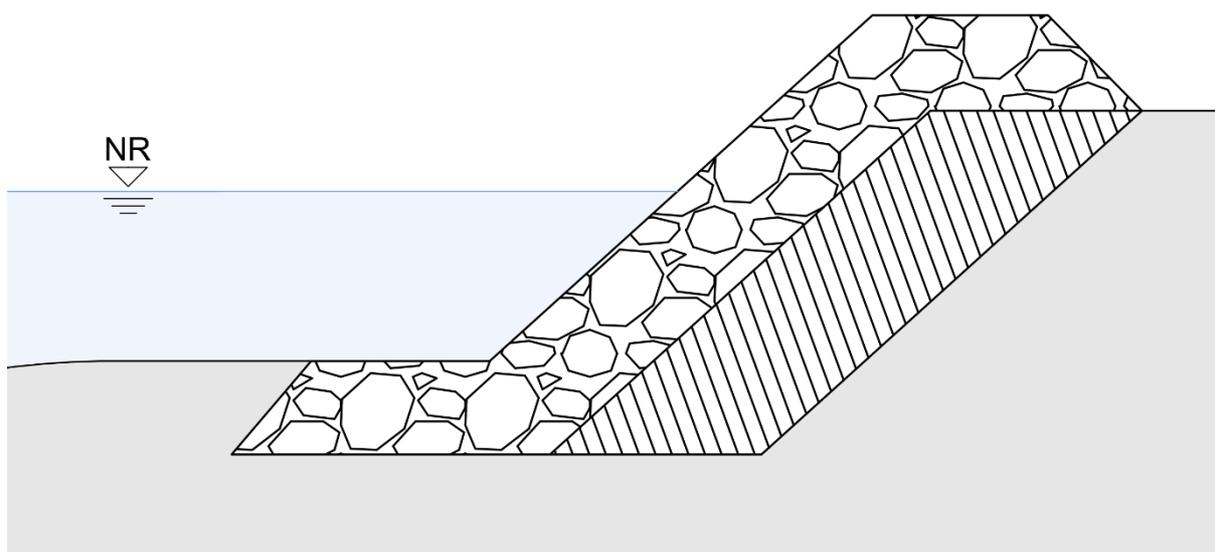


Figura 2.1- Exemplo do perfil transversal de uma estrutura de defesa longitudinal aderente

2.2. Principais fenômenos que ocorrem quando a agitação marítima atinge a estrutura

Quando a agitação marítima atinge a costa numa zona protegida com uma estrutura de proteção marginal, ocorrem quatro fenômenos principais de interação entre a agitação e essa estrutura:

- Reflexão;
- Rebentação;
- Espraçamento;
- Galgamento.

Quando a onda atinge a estrutura, parte da sua energia é refletida. A reflexão das ondas nas estruturas marítimas obedece às leis da reflexão em outros meios. Quando a onda incide na estrutura, a reflexão pode ser total ou parcial dependendo da inclinação do talude da estrutura, da rugosidade e porosidade do talude e das características da agitação incidente. A reflexão é máxima quando o talude da estrutura é vertical, apresenta baixa rugosidade e porosidade e a direção da onda incidente é ortogonal à estrutura (Negm & Nassar, 2016). Na Figura 2.2 é apresentado um esquema do efeito de reflexão das ondas após incidirem numa estrutura de proteção marginal com incidência oblíqua.

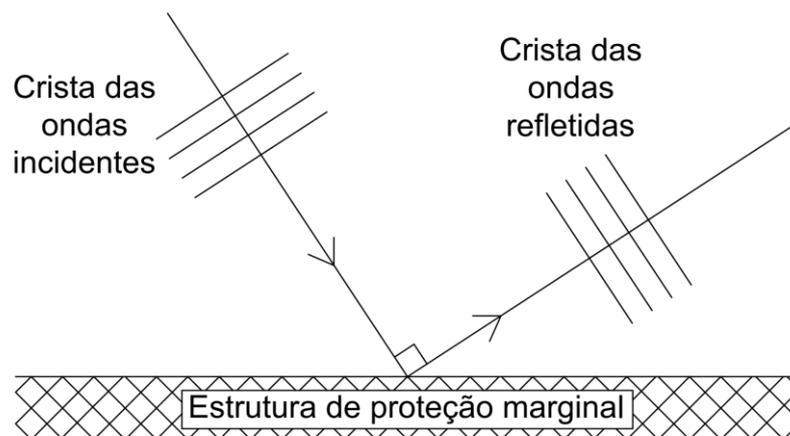


Figura 2.2- Esquema representativo do efeito de reflexão das ondas na estrutura.

Pode ainda ocorrer dissipação de energia através da rebentação da onda, isto acontece quando a profundidade diminui bruscamente, originando um aumento da altura de onda, que faz com que a declividade da onda (relação entre o comprimento e altura) atinja o seu valor limite. Ao atingir o valor limite a onda torna-se instável e a crista colapsa (Dalrymple, 2012). Existe ainda um parâmetro adimensional, conhecido por número de *Iribarren* (ξ_0) (relação entre a altura, comprimento de onda e inclinação do fundo) que caracteriza o tipo de rebentação, existindo quatro tipos de rebentação distintos: Progressiva (para $\xi_0 < 0,5$),

mergulhante (para $0,5 < \xi_0 < 3$), colapsante (para $3 < \xi_0 < 3,5$) e de fundo (para $\xi_0 > 3,5$), como ilustrado na Figura 2.3.

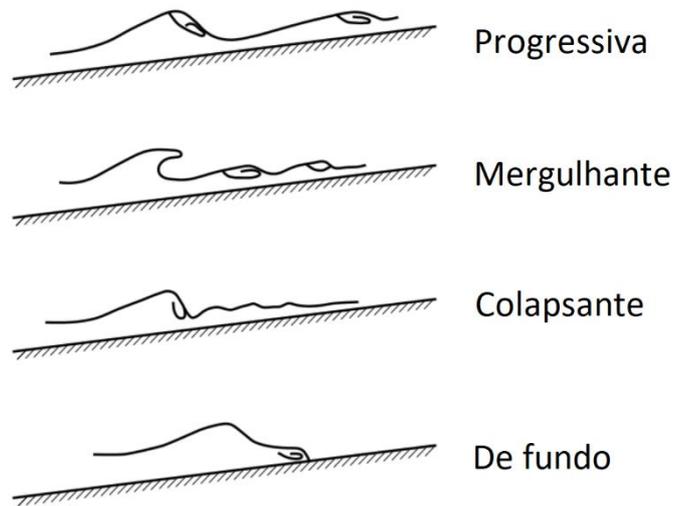


Figura 2.3- Tipos de rebentação das ondas (adaptado de Battjes, 1974)

A energia da onda que não foi refletida nem dissipada com a rebentação (ou transmitida através da estrutura, caso esta seja porosa), dissipa-se através do escoamento, que se dá sobre o talude da estrutura (Figura 2.4). A este fenómeno dá-se o nome de espraçamento (ou *runup*, na literatura anglosaxónica), R_u , dado pela distância vertical entre o nível de repouso do mar, NR , e a altura máxima atingida pela onda no talude da estrutura (Silva, 2019).

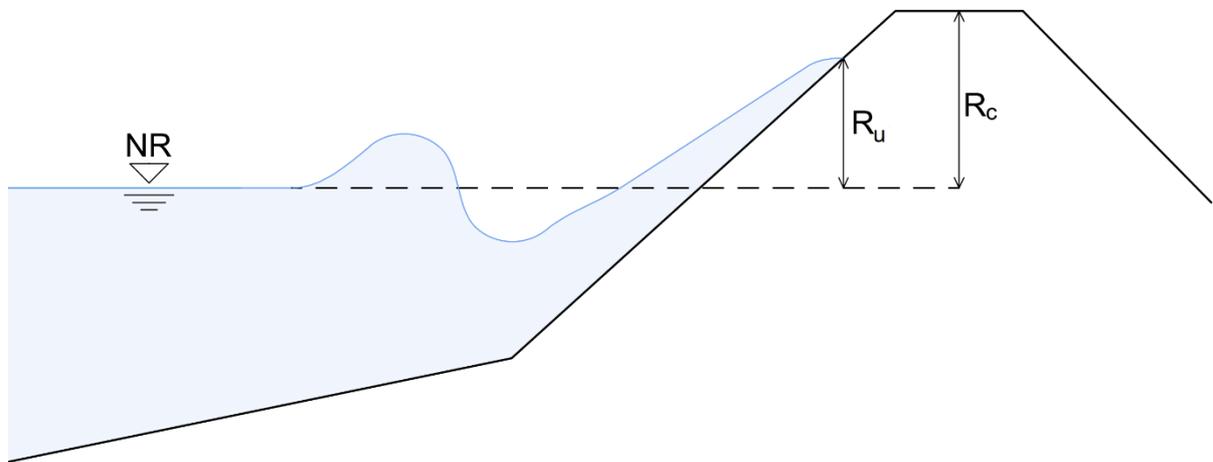


Figura 2.4- Esquema representativo do efeito de espraçamento

Quando a energia não é dissipada pelos fenómenos anteriormente mencionados ocorre a transmissão por galgamento ou através do meio poroso. O galgamento acontece quando a altura de espraçamento é superior à cota de coroaamento, o que origina a passagem de uma massa de água sobre o coroaamento da estrutura (Figura 2.5). Este fenómeno físico, designado por galgamento, ocorre em situações de forte agitação marítima. É contabilizado através do

caudal médio, q , que galga o coroamento da estrutura marítima, por metro linear do seu comprimento. O caudal médio galgado é usualmente expresso em $m^3/s/m$ ou $l/s/m$.

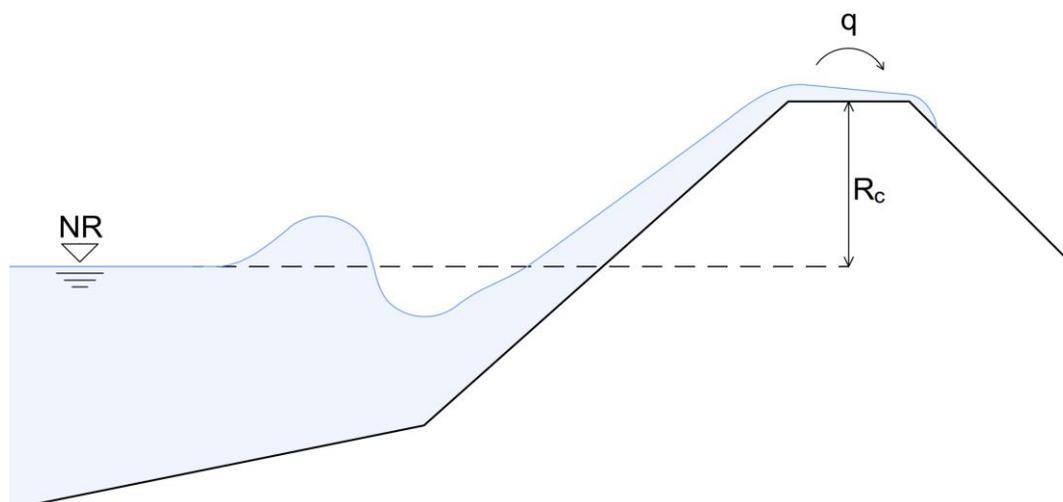


Figura 2.5- Esquema representativo do efeito de galgamento.

2.3. Fórmulas de cálculo do galgamento

Existem diferentes fórmulas para o cálculo do galgamento e do espraçamento de estruturas de proteção marginal. Neste capítulo serão apresentadas as utilizadas nesta dissertação e que se enquadram nas características do caso em estudo: estrutura de proteção costeira localizada em zonas de muito baixa profundidade ou mesmo emersa.

2.3.1. Eurotop (2018)

O Eurotop - *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures* (Van Gent *et al.*, 2018) é um manual europeu que serve como guia para a análise do desempenho de galgamento de estruturas de proteção costeira. Foi publicado originalmente em 2007, mas foi sofrendo algumas reformulações ao longo do tempo, tendo sido a última realizada em 2018 (Van Gent *et al.*, 2018). Este manual define, para vários tipos de estruturas, os respectivos parâmetros e propõe as fórmulas que devem ser utilizadas de acordo com o caso em estudo. Fornece ainda orientações de como os resultados devem ser interpretados e inclui vários exemplos de casos de estudo.

No que diz respeito ao cálculo do espraçamento e galgamento, o Eurotop faz dois tipos de estimativa, "*Mean value approach*" e "*Design approach*". O "*Mean value approach*" corresponde a uma estimativa baseada no seu valor médio, enquanto o "*Design approach*" tem um coeficiente de segurança associado, sendo, portanto, uma estimativa majorada que pode ser utilizada diretamente em projeto e na avaliação do comportamento de estruturas de proteção costeira relativamente ao galgamento. Este manual prevê também a utilização de diversos fatores de redução que dependem das características da estrutura.

As fórmulas recomendadas pelo Eurotop (2018) para o cálculo do espraçamento em estruturas de proteção marginal variam consoante as características do perfil e a declividade da onda incidente. Para uma estrutura de proteção costeira localizada em zonas de muito baixa

profundidade ou mesmo emersa, a altura de espraiamento que é excedida em 2% das ondas incidentes, $R_{u2\%}$, é calculada de acordo com as seguintes fórmulas:

Main value approach:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \\ \text{Com um máximo de:} \\ \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.0 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}} \right) \end{array} \right. \quad (\text{se } \cot\alpha > 2) \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 0,8 \cdot \cot\alpha + 1,6 \\ \text{Com um mínimo de 1,8 e um máximo de 3,0} \end{array} \right. \quad (\text{se } \cot\alpha \leq 2) \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.0 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}} \right) \\ \text{Com um mínimo de 1,8 e um máximo de 3,0} \end{array} \right. \quad (\text{se } S_{m-1,0} \leq 0,01) \quad (3)$$

Design approach:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.65 \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \xi_{m-1,0} \\ \text{Com um máximo de:} \\ \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.07 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}} \right) \end{array} \right. \quad (\text{se } \cot\alpha > 2) \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 0,86 \cdot \cot\alpha + 1,71 \\ \text{Com um mínimo de 1,93 e um máximo de 3,21} \end{array} \right. \quad (\text{se } \cot\alpha \leq 2) \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.07 \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \left(4 - \frac{1.5}{\sqrt{\gamma_b \cdot \xi_{m-1,0}}} \right) \\ \text{Com um mínimo de 1,93 e um máximo de 3,21} \end{array} \right. \quad (\text{se } S_{m-1,0} \leq 0,01) \quad (6)$$

Nestas fórmulas:

α - Inclinação do fundo em frente à estrutura [°];

$\xi_{m-1,0}$ - Número de Iribarren [-];

H_{m0} - Altura de onda significativa em frente à estrutura [m];

γ_b - Fator de redução devido à berma [-];

γ_β - Fator de redução devido à obliquidade das ondas incidentes [-];

γ_f - Fator de redução devido à permeabilidade e rugosidade do talude da estrutura [-];

$L_{m-1,0}$ - Comprimento de onda espectral em águas profundas = $gT_{m-1,0}^2/2\pi$ [m];

$R_{u2\%}$ - Nível de espraiamento excedido por 2% das ondas incidentes [m];

$S_{m-1,0}$ - Declividade da onda incidente com L_0 baseado em $T_{m-1,0} = H_{m0}/L_{m-1,0}$ [-].

As fórmulas propostas pelo Eurotop (2018) para o cálculo do caudal de galgamento variam consoante o tipo de rebentação e a declividade da onda incidente. Para uma estrutura de proteção costeira localizada em zonas de muito baixa profundidade ou mesmo emersa, o caudal de galgamento, q , calcula-se de acordo com as seguintes expressões:

Mean value approach:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,023}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp \left[- \left(2,7 \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)^{1,3} \right] \\ \text{com um máximo de:} \\ \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,09 \cdot \exp \left[- \left(1,5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma^*} \right)^{1,3} \right] \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 10^{-0,79} \cdot \exp \left(- \frac{R_c}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot H_{m0} \cdot (0,33 + 0,022 \cdot \xi_{m-1,0})} \right) \\ \text{(se } \xi_{m-1,0} \geq 7 \text{ e } S_{m-1,0} \leq 0,01) \end{array} \right. \quad (8)$$

Design approach:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0,026}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp \left[- \left(2,5 \frac{R_c}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v} \right)^{1,3} \right] \\ \text{com um máximo de:} \\ \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0,1035 \cdot \exp \left[- \left(1,35 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma^*} \right)^{1,3} \right] \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 10^{-0,50} \cdot \exp \left(- \frac{R_c}{\gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot H_{m0} \cdot (0,33 + 0,022 \cdot \xi_{m-1,0})} \right) \\ \text{(se } \xi_{m-1,0} \geq 7 \text{ e } S_{m-1,0} \leq 0,01) \end{array} \right. \quad (10)$$

Nestas fórmulas:

g - Aceleração gravítica [m/s²];

γ_v - Fator de redução devido a parede vertical no talude [-];

γ^* - Fator de redução geral devido a parede vertical no talude ou passeio [-];

q - Caudal médio galgado por metro de largura da estrutura [m³/s/m];

R_c - Cota de coroamento da estrutura [m].

2.3.2. NN_Overtopping

O NN_Overtopping é um programa que serve para estimar o caudal médio galgado em diversos tipos de estruturas de proteção costeira. Esta ferramenta faz uma abordagem utilizando as metodologias desenvolvidas por Pozueta em (2004) e Van Gent *et al.* (2004).

O programa foi desenvolvido pela empresa "DELFT HYDRAULICS" e foi copatrocinado pela comissão da comunidade europeia no âmbito do projeto "CLASH" (*Crest Level Assessment of Coastal Structures by full scale monitoring, neural network prediction and Hazard analysis on permissible wave overtopping*).

A previsão do caudal médio galgado é realizada através da rede neural e pode ser utilizada em projeto de estruturas costeiras. No entanto, os seus autores sugerem que, na fase final do projeto, é necessário realizar testes em modelo físico para confirmar a fiabilidade dos resultados obtidos através do programa (Coeveld et al., 2005).

NN_Overtopping realiza a estimativa do caudal médio de galgamento, q , com base em quinze parâmetros distintos, que caracterizam a agitação marítima e a estrutura de proteção costeira. Na Tabela 2.1 é possível observar todos os parâmetros utilizados pelo programa bem como os respetivos intervalos de aplicabilidade.

Tabela 2.1- Parâmetros e respetivos intervalos de aplicabilidade (NN_Overtopping)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Unidades
β	0,0	80,0	[°]
h	0,9	20,0	[m]
H_{m0}	1,0	1,0	[m]
$S_{m-1,0}$	0,005	0,07	[-]
h_t	0,5	20,0	[m]
B_t	0,0	10,0	[m]
γ_f	0,3	1,0	[-]
$\text{Cot } \alpha_d$	0,0	10,0	[-]
$\text{Cot } \alpha_u$	-1,0	10,0	[-]
R_c	0,5	5,0	[m]
B	0,0	15,0	[m]
h_{berma}	-1,0	5,0	[m]
$\tan h_b$	0,0	0,1	[-]
A_c	0,0	5,0	[m]
G_c	0,0	10,0	[m]

Os parâmetros apresentados na Tabela 2.1 são:

β - Ângulo entre a direção da onda incidente e a direção perpendicular à estrutura [°];

h - Profundidade em frente à estrutura [m];

H_{m0} - Altura de onda significativa em frente à estrutura [m];

$T_{m-1,0}$ - Período de pico espectral [s];

h_t - Profundidade no pé da estrutura [m];

B_t - Largura de berma de pé da estrutura [m];

γ_f - Fator de redução devido à permeabilidade e rugosidade do talude da estrutura [-];

- Cot α_d** - Inclinação da estrutura a baixo da berma [-];
- Cot α_u** - Inclinação da estrutura acima da berma [-];
- R_c** - Cota de coroamento [m];
- B** - Largura da berma [m];
- h_{berma}** - Profundidade da berma [m];
- $\tan \alpha_b$** - Inclinação da berma [-];
- A_c** - Distância entre o nível do mar e a berma [m];
- G_c** - Largura do coroamento da estrutura [m].

A Figura 2.6 mostra a representação gráfica dos quinze parâmetros utilizados pelo programa.

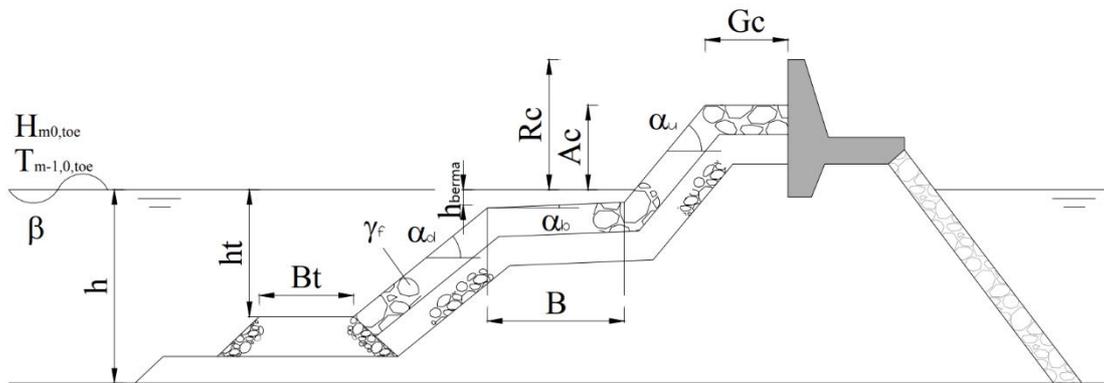


Figura 2.6- Representação gráfica dos parâmetros (adaptado de Coeveld *et al.*, 2005)

2.3.3. Goda (2009)

Goda propôs um conjunto de fórmulas para a previsão do caudal médio galgado em estruturas de proteção costeira lisas e impermeáveis, tanto inclinadas como verticais. Para isso utilizou dados provenientes da base de dados do projeto *CLASH* (financiado pela união europeia), e testes realizados na universidade de Kansai, no Japão, por Tamada *et al.* em 2002. O autor mostrou que as fórmulas exponenciais existentes para o cálculo do caudal médio galgado têm tendência para superestimar os maiores valores de galgamento e subestimar os pequenos valores de galgamento (Goda, 2009).

De forma a melhorar a previsão do caudal médio galgado, Goda partiu da fórmula exponencial simples e bem conhecida:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0,0}^3}} = \exp \left[- \left(A + B \frac{R_c}{H_{m0,0}} \right) \right] \quad (11)$$

onde $H_{m0,0}$ é a altura de onda no pé da estrutura.

O autor redefiniu os coeficientes A e B , deixando de serem constantes e passando a ser funções da inclinação do fundo, inclinação da estrutura e profundidade no pé do talude.

Assim, os coeficientes A e B são dados pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} A &= A_0 \tanh[(0,956 + 4,44 \cdot \tan\theta) \cdot (h_t/H_{m0,o} + 1,242 - 2,032 \cdot \tan^{0,25}\theta)] \\ B &= B_0 \tanh[(0,822 + 2,22 \cdot \tan\theta) \cdot (h_t/H_{m0,o} + 0,578 - 2,22 \cdot \tan\theta)] \end{aligned} \quad (12)$$

e

$$\begin{aligned} A_0 &= 3,4 - 0,734 \cdot \cot\alpha + 0,239 \cdot \cot^2\alpha - 0,0162 \cdot \cot^3\alpha \\ B_0 &= 2,3 - 0,5 \cdot \cot\alpha + 0,15 \cdot \cot^2\alpha - 0,011 \cdot \cot^3\alpha \end{aligned} \quad (13)$$

onde α é a inclinação do fundo em frente à estrutura, θ a inclinação da estrutura e h_t a profundidade no pé do talude.

Ambos os coeficientes A e B aumentam até convergirem para um valor constante à medida que a profundidade no pé do talude também aumenta. Isto acontece para valores de $h_t/H_{m0,o}$ maiores que 3 na maioria dos casos. No entanto, todos os dados utilizados em Goda (2009) apresentam $h_t/H_{m0,o}$ maior que 1. Logo, não há dados para situações de profundidade no pé do talude extremamente baixas ou emersas.

2.3.4. Van Gent (1999) modificado por Altomare et al. (2016)

Partindo da estrutura original proposta por Van Gent em 1999, em C. Altomare *et al.*, 2016, foi introduzido o conceito de inclinação característica em águas pouco profundas. Este conceito tem em conta a profundidade no pé do talude, inclinação do fundo e inclinação da estrutura de proteção costeira.

Os autores consideram que o fundo começa a influenciar o galgamento quando a profundidade no pé do talude é menor que 1,5 vezes a altura da onda incidente. Assim, a inclinação característica deve ser utilizada sempre que $h_t/H_{m0,o}$ é menor que 1,5 e nos casos em que o pé do talude se encontra emerso, caso contrário deve utilizar-se a inclinação do fundo da praia.

A inclinação característica é calculada de acordo com o Eurotop (Van Gent *et al.*, 2018).

Nesse estudo foram utilizados os dados do banco de dados CLASH, obtidos em campanhas experimentais na *Flanders Hydraulics Research* e na *Ghent University*.

O caudal médio galgado é dado pela seguinte expressão:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0,o}^3}} = 10^c \cdot \exp \left[- \frac{R_c}{H_{m0,o} \cdot (0,33 + 0,022 \cdot \xi_{m-1,0})} \right] \quad (14)$$

onde o expoente c é considerado como uma distribuição normal, sendo o valor médio igual a -0,791 e o desvio padrão igual a 0,294.

2.3.5. Altomare et al. (2020)

Em Altomare *et al.*, 2020, é estudada a influência da dispersão direcional da onda no galgamento de estruturas de proteção costeira em baixa profundidade. De forma a obter uma melhor previsão do caudal médio galgado, os autores partem das fórmulas sugeridas por

Goda, 2009 e Van Gent, 1999, modificado por Altomare *et al.*, 2016, introduzindo um coeficiente de redução devido à dispersão direcional. Este coeficiente é calculado de acordo com as seguintes equações.

Para Goda, 2009:

$$\gamma_{\sigma} = \begin{cases} \exp(-0,046\sigma), \text{ para } \frac{h_t}{H_{m0,o}} < 0,3 \\ \exp(-0,014\sigma), \text{ para } 0,3 < \frac{h_t}{H_{m0,o}} < 1 \end{cases} \quad (15)$$

Para Altomare *et al.*, 2016:

$$\gamma_{\sigma} = \begin{cases} \exp(-0,053\sigma), \text{ para } \frac{h_t}{H_{m0,o}} < 0,3 \\ \exp(-0,02\sigma), \text{ para } 0,3 < \frac{h_t}{H_{m0,o}} < 1 \end{cases} \quad (16)$$

Desta forma, para determinar o caudal médio galgado, basta adicionar às fórmulas já existentes, em Goda, 2009 e Altomare *et al.*, 2016, o coeficiente de redução devido à dispersão direcional das ondas.

Para Goda, 2009:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0,o}^3}} = \gamma_{\sigma} \cdot \exp \left[- \left(A + B \frac{R_c}{H_{m0,o}} \right) \right] \quad (17)$$

Para Altomare *et al.*, 2016:

$$\frac{q}{\sqrt{g H_{m0,o}^3}} = \gamma_{\sigma} \cdot 10^c \cdot \exp \left[- \frac{R_c}{H_{m0,o} \cdot (0,33 + 0,022 \cdot \xi_{m-1,0})} \right] \quad (18)$$

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

A fórmula proposta por Mase *et al.* (2013) permite estimar o espraiamento e galgamento de estruturas de defesa aderente situadas em profundidades muito baixas e acima do nível do mar. Embora em outras fórmulas sejam utilizadas as características da onda incidente no pé do talude, nesta proposta são utilizadas as características da onda em águas profundas com uma inclinação do talude imaginária, de forma a facilitar a sua aplicação nos casos onde o pé do talude se encontra emerso.

O conceito de talude imaginário foi inicialmente idealizado por Saville em 1958. A sua proposta consistia em ligar dois pontos, um ponto no fundo do mar na posição de rebentação da onda e o outro ponto no nível de espraiamento. Mais tarde esta reta foi ajustada por Mase *et al.* (2013) com base em dois conjuntos de dados experimentais. Um conjunto de dados experimentais foi realizado num tanque de ondas de dimensões [50 x 1,5 x 1] (m), com três

declives de fundo e dois declives da estrutura diferentes, para ensaios de agitação correspondentes a aproximadamente 200 ondas e utilizando uma escala de 1:50. O outro conjunto de dados é proveniente de ensaios realizados por Mase, em 2004, de uma estrutura de defesa aderente à escala 1:45, destinada a avaliar as características de espraio em estruturas localizadas junto à linha de costa. Estes ensaios permitiram determinar os coeficientes empíricos da fórmula que se adequam ao cálculo do caudal galgado em estruturas marginais, localizadas na costa ou em águas pouco profundas.

Na Figura 2.7 é possível observar as duas propostas do talude imaginário.

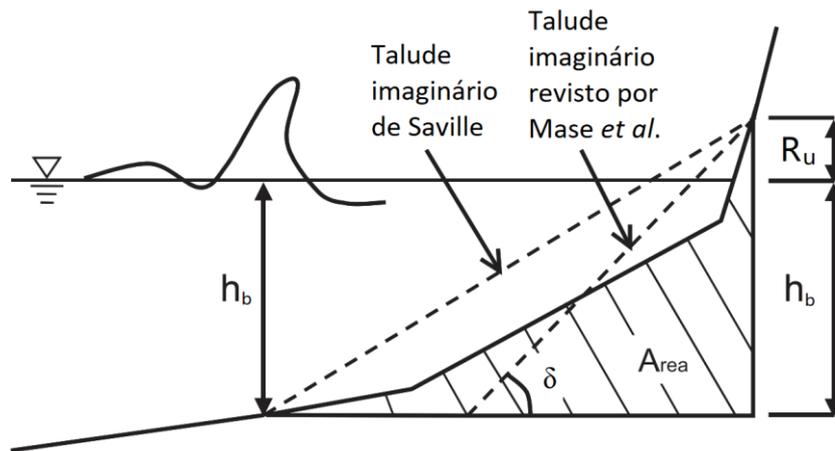


Figura 2.7- Talude imaginário (adaptado de Mase *et al.*, 2013)

O declive imaginário, $\cotan(\delta)$, é dado por:

$$\cotan(\delta) = \frac{2 \cdot A_{rea}}{(h_b + R_u)^2} \quad (19)$$

onde A_{rea} é a área da secção transversal da estrutura e do fundo entre a posição de rebentação da onda e o nível de espraio, em condições de agitação irregulares, δ representa o ângulo que o talude imaginário faz com a horizontal, h_b é a profundidade onde a altura de onda significativa se reduz para 7% e R_u é o nível de espraio.

O nível de espraio excedido por 2% das ondas incidentes na estrutura, $R_{u2\%}$, é dado pela seguinte expressão:

$$R_{u2\%} = H_{m0} \cdot [2,99 - 2,73 \exp(-0,57 \cdot \frac{\tan(\delta)}{\sqrt{H_{m0}/L_0}})] \quad (20)$$

Como o nível de espraio depende do declive imaginário e vice-versa, é necessário realizar um cálculo iterativo até a solução convergir.

Partindo do $R_{u2\%}$ é possível determinar o espraio máximo não excedido por 37% e 99% das ondas incidentes, R_{max} , e assim calcular o caudal médio galgado (q), ambos obtidos através da equação 21, proposta por Mase *et al.* (2013).

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \begin{cases} A \left(\frac{R_{max}}{H_{m0}} \right)^{3/2} \left[1 - \left(\frac{R_c}{H_{m0}} \right) / \left(\frac{R_{max}}{H_{m0}} \right) \right]^B & \text{para } 0 \leq R_c < R_{max} \\ 0 & \text{para } R_{max} \leq R_c \end{cases} \quad (21)$$

onde $A=0,018$, $B=3,200$ e $(R_{max})_{37\%,100}=1,09R_{u2\%}$ quando se pretende calcular o caudal de galgamento $Q_{37\%}$ e $A=0,018$, $B=6,240$ e $(R_{max})_{99\%,100}=1,54R_{u2\%}$ caso se pretenda calcular o caudal $Q_{99\%}$.

Como se pode verificar, sempre que o nível máximo de espraçamento seja superior à cota de coroamento da estrutura, ocorre galgamento, sendo então calculado o caudal de galgamento por metro de largura da estrutura.

De forma a permitir a aplicação da fórmula a uma maior gama de condições de galgamento, Yuhi *et al.* (2021), propõem novos coeficientes A e B para o cálculo do caudal de galgamento $Q_{99\%}$ em função do valor de X:

$$X = \log \left(1 - \frac{R_c}{(R_{max})_{99\%,100}} \right)$$

- Se $X \geq -0,5$ $\begin{cases} A = 0,018 \\ B = 6,240 \end{cases}$ (22)
- Se $-1,4 \leq X < -0,5$ $\begin{cases} A = e^{-3,27-2,91x^2} \\ B = 5,82x + 9,15 \end{cases}$
- Se $X < -1,4$ $\begin{cases} A = 0,0013 \\ B = 1 \end{cases}$

É de salientar que esta correção não se aplica ao espraçamento excedido em 37%, afetando exclusivamente o valor do caudal de galgamento $Q_{99\%}$.

3. Descrição do caso de estudo

3.1. Considerações gerais

O município de Vagos, localizado no distrito de Aveiro, é composto por 8 freguesias, que cobrem uma área total de 164,92 km², onde habitam 22.851 pessoas, o que resulta numa densidade populacional de 138,6 habitantes/Km² (INE, 2012). Este município é delimitado a norte pelos concelhos de Ílhavo e Aveiro, a este por Oliveira do Bairro e Cantanhede, a sul por Cantanhede e Mira e a Oeste pelo Oceano Atlântico. A sua linha costeira, entre os concelhos de Ílhavo e Mira, tem um comprimento de cerca de 7 km, e é aí que se localiza a praia da Vagueira.

A praia da Vagueira é a maior e mais frequentada praia do município de Vagos e o seu areal estende-se ao longo de aproximadamente 2,6 km. Na Figura 3.1 é possível observar a localização geográfica da praia da Vagueira.

Atendendo a que o cordão dunar nesta zona costeira se encontrava bastante degradado foi necessário reabilitá-lo, sendo parcialmente substituído por diques arenosos aos quais foram adicionadas paliçadas e plantada vegetação adequada para promover a fixação das dunas. Estes diques nas frentes urbanas são interrompidos, sendo por vezes substituídos por estruturas de defesa longitudinal aderente, como foi o caso da povoação da Vagueira (Soraia M. Romão *et al.*, 2015).



Figura 3.1- Localização geográfica da praia da Vagueira (adaptado de *Google Earth*, 06/07/2021)

Na maior parte das obras de defesa aderente do litoral oeste de Portugal tem-se observado uma diminuição da largura das praias situadas em frente às obras, devido à erosão, onde a praia da Vagueira não é exceção. É expectável que os fenómenos erosivos e a frequência e intensidade dos fenómenos de galgamento e inundações costeiras aumentem no futuro devido ao impacto das alterações climáticas, em particular nos sistemas de praias/dunas deficitários (Filipe Duarte Santos *et al.*, 2014).

Devido aos problemas anteriormente mencionados, e com objetivo de minimizar os causais de galgamento e futuras inundações, está-se a estudar a viabilidade da construção de um quebramar destacado em frente à estrutura de defesa aderente da praia da Vagueira.

3.2. Estrutura de proteção marginal

A estrutura de proteção marginal em estudo é uma defesa longitudinal aderente cujo principal objetivo é mitigar os efeitos do galgamento de forma a garantir a segurança de pessoas e bens na sua retaguarda.

Nas figuras 3.2, 3.3 e 3.4 encontram-se as fotografias da estrutura. Observa-se que o manto exterior da estrutura é composto por enrocamento. No seu coroamento possui um passadiço pedonal, que serve de acesso à praia, e uma estrada destinada à circulação de veículos. Na sua retaguarda existem diversos edifícios de habitação unifamiliar e coletiva, sendo que o piso térreo de alguns é destinado a comércio. É de salientar que o pé do talude da estrutura se encontra a maior do tempo acima do nível do mar, tal como no momento em que as fotografias foram tiradas.



Figura 3.2- Fotografia da estrutura de defesa longitudinal aderente da praia da Vagueira (Vista para norte)



Figura 3.3- Fotografia da estrutura de defesa longitudinal aderente da praia da Vagueira (Vista para sul)



Figura 3.4- Fotografia da estrutura de defesa longitudinal aderente da praia da Vagueira (Tirada do espô-
rão)

A Tabela 3.1 contém os dados referentes às principais características da estrutura em estudo.

Tabela 3.1- Características da estrutura de defesa longitudinal aderente

Ângulo do perfil de praia (α)	4,67	[°]
Fator de rugosidade da estrutura (γ_f)	0,80	[-]
Largura da berma de coroamento (B)	7,19	[m]
Cota de coroamento (R_c)	10,93	[m]
Profundidade do pé de talude, positivo acima do ZH (h_t)	2,89	[m]
Profundidade na zona de medição da agitação	-9,87	[m]
Profundidade mais baixa na zona do perfil	-12,00	[m]
Ângulo da estrutura marginal (θ)	55,76	[°]
Ângulo do perfil de fundo	0,11	[°]
Ângulo que a perpendicular à estrutura faz com o Norte	252,50	[°]

Na Figura 3.5 encontra-se representado o perfil transversal da zona submersa em frente à estrutura, resultante de levantamentos efetuados em julho de 2018, no âmbito do programa COSMO. O ponto de abcissa nula e profundidade de 10 metros corresponde ao ponto P3, onde foram obtidos os dados de agitação marítima utilizados nesta dissertação. Nesta dissertação apenas foi utilizado o perfil PCE (Perfil Central da Estrutura). Como é possível observar, na zona inicial, o perfil cresce constantemente até os 800 metros de comprimento, a partir deste ponto torna-se mais complexo, começando a existir variações acentuadas do seu declive e mudanças de sinal da sua derivada. Na zona compreendida entre os 800m e os 1300m é possível observar a presença de uma barra e uma fossa. Esta é uma característica muito presente ao longo das praias da costa portuguesa e determinante na previsão do caudal galgado, uma vez que em certas condições de agitação marítima a rebentação da onda ocorre nesse ponto.



Figura 3.5- Perfil transversal da zona submersa em frente à estrutura (2018)

3.3. Agitação marítima e nível do mar

De acordo com Fortes *et al.*, (2020), a caracterização da agitação marítima em frente à estrutura foi obtida com base nos dados provenientes do modelo de previsão WAM, do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a médio prazo (ECMWF), para um período de 39 anos (1979-2018), de 6 em 6 horas, que resultou num total de 58.076 trios de valores dos parâmetros H_s (altura de onda significativa), T_p (período de pico) e $Dirm$ (direção média de pico).

Seguidamente estes dados foram transferidos para a zona em frente à praia da Vagueira, em especial para o ponto P3 (Figura 3.6) de coordenadas $40^{\circ}34'03.2''N$, $8^{\circ}47'45.9''W$, de acordo com a metodologia apresentada em Freire *et al.* (2020), utilizando o modelo numérico SWAN (Booij *et al.*, 1999). Tal permitiu obter o regime geral observado no ponto P3.

Nesta dissertação são usados os dados no ponto P3.



Figura 3.6- Localização do ponto P3 (adaptado de Google Earth, 09/11/2021)

O nível do mar (N_{mar}), utilizado nesta dissertação foi obtido, segundo Fortes *et al.* (2020) somando ao nível de maré máxima entre 3 horas antes e 2 horas depois da hora do dado de agitação (Exemplo: agitação às 6h, máximo do N_{mar} entre as 3h e as 8h), o valor da sobrelevação do Copernicus, retirada de 6 em 6 horas.

Nas figuras que se seguem apresenta-se a variação anual máxima e mínima de cada um destes parâmetros.

A Figura 3.7 diz respeito à variação anual da altura de onda significativa, H_{m0} , sendo possível observar que a variação da altura mínima anual é pequena, variando entre 0 e 0,5 [m], os valores médios rondam os 2 metros, e os máximos apresentam uma maior variação de valores, entre os 5 e os 7 [m].

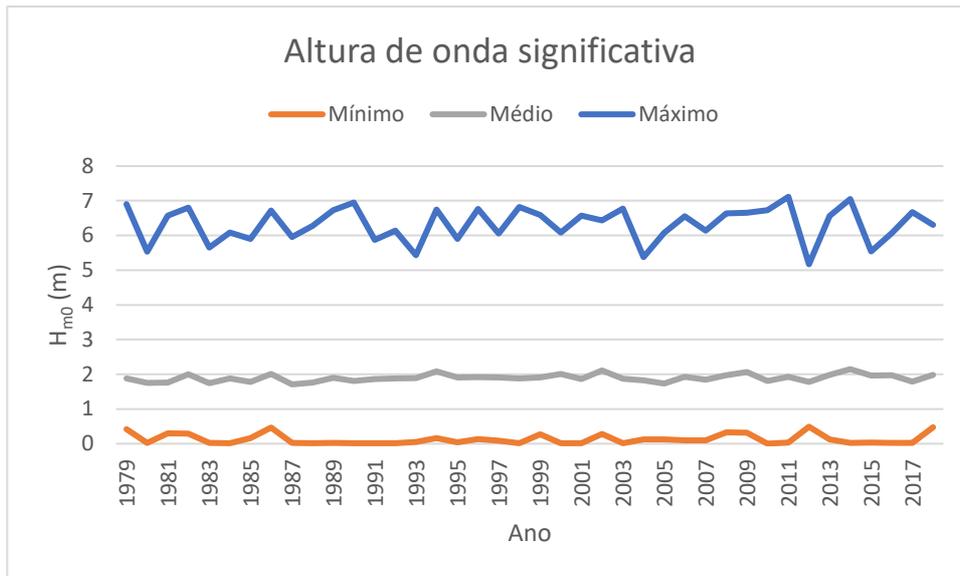


Figura 3.7- Variação anual mínima, média e máxima da altura de onda significativa entre 1979 e 2018

Em relação ao período de pico, T_p , o valor mínimo anual quase não varia, rondando os 4,5 s, enquanto o valor máximo, apesar de rondar os 18 s na maior parte dos anos, apresenta variações entre os 16 e os 20 s, já os valores médios anuais rondam os 11 s como é possível observar na Figura 3.8.

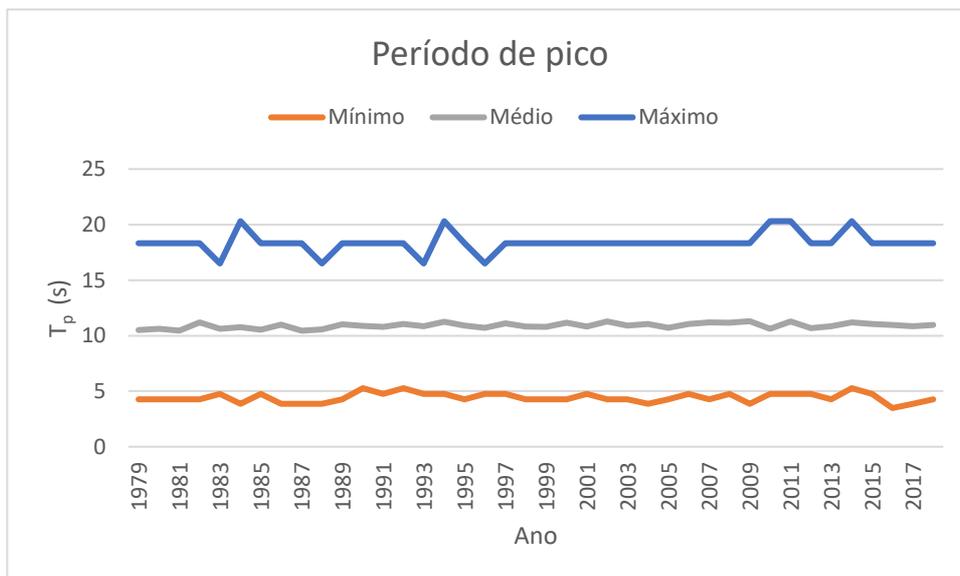


Figura 3.8- Variação anual mínima, média e máxima do período de pico entre 1979 e 2018

Na Figura 3.10 é apresentada a variação anual mínima e máxima da direção da onda incidente: os valores máximos anuais praticamente não variam, estabilizando em torno dos 355°, isto é, provenientes de norte, aproximadamente. O mesmo não se verifica no que diz respeito aos valores mínimos, que variam entre os 0° e os 200°, variando entre o quadrante sudoeste (200°) e o quadrante norte (0° ou 360°). Os valores médios anuais rondam os 300°.

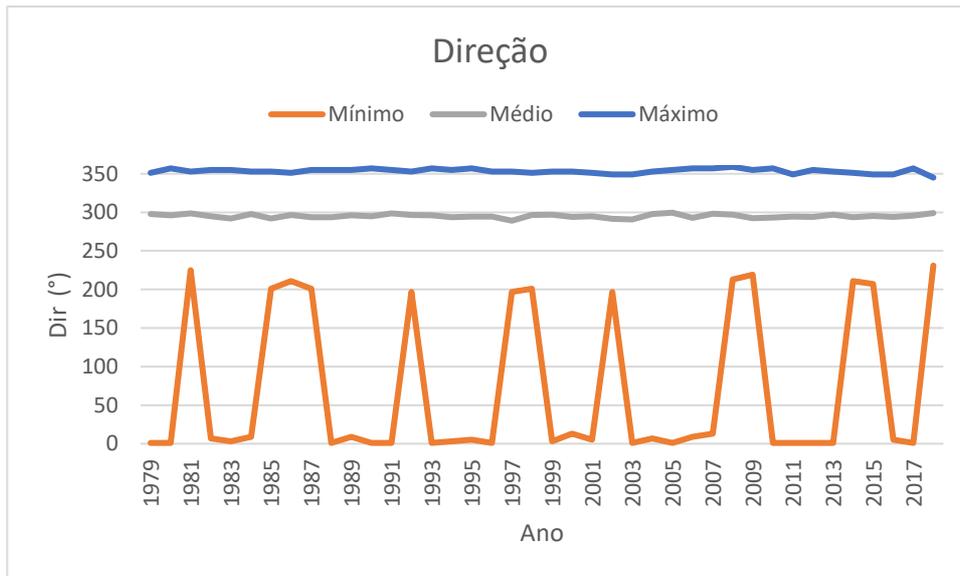


Figura 3.10- Variação anual mínima, média e máxima da direção das ondas incidentes entre 1979 e 2018

No que diz respeito ao nível do mar (Figura 3.9), os valores mínimos e máximos apresentam uma variação anual pouco significativa, andando os valores mínimos em torno de 1,6 m e os máximos em torno de 3,7 m, já os valores médios anuais rondam os 2,7m.

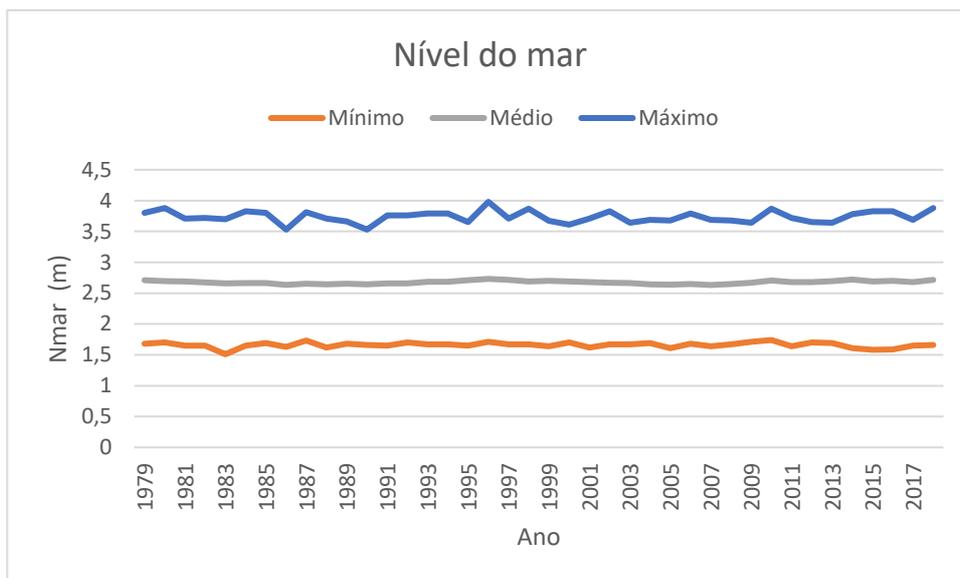


Figura 3.9- Variação anual mínima, média e máxima da direção do nível do mar entre 1979 e 2018

3.4. Valores admissíveis de caudal de galgamento

Tendo em conta o tipo de estrutura em estudo e a sua utilização, foram propostos intervalos que relacionam os valores dos caudais médios de galgamento com as respetivas consequências e danos associados (Van Gent *et al.*, 2018) de forma a facilitar a análise dos resultados obtidos:

- $q=0$ l/s/m (considera-se que o caudal de galgamento é nulo sempre que os valores obtidos são inferiores a 10^{-7} l/s/m);
- $0,03 < q$ (l/s/m) $\leq 0,1$ - Apenas recomendada a circulação a pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente assustadas ou perturbadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas. Não é recomendada a circulação de veículos a alta velocidade;
- $0,1 < q$ (l/s/m) ≤ 1 - Inseguro para o tráfego e estacionamento de veículos. Perigosa a circulação de peões não prevenidos;
- $1 < q$ (l/s/m) ≤ 10 - Apenas é recomendável a circulação de pessoas treinadas, com equipamento e calçado adequado, com perigo reduzido de queda ao mar. Risco de danos em edifícios e equipamentos localizados na retaguarda da estrutura;
- $10 < q$ (l/s/m) ≤ 50 - Muito perigosa a circulação de pessoas. Sem danos na estrutura se o coroamento e o tardo estiverem bem protegidos;
- q (l/s/m) > 50 - Danos na estrutura de proteção costeira.

4. Galgamento da estrutura de proteção marginal da praia da Vagueira

4.1. Definição e geometria do perfil

Na zona da praia da Vagueira onde se localiza a estrutura de proteção marginal, tal como foi descrito no capítulo 3.2, o perfil transversal da zona submersa em frente à estrutura não é sempre crescente, sendo composto por uma barra e uma fossa.

Alguns métodos utilizados na previsão do caudal de galgamento exigem que o perfil do fundo seja sempre crescente. Isto significa que, para possibilitar a sua utilização no caso em estudo, é necessário adaptar o perfil para que seja crescente do início ao fim. Como a zona da barra e fossa é determinante na previsão do galgamento e não é possível reproduzi-la na maioria dos métodos considerados, utilizaram-se quatro adaptações ao perfil original para estudar de que forma esta zona afeta o galgamento e qual a incerteza dos resultados obtidos.

Na Figura 4.1 encontra-se representada a primeira proposta de adaptação do perfil original. Como é possível observar, nesta proposta a zona da fossa foi anulada sendo substituída por uma zona com uma ligeira inclinação de forma a garantir um perfil sempre crescente.

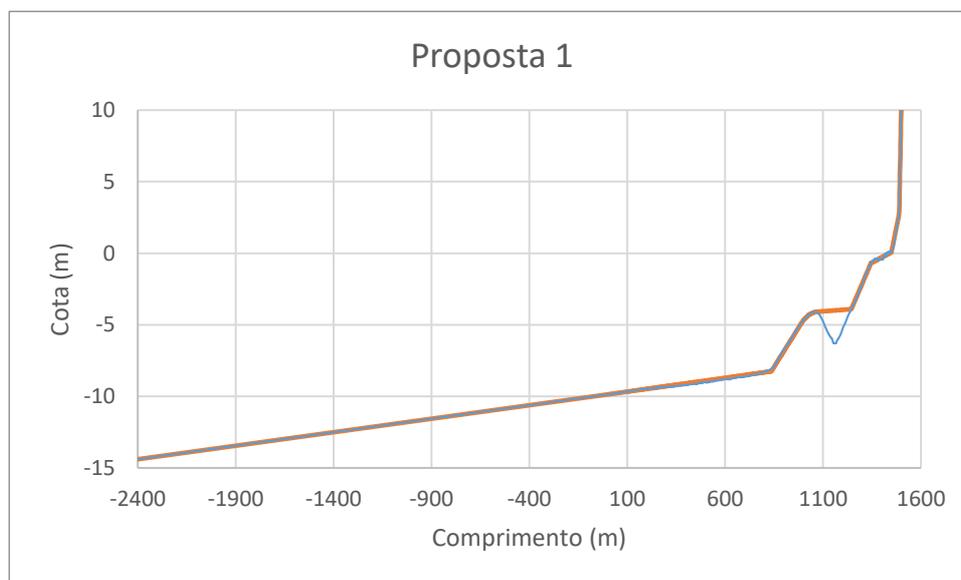


Figura 4.1- Proposta 1 de alteração do perfil original

Na Figura 4.2 encontra-se a segunda proposta de alteração do perfil original. Nesta proposta uniu-se o ponto inicial da barra ao ponto final da fossa, tornando dessa forma o perfil sempre crescente.

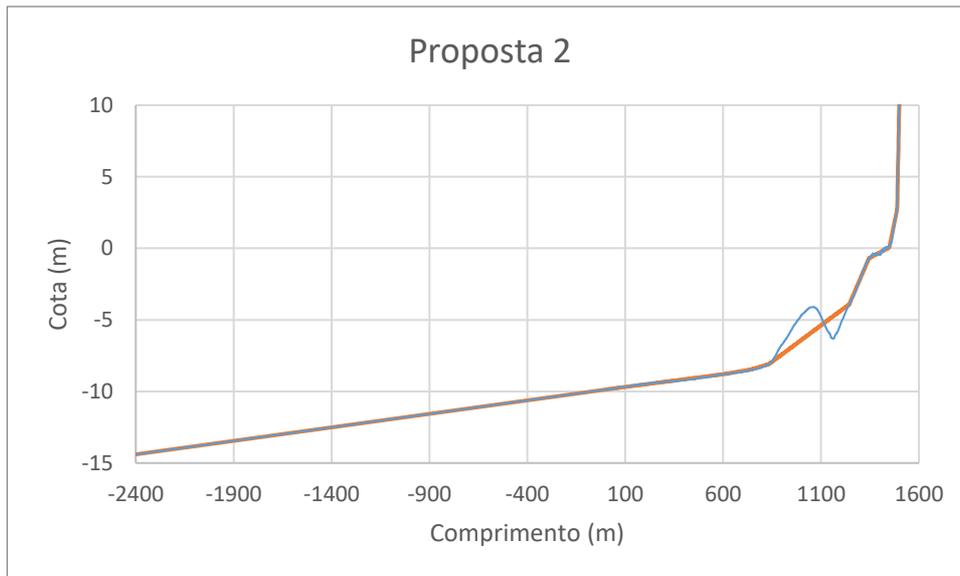


Figura 4.2- Proposta 2 de alteração do perfil original

A proposta número 3, representada na Figura 4.3, teve por base o declive médio da zona da barra e fossa, desta forma atenuou-se as irregularidades da zona tornando-a sempre crescente.

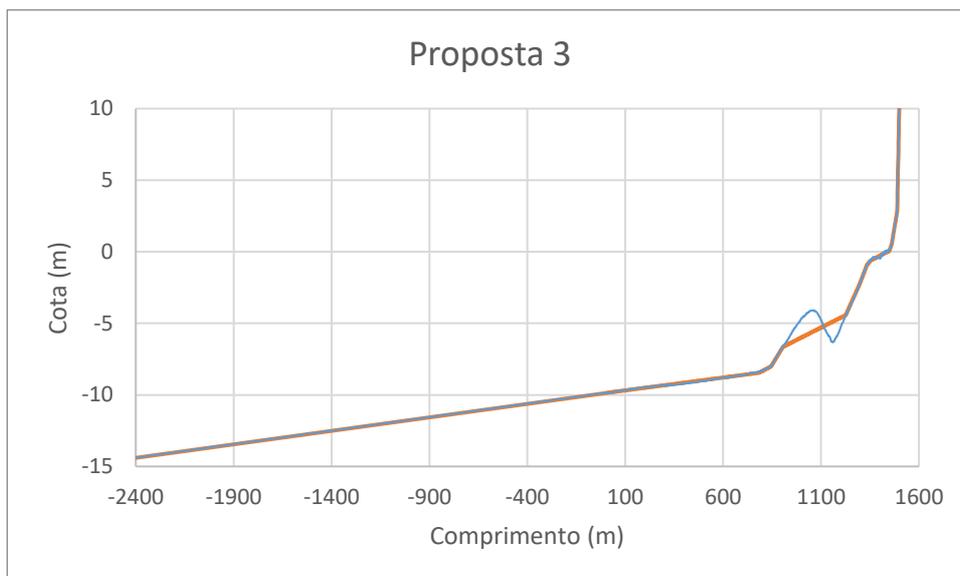


Figura 4.3- Proposta 3 de alteração do perfil original

Por fim, na quarta proposta apresentada na Figura 4.4, anulou-se a barra tornando o perfil sempre crescente como se ela não existisse.

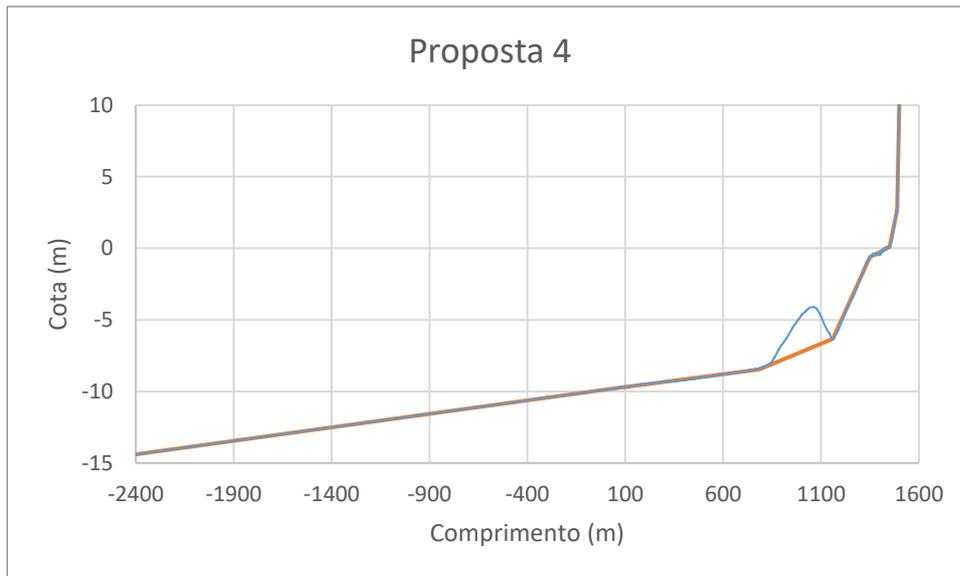


Figura 4.4- Proposta 4 de alteração do perfil original

Assim, as propostas apresentadas cobrem as formas mais evidentes de tornar o perfil sempre crescente, sendo posteriormente possível comparar os resultados obtidos em cada perfil e avaliar a relevância da zona da barra e fossa no que diz respeito ao galgamento e qual a melhor forma de tornar o perfil sempre crescente em situações como esta.

4.2. Eurotop (2018)

Para a aplicação do Eurotop é preciso definir vários parâmetros que entram nas fórmulas do galgamento. Nos pontos 4.2.1 a 4.2.8 são apresentados os parâmetros utilizados e os valores considerados. No ponto 4.2.9 apresentam-se os resultados obtidos da aplicação do Eurotop.

4.2.1. Inclinação do fundo (α)

A inclinação do fundo, α , varia ao longo do perfil e consoante o nível do mar. Assim sendo, é necessário verificar, em cada caso, onde se localiza o nível do mar em relação ao perfil em estudo, de forma a determinar o ângulo α que mais se adequa à situação. Para perfis compostos por zonas de diferentes inclinações, é necessário considerar-se uma inclinação característica, α_c , desde o ponto de rebentação da onda até a altura de espraiamento. Como a altura de espraiamento, $R_{u2\%}$, é desconhecida à partida, é necessário efetuar um cálculo iterativo.

Para tal, o Eurotop propõe considerar-se inicialmente o ponto inferior situado a $1.5H_{m0}$ abaixo do nível do mar e o ponto superior situado a $1.5H_{m0}$ acima o nível do mar para realizar a primeira estimativa, como se pode observar na Figura 4.5.

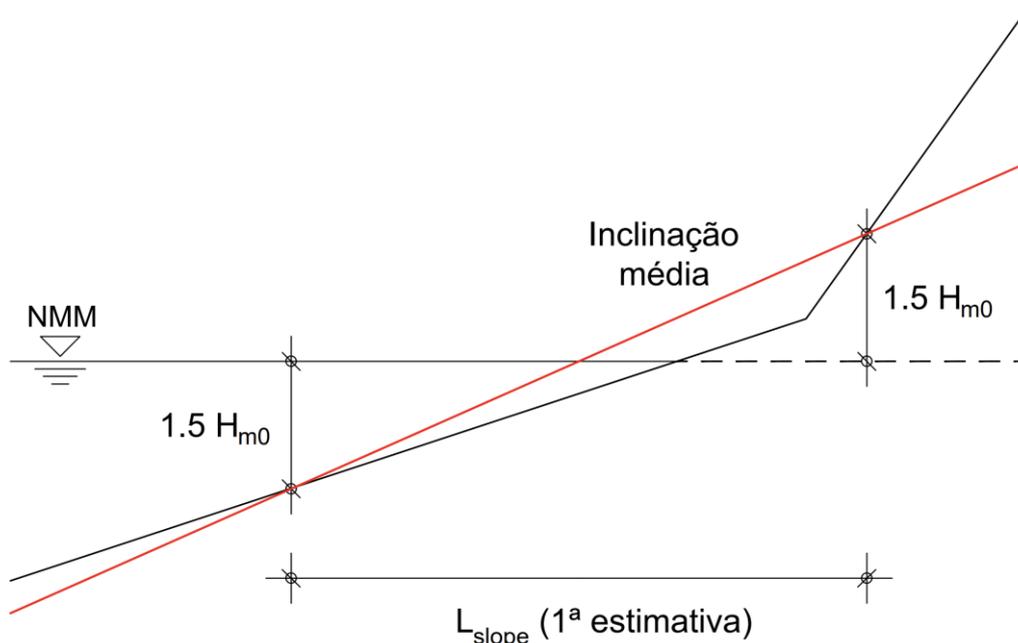


Figura 4.5- Primeira estimativa da inclinação característica do fundo

Partindo do ângulo proveniente da primeira estimativa, calcula-se a altura de espraio (Ru2%) e considerando essa altura para o ponto mais alto estima-se um novo ângulo α (Figura 4.6). Este processo é repetido até a solução convergir.

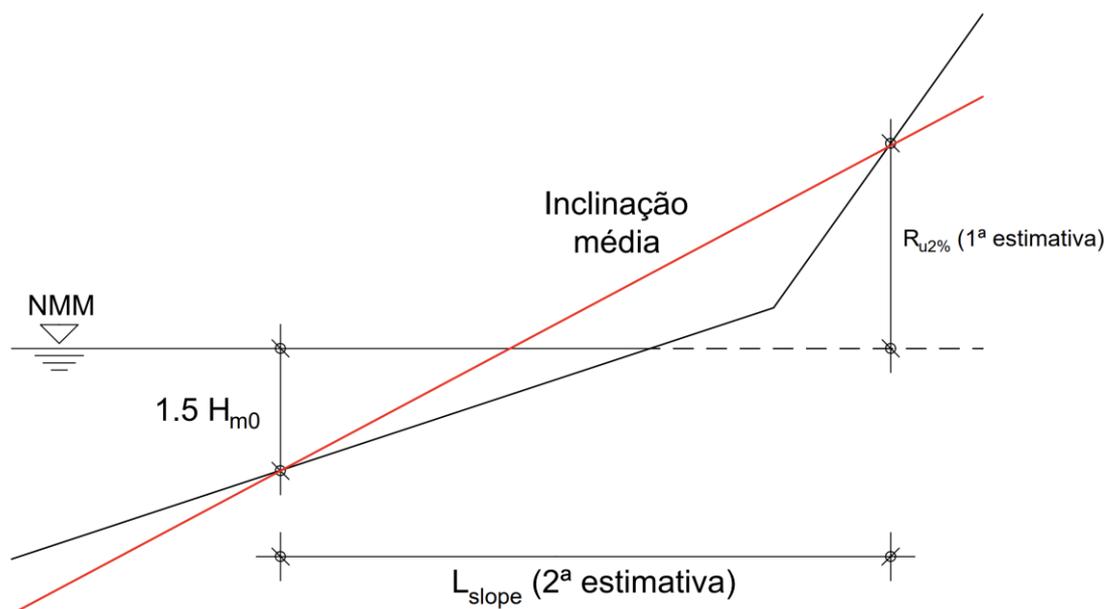


Figura 4.6- Segunda estimativa da inclinação característica do fundo

O manual recomenda a utilização de um ângulo α igual à inclinação do talude sempre que a inclinação característica seja superior a 1:10.

4.2.2. Fator de redução devido à berma (γ_b)

Como no caso em estudo não existe berma, considerou-se um fator de redução devido à berma, γ_b , igual a um.

4.2.3. Fator de redução devido à obliquidade das ondas incidentes (γ_β)

Segundo o Eurotop (2018), o fator de redução devido à obliquidade da onda incidente, γ_β , é calculado de acordo com as seguintes expressões:

Para o espraçamento:

$$\begin{aligned}\gamma_\beta &= 1 - 0.0022|\beta| \quad \text{para: } 0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ \\ \gamma_\beta &= 0.824 \quad \text{para: } |\beta| > 80^\circ\end{aligned}\quad (23)$$

Para o galgamento:

$$\begin{aligned}\gamma_\beta &= 1 - 0.0033|\beta| \quad \text{para: } 0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ \\ \gamma_\beta &= 0.736 \quad \text{para: } |\beta| > 80^\circ\end{aligned}\quad (24)$$

onde β é o ângulo entre a perpendicular à estrutura e a direção da onda incidente, como se pode ver esquematicamente representado na Figura 4.7.

Como o fator de redução devido à obliquidade das ondas incidentes depende de β , este fator tem que ser calculado para todas as condições de agitação em estudo.

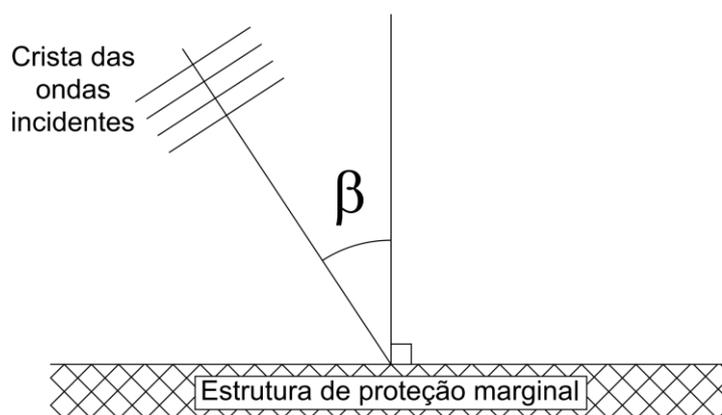


Figura 4.7- Esquema representativo do ângulo de incidência β

4.2.4. Fator de redução devido à permeabilidade e rugosidade do talude da estrutura (γ_f)

Este parâmetro caracteriza a rugosidade e permeabilidade da estrutura de proteção costeira, que está relacionado com o tipo de material utilizado na construção do talude. Quanto mais áspera e permeável for a estrutura, maior será a energia dissipada e conseqüentemente

menor será o galgamento (Coeveld et al., 2005). Tendo em conta as características da estrutura em estudo considerou-se um valor de 0,8 para o γ_f .

4.2.5. Fatores de redução devido à parede vertical no talude (γ_v e γ^*)

Uma vez que a estrutura de proteção marginal em questão não apresenta nenhuma parede vertical no talude, considerou-se γ_v e γ^* igual a um.

4.2.6. Número de Iribarren ($\xi_{m-1.0}$)

O número de Iribarren, $\xi_{m-1.0}$, segundo o Eurotop (2018) é calculado de acordo com as seguintes expressões:

$$\xi_{m-1.0} = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{H/L_{m-1.0}}} \quad (25)$$

$$L_{m-1.0} = \frac{g}{2\pi} \cdot T_{m-1.0}^2 \quad (26)$$

$$T_{m-1.0} = \frac{T_p}{1.1} \quad (27)$$

4.2.7. Cota de coroamento (R_c)

A cota de coroamento, R_c , diz respeito à distância entre o nível do mar em repouso e o coroamento da estrutura. Como se sabe a distância entre o coroamento da estrutura e o zero hidrográfico, para obter a variável R_c , em cada caso, é necessário subtrair a essa distância a altura do nível do mar.

4.2.8. Resultados obtidos

Tal como mencionado no capítulo 2.3.1, o Eurotop (2018) propõe duas estimativas distintas para o cálculo do caudal de galgamento. O *Mean value approach*, correspondente ao caudal médio galgado e o *Design approach* destinado ao dimensionamento estrutural. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através da aplicação destas duas estimativas.

De forma a facilitar a análise dos resultados obtidos foram criados intervalos de caudais de galgamento, relacionados com os valores admissíveis e as respetivas consequências e danos associados, e calculou-se o número de eventos em cada classe.

Na Tabela 4.1 é possível observar, para cada perfil, o número de eventos ocorridos em cada intervalo, segundo o Eurotop (2018).

Uma vez que os resultados não diferem significativamente com a escolha do perfil, a maior diferença entre perfis é de 0,56%, a análise que se segue foi feita apenas para o perfil 1, por ser a proposta que mais se aproxima do perfil original do fundo.

Nas figuras 4.8 e 4.9 é possível observar os histogramas relativos à frequência dos caudais de galgamento segundo o *Main value approach* e o *Design approach*, respetivamente. Tal como esperado, a frequência dos resultados obtidos vai diminuindo à medida que o valor do

caudal galgado aumenta, isto acontece porque em situações normais de agitação não é esperado que ocorra galgamento.

Tabela 4.1- Número de eventos obtidos em cada perfil segundo Eurotop (2018)

Perfil	Nº eventos - Eurotop (2018)							
	Main value approach				Design approach			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Total	58076	58076	58076	58076	58076	58076	58076	58076
$q(l/s/m)=0$	35562	35536	35679	35420	41331	41259	41383	40912
$0 < q(l/s/m) \leq 0,03$	21629	21655	21528	21793	15370	15442	15334	15811
$0,03 < q(l/s/m) \leq 0,1$	477	477	471	469	738	738	734	733
$0,1 < q(l/s/m) \leq 1$	390	390	380	377	580	580	569	565
$1 < q(l/s/m) \leq 10$	18	18	18	17	57	57	56	55

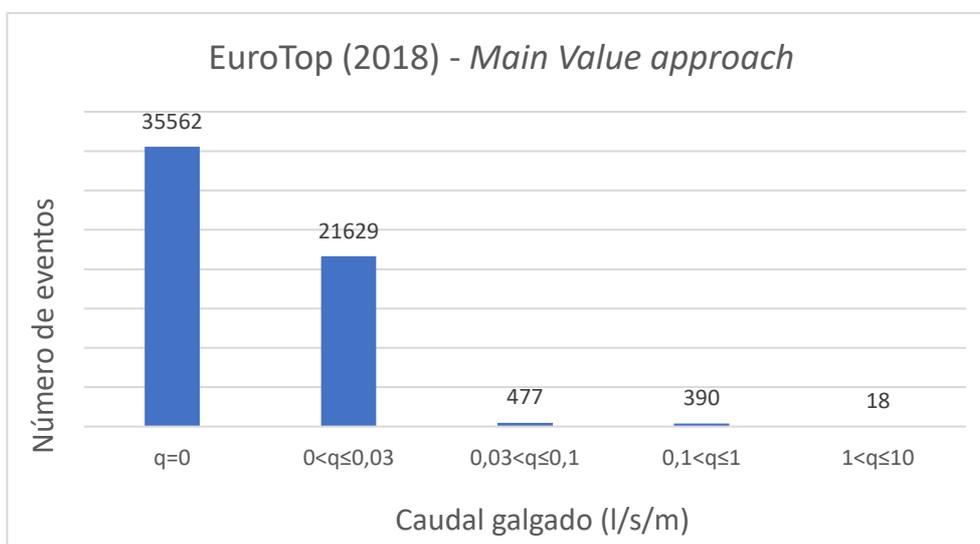


Figura 4.8- Histograma relativo aos caudais de galgamento obtidos segundo o *Main value approach* do Eurotop (2018)

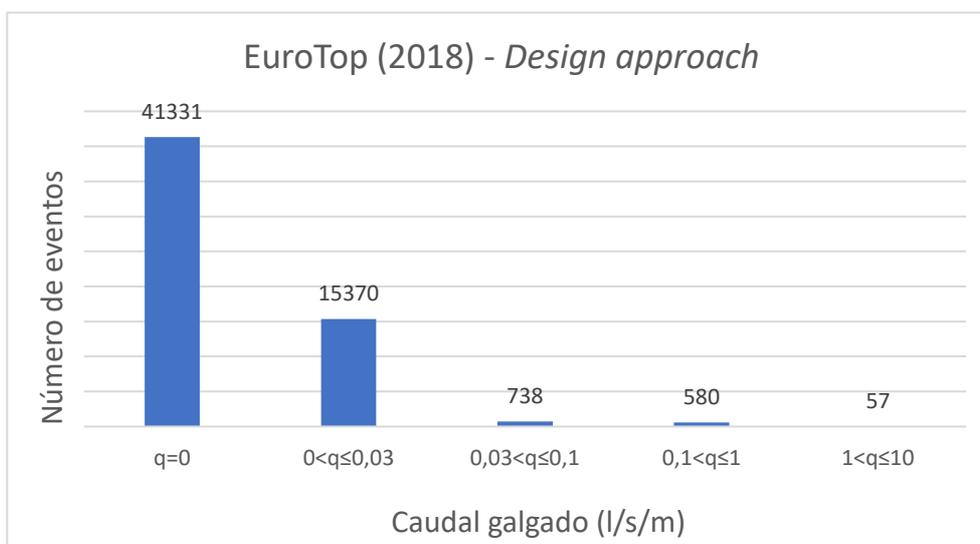


Figura 4.9- Histograma relativo aos caudais de galgamento obtidos segundo o *Design approach* do Eurotop (2018)

Depois de analisadas as frequências dos resultados para cada intervalo de valores, analisaram-se também as características de agitação marítima responsáveis por esses caudais de galgamento. Estas características de agitação são apresentadas nos gráficos e tabelas seguintes, onde é possível observar o seu valor mínimo, médio e máximo.

Na Tabela 4.2 e nas figuras 4.10 e 4.11 encontram-se, respetivamente, os valores e a representação gráfica da altura das ondas responsáveis pelos caudais de galgamento de cada intervalo. Como seria de esperar, quanto maior a altura da onda, maiores os caudais de galgamento. Também se verifica que, à medida que aumenta o caudal do intervalo o valor das alturas de onda mínimo é máximo aproximam-se, isto é, as condições que levam a esses caudais correspondem a alturas de onda dentro de uma pequena gama de valores.

Tabela 4.2- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Eurotop 2018)

q (l/s/m)	Altura de onda significativa (m)					
	Main value approach			Design approach		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
0<q≤0,03	0,49	1,43	4,98	0,46	1,30	4,98
0,03<q≤0,1	1,42	1,89	2,11	1,37	1,80	1,99
0,1<q≤1	1,60	2,15	2,46	1,60	2,06	2,32
1<q≤10	2,42	2,56	2,77	2,17	2,42	2,77

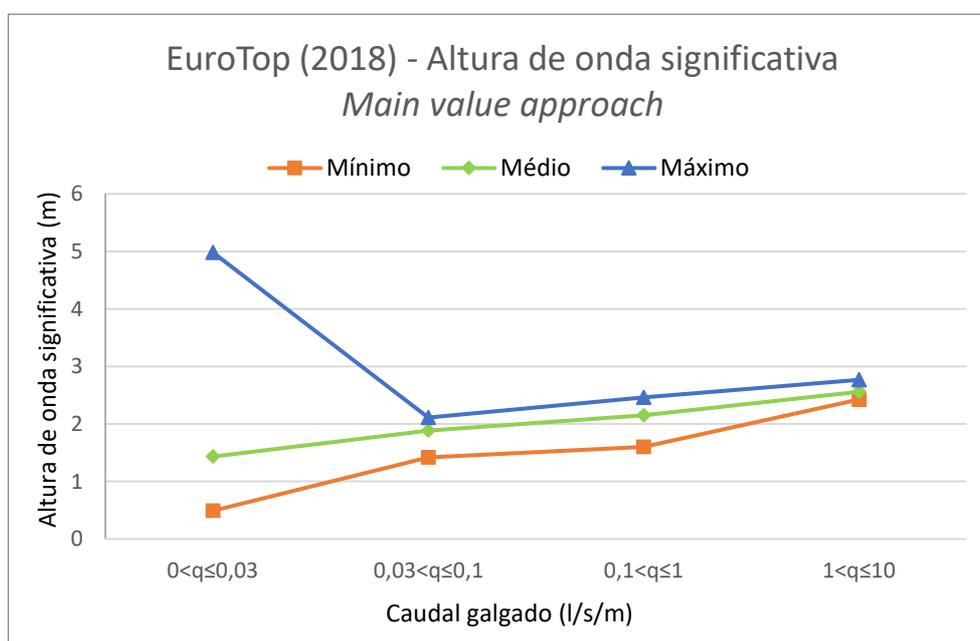


Figura 4.10- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Main value approach - Eurotop 2018)

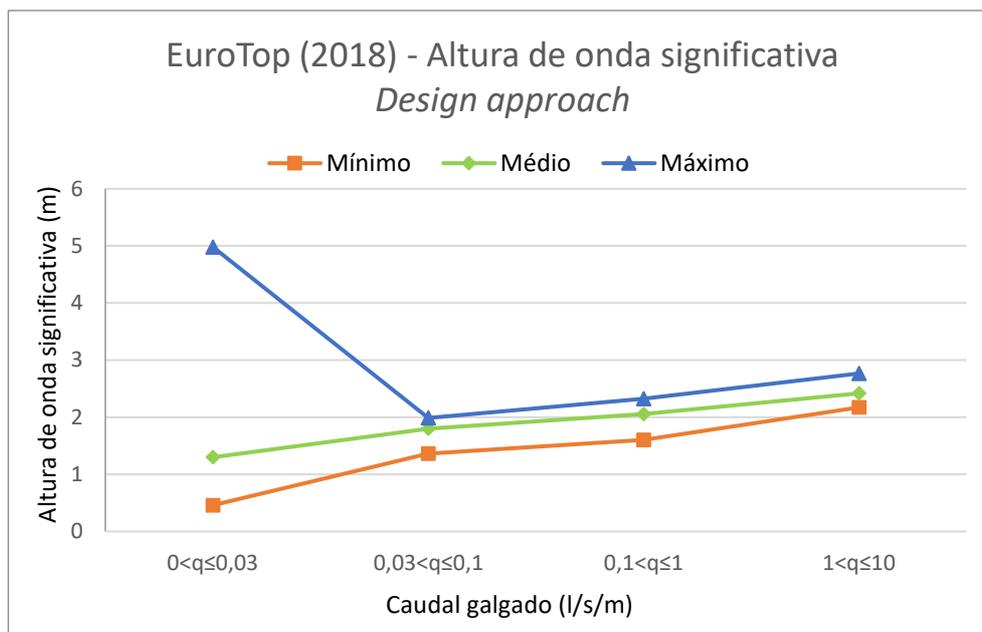


Figura 4.11- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (*Design approach* - Eurotop 2018)

Na Tabela 4.3 é possível observar os valores do período de pico da agitação marítima responsável pelos caudais de galgamento de cada intervalo, nas figuras 4.12 e 4.13 encontra-se a representação gráfica desses valores para o *Main value approach* e para o *Design approach*, respetivamente. Como seria de esperar, verifica-se que o aumento do período médio da onda leva ao aumento do caudal de galgamento e, tal como para as alturas de onda significativas, os períodos de pico que levam a caudais elevados correspondem a valores dentro de uma pequena gama de valores. Por exemplo, para caudais entre 1 l/s/m e 10 l/s/m os períodos de pico variam entre aproximadamente 15 s e 18,3 s.

Tabela 4.3- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Eurotop 2018)

q (l/s/m)	Período de pico (s)					
	<i>Main value approach</i>			<i>Design approach</i>		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
0 < q ≤ 0,03	5,84	10,74	20,31	7,19	11,01	20,31
0,03 < q ≤ 0,1	10,89	13,67	18,31	10,89	13,01	18,31
0,1 < q ≤ 1	13,41	14,22	18,31	12,09	13,99	18,31
1 < q ≤ 10	14,88	15,43	18,31	14,88	15,28	18,31

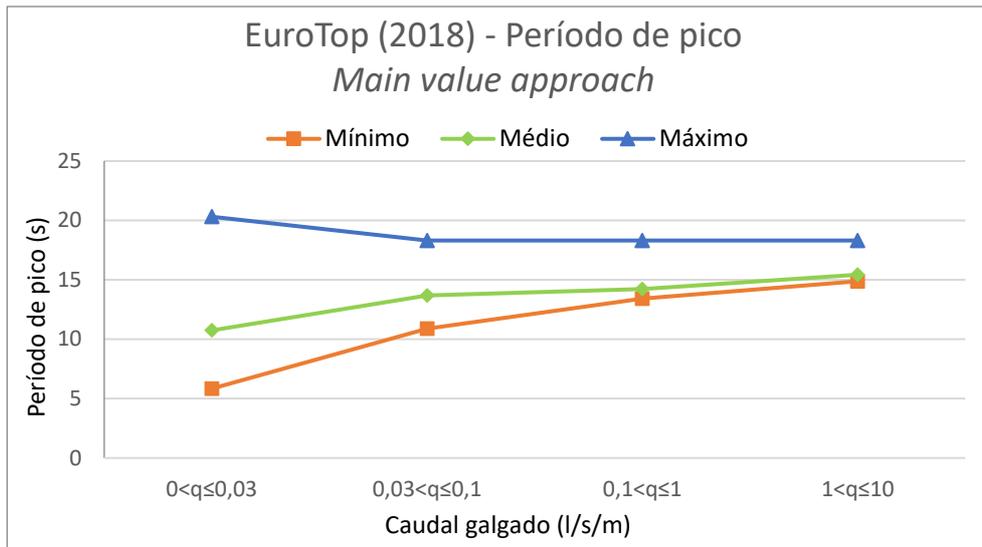


Figura 4.12- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (*Main value approach* - Eurotop 2018)

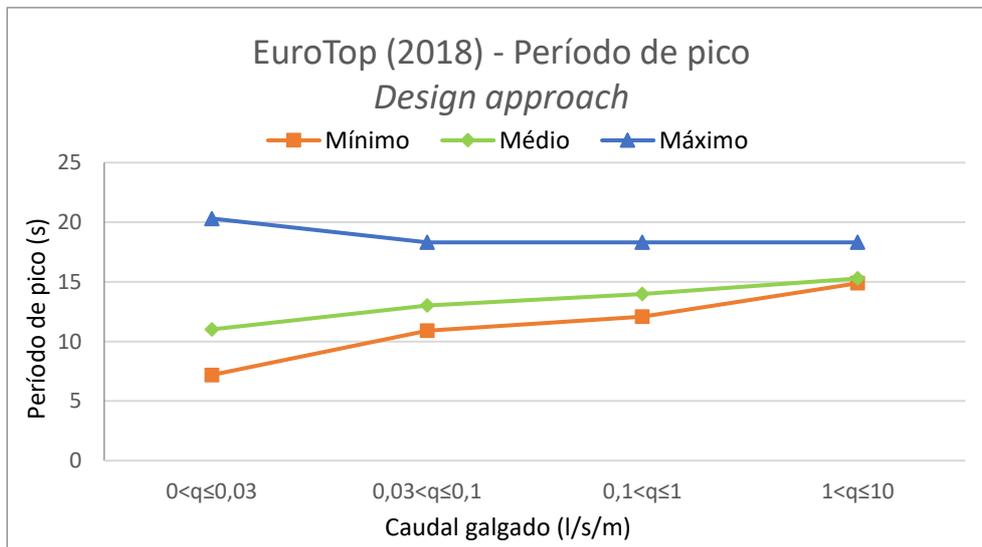


Figura 4.13- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (*Design approach* - Eurotop 2018)

Na Tabela 4.4 e nas figuras 4.14 e 4.15 é possível observar os valores da direção das ondas para cada intervalo de caudais de galgamento. Os valores apresentados encontram-se em graus e têm como referência o norte cartográfico. É possível observar que em todos os intervalos de galgamento os valores médios da direção rondam os 290° embora a direção ortogonal à estrutura e conseqüentemente a mais gravosa, seja 280°. Verifica-se também que quanto maior o caudal de galgamento, menor a variação entre o valor máximo e o mínimo da direção.

Tabela 4.4- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Eurotop 2018)

q (l/s/m)	Direção da onda (°)					
	Main value approach			Design approach		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
0<q≤0,03	219	296	353	221	296	353
0,03<q≤0,1	243	290	329	243	291	325
0,1<q≤1	251	289	331	243	289	331
1<q≤10	269	285	311	261	287	313

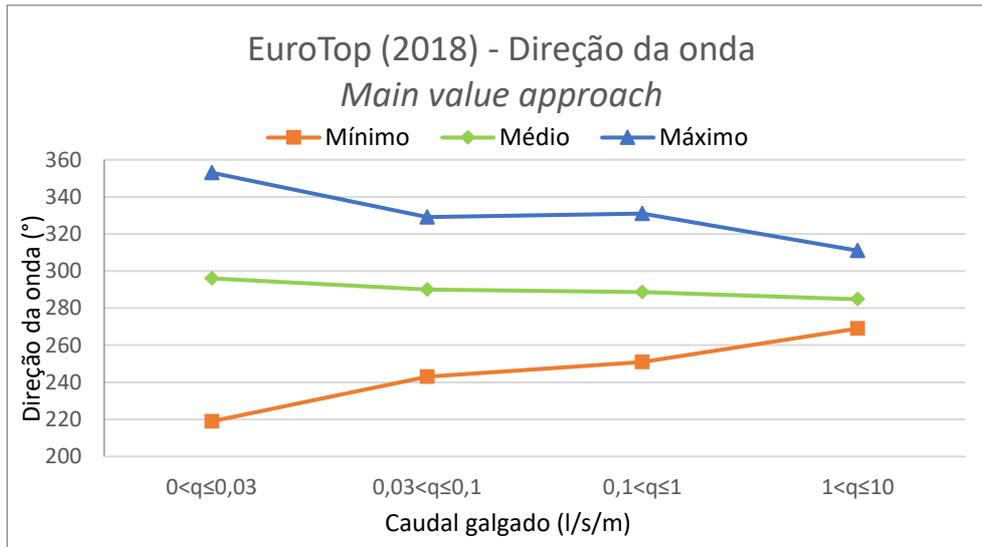


Figura 4.14- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Main value approach - Eurotop 2018)

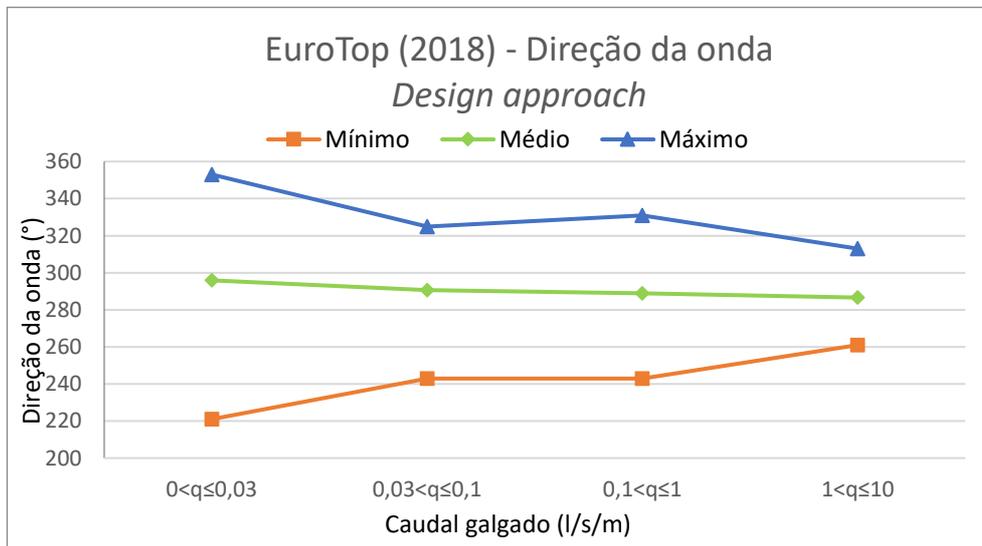


Figura 4.15- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Design approach - Eurotop 2018)

A Tabela 4.5 e os gráficos das figuras 4.16 e 4.17 apresentam os valores do nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento. É possível observar que quanto maior o nível médio do mar, maior a estimativa do caudal de galgamento e que os maiores caudais apresentam uma menor diferença entre os valores máximos e mínimos do nível do mar.

Tabela 4.5- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Eurotop 2018)

q (l/s/m)	Nível do mar (m)					
	Main value approach			Design approach		
	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo
0<q≤0,03	1,64	2,84	3,98	1,64	2,77	3,98
0,03<q≤0,1	2,45	3,09	3,83	2,40	3,10	3,83
0,1<q≤1	2,76	3,21	3,88	2,61	3,14	3,88
1<q≤10	3,22	3,53	3,79	3,20	3,41	3,79

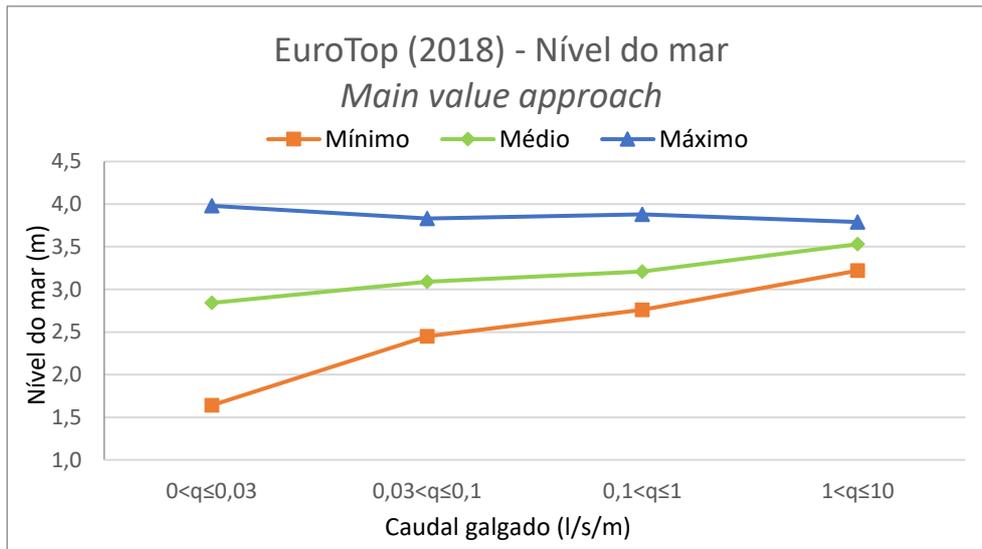


Figura 4.16- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (*Main value approach* - Eurotop 2018)

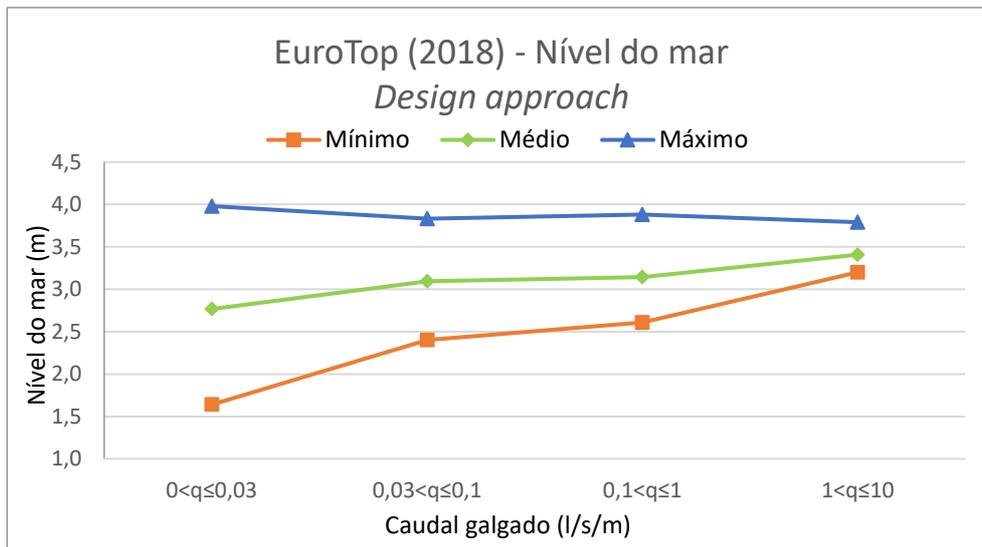


Figura 4.17- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (*Design approach* - Eurotop 2018)

É possível verificar, partindo das tabelas e gráficos anteriormente apresentados, que as condições de agitação marítima no *Design Approach* são sempre menos gravosas que as do *Main Value Approach*. Isto acontece porque, devido ao coeficiente de segurança associado ao

Design Approach, a estimativa do caudal de galgamento é sempre maior, logo, para as mesmas condições de agitação obtêm-se maiores valores do caudal de galgamento. É ainda possível observar que os maiores valores de caudais, entre 1 l/S/m e 10 l/s/m, ocorrem para H_s entre 2,42 m e 2,77 m, T_p entre 14,88 s e 18,31 s, direções de agitação provenientes dos quadrantes oeste e noroeste e níveis de mar entre 3,22 m e 3,79 m.

4.3. NN_Overtopping

Tal como foi explicado no capítulo 2.3.5, a utilização do programa NN_Overtopping implica a introdução de 15 parâmetros para definir a agitação marítima e as características da estrutura de proteção costeira. Estes parâmetros têm que respeitar os intervalos de aplicabilidade exigidos pelo programa, só assim é possível realizar a estimativa do caudal médio galgado.

Dado que, no caso em estudo, o pé do talude da estrutura se encontra a profundidades extremamente baixas e por vezes emerso, alguns parâmetros situam-se fora do intervalo de aplicabilidade. Estes parâmetros são o coroamento da estrutura (R_c), a distância entre o nível do mar e a berma (A_c) e ainda a inclinação do fundo (α).

Devido à baixa profundidade no pé do talude os parâmetros R_c e A_c apresentam, para todos os casos, valores superiores a 6 metros. Como o intervalo de aplicabilidade é entre os 0 e os 5 metros, pode-se concluir que estes parâmetros se encontram fora do intervalo de aplicabilidade.

Como a inclinação da praia no caso de estudo, que corresponde ao parâmetro α do programa, é sempre inferior a 5 graus, isso implica que $\cot(\alpha)$ é sempre superior a 11. Como o intervalo de aplicabilidade é entre 0 e 10, pode-se concluir que este parâmetro também se encontra fora do intervalo de valores admissíveis pelo programa.

Por esse motivo não foi possível estimar o caudal médio de galgamento utilizando o NN_Overtopping.

4.4. Goda (2009)

Para a aplicação da fórmula de Goda é preciso definir vários parâmetros que entram nas fórmulas do galgamento. Nos pontos 4.4.1 a 4.4.4 são apresentados os parâmetros utilizados e os valores considerados. No ponto 4.4.5 apresentam-se os resultados obtidos.

4.4.1. Cota de coroamento (R_c)

As cotas de coroamento utilizadas em Goda (2009) foram calculadas de acordo com o ponto 4.2.7 referente ao Eurotop (2018).

4.4.2. Inclinação do fundo (α)

A inclinação do fundo (α) utilizada nesta abordagem não contempla o conceito de inclinação característica. Assim sendo, foi utilizada a inclinação do perfil da praia junto à estrutura

para todos os casos, independentemente do nível do mar. O valor utilizado para este parâmetro foi 4,67°.

4.4.3. Profundidade no pé do talude (h_t)

A profundidade no pé do talude varia consoante o nível do mar. Como é conhecida a distância entre o pé do talude da estrutura e o zero hidrográfico, para cada caso, h_t é dado pela diferença entre essa distância e o nível do mar. Nos casos em que h_t é negativo significa que o pé do talude se encontra emerso. Este parâmetro toma valores entre -1,38 m e 1,09 m.

4.4.4. Altura de onda no pé do talude ($H_{m0,o}$)

Na abordagem de Goda (2009) é utilizada a altura de onda no pé do talude para estimar o galgamento. Este parâmetro é calculado de acordo com as seguintes fórmulas propostas por Goda:

$$H_{m0,o} = \begin{cases} k_s H_{m0} & \text{se } h/L_0 \geq 0,2 \\ \min\{\beta_0 H_{m0} + \beta_1 h, \beta_{max} H_{m0}, k_s H_{m0}\} & \text{se } h/L_0 < 0,2 \end{cases} \quad (28)$$

onde

$$\beta_0 = 0,028(H_{m0}/L_{m-1,0})^{-0,38} \exp[20 \tan^{1,5} \alpha] \quad (29)$$

$$\beta_1 = 0,052 \exp[4,2 \tan \alpha] \quad (30)$$

$$\beta_{max} = \max\{0,92; 0,32(H_{m0}/L_{m-1,0})^{-0,29} \exp[2,4 \tan \alpha]\} \quad (31)$$

$$k_s = [\tanh(k \cdot h_t) + kh(1 - \tanh^2(k \cdot h_t))]^{-1/2} \quad (32)$$

sendo $k=2\pi/L_{m-1,0}$.

Com este método só é possível calcular a altura de onda no pé do talude nos casos em que este se encontra submerso. Por esse motivo dos 58076 registos de agitação marítima em estudo, apenas foi possível fazer a previsão do galgamento para 20434, o que corresponde aproximadamente a 35% dos casos totais.

Para calcular a altura de onda no pé do talude em todos os casos seria necessário utilizar o programa SWASH.

4.4.5. Resultados obtidos

De forma a facilitar a análise dos resultados obtidos, foram utilizados intervalos de caudais de galgamento, relacionados com os valores admissíveis e as respetivas consequências e danos associados, tal como na aplicação do Eurotop.

Como a proposta de Goda (2009) para a previsão do galgamento só tem em conta a inclinação do talude da estrutura e da praia, os resultados não variam com a escolha do perfil de fundo.

Uma vez que a abordagem segundo Goda (2009) não é aplicável nos casos em que o pé do talude se encontra emerso, dos 58076 registos de agitação marítima em estudo apenas foi possível fazer a previsão do galgamento para 20434, o que corresponde aproximadamente a 35% dos casos totais.

Na Figura 4.18 é possível observar um histograma que representa a frequência dos resultados obtidos em cada intervalo de valores. Era espectável que a maioria dos resultados dos caudais de galgamento obtidos fossem nulos, porque é suposto, em condições de agitação

normais, não ocorrer galgamento. Ao contrário do que era esperado, a maioria dos resultados obtidos situa-se no intervalo de valores compreendido entre os 0 e os 0,03 l/s/m. Uma possível explicação para a obtenção destes resultados é o facto de nesta abordagem apenas estarem a ser analisados os casos em que o pé do talude se encontra submerso, ou seja, os casos com maiores valores do nível do mar, que normalmente são responsáveis por maiores caudais de galgamento.

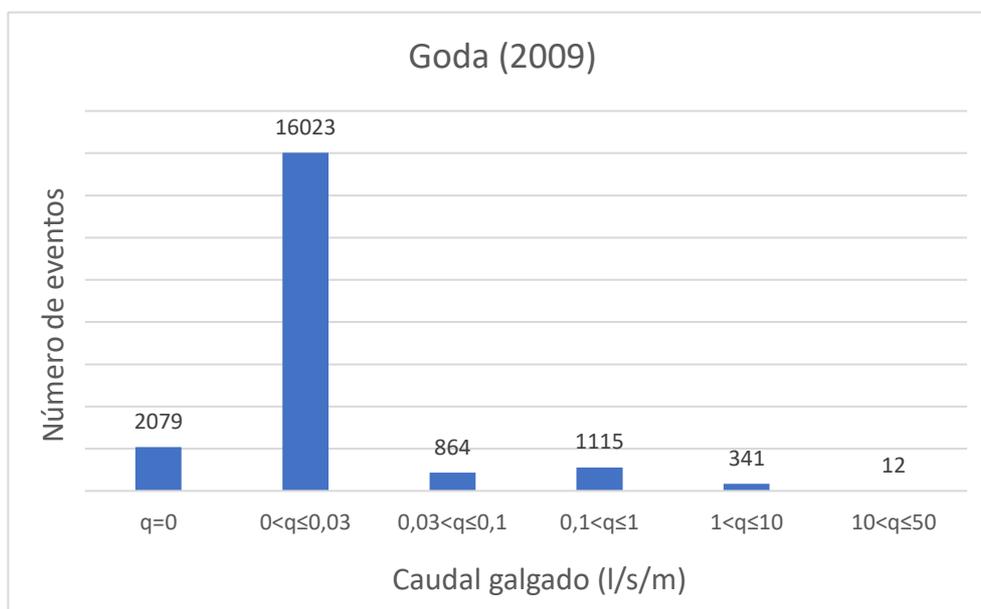


Figura 4.18- Histograma relativo aos caudais de galgamento obtidos segundo Goda (2009)

Nas tabelas 4.6 e 4.7 e nos gráficos das figuras 4.19 e 4.20 é possível observar os valores relativos à altura de onda significativa e período de pico responsável pelos caudais de galgamento de cada intervalo. Como era esperado, verifica-se que para os intervalos com maior valor de caudal galgado a altura de onda significativa e o período de pico tomam valores mais altos. Quanto à direção da onda incidente (Tabela 4.8 e Figura 4.21) verifica-se que nos casos onde ocorre galgamento tem sempre um valor médio de aproximadamente 280°, que é a direção mais gravosa, uma vez que é ortogonal à estrutura. Já os valores relativos ao nível do mar presentes na Tabela 4.9 e Figura 4.22 não vão de encontro com o esperado, uma vez que não se verifica um aumento do galgamento associado ao aumento do nível do mar, isto acontece porque esta fórmula apenas é aplicável nos casos em que o pé do talude se encontra submerso, ou seja, para valores do nível do mar superiores a 2,89 m.

Tabela 4.6- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda 2009)

Altura de onda significativa (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	0,22	1,71	4,60
0,03<q≤0,1	1,75	3,26	4,89
0,1<q≤1	2,21	3,98	5,65
1<q≤10	3,73	5,21	7,11
10<q≤50	5,96	6,36	6,90

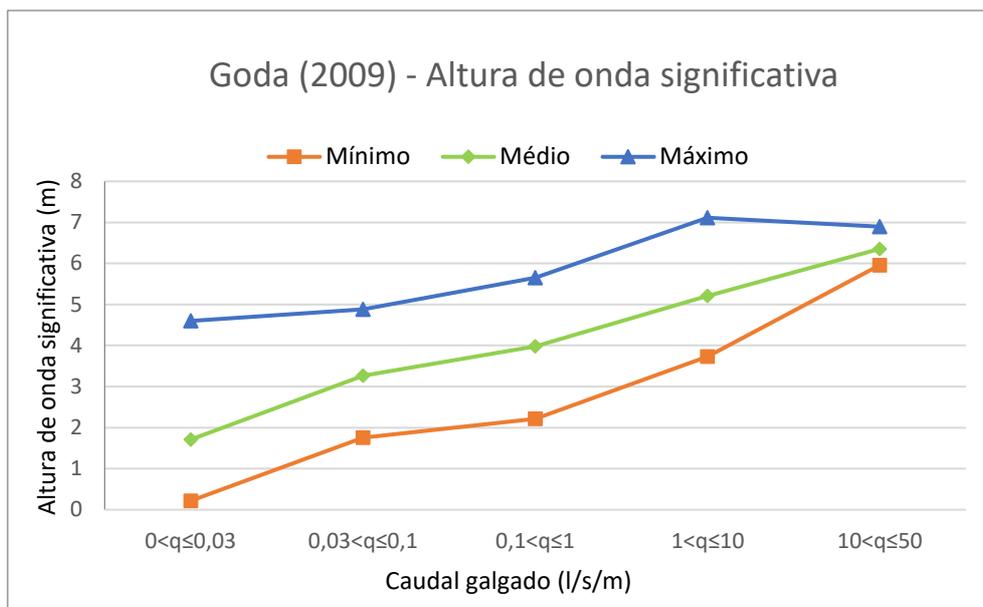


Figura 4.19- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda 2009)

Tabela 4.7- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda 2009)

Período de pico (s)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	3,86	10,69	20,31
$0,03 < q \leq 0,1$	9,82	13,66	18,31
$0,1 < q \leq 1$	10,89	14,60	20,31
$1 < q \leq 10$	12,09	16,04	18,31
$10 < q \leq 50$	16,50	18,33	20,31

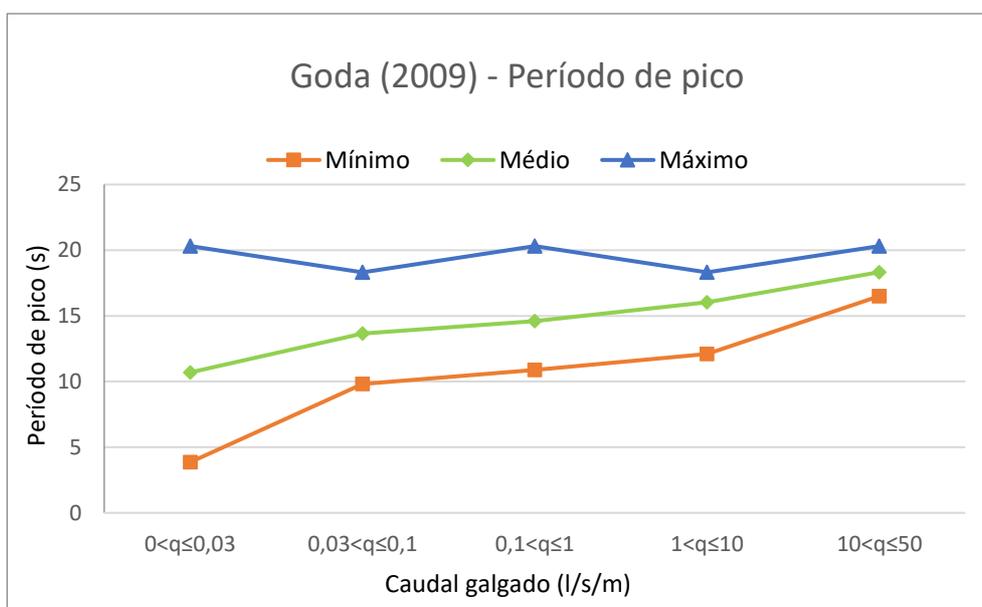


Figura 4.20- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda 2009)

Tabela 4.8- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda 2009)

Direção da onda (°)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	5	295	357
0,03<q≤0,1	249	286	321
0,1<q≤1	251	284	317
1<q≤10	253	285	313
10<q≤50	273	282	293

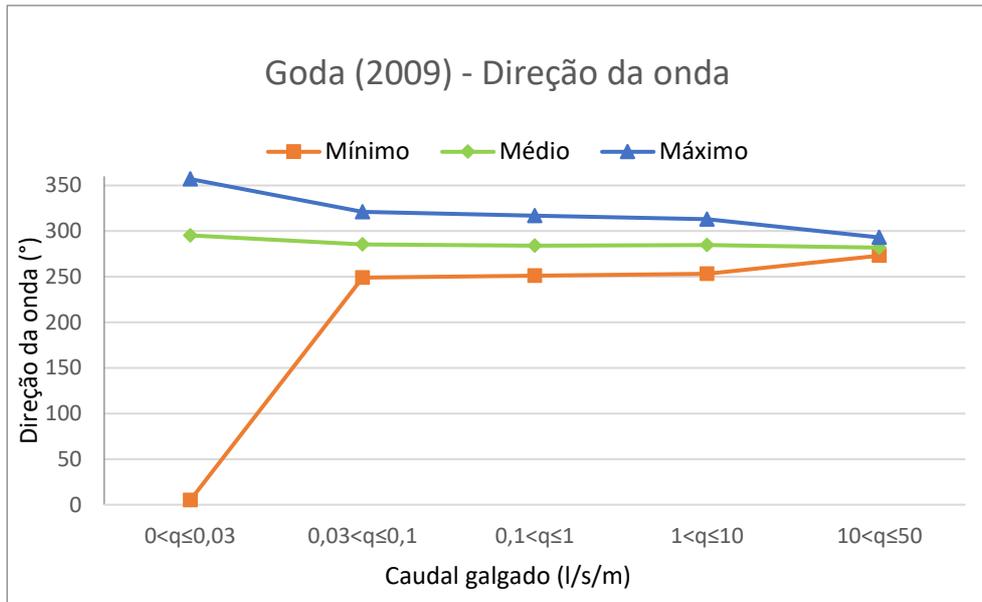


Figura 4.21- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda 2009)

Tabela 4.9- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda 2009)

Nível do mar (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	2,89	3,18	3,87
0,03<q≤0,1	2,89	3,22	3,88
0,1<q≤1	2,89	3,21	3,88
1<q≤10	2,89	3,18	3,98
10<q≤50	2,91	3,18	3,62

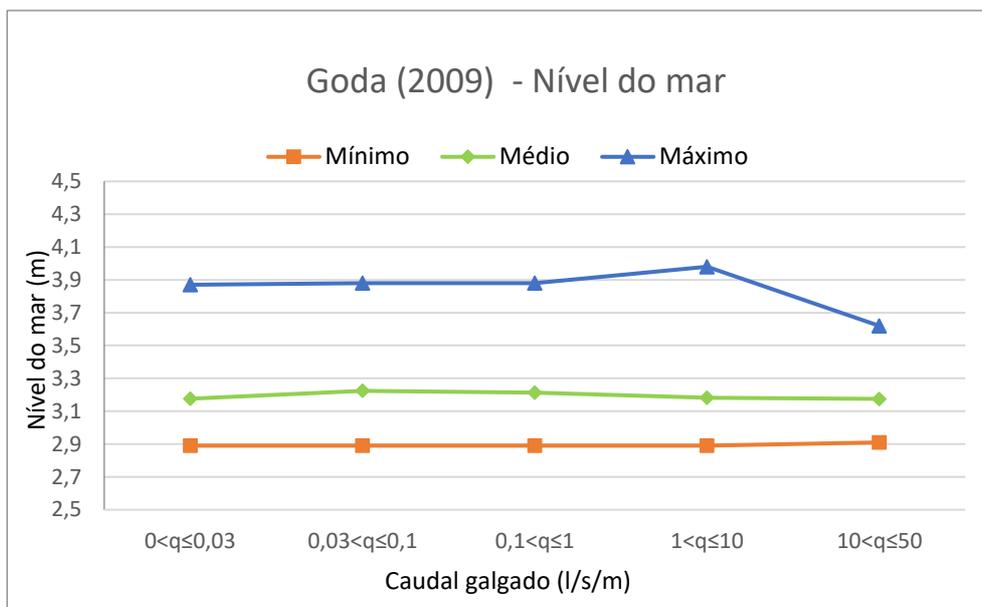


Figura 4.22- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda 2009)

Tendo em conta os gráficos apresentados anteriormente pode-se concluir que à medida que os caudais de galgamento aumentam, os valores de cada parâmetro vão convergindo, existindo uma menor diferença entre os valores máximos e mínimos. É ainda possível observar, que os maiores valores de caudais, entre 10 l/S/m e 50 l/s/m, ocorrem para H_s entre 5,69 m e 6,90 m, T_p entre 16,50 s e 20,31 s, direções de agitação provenientes dos quadrantes oeste e oés-noroeste e níveis de mar entre 2,91 m e 3,62 m.

4.5. Van Gent (1999) modificado por Altomare *et al.* (2016)

Para a aplicação da fórmula de Van Gent (1999) modificado por Altomare *et al.* (2016) é preciso definir vários parâmetros que entram nas fórmulas do galgamento. Nos pontos 4.5.1 a 4.5.5 são apresentados os parâmetros utilizados e os valores considerados. No ponto 4.5.6 apresentam-se os resultados obtidos.

4.5.1. Cota de coroamento (R_c)

As cotas de coroamento (R_c) foram calculadas, para cada caso, de acordo com o ponto 4.2.7 referente ao Eurotop (2018).

4.5.2. Profundidade no pé do talude (h_t)

A profundidade no pé do talude (h_t) calcula-se, para cada caso, de acordo com o ponto 4.4.3 referente a Goda (2009).

4.5.3. Número de Iribarren ($\xi_{m-1.0}$)

O número de Iribarren ($\xi_{m-1.0}$) calcula-se de acordo com o ponto 4.2.6 referente ao Eurotop (2018).

4.5.4. Inclinação do fundo (α)

O autor sugere que se utilize o conceito de inclinação característica sempre que h_t/H_{m0} seja menor que 1,5, assim, para estes casos, calcula-se a inclinação característica do fundo segundo o Eurotop (2018), apresentada no 4.2.1. Nos casos em que h_t/H_{m0} é superior a 1,5 utiliza-se a inclinação do perfil da praia junto à estrutura.

4.5.5. Altura de onda no pé do talude ($H_{m0,o}$)

A altura de onda no pé do talude, $H_{m0,o}$, foi calculada de acordo com o ponto 4.4.4. Com o método utilizado só é possível calcular a altura de onda no pé do talude nos casos em que este se encontra submerso. Por esse motivo dos 58076 registos de agitação marítima em estudo, apenas foi possível fazer a previsão do galgamento para 20434, o que corresponde aproximadamente a 35% dos casos totais.

4.5.6. Resultados obtidos

Mais uma vez, de forma a facilitar a análise dos resultados obtidos, foram utilizados intervalos de caudais de galgamento, relacionados com os valores admissíveis e as respetivas consequências e danos associados. Os intervalos foram os definidos aquando da utilização do Eurotop.

Na Tabela 4.10 e no histograma da Figura 4.23 encontra-se o número de eventos para cada perfil segundo a previsão de galgamento proposta por Van Gent *et al.* (2016). Tal como acontece em Goda (2009), dos 58076 registos de agitação marítima em estudo apenas é possível fazer a previsão do galgamento para 20434, que corresponde a aproximadamente 35% dos casos totais. Isto acontece porque não foi possível calcular a altura de onda no pé do talude nos casos em que o pé do talude se encontra emerso. Ao contrário do que era esperado, a maioria dos resultados obtidos situa-se no intervalo de valores compreendido entre os 0 e os 0,03 l/s/m. Uma possível explicação para a obtenção destes resultados é o facto de nesta abordagem apenas estarem a ser analisados os casos em que o pé do talude se encontra submerso, ou seja, os casos com maiores valores do nível do mar, que normalmente são responsáveis por maiores caudais de galgamento.

Tabela 4.10- Número de eventos ocorridos segundo Van Gent *et al.* (2016)

Perfil	Nº de eventos - Van Gent <i>et al.</i> (2016)			
	1	2	3	4
Total	20434	20434	20434	20434
$q(l/s/m)=0$	3237	3236	3260	13447
$0 < q(l/s/m) \leq 0,03$	16756	16757	16740	6987
$0,03 < q(l/s/m) \leq 0,1$	315	315	310	0
$0,1 < q(l/s/m) \leq 1$	124	124	122	0
$1 < q(l/s/m) \leq 10$	2	2	2	0

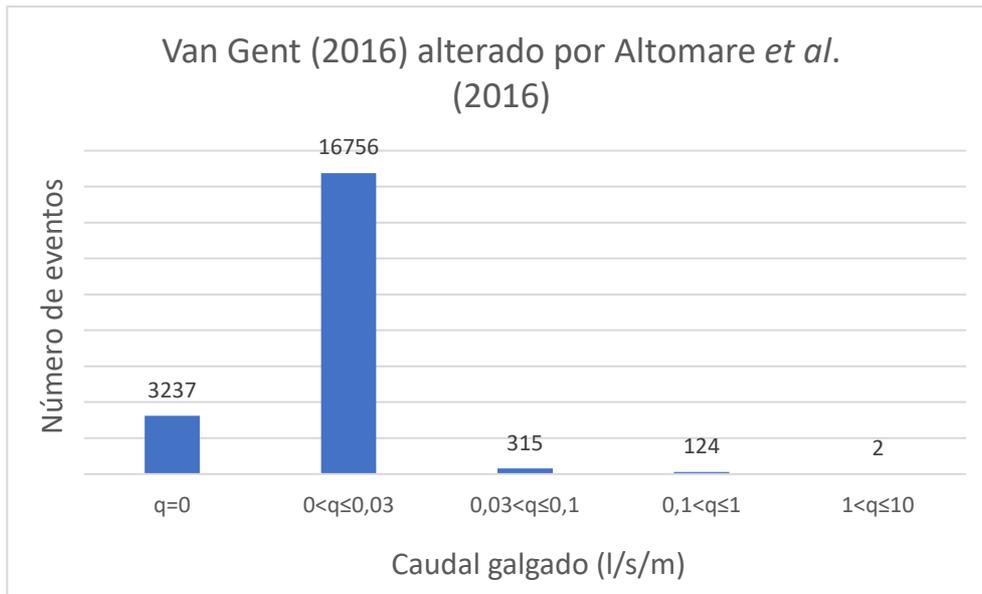


Figura 4.23- Histograma relativo aos caudais de galgamento obtidos segundo Van Gent *et al.* (2016)

Os gráficos e as tabelas que se seguem apresentam os valores das condições de agitação marítima correspondentes aos resultados obtidos em cada intervalo de valores. Observa-se nas tabelas 4.11 e 4.12 e nas figuras 4.24 e 4.25 que tanto a altura de onda significativa como o período de pico aumentam à medida que o caudal de galgamento aumenta. Em relação à direção da onda incidente verifica-se, na Tabela 4.13 e na Figura 4.26, que nos casos onde ocorre galgamento, este parâmetro toma valores na ordem dos 280° , que é a direção ortogonal à estrutura de proteção costeira. Por fim, é possível observar na Tabela 4.14 e na Figura 4.27 que nos casos onde se verificam caudais de galgamento maiores, o nível do mar também é mais alto.

Tabela 4.11- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* 2016)

Altura de onda significativa (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	0,15	1,90	7,11
0,03<q≤0,1	1,05	2,10	2,71
0,1<q≤1	1,39	2,26	2,78
1<q≤10	2,61	2,66	2,71

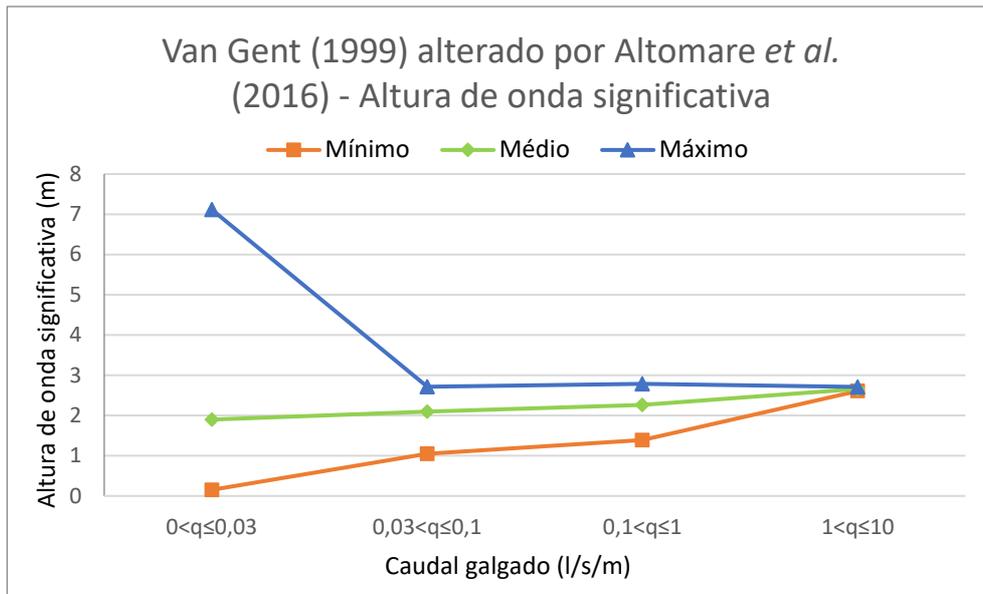


Figura 4.24- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* 2016)

Tabela 4.12- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* 2016)

Período de pico (s)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	3,86	11,03	20,31
$0,03 < q \leq 0,1$	9,82	13,07	18,31
$0,1 < q \leq 1$	10,89	13,95	18,31
$1 < q \leq 10$	14,88	16,60	18,31

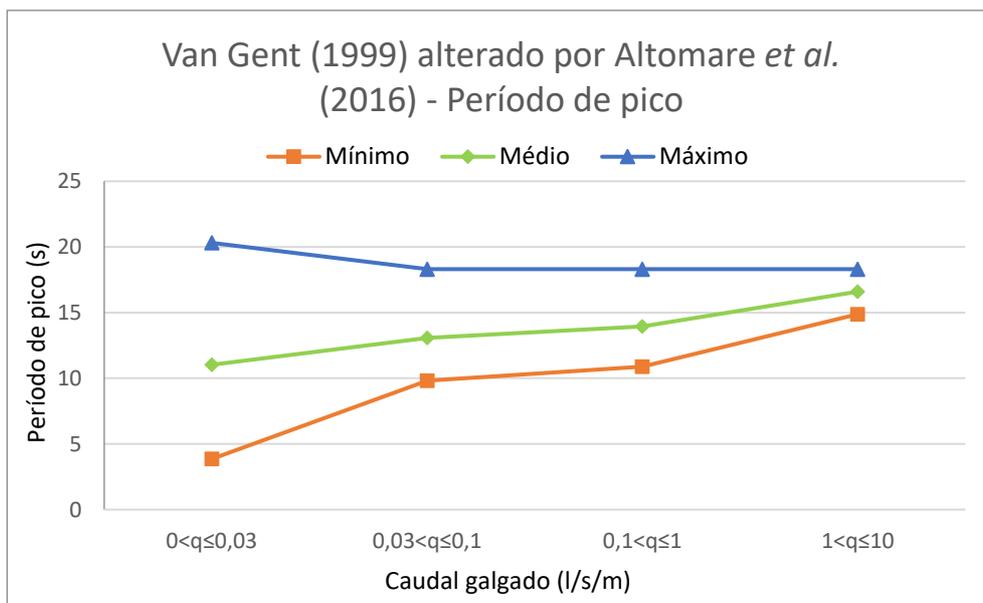


Figura 4.25- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* 2016)

Tabela 4.13- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* 2016)

Direção da onda (°)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	1	295	357
0,03<q≤0,1	243	289	327
0,1<q≤1	249	286	319
1<q≤10	281	290	299

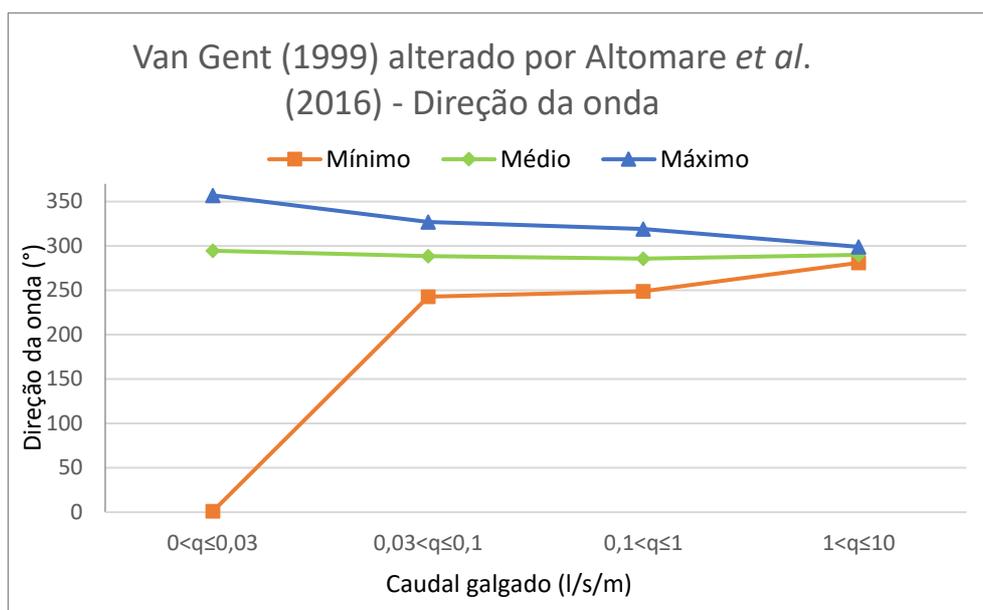


Figura 4.26- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* 2016)

Tabela 4.14- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* 2016)

Nível do mar (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	2,89	3,19	3,98
0,03<q≤0,1	3,16	3,50	3,87
0,1<q≤1	3,22	3,61	3,88
1<q≤10	3,62	3,71	3,79

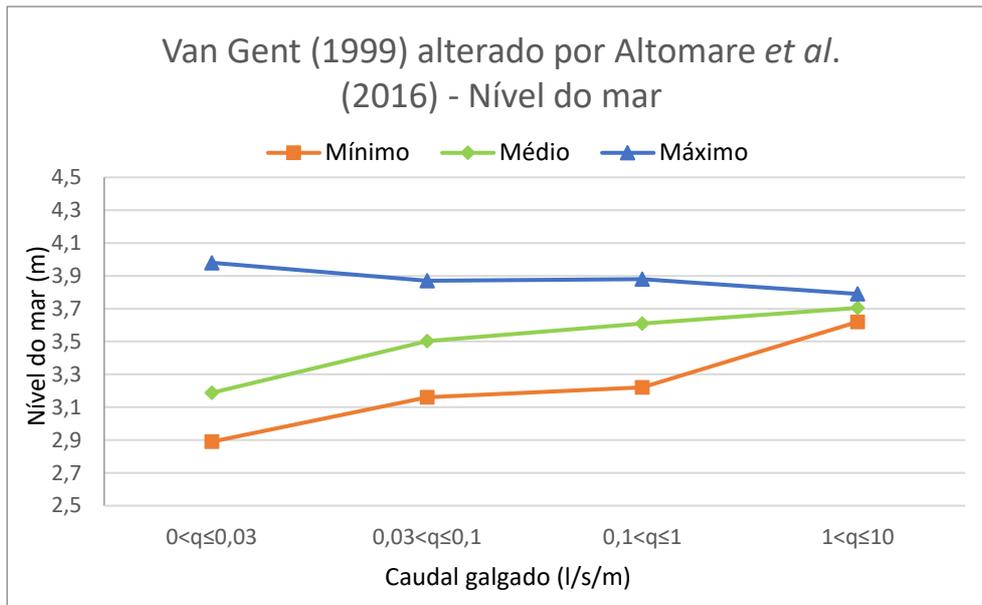


Figura 4.27- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* 2016)

Tendo em conta os gráficos apresentados anteriormente pode-se concluir que à medida que os caudais de galgamento aumentam, os valores de cada parâmetro vão convergindo, existindo uma menor diferença entre os valores máximos e mínimos. É ainda possível observar, que os maiores valores de caudais, entre 1 l/S/m e 10 l/s/m, ocorrem para Hs entre 2,61 m e 2,71 m, Tp entre 14,88 s e 18,31 s, direções de agitação provenientes maioritariamente do quadrante oés-noroeste e níveis de mar entre 3,62 m e 3,79 m.

4.6. Altomare *et al.* (2020)

Para a aplicação da fórmula de Altomare *et al.* (2020) é necessário definir vários parâmetros que entram nas fórmulas do galgamento. Nos pontos 4.6.1 a 4.6.2 são apresentados os parâmetros utilizados e os valores considerados. No ponto 4.6.3 apresentam-se os resultados obtidos pela fórmula de Goda (2009) modificada por Altomare *et al.* (2020) e no ponto 4.6.4 apresentam-se os resultados obtidos segundo Van Gent *et al.* (2016) modificado por Altomare *et al.* (2020).

4.6.1. Função de dispersão direcional (σ)

Na proposta de Altomare *et al.* (2020), a função de dispersão direcional (σ) é calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{s + 1}} \quad (33)$$

onde s representa a declividade da onda incidente que é dado por:

$$s = \frac{H_{m-1.0}}{L_{m-1.0}} \quad (34)$$

4.6.2. Profundidade no pé do talude (ht)

A profundidade no pé do talude (h_t) calcula-se de acordo com o ponto 4.4.3 referente a Goda (2009).

4.6.3. Resultados obtidos - Goda (2009) modificado por Altomare *et al.* (2020)

O histograma da Figura 4.28 representa a frequência dos resultados obtidos, em cada intervalo de valores, segundo a abordagem proposta por Goda (2009) com o coeficiente de redução proposto por Altomare *et al.* (2020). É possível observar que a maior parte dos resultados obtidos pertence ao intervalo compreendido entre os 0 l/s/m e os 0,03 l/s/m, uma explicação para estes resultados é o facto de apenas estarem a ser analisados os casos onde o pé do talude se encontra submerso, isto é, quando o nível do mar toma valores maiores. Uma vez que a abordagem segundo Goda (2009) não é aplicável nos casos em que o pé do talude se encontra emerso, dos 58076 registos de agitação marítima em estudo apenas foi possível fazer a previsão do galgamento para 20434, o que corresponde aproximadamente a 35% dos casos totais. Como a proposta de Goda (2009) não tem em conta o conceito de inclinação característica, a previsão de galgamento não varia com o perfil escolhido.

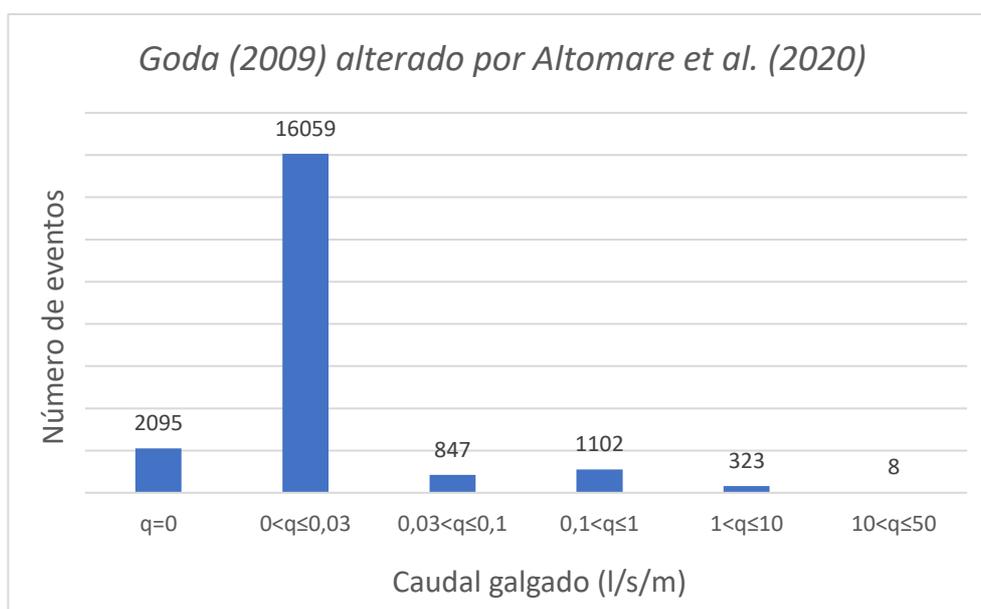


Figura 4.28- Histograma relativo aos caudais de galgamento obtidos segundo Goda (2009) alterado por Altomare *et al.* (2020)

As tabelas e figuras que se seguem apresentam os valores da agitação marítima responsável pelos caudais de galgamento de cada intervalo. Como era esperado, condições de agitação mais gravosas originam maiores caudais de galgamento, isto acontece com a altura de onda significativa (Tabela 4.15 e Figura 4.29), período de pico (Tabela 4.16 e Figura 4.30) e nível do mar (Tabela 4.17 e Figura 4.31). Em relação à direção da onda incidente, verifica-se que nos casos em que ocorre galgamento, este parâmetro toma valores em torno dos 280° (direção ortogonal à estrutura de proteção costeira). É possível observar que em todos os

parâmetros os valores convergem à medida que os caudais de galgamento aumentam. Isto só não é tão evidente em relação ao nível do mar, uma vez que esta abordagem só é aplicável para um nível do mar superior a 2,89 m, altura em que o pé do talude fica submerso.

Tabela 4.15- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda (2009) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Altura de onda significativa (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	0,22	1,72	4,17
0,03<q≤0,1	1,75	3,28	4,89
0,1<q≤1	2,21	4,01	5,65
1<q≤10	3,73	5,26	7,11
10<q≤50	5,99	6,45	6,90

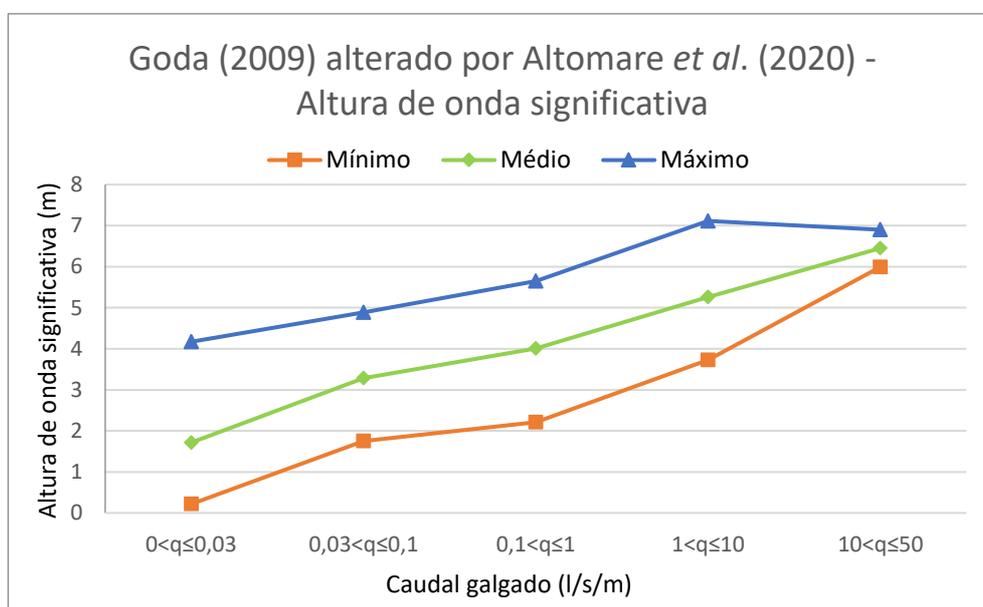


Figura 4.29- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda (2009) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Tabela 4.16- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda (2009) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Período de pico (s)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	3,86	10,70	20,31
0,03<q≤0,1	9,82	13,70	18,31
0,1<q≤1	10,89	14,64	20,31
1<q≤10	12,09	16,10	18,31
10<q≤50	16,50	18,33	20,31

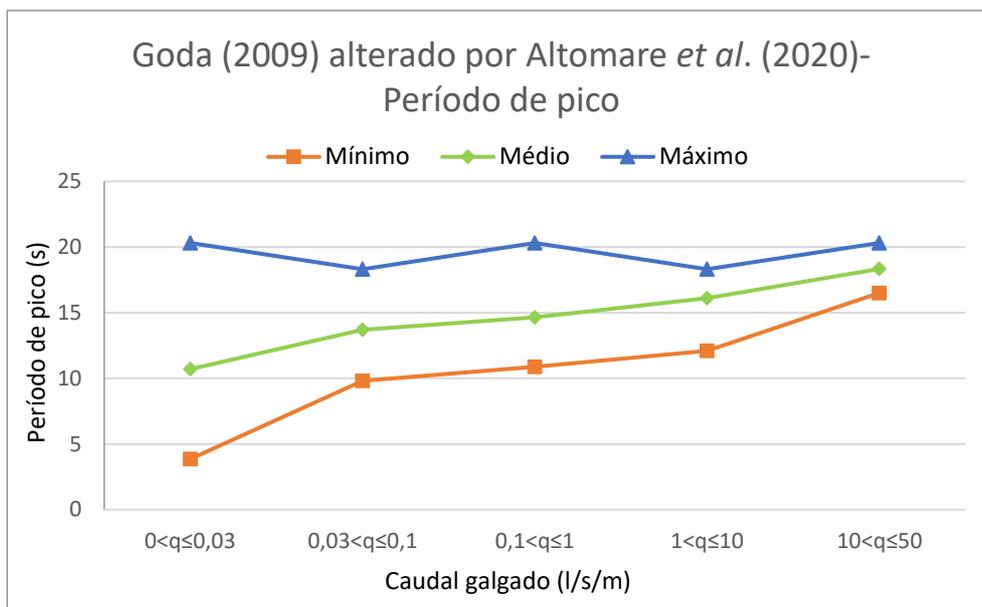


Figura 4.30- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda (2009) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Tabela 4.17- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda (2009) alterado po Altomare *et al.* (2020))

Direção da onda (°)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0 < q ≤ 0,03	5	295	357
0,03 < q ≤ 0,1	249	285	321
0,1 < q ≤ 1	251	284	317
1 < q ≤ 10	257	285	311
10 < q ≤ 50	273	279	293

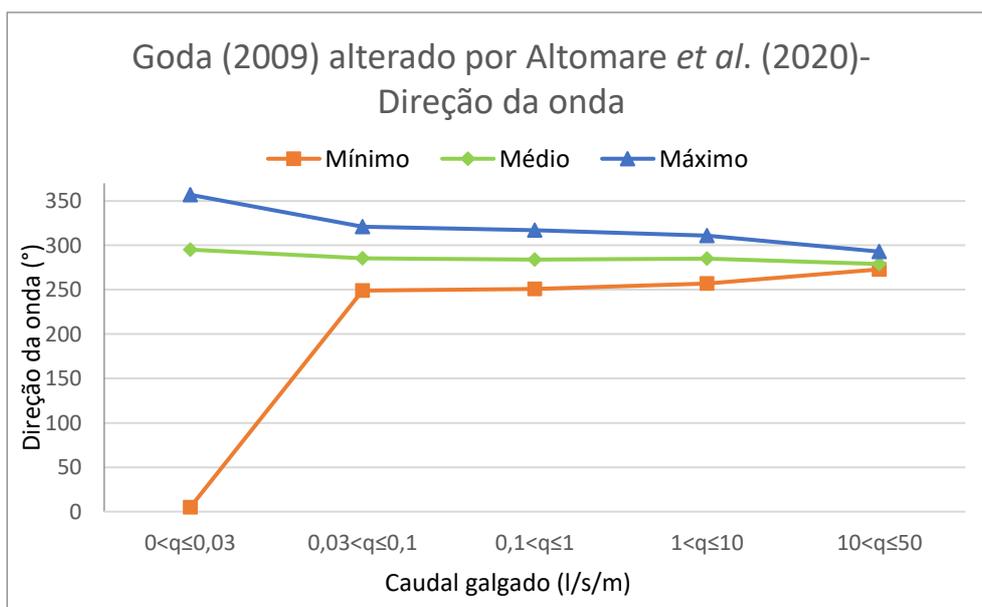


Figura 4.31- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda (2009) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Tabela 4.18- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda (2009) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Nível do mar (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	2,89	3,18	3,87
0,03<q≤0,1	2,89	3,23	3,88
0,1<q≤1	2,89	3,21	3,88
1<q≤10	2,89	3,18	3,98
10<q≤50	2,91	3,15	3,62

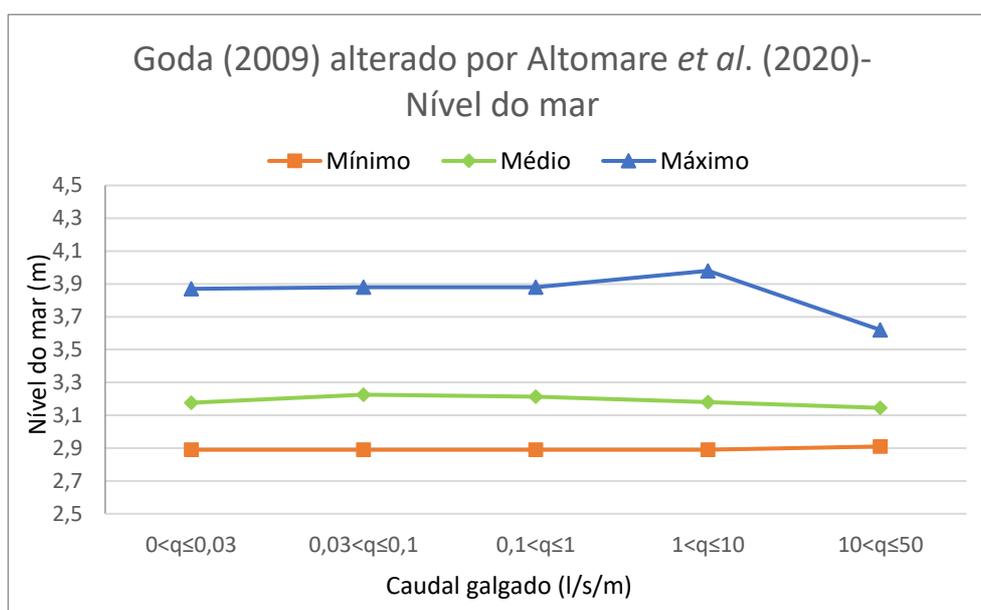


Figura 4.32- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Goda (2009) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Tendo em conta os gráficos e tabelas anteriormente apresentados verifica-se que os maiores valores de caudais, entre 10 l/S/m e 50 l/s/m, ocorrem para H_s entre 5,99 m e 6,90 m, T_p entre 16,50 s e 20,31 s, direções de agitação provenientes dos quadrantes oeste e oés-noroeste e níveis de mar entre 2,91 m e 3,62 m.

4.6.4. Resultados obtidos - Van Gent *et al.* (2016) modificado por Altomare *et al.* (2020)

A Tabela 4.19 apresenta o número de eventos ocorridos para cada um dos perfis em estudo. O histograma da Figura 4.24 representa a frequência dos resultados obtidos, em cada intervalo de valores, segundo a abordagem proposta por Van Gent *et al.* (2016) com o coeficiente de redução proposto por Altomare *et al.* (2020) para o perfil base (perfil 1).

Partindo das tabelas 4.20 e 4.21 e das figuras 4.34 e 4.35 conclui-se que tanto a altura de onda significativa como o período de pico aumentam à medida que o caudal de galgamento aumenta. Em relação à direção da onda incidente verifica-se, na Tabela 4.22 e na Figura 4.36, que nos casos onde ocorre galgamento, este parâmetro toma valores na ordem dos 280°, que

é a direção ortogonal à estrutura de proteção costeira. Por fim, é possível observar na Tabela 4.23 e na Figura 4.37 que nos casos onde se verificam caudais de galgamento maiores, o nível do mar também é mais alto. É de salientar que à medida que os caudais de galgamento aumentam, os valores de cada parâmetro vão convergindo, diminuindo a diferença entre o mínimo e o máximo.

Tabela 4.19- Número de eventos ocorridos segundo Van Gent *et al.* (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020)

Perfil	Nº de eventos - Van Gent <i>et al.</i> (2016) alterado por Altomare <i>et al.</i> (2020)			
	1	2	3	4
Total	20434	20434	20434	20434
$q(l/s/m)=0$	2502	2502	2520	12761
$0 < q(l/s/m) \leq 0,03$	17509	17509	17498	7673
$0,03 < q(l/s/m) \leq 0,1$	316	316	311	0
$0,1 < q(l/s/m) \leq 1$	106	106	104	0
$1 < q(l/s/m) \leq 10$	1	1	1	0

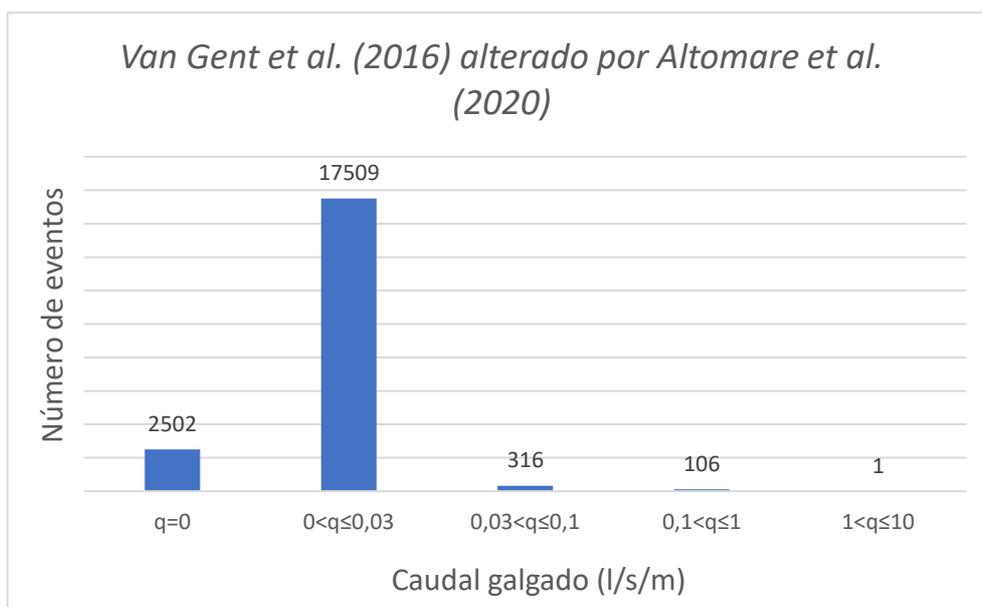


Figura 4.33- Histograma relativo aos caudais de galgamento obtidos segundo Van Gent *et al.* (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020)

Tabela 4.20- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Altura de onda significativa (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	0,15	1,90	7,11
$0,03 < q \leq 0,1$	1,05	2,13	2,72
$0,1 < q \leq 1$	1,26	2,28	2,78
$1 < q \leq 10$	2,71	2,71	2,71

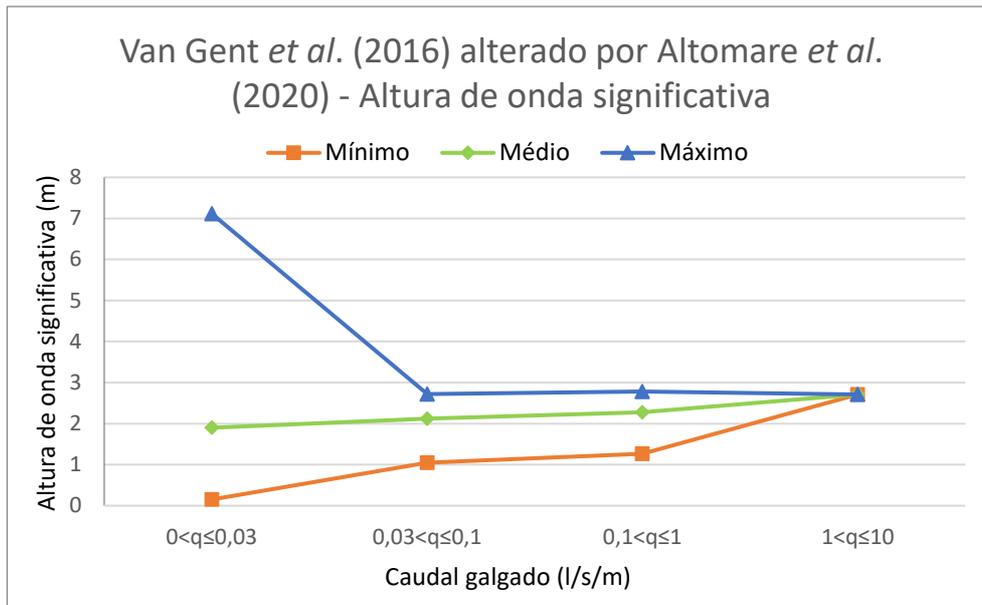


Figura 4.34- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Tabela 4.21- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Período de pico (s)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	3,86	11,00	20,31
$0,03 < q \leq 0,1$	9,82	13,23	18,31
$0,1 < q \leq 1$	12,09	14,39	18,31
$1 < q \leq 10$	18,31	18,31	18,31

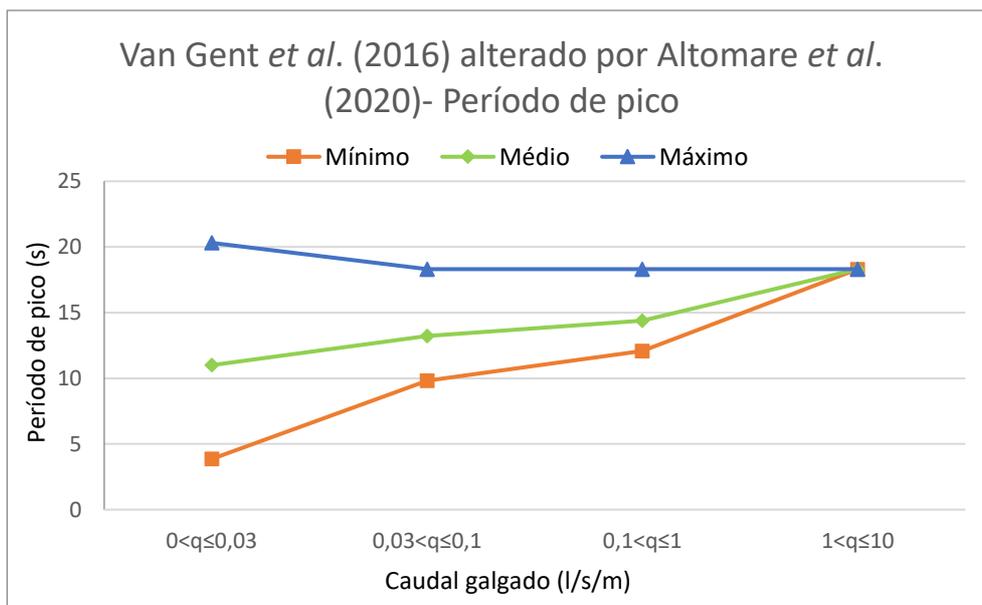


Figura 4.35- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Tabela 4.22- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Direção da onda (°)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	1	295	357
0,03<q≤0,1	243	289	331
0,1<q≤1	249	286	319
1<q≤10	299	299	299

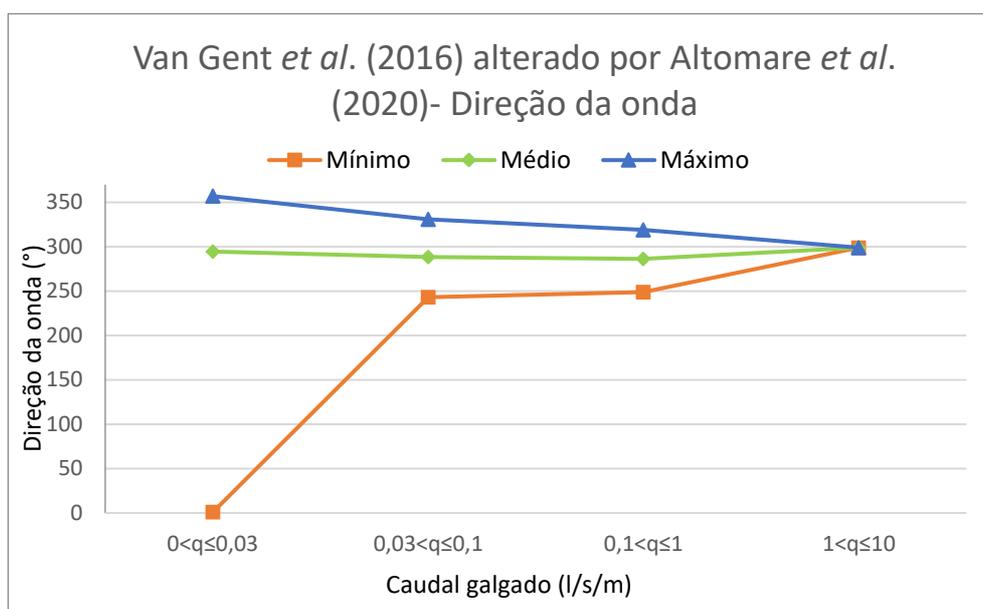


Figura 4.36- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent *et al.* (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Tabela 4.23- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Nível do mar (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
0<q≤0,03	2,89	3,18	3,98
0,03<q≤0,1	3,07	3,49	3,87
0,1<q≤1	3,21	3,59	3,88
1<q≤10	3,62	3,62	3,62

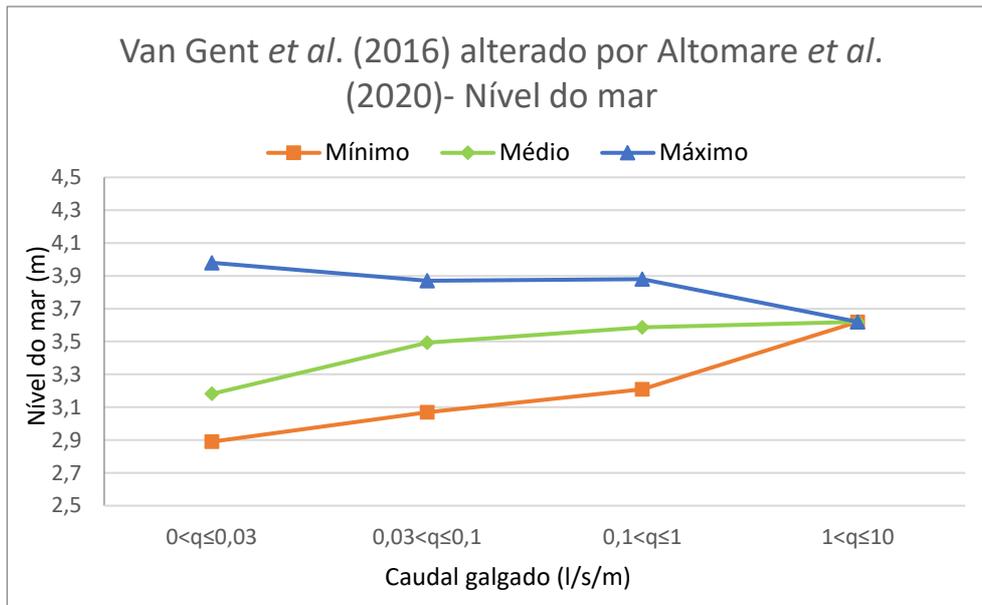


Figura 4.37- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Van Gent (2016) alterado por Altomare *et al.* (2020))

Tendo em conta os gráficos e tabelas anteriormente apresentados verifica-se que o maior valor de caudal, o único situado no intervalo compreendido entre 1 l/S/m e 10 l/s/m, ocorre para um Hs de 2,71 m, Tp de 18,31 s, direção de agitação proveniente do quadrante noroeste e nível de mar igual a 3,62 m.

4.7. Mase *et al.* (2013)

Para aplicar a fórmula de Mase *et al.* (2020) é necessário definir a profundidade onde ocorre a rebentação (h_b). No ponto 4.7.1 encontra-se a explicação de como este parâmetro é calculado. Nos pontos 4.7.2 e 4.7.3 são apresentados os resultados obtidos pela fórmula de Mase com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase e com $h_b=H_{m0}/0,6$, respetivamente.

4.7.1. Profundidade onde ocorre a rebentação (h_b)

A profundidade onde ocorre a rebentação, h_b , foi calculada tendo em conta duas abordagens distintas.

Uma proposta por Kirby e Mase em 1993 (M. Yuhi *et al.* 2021), que é sugerida pelos autores para ser usada na sua fórmula, dada por:

$$\frac{h_b}{H_{m0}} = a_0 + a_1 \cdot \exp \left[- \left(\frac{\ln \{ (H'_0/L_0)/a_2 \}}{a_3} \right)^2 \right] \quad (35)$$

$$a_0 = 30.2470 - 27.3440 \cdot \exp \left[- \left\{ \frac{\ln(22.9130 \cdot \tan \alpha)}{5.4509} \right\}^2 \right] \quad (36)$$

$$a_1 = -9.9467 + 8.9213 \cdot \exp \left[- \left\{ \frac{\ln(29.3880 \cdot \tan \alpha)}{3.1264} \right\}^2 \right] \quad (37)$$

$$a_2 = 0.0302 - 0.0023 \cdot \exp \left[- \left\{ \frac{\ln(25.9160 \cdot \tan \alpha)}{1.7065} \right\}^2 \right] \quad (38)$$

$$a_3 = 6.1291 - 3.5001 \cdot \exp \left[- \left\{ \frac{\ln(36.3660 \cdot \tan \alpha)}{1.3457} \right\}^2 \right] \quad (39)$$

Dada a complexidade desta fórmula, foi ainda utilizada uma fórmula simples, considerando $h_b/H_{m0}=0,6$, visto como um valor médio e proposto por Goda, 2010.

4.7.2. Resultados obtidos- Mase *et al.* (2013) com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase

A Tabela 4.24 apresenta o número de eventos ocorridos para cada perfil segundo a abordagem proposta por Mase *et al.* (2013) com h_b/H_{m0} calculado segundo Kirby e Mase. Verifica-se que, para todos os perfis em análise, 99% dos resultados obtidos correspondem a um caudal nulo. Na Figura 4.38 é possível observar um histograma que representa a frequência dos resultados obtidos em cada intervalo de valores para o perfil base (perfil 1).

Tabela 4.24- Número de eventos ocorridos segundo Mase *et al.* (2013) com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase

Perfil	Nº de eventos - Mase <i>et al.</i> (2013) com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase				
	1	2	3	4	Original
Total	58076	58076	58076	58076	58076
$q(l/s/m)=0$	58021	58033	58021	58076	58021
$0 < q(l/s/m) \leq 0,03$	2	4	2	0	2
$0,03 < q(l/s/m) \leq 0,1$	12	5	12	0	12
$0,1 < q(l/s/m) \leq 1$	40	33	40	0	40
$1 < q(l/s/m) \leq 10$	1	1	1	0	1

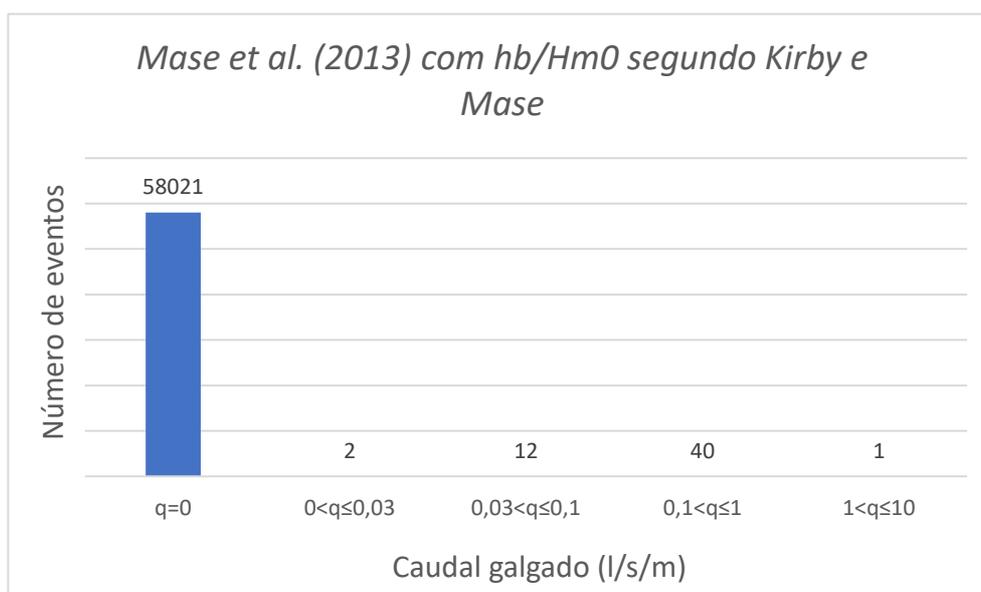


Figura 4.38- Histograma relativo aos caudais de galgamento obtidos segundo Mase *et al.* (2013) com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase

Na Tabela 4.25 e no gráfico da Figura 4.39 é possível observar os valores relativos à altura de onda significativa para cada intervalo de valores. Contrariamente ao que era esperado, não se verifica um aumento da altura de onda com o aumento do caudal de galgamento. No entanto, nestes casos o período de pico (Tabela 4.26 e Figura 4.40) e o nível do mar (Tabela 4.28 e Figura 4.42) são favoráveis à ocorrência de galgamento. Na Tabela 4.27 e no gráfico da Figura 4.41 é possível observar que a direção da onda incidente nos casos onde ocorre galgamento anda em torno dos 280° , ou seja, perpendicular à estrutura de proteção costeira.

Tabela 4.25- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com hb/Hm0 segundo Kirby e Mase)

Altura de onda significativa (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	2,29	3,15	4,60
$0,03 < q \leq 0,1$	2,16	2,43	2,70
$0,1 < q \leq 1$	2,13	2,51	3,35
$1 < q \leq 10$	2,61	2,61	2,61

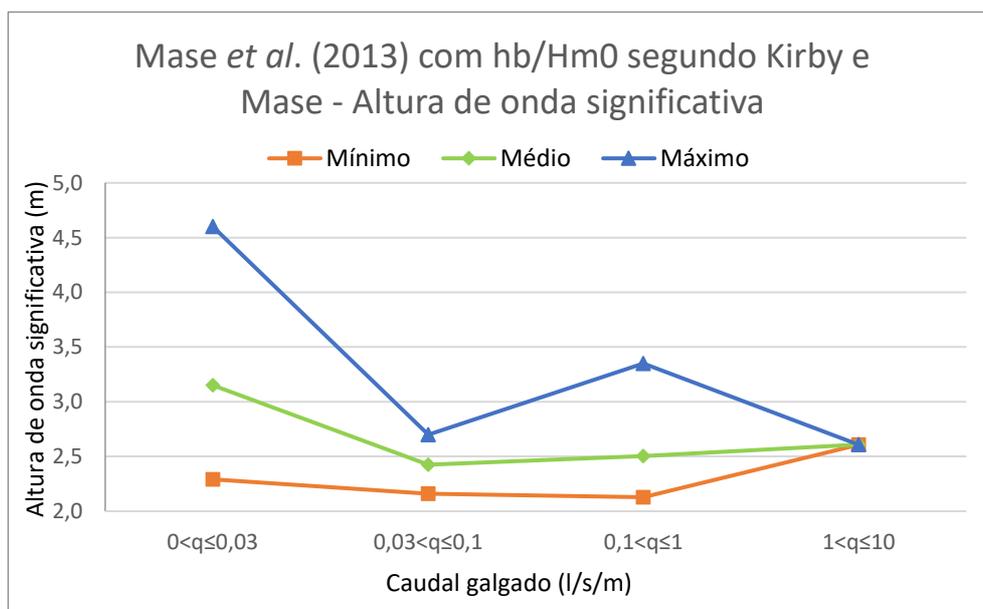


Figura 4.39- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com hb/Hm0 segundo Kirby e Mase)

Tabela 4.26- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com hb/Hm0 segundo Kirby e Mase)

Período de pico (s)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	7,98	12,09	14,88
$0,03 < q \leq 0,1$	12,09	12,65	14,88
$0,1 < q \leq 1$	8,85	13,10	16,50
$1 < q \leq 10$	14,88	14,88	14,88

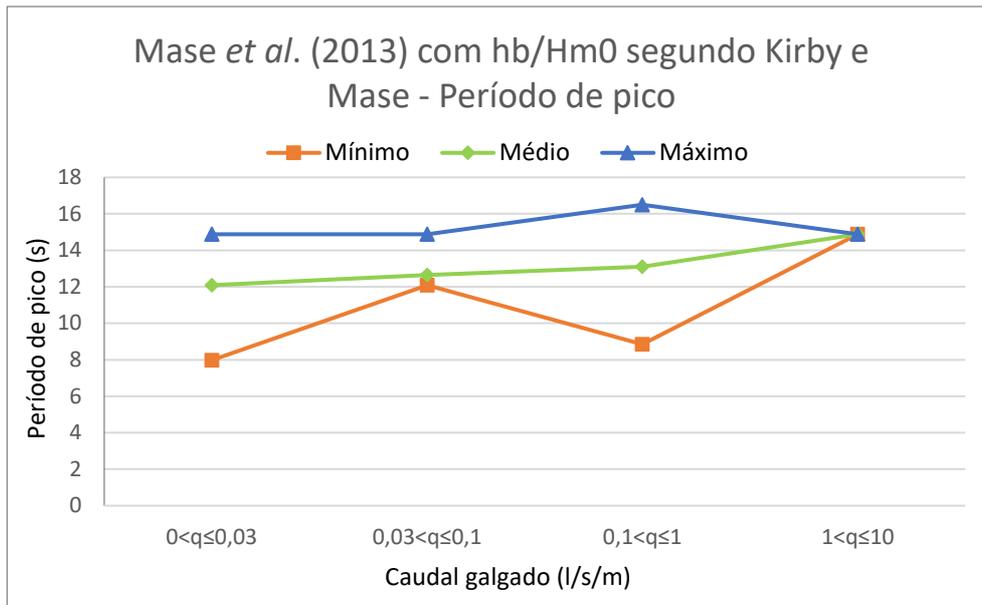


Figura 4.40- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase)

Tabela 4.27- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase)

Direção da onda (°)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	275	292	323
$0,03 < q \leq 0,1$	269	292	311
$0,1 < q \leq 1$	247	283	319
$1 < q \leq 10$	281	281	281

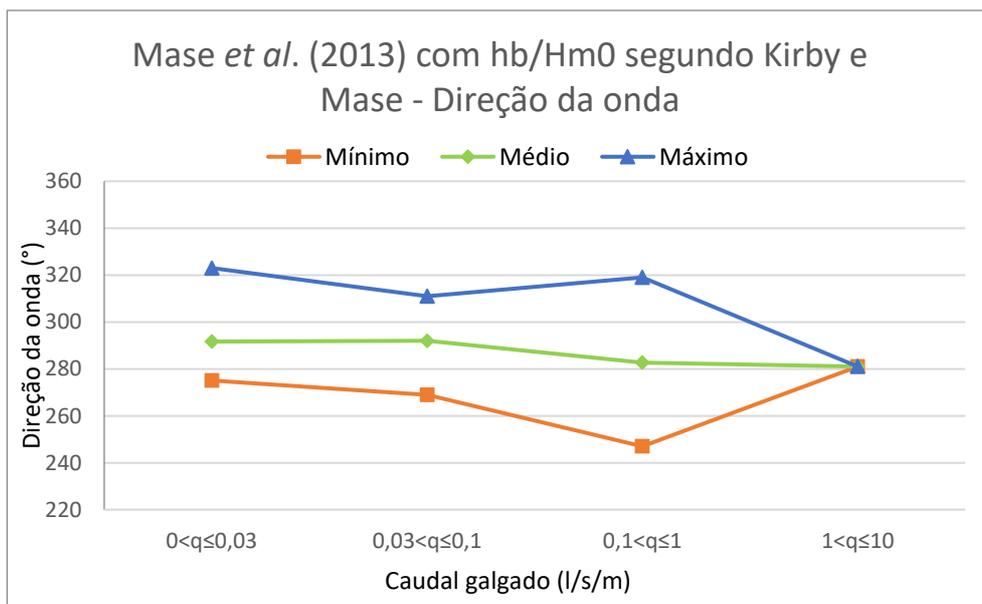


Figura 4.41- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase)

Tabela 4.28- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase)

Nível do mar (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	3,47	3,58	3,79
$0,03 < q \leq 0,1$	3,51	3,61	3,88
$0,1 < q \leq 1$	3,45	3,63	3,88
$1 < q \leq 10$	3,79	3,79	3,79

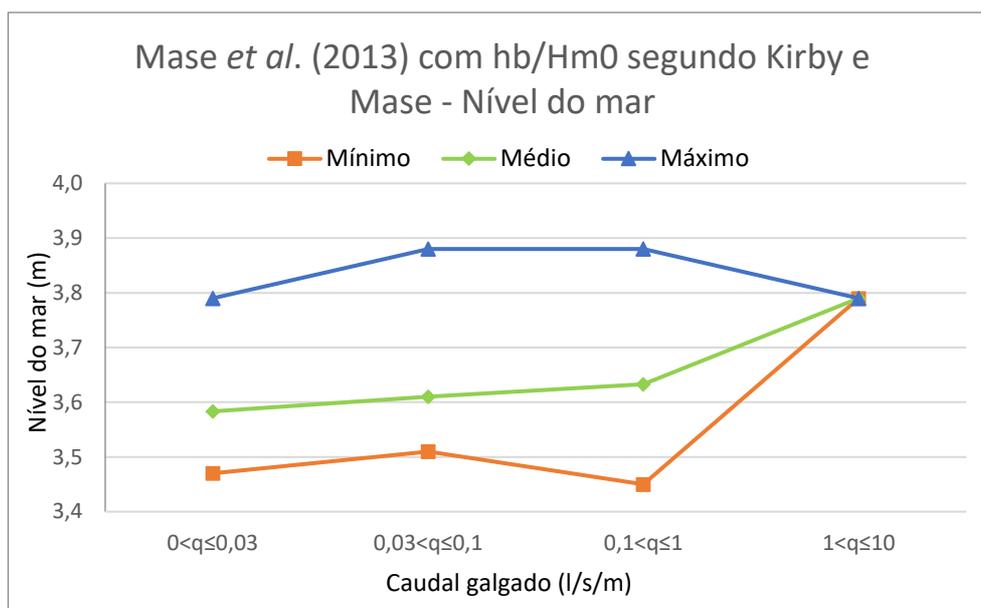


Figura 4.42- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase)

Tendo em conta os gráficos e tabelas anteriormente apresentados verifica-se que o maior valor de caudal, o único situado no intervalo compreendido entre 1 l/S/m e 10 l/s/m, ocorre para um H_s de 2,61 m, T_p de 14,88 s, direção de agitação proveniente do quadrante oés-noroeste e nível de mar igual a 3,79 m.

4.7.3. Resultados obtidos- Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$

A Tabela 4.29 apresenta o número de eventos segundo a proposta de Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$ para todos os perfis em estudo. Verifica-se que para o perfil 4, todos os resultados obtidos apresentam um caudal de galgamento nulo. Nos restantes perfis apenas ocorre galgamento em menos de 1% dos casos em estudo. O histograma da Figura 4.43 apresenta os eventos apenas para o perfil base.

Tabela 4.29- Número de eventos ocorridos segundo Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$

Perfil	Nº de eventos - Mase <i>et al.</i> (2013) com $hb=Hm0/0,6$				
	1	2	3	4	Original
Total	58076	58076	58076	58076	58076
$q(l/s/m)=0$	57707	57712	57665	58076	57564
$0 < q(l/s/m) \leq 0,03$	28	22	30	0	31
$0,03 < q(l/s/m) \leq 0,1$	49	62	51	0	54
$0,1 < q(l/s/m) \leq 1$	263	257	295	0	346
$1 < q(l/s/m) \leq 10$	29	23	35	0	81

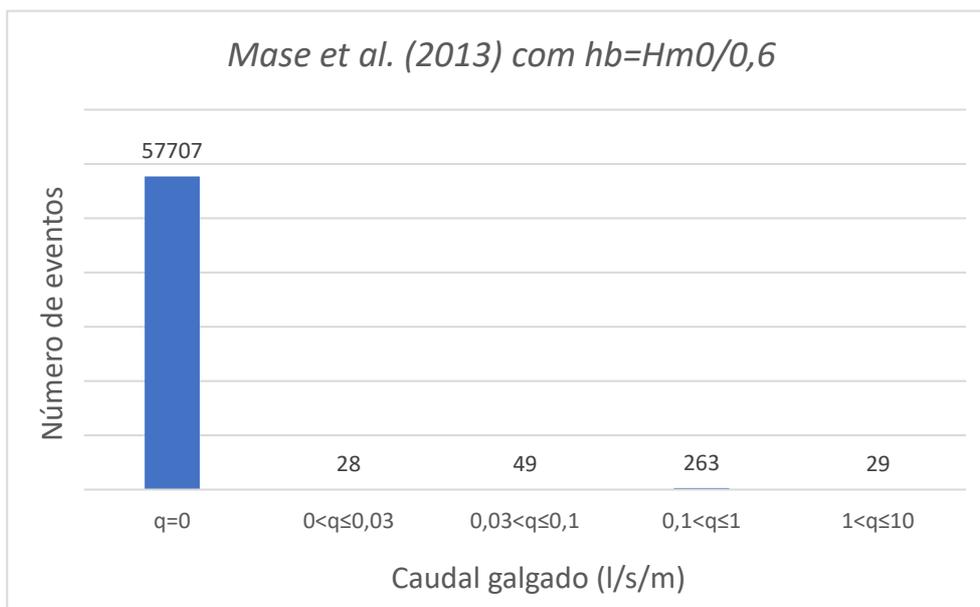


Figura 4.43- Histograma relativo aos caudais de galgamento obtidos segundo Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$

As tabelas e figuras que se seguem apresentam as condições de agitação marítima e nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento. É possível observar que tanto a altura significativa da onda (Tabela 4.30 e Figura 4.44) como o período de pico (Tabela 4.31 e Figura 4.45) aumentam ligeiramente à medida que o caudal de galgamento aumenta. Em relação à direção da onda incidente, apresentada na Tabela 4.32 e Figura 4.46, é possível observar que para todos os casos onde ocorre galgamento a direção média ronda os 280° , direção ortogonal à estrutura de proteção costeira. Por fim, é possível observar na Tabela 4.33 e na Figura 4.47 que o nível do mar aumenta significativamente à medida que os caudais de galgamento também aumentam.

Tabela 4.30- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$)

Altura de onda significativa (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	2,10	2,98	4,60
$0,03 < q \leq 0,1$	2,16	2,98	4,73
$0,1 < q \leq 1$	2,13	3,11	4,72
$1 < q \leq 10$	2,61	3,43	4,67

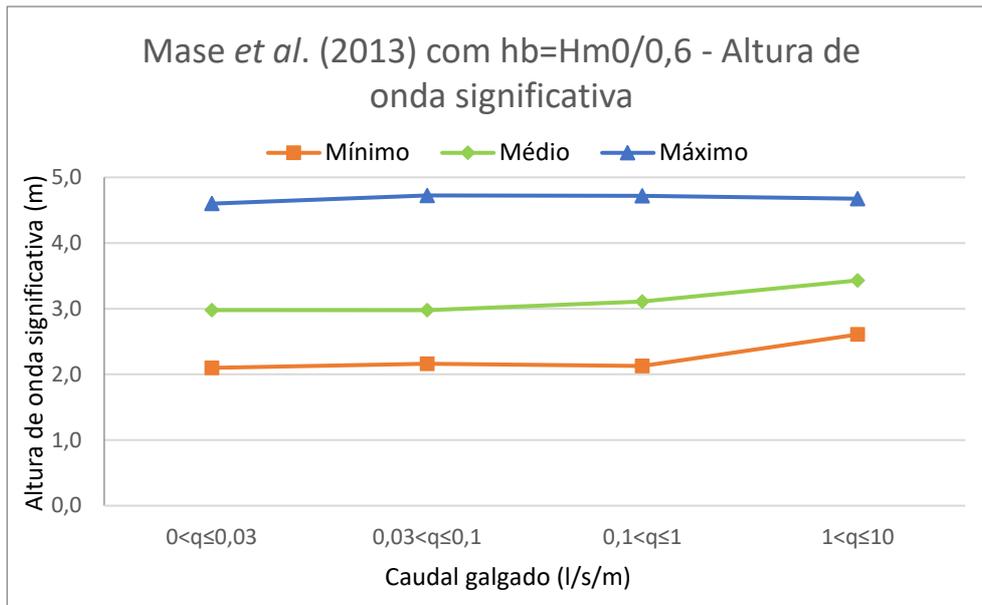


Figura 4.44- Altura de onda significativa para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$)

Tabela 4.31- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$)

Período de pico (s)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	10,89	14,24	18,31
$0,03 < q \leq 0,1$	10,89	14,85	18,31
$0,1 < q \leq 1$	10,89	14,68	20,31
$1 < q \leq 10$	13,41	15,93	18,31

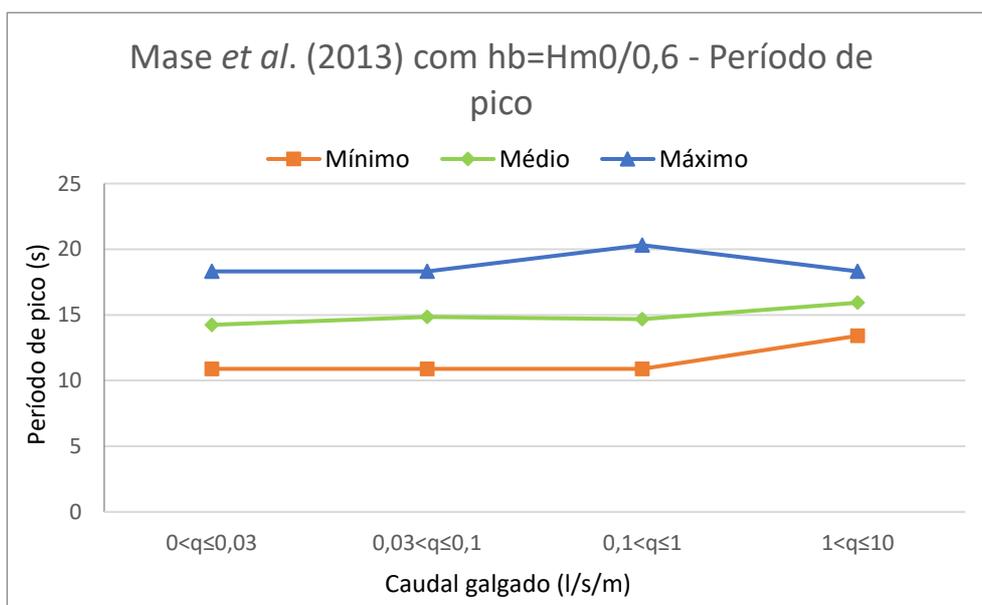


Figura 4.45- Período de pico para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$)

Tabela 4.32- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com com $hb=Hm0/0,6$)

Direção da onda (°)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	261	289	319
$0,03 < q \leq 0,1$	251	285	311
$0,1 < q \leq 1$	249	284	319
$1 < q \leq 10$	263	281	303

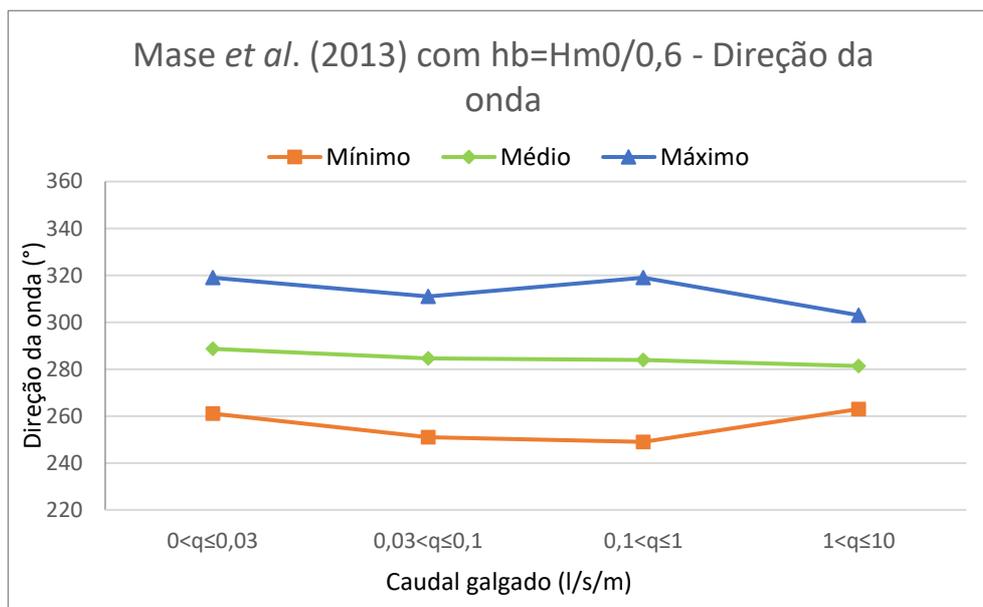


Figura 4.46- Direção da onda para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com com $hb=Hm0/0,6$)

Tabela 4.33- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com com $hb=Hm0/0,6$)

Nível do mar (m)			
q (l/s/m)	Mínimo	Médio	Máximo
$0 < q \leq 0,03$	3,03	3,45	3,70
$0,03 < q \leq 0,1$	2,99	3,40	3,74
$0,1 < q \leq 1$	3,04	3,53	3,88
$1 < q \leq 10$	3,29	3,65	3,98

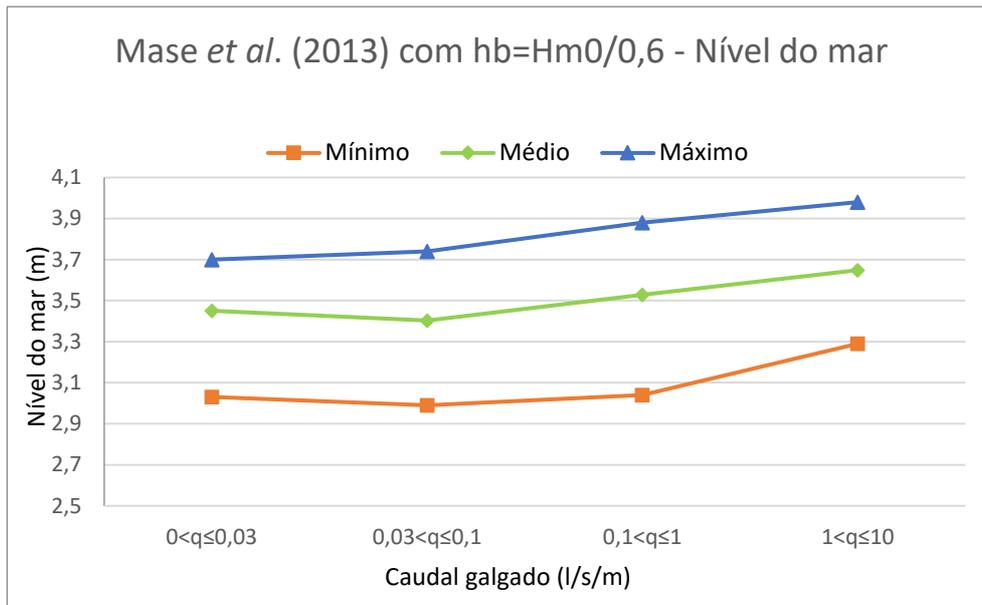


Figura 4.47- Nível do mar para cada intervalo de caudais de galgamento (Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$)

Tendo em conta os gráficos e tabelas anteriormente apresentados verifica-se que os maiores valores de caudais, entre 10 l/S/m e 50 l/s/m, ocorrem para H_s entre 2,61 m e 4,67 m, T_p entre 13,41 s e 18,31 s, direções de agitação provenientes dos quadrantes oeste e noroeste e níveis de mar entre 3,29 m e 3,98 m.

5. Análise dos resultados obtidos

Nesta dissertação foram utilizadas seis fórmulas distintas para estimar o caudal de galgamento da estrutura de defesa aderente da praia da Vagueira. Neste capítulo são analisadas as condições de agitação responsáveis pela maior previsão de galgamento em cada fórmula, comparados os resultados obtidos segundo as diversas fórmulas utilizadas e analisada a influência da escolha do perfil de fundo na estimativa do caudal de galgamento.

5.1. Condições de agitação e nível do mar responsáveis pelos galgamentos máximos

Os dados de agitação marítima e nível do mar utilizados neste estudo foram obtidos de seis em seis horas, perfazendo um total de 58.076 casos. Neste capítulo são analisadas as condições de agitação e nível do mar responsáveis pela maior previsão de galgamento de cada fórmula. De forma a estudar a evolução do caudal de galgamento e as respectivas condições de agitação e nível do mar nas horas antes e depois da maior previsão de galgamento, foram também analisados os três casos antes e depois do caso onde foi estimado o galgamento máximo, contabilizando um total de sete casos em análise. Nas abordagens que dependem do perfil do fundo do mar esta análise foi feita para os vários perfis utilizados.

Da tabela 5.1 à 5.6 é possível observar as estimativas máximas de galgamento de todas as fórmulas utilizadas e todos os perfis em estudo. É possível verificar que em algumas fórmulas a estimativa de galgamento máximo ocorre para as mesmas condições. Isto é, nos quatro perfis do Eurotop (2018), nos três primeiros perfis de Van Gent *et al.* (2016) e nos dois primeiros de Van Gent *et al.* (2020) a estimativa máxima de galgamento ocorre nas mesmas condições de agitação e nível do mar (caso 27993). Em relação ao perfil 3 de Van Gent *et al.* (2020) e aos dois primeiros perfis de Mase *et al.* (2013), com hb/Hm_0 segundo Kirby e Mase, o galgamento máximo ocorre no caso 39685, por fim, tanto em Van Gent *et al.* (2016) como em Van Gent *et al.* (2020), o galgamento máximo do quarto perfil ocorre no caso 51265.

Tabela 5.1- Estimativa máxima de galgamento - *Main Value Approach*, Eurotop (2018)

Caudal de galgamento (l/s/m)				
Caso	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4
27990	1,31E-06	1,31E-06	1,31E-06	1,31E-06
27991	8,62E-05	8,62E-05	8,62E-05	8,62E-05
27992	0,24	0,24	0,24	0,24
27993	4,58	4,58	4,58	4,58
27994	0,00	0,00	0,00	0,00
27995	3,14E-09	3,14E-09	2,32E-09	6,18E-09
27996	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 5.2- Estimativa máxima de galgamento - Van Gent *et al.* (2016)

Caudal de galgamento (l/s/m)					
Caso	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Caso	Perfil 4
27990	3,22E-05	3,22E-05	3,22E-05	51262	0,00
27991	2,72E-04	2,72E-04	2,72E-04	51263	7,71E-04
27992	0,17	0,17	0,17	51264	4,00E-04
27993	2,21	2,21	2,21	51265	0,03
27994	0,00	0,00	0,00	51266	0,00
27995	3,58E-05	3,58E-05	3,53E-05	51267	3,37E-03
27996	0,00	0,00	0,00	51268	0,00

Tabela 5.3- Estimativa máxima de galgamento - Van Gent *et al.* (2020)

Caudal de galgamento (l/s/m)						
Caso	Perfil 1	Perfil 2	Caso	Perfil 3	Caso	Perfil 4
27990	4,82E-05	4,82E-05	39682	0,02	51262	1,39E-07
27991	3,41E-04	3,41E-04	39683	0,03	51263	7,44E-04
27992	0,17	0,17	39684	0,38	51264	6,57E-04
27993	1,84	1,84	39685	1,37	51265	0,02
27994	7,88E-08	7,88E-08	39686	3,21E-07	51266	0,00
27995	3,88E-05	3,88E-05	39687	1,86E-05	51267	3,76E-03
27996	2,11E-07	2,11E-07	39688	1,52E-07	51268	0,00

Tabela 5.4- Estimativa máxima de galgamento - Mase *et al.* (2013) com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase

Caudal de galgamento (l/s/m)					
Caso	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Perfil 4	Original
39682	0,00	0,00	0,00	-	0,00
39683	0,00	0,00	0,00	-	0,00
39684	0,27	0,20	0,27	-	0,27
39685	1,37	1,15	1,37	-	1,37
39686	0,00	0,00	0,00	-	0,00
39687	0,00	0,00	0,00	-	0,00
39688	0,00	0,00	0,00	-	0,00

Tabela 5.5- Estimativa máxima de galgamento - Mase *et al.* (2013) com $h_b=H_{m0}/0,6$

Caudal de galgamento (l/s/m)							
Caso	Perfil 1	Perfil 3	Caso	Perfil 2	Perfil 4	Caso	Original
46950	0,00	0,00	48482	0,00	-	51266	0,00
46951	0,52	0,52	48483	0,01	-	51267	0,11
46952	0,88	0,88	48484	1,61	-	51268	0,00
46953	1,90	1,90	48485	1,65	-	51269	5,56
46954	0,00	0,00	48486	0,89	-	51270	0,00
46955	0,00	0,00	48487	1,19	-	51271	0,00
46956	0,00	0,00	48488	0,04	-	51272	0,00

Tabela 5.6- Estimativa máxima de galgamento- Goda *et al.* (2009) e Goda *et al.* (2020)

Caudal máximo de galgamento (l/s/m)		
Caso	Goda (2009)	Goda <i>et al.</i> (2020)
171	0,51	0,48
172	3,13	2,93
173	12,40	11,62
174	17,32	16,24
175	12,36	11,59
176	6,96	6,53
177	1,34	1,26

Na Figura 5.1 é possível observar a evolução do galgamento em cada uma das fórmulas. Observa-se, que para as mesmas condições de agitação e nível do mar, a maior estimativa de galgamento foi obtida segundo a abordagem proposta pelo Eurotop (2018), seguida de Van Gent *et al.* (2016) e por fim Van Gent *et al.* (2020). É de salientar que em todas, no caso antes do máximo ser obtido, já ocorre um galgamento considerável. Na Tabela 5.7 encontram-se os valores que caracterizam a agitação marítima e nível do mar registados nos sete casos em análise. Tal como era esperado, no caso onde ocorre o galgamento máximo, verifica-se uma altura de onda significativa, período de pico e nível do mar acima da média, associado a uma direção da onda incidente ortogonal à estrutura.

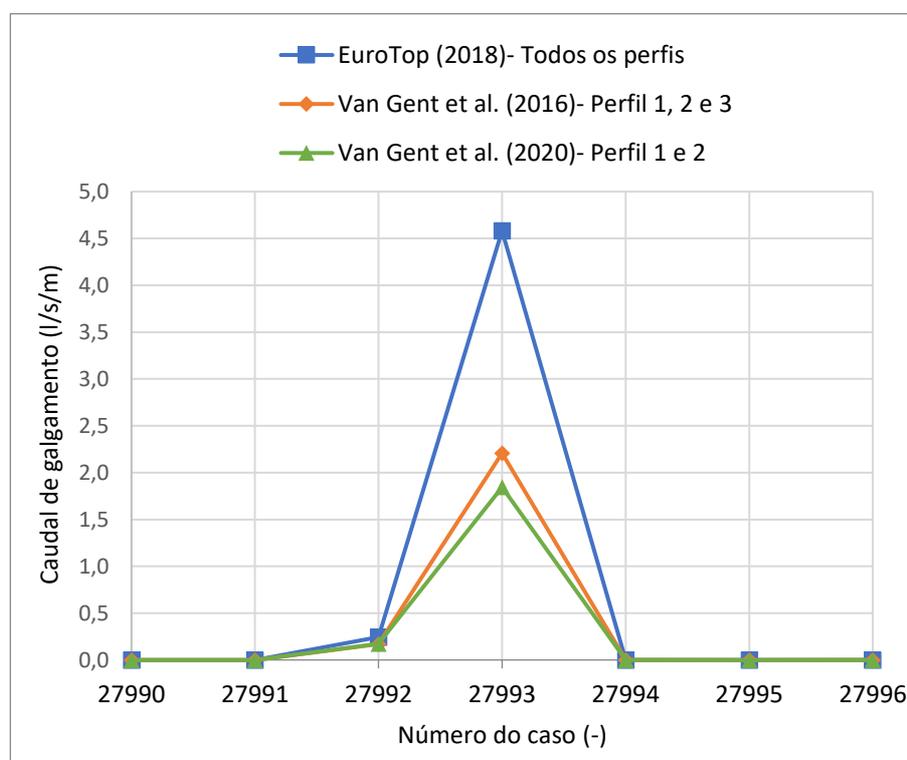


Figura 5.1- Previsão máxima de galgamento em todos os perfis do Eurotop (2018), três primeiros perfis de Van Gent *et al.* (2016) e dois primeiros perfis de Van Gent *et al.* (2020)

Tabela 5.7- Condições de agitação e nível do mar (caso 27990 ao 27996)

Condições de agitação e nível do mar				
Caso	Hs	Tp	dirp	Nmar
(-)	(m)	(s)	(°)	(m)
27990	0,88	10,89	287	3,28
27991	1,16	10,89	295	3,35
27992	1,93	16,50	297	3,41
27993	2,71	18,31	299	3,62
27994	2,88	16,50	303	3,05
27995	3,20	16,50	301	3,42
27996	3,23	16,50	303	3,03

Na Figura 5.2 observa-se a evolução do caudal de galgamento segundo o perfil 3 da fórmula de Van Gent *et al.* (2020) e os perfis 1, 2, 3 e original da fórmula de Mase *et al.* (2013) com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase. É visível que nos dois casos que antecedem o galgamento máximo já ocorre galgamento nas duas fórmulas, crescendo exponencialmente até o máximo. É também de salientar, que nestes casos, a estimativa pela fórmula de Mase é idêntica nos perfis 1, 3 e original. As condições de agitação e nível do mar presentes nos sete casos em análise encontram-se na Tabela 5.8, mais uma vez as condições de agitação encontram-se acima da média assim como o nível do mar.

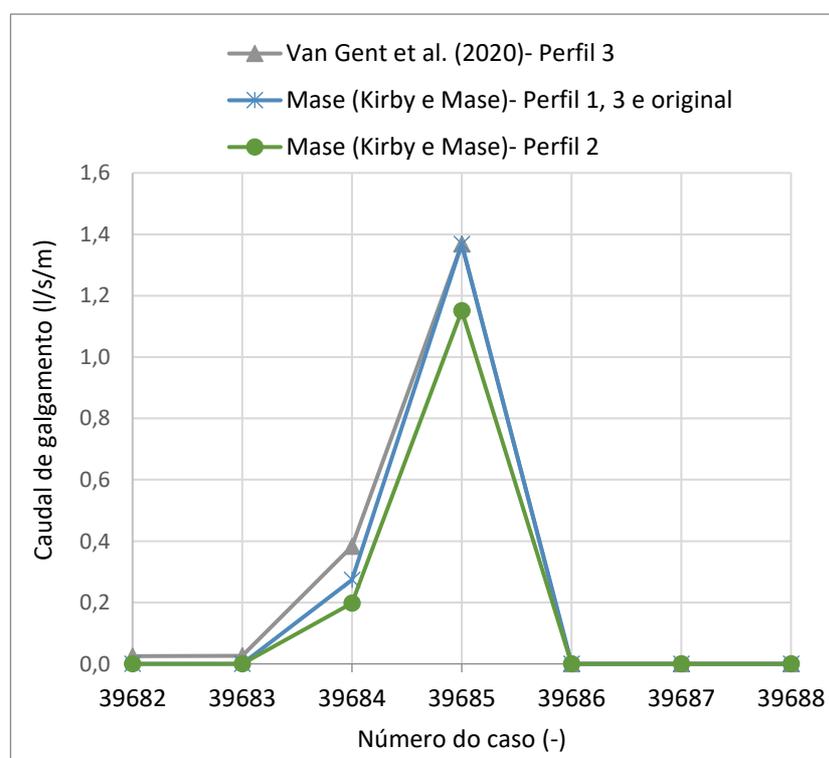


Figura 5.2- Previsão máxima de galgamento para o perfil 1, 2, 3 e original da fórmula de Mase *et al.* (2013) com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase e perfil 3 de Van Gent *et al.* (2020)

Tabela 5.8- Condições de agitação e nível do mar (caso 39682 ao 39688)

Condições de agitação e nível do mar				
Caso	Hs	Tp	dirp	Nmar
(-)	(m)	(s)	(°)	(m)
39682	1,60	13,41	283	3,47
39683	1,68	13,41	281	3,46
39684	2,14	14,88	279	3,70
39685	2,61	14,88	281	3,79
39686	2,78	14,88	283	3,25
39687	2,72	14,88	279	3,54
39688	2,50	13,41	283	3,32

A Figura 5.3 mostra a evolução do caudal de galgamento segundo o perfil 4 das fórmulas de Van Gent *et al.* (2016) e Van Gent *et al.* (2020). É visível que para as mesmas condições de agitação e nível do mar a previsão máxima segundo Van Gent *et al.* (2016) é superior. Observa-se também a ocorrência de galgamento nos dois casos que antecedem o máximo e um galgamento considerável dois casos depois (caso 51267). Os valores apresentados na Tabela 5.9 referentes à agitação marítima e nível do mar presentes nestes sete casos justificam a ocorrência de galgamento, uma vez que nos casos onde isto acontece, a agitação marítima encontra-se acima da média assim como o nível do mar.

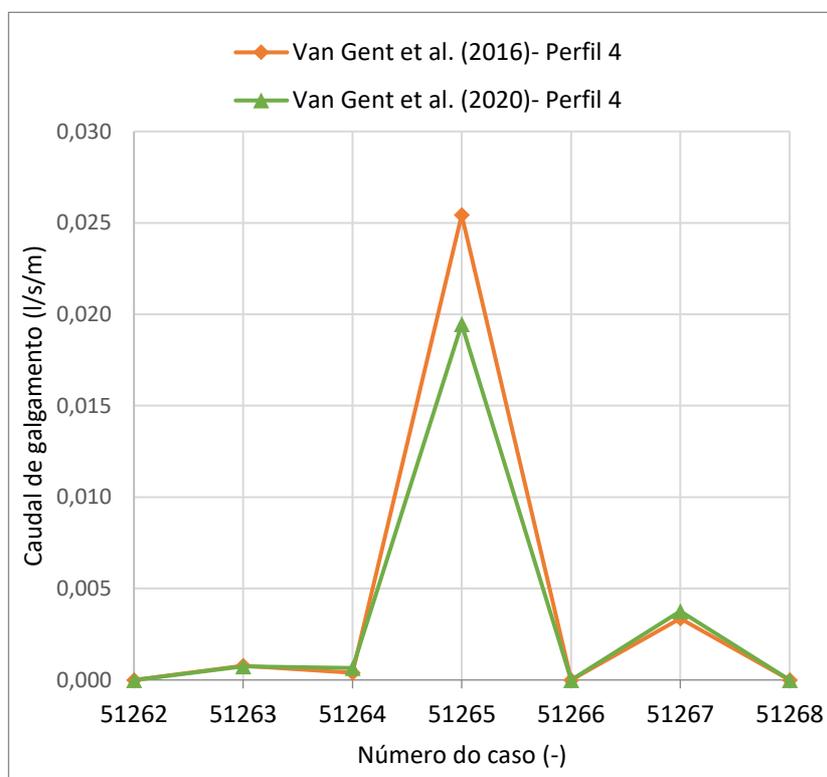


Figura 5.3- Previsão máxima de galgamento no quarto perfil de Van Gent *et al.* (2016) e Van Gent *et al.* (2020)

Tabela 5.9- Condições de agitação e nível do mar (caso 51262 ao 51268)

Condições de agitação e nível do mar				
Caso	Hs	Tp	dirp	Nmar
(-)	(m)	(s)	(°)	(m)
51262	3,76	12,09	291	3,21
51263	5,51	14,88	289	3,47
51264	6,26	16,50	293	3,19
51265	6,17	18,31	293	3,62
51266	6,54	18,31	295	2,63
51267	5,81	18,31	293	3,38
51268	5,18	16,50	295	2,63

Na Figura 5.4 encontra-se representa a previsão máxima de galgamento para os perfis 1 e 3 da fórmula de Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm0/0,6$. Observa-se que a estimativa é igual para os dois perfis e que ocorre galgamento nos dois casos que antecedem o máximo. Na Tabela 5.10 encontram-se os valores referentes à agitação e nível do mar dos sete casos em análise, mais uma vez o galgamento é provocado por condições de agitação marítima acima da média, associado a um elevado nível do mar.

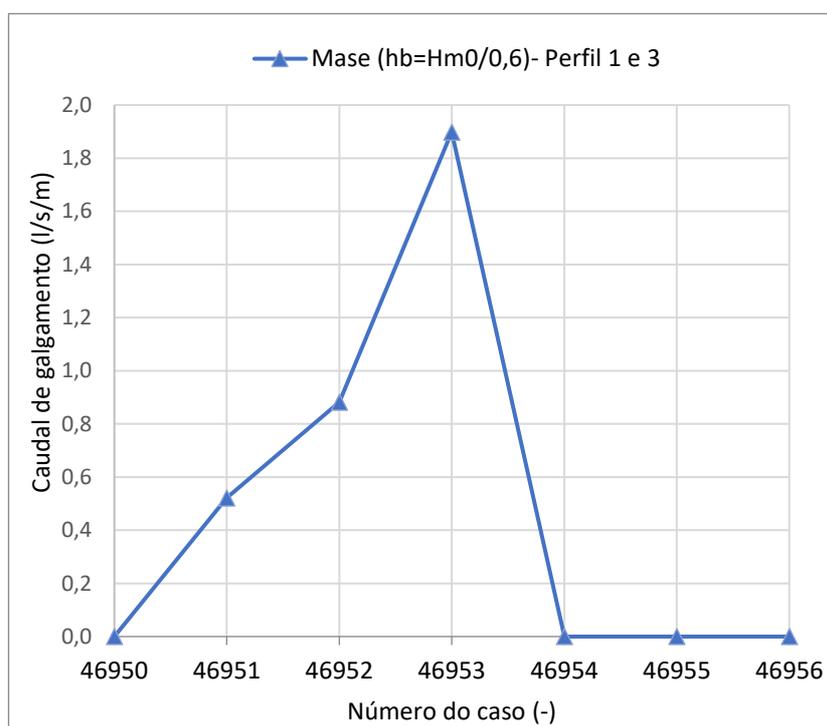


Figura 5.4- Previsão máxima de galgamento do perfil 1 e 3 da Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$

Tabela 5.10- Condições de agitação e nível do mar (caso 46950 ao 46956)

Condições de agitação e nível do mar				
Caso	Hs	Tp	dirp	Nmar
(-)	(m)	(s)	(°)	(m)
46950	2,26	12,09	269	3,37
46951	2,84	14,88	271	3,51
46952	3,48	16,50	275	3,47
46953	3,74	16,50	275	3,72
46954	3,50	14,88	275	2,99
46955	3,46	14,88	275	3,41
46956	3,54	14,88	275	2,91

Na Figura 5.5 encontra-se representa a previsão máxima de galgamento para o perfil 2 da fórmula de Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm0/0,6$. Contrariamente aos gráficos analisados até ao momento, nos casos em análise, verifica-se a ocorrência de galgamento antes e depois da estimativa máxima. É possível observar na Tabela 5.11 que nos casos onde ocorre galgamento as condições de agitação são todas muito semelhantes e os valores do nível do mar variam muito pouco, provavelmente por se tratar de uma fase de marés mortas (pouca amplitude entre a baixa mar e a preia mar), justificando assim a ocorrência de galgamento em quatro dos sete casos em análise.

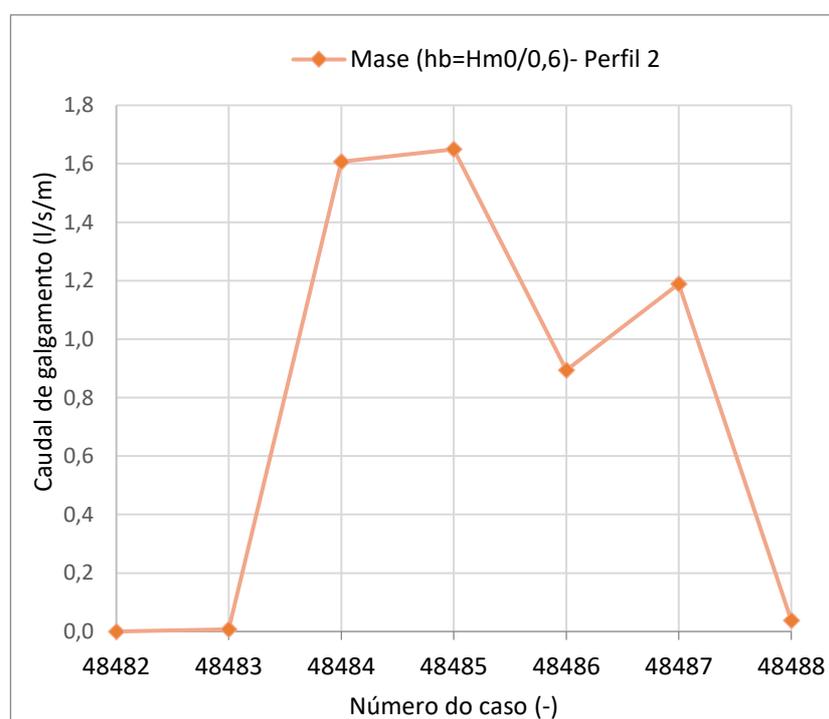


Figura 5.5- Previsão máxima de galgamento do perfil 2 da fórmula de Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$

Tabela 5.11- Condições de agitação e nível do mar (caso 48482 ao 48488)

Condições de agitação e nível do mar				
Caso	Hs	Tp	dirp	Nmar
(-)	(m)	(s)	(°)	(m)
48482	2,49	16,50	295	3,25
48483	3,23	16,50	297	3,25
48484	4,09	18,31	297	3,45
48485	4,40	18,31	297	3,44
48486	4,20	18,31	299	3,24
48487	4,13	18,31	297	3,33
48488	3,33	16,50	297	3,26

Na Figura 5.6 encontra-se representa a previsão máxima de galgamento para o perfil original da fórmula de Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm0/0,6$. Como se pode ver, nos casos em análise apenas é estimado que ocorra um galgamento ligeiro no caso 51267 e o galgamento máximo no caso 51269. Na Tabela 5.12 encontram-se os valores que caracterizam as condições de agitação e nível do mar presentes nos sete casos. Mais uma vez nos casos onde ocorre galgamento verificam-se condições de agitação marítima acima da média associadas a um elevado nível do mar. É também possível verificar a influência do nível do mar na ocorrência de galgamento. Apesar de no caso 51268 a altura de onda significativa, período de pico e direção da onda serem mais gravosas, é no caso 51269 que se estima um maior caudal de galgamento, porque apesar das condições de agitação serem um pouco menos gravosas, o nível encontra-se bem mais elevado.

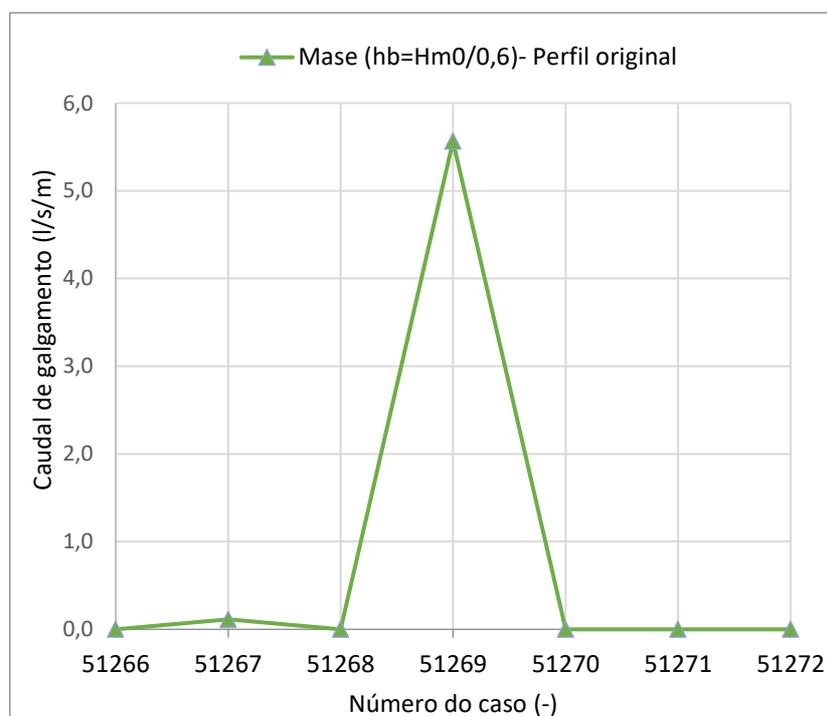


Figura 5.6- Previsão máxima de galgamento do perfil original da fórmula de Mase *et al.* (2013) com $hb=Hm0/0,6$

Tabela 5.12- Condições de agitação e nível do mar (caso 51266 ao 51272)

Condições de agitação e nível do mar				
Caso	Hs	Tp	dirp	Nmar
(-)	(m)	(s)	(°)	(m)
51266	6,54	18,31	295,00	2,63
51267	5,81	18,31	293,00	3,38
51268	5,18	16,50	295,00	2,63
51269	4,67	16,50	271,00	3,65
51270	4,32	14,88	271,00	2,20
51271	4,42	12,09	281,00	3,31
51272	4,18	12,09	285,00	2,07

Por fim, na Figura 5.7 encontra-se a estimativa máxima de galgamento segundo Goda (2009) e Goda *et al.* (2020). Estas duas abordagens não dependem da escolha do perfil de fundo. Observa-se que ambas as fórmulas apresentam resultados muito semelhantes, sendo a estimativa segundo Goda *et al.* (2020) ligeiramente mais baixa devido ao coeficiente proposto por Altomare *et al.* (2020). É também possível verificar que ocorre um galgamento considerável nos sete casos em análise, sendo este sempre crescente até ser atingido o máximo, seguido de um decréscimo quase constante. Na Tabela 5.13 encontram-se os valores que caracterizam a agitação marítima e nível do mar presentes nestes sete casos. Pode-se concluir que em todos os casos a agitação marítima toma valores acima da média e o nível do mar, para além de ser elevado, varia muito pouco entre cada caso, ao contrário do que costuma acontecer.

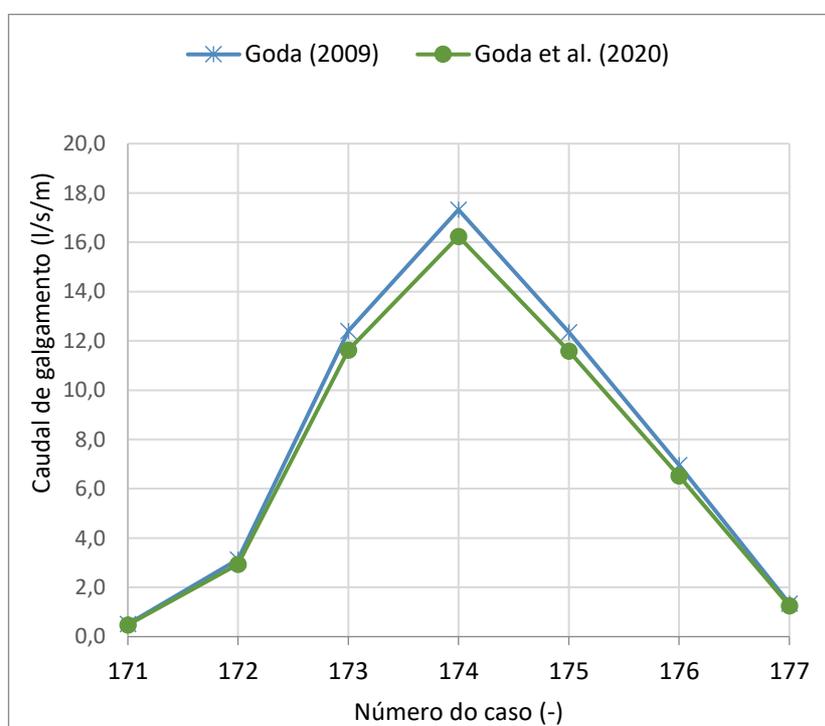


Figura 5.7- Previsão máxima de galgamento segundo Goda (2009) e Goda *et al.* (2020)

Tabela 5.13- Condições de agitação e nível do mar (caso 171 ao 177)

Condições de agitação e nível do mar				
Caso	Hs	Tp	dirp	Nmar
(-)	(m)	(s)	(°)	(m)
171	5,08	13,41	269,00	3,18
172	6,30	14,88	271,00	3,27
173	6,64	18,31	275,00	3,36
174	6,90	18,31	273,00	3,01
175	6,58	18,31	275,00	3,14
176	6,35	16,50	277,00	3,00
177	5,27	14,88	275,00	3,31

Dos gráficos e tabelas anteriormente apresentados é possível concluir que o caso onde foram estimados mais caudais máximos de galgamento foi o 27993, onde ocorre o máximo para todos os perfis do Eurotop (2018), para os três primeiros perfis de Van Gent *et al.* (2016) e para os dois primeiros perfis de Van Gent *et al.* (2020). Segue-se o caso 39685 onde foram obtidos os valores máximos de galgamento com todos os perfis da fórmula de Mase *et al.* (2013), com h_b/H_{m0} segundo Kirby e Mase e o terceiro perfil de Van Gent *et al.* (2020).

Conclui-se ainda que os caudais máximos de galgamento são provocados por condições de agitação com alturas de onda significativas entre 2,61m e 6,9m, com um valor médio de 4,46m, períodos de pico compreendidos entre 14,88s e 18,31s, com um valor médio de 17,3s, direção de onda entre 271° e 299°, com valor médio de 284° e valores de nível do mar compreendidos entre 3,01m e 3,79m, com o valor médio de 3,55m. Importa salientar que o fator que mais contribui para o galgamento, consensual a todas as bordagens, é o nível do mar.

5.2. Comparação dos resultados obtidos

Os gráficos que se seguem comparam os resultados do caudal de galgado obtidos pelas diversas fórmulas utilizadas. A comparação é realizada tendo em conta o perfil 1, por se tratar do perfil de fundo que mais se aproxima do perfil original. A Tabela 5.14 é uma tabela resumo, e tem como objetivo facilitar a interpretação dos gráficos seguintes, uma vez que relaciona o número da figura com as fórmulas que estão a ser comparadas. Como neste tipo de gráfico se representam os resultados obtidos por uma fórmula em função dos resultados obtidos pela outra, quanto mais próximos se encontrarem os resultados da bissetriz do gráfico, maior a semelhança dos resultados entre as duas fórmulas que estão a ser comparadas.

Tabela 5.14- Relação entre o número da figura e as fórmulas comparadas

		Eixo y						
		Eurotop (2018)	Goda (2009)	Goda (2020)	Van Gent (2016)	Van Gent (2020)	Mase (2013), Kirby	Mase (2013), fórmula
EIXO X	Eurotop (2018)	-	Figura 5.8	Figura 5.9	Figura 5.19	Figura 5.20	Figura 5.21	Figura 5.22
	Goda (2009)	-	-	Figura 5.18	Figura 5.10	Figura 5.11	Figura 5.12	Figura 5.13
	Goda (2020)	-	-	-	Figura 5.14	Figura 5.15	Figura 5.16	Figura 5.17
	Van Gent (2016)	-	-	-	-	Figura 5.23	Figura 5.24	Figura 5.26
	Van Gent (2020)	-	-	-	-	-	Figura 5.25	Figura 5.27
	Mase (2013), Kirby	-	-	-	-	-	-	Figura 5.28
	Mase (2013), fórmula	-	-	-	-	-	-	-

Da Figura 5.8 à Figura 5.17 é possível observar os gráficos comparativos entre as abordagens de Goda e as restantes fórmulas utilizadas. Observa-se que na maioria dos casos, os resultados obtidos pelas abordagens de Goda são sempre superiores. Esta diferença nos resultados pode ser justificada pelo facto de ser a única abordagem que não utiliza o conceito de inclinação característica, por esse motivo, em todos os casos os coeficientes A e B utilizados na fórmula são calculados tendo em conta a inclinação da praia em frente à estrutura ($4,67^\circ$) e a inclinação do talude da estrutura ($55,76^\circ$). Para além disso, tanto nas abordagens de Goda como nas de Van Gent, utiliza-se a altura de onda no pé do talude, contrariamente às restantes fórmulas, por esse motivo nestas abordagens apenas foi possível calcular o caudal de galgamento nos casos onde o nível do mar se encontra acima do pé do talude (35% dos casos).

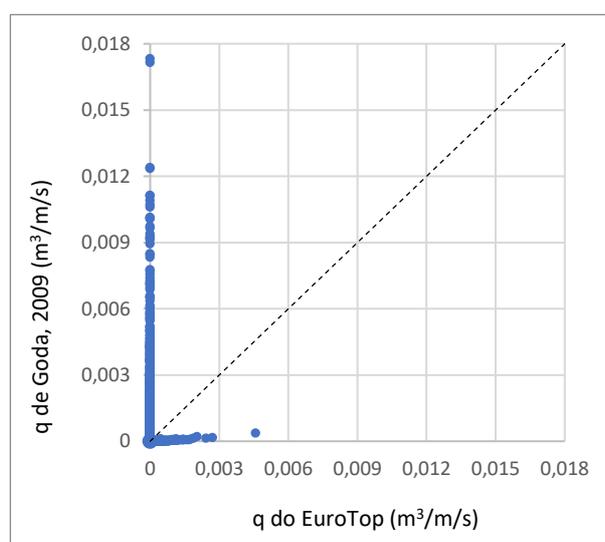


Figura 5.8- Comparação dos resultados obtidos pelo Eurotop (2018) com os de Goda (2009)

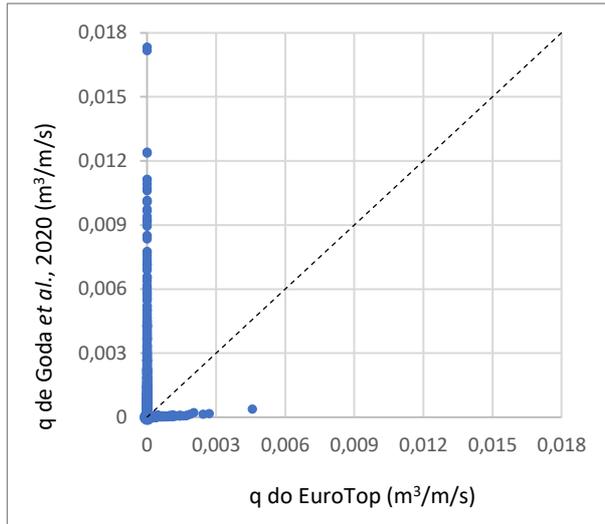


Figura 5.9- Comparação dos resultados obtidos pelo Eurotop (2018) com os de Goda (2020)

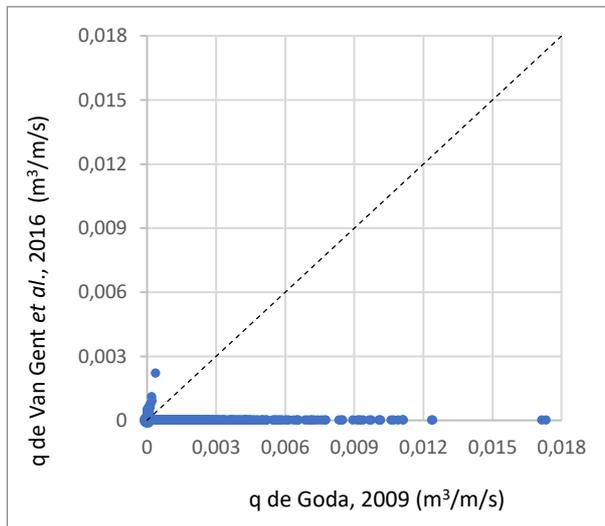


Figura 5.10- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda (2009) com os de Van Gent *et al.* (2016)

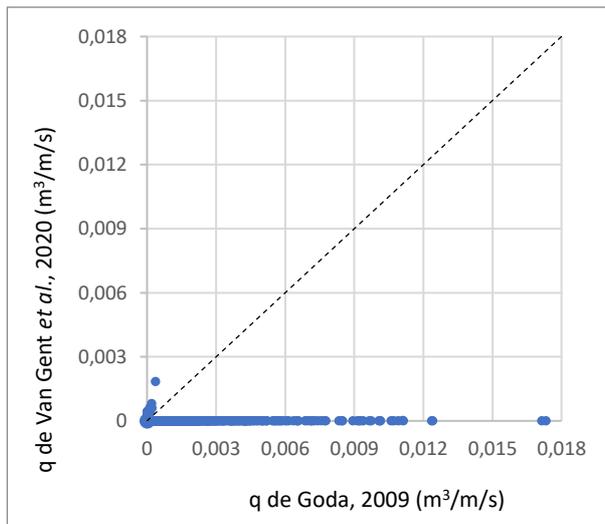


Figura 5.11- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda (2009) com os de Van Gent *et al.* (2020)

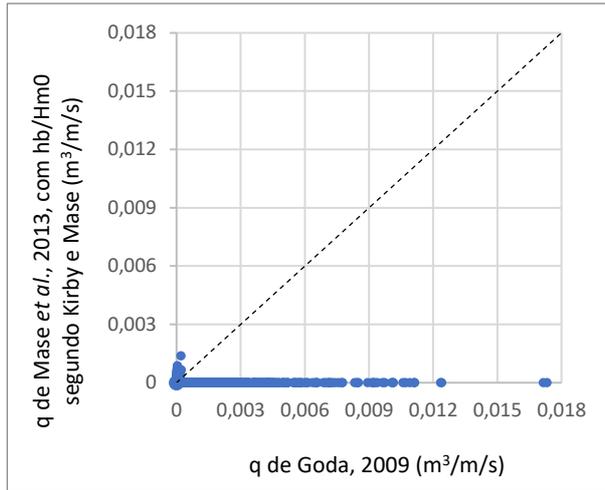


Figura 5.12- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda (2009) com os de Mase *et al.* (2013), com hb/Hm0 segundo Kirby e Mase

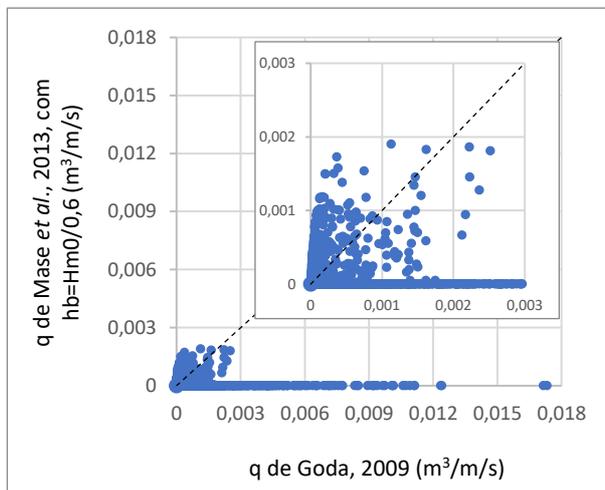


Figura 5.13- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda (2009) com os de Mase *et al.* (2013), com hb=Hm0/0,6

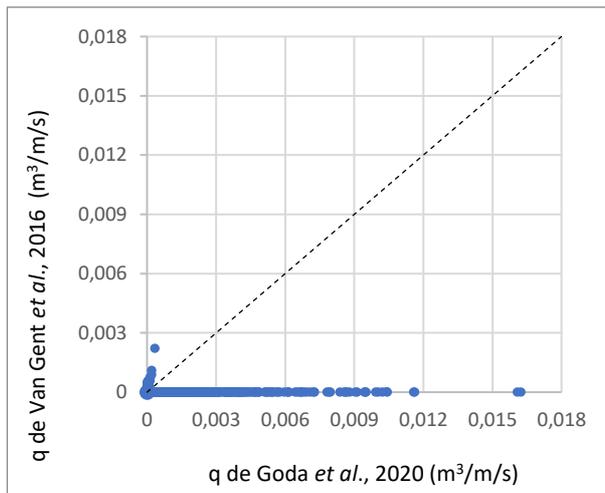


Figura 5.14- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda *et al.* (2020) com os de Van Gent *et al.* (2016)

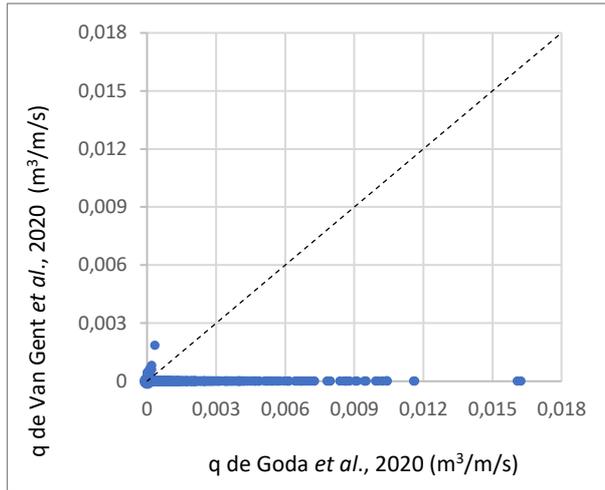


Figura 5.15- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda *et al.* (2020) com os de Van Gent *et al.* (2020)

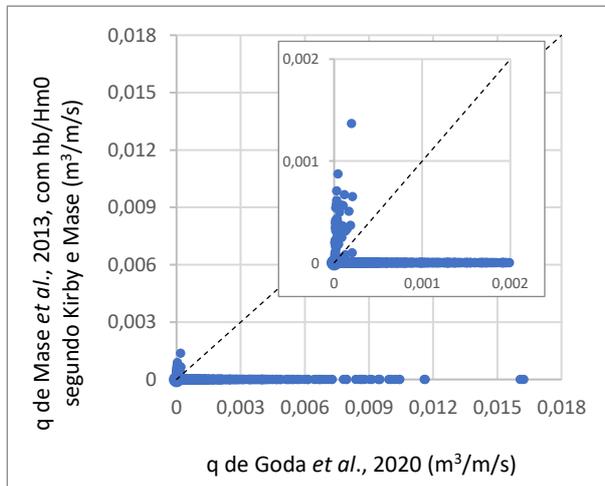


Figura 5.16- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda *et al.* (2020) com os de Mase *et al.* (2013), com hb/Hm0 segundo Kirby e Mase

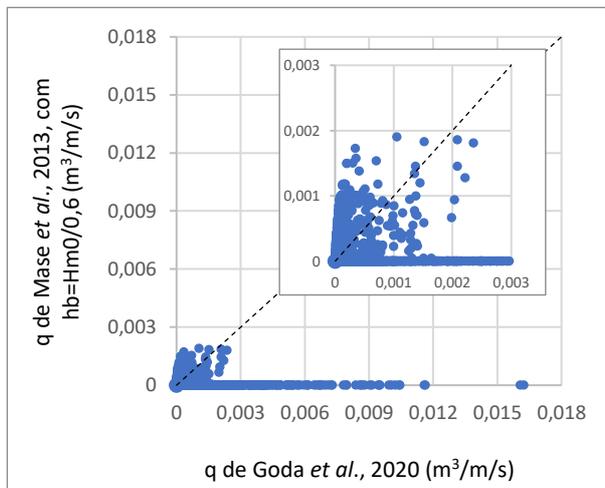


Figura 5.17- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda *et al.* (2020) com os de Mase *et al.* (2013), com hb=Hm0/0,6

Na Figura 5.18 é possível observar a comparação entre os resultados obtidos segundo Goda (2009) com os de Goda *et al.* (2020). Como era de esperar os resultados obtidos por estas duas abordagens são muito semelhantes, uma vez que a única diferença é o coeficiente que foi introduzido por Altomare *et al.* (2020), por esse motivo a estimativa segundo Goda (2009) é sempre ligeiramente superior.

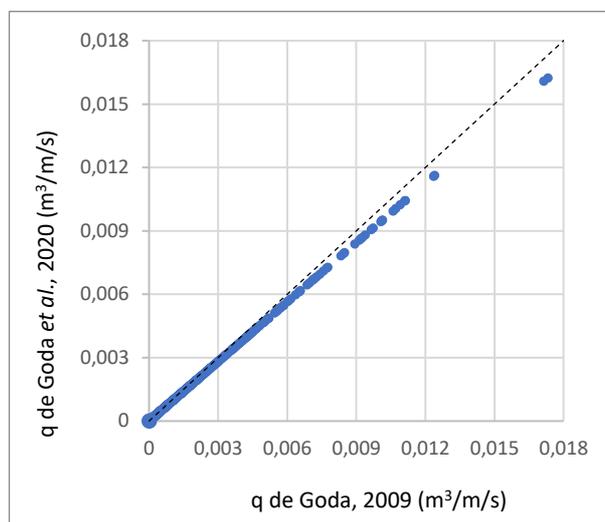


Figura 5.18- Comparação dos resultados obtidos segundo Goda (2009) com os de Goda *et al.* (2020)

Na Figura 5.19 é possível observar a comparação entre os resultados obtidos pelo Eurotop (2018) com os de Van Gent *et al.* (2016) e na Figura 5.20 entre o Eurotop (2018) e Van Gent *et al.* (2020). Estes dois gráficos são muito semelhantes uma vez que a única diferença entre as duas fórmulas de Van Gent é o coeficiente introduzido por Altomare *et al.* (2020), que origina resultados ligeiramente menores na abordagem de Van Gent *et al.* (2020). Verifica-se que na maioria dos resultados a estimativa segundo o Eurotop (2018) é superior, especialmente nos caudais de galgamento maiores, no entanto, também existem alguns casos, em caudais de galgamento menores, onde se verifica o contrário. A divergência nos resultados obtidos segundo estas duas abordagens pode estar associada ao facto de no Eurotop se considerar a altura de onda em frente à estrutura, enquanto na abordagem de Van Gent se considera a altura de onda no pé do talude. Como nos casos onde ocorre galgamento o nível do mar encontra-se sempre acima do pé do talude, a abordagem do Eurotop considera apenas a inclinação do talude da estrutura, enquanto na abordagem de Van Gent a altura de onda no pé do talude é calculada tendo em conta a inclinação da praia e, posteriormente, para o cálculo do galgamento, é que é considerada a inclinação da estrutura.

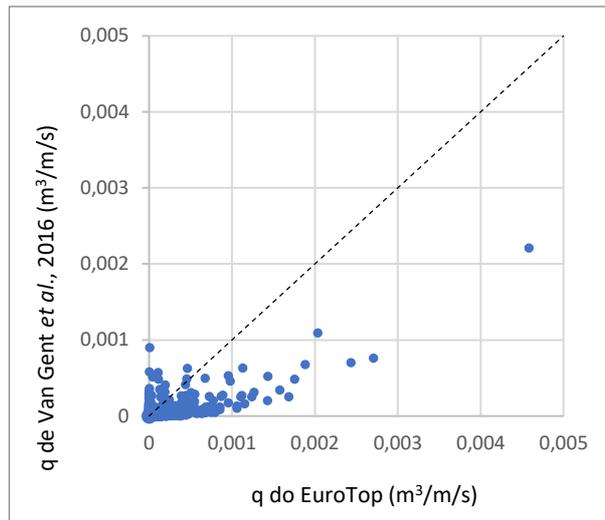


Figura 5.19- Comparação dos resultados obtidos pelo Eurotop com os de Van Gent *et al.* (2016)

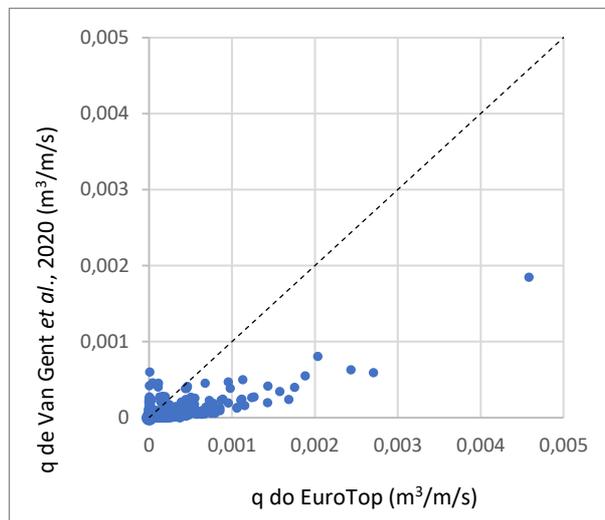


Figura 5.20- Comparação dos resultados obtidos pelo Eurotop com os de Van Gent *et al.* (2020)

Nas figuras 5.21 e 5.22 encontra-se a comparação entre os resultados obtidos segundo o Eurotop (2018) e as duas abordagens de Mase *et al.* (2013). Verifica-se uma grande divergência nos resultados entre estas duas abordagens. Há muitos casos em que uma das fórmulas prevê a ocorrência de galgamento e a outra não (pontos situados sobre os eixos do gráfico). Pode-se concluir que nos casos onde ambas as fórmulas preveem a ocorrência de galgamento, a estimativa do Eurotop é sempre superior, com a exceção de um caso. É ainda de salientar que no caso onde se prevê que ocorra o galgamento máximo segundo o Eurotop, a abordagem de Mase prevê galgamento nulo. A divergência de resultados entre estas duas abordagens ocorre porque, em todos os casos onde o Eurotop prevê a ocorrência de galgamento, o nível do mar encontra-se acima do pé do talude. Nestes casos, como a inclinação característica é superior a 1:10, o Eurotop considera a inclinação do talude da estrutura, enquanto as duas abordagens de Mase têm em conta o perfil do fundo desde o fundo da praia até o nível de espraimento.

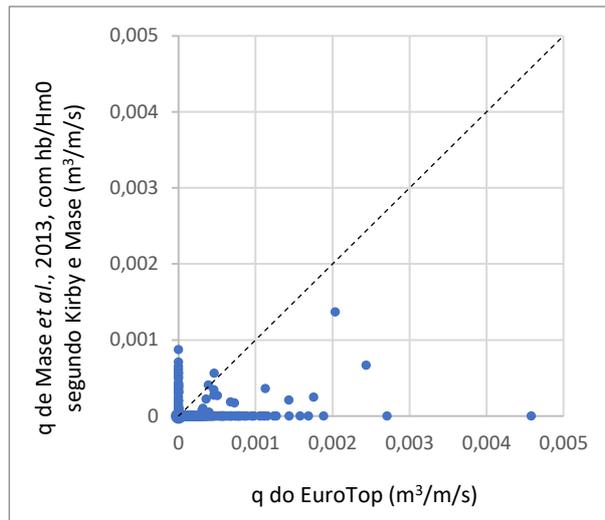


Figura 5.21- Comparação dos resultados obtidos pelo Eurotop com os de Mase *et al.* (2013), com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase

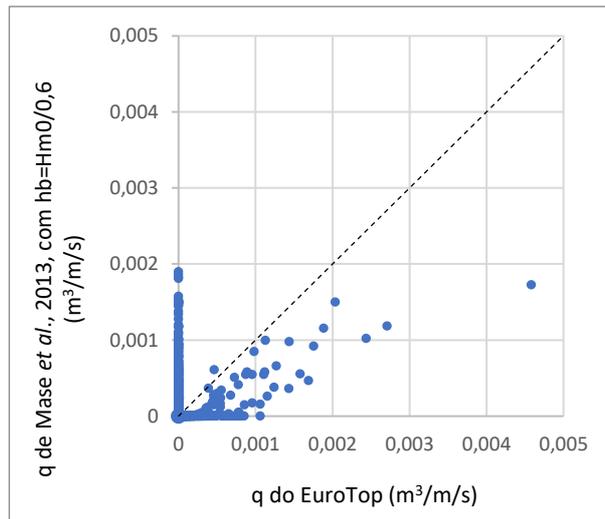


Figura 5.22- Comparação dos resultados obtidos pelo Eurotop com os de Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm0/0,6$

Na Figura 5.23 encontra-se representado o gráfico comparativo dos resultados obtidos segundo Van Gent *et al.* (2016) com os de Van Gent *et al.* (2020). Observa-se que estas duas abordagens obtêm resultados muito semelhantes, como seria de esperar, a estimativa de Van Gent *et al.* (2020) é a que obtêm os menores resultados, devido ao coeficiente introduzido por Altomare *et al.* (2020).

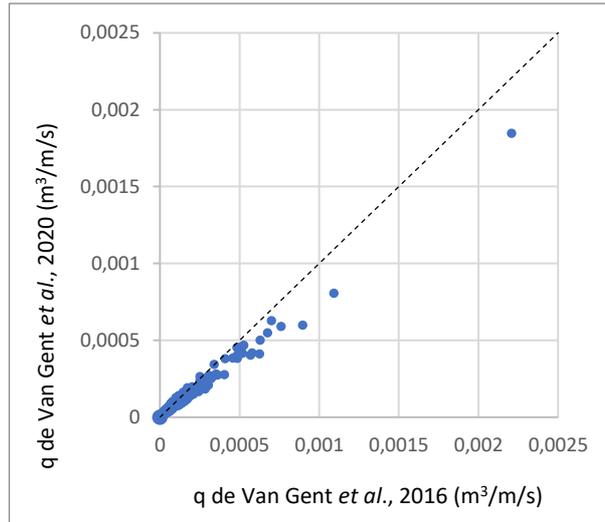


Figura 5.23- Comparação dos resultados obtidos segundo Van Gent *et al.* (2016) com os de Van Gent *et al.* (2020)

Nas figuras 5.24 e 5.25 é possível observar a comparação entre as duas abordagens de Van Gent e a abordagem de Mase *et al.* (2013), com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase. Observa-se que os resultados se encontram bastante dispersos, existindo poucos resultados semelhantes entre estas duas abordagens. Na maioria dos resultados são as abordagens de Van Gent que estimam caudais de galgamento maiores. É de salientar que na previsão máxima de galgamento segundo Van Gent, a fórmula de Mase prevê que ocorra galgamento nulo. Já nas figuras 5.26 e 5.27 encontra-se a comparação entre as duas abordagens de Van Gent e a abordagem de Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm0/0,6$. Apesar de na maioria dos casos a abordagem de Mase prever a ocorrência de galgamento enquanto as de Van Gent estimam galgamento nulo, existe uma gama de resultados em que as duas abordagens fazem uma estimativa semelhante.

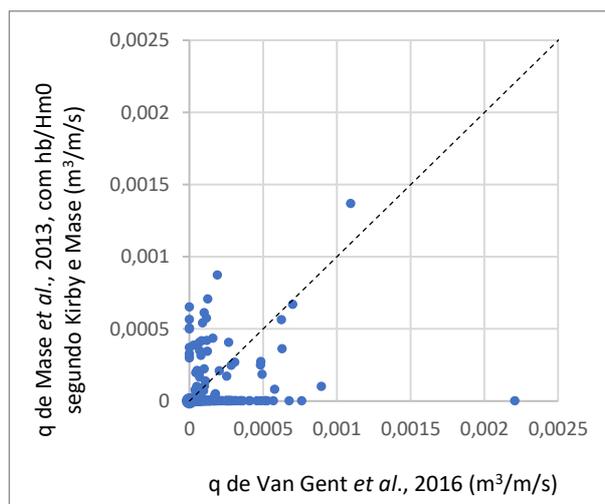


Figura 5.24- Comparação dos resultados obtidos segundo Van Gent *et al.* (2016) com os de Mase *et al.* (2013), com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase

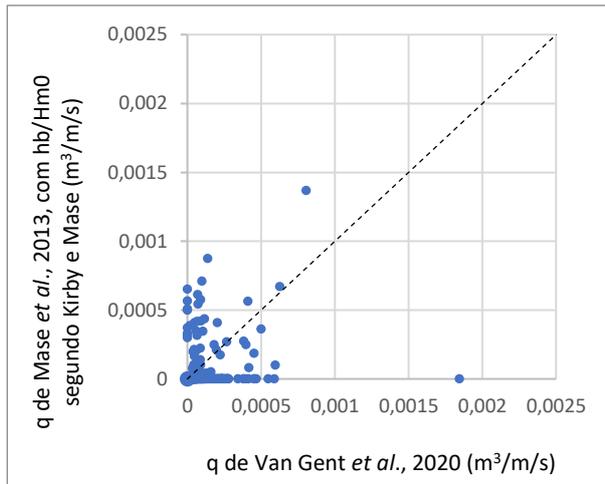


Figura 5.25- Comparação dos resultados obtidos segundo Van Gent *et al.* (2020) com os de Mase *et al.* (2013), com hb/Hm0 segundo Kirby e Mase

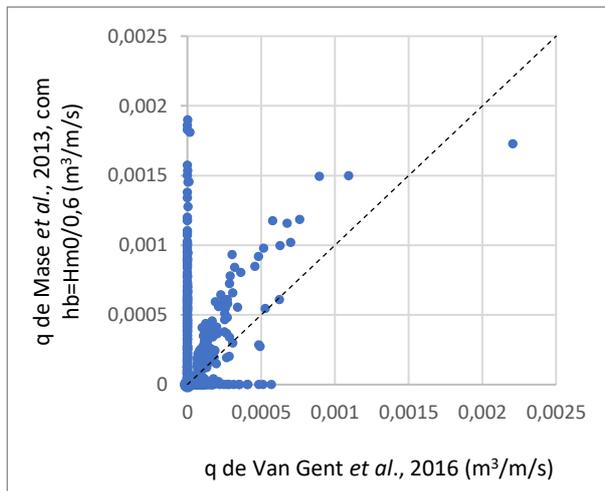


Figura 5.26- Comparação dos resultados obtidos segundo Van Gent *et al.* (2016) com os de Mase *et al.* (2013), com hb=Hm0/0,6

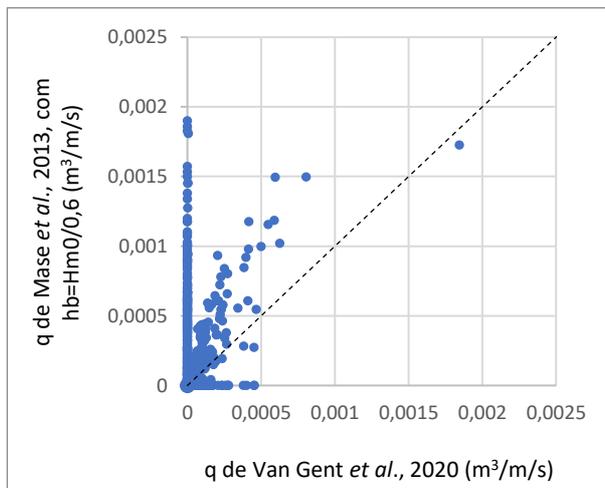


Figura 5.27- Comparação dos resultados obtidos segundo Van Gent *et al.* (2020) com os de Mase *et al.* (2013), com hb=Hm0/0,6

Uma possível explicação para as diferenças nos resultados obtidos tem a ver com o facto de a abordagem de Van Gent considerar a altura de onda no pé do talude enquanto Mase considera a altura de onda em frente à estrutura. As fórmulas de Mase também consideram o perfil do fundo desde o fundo da praia até ao nível de espraçamento, enquanto a abordagem de Van Gent apenas considera o declive da estrutura, uma vez que só foi possível estimar o galgamento nos casos em que o nível do mar se encontra acima do pé do talude.

Na Figura 5.28 é possível observar a comparação de resultados das duas abordagens de Mase, uma com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase e a outra com $hb=Hm0/0,6$. Observa-se que há muitos casos onde esta segunda abordagem prevê a ocorrência de galgamento, enquanto a primeira prevê galgamento nulo. Em relação aos casos onde ambas preveem a ocorrência de galgamento, os resultados encontram-se bastante dispersos. É também visível que a previsão máxima de galgamento com $hb=Hm0/0,6$ é superior à de $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase. A diferença dos resultados obtidos entre as duas abordagens deve-se exclusivamente à forma como é calculado o valor de hb .

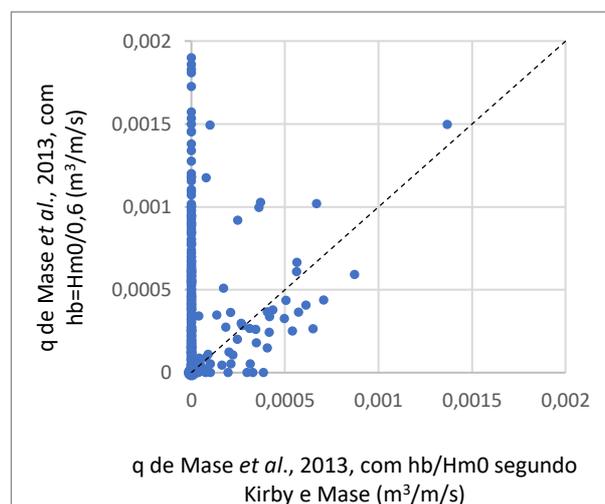


Figura 5.28- Comparação dos resultados obtidos segundo Mase *et al.* (2013), com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase, com os de Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm0/0,6$

5.3. Influência do perfil de fundo

Com exceção das fórmulas de Goda, todas as abordagens utilizadas nesta dissertação dependem do perfil do fundo do mar para o cálculo do caudal de galgamento. Tal como foi explicado no capítulo 4.1, com exceção da abordagem de Mase *et al.* (2013), para aplicar as fórmulas é necessário o perfil do fundo ser sempre crescente. Por esse motivo foram utilizados quatro perfis distintos para estimar o caudal de galgamento. Neste capítulo, os resultados obtidos com os diversos perfis utilizados, são comparados com o perfil base (perfil 1), com o objetivo de analisar de que forma o perfil do fundo influencia a estimativa do galgamento. Como as duas abordagens de Van Gent são idênticas só foi realizada a comparação para a de Van Gent *et al.* (2016).

Nas figuras 5.29 e 5.30 encontram-se os gráficos comparativos dos resultados obtidos através do perfil 1 com o perfil 2, em todas as fórmulas utilizadas. Recorda-se que no perfil 1 se manteve a barra e eliminou-se a fossa, enquanto no perfil 2 se uniu o início da barra com o fim da fossa. É possível observar que tanto na abordagem do Eurotop como nas de Van Gent os resultados obtidos através dos dois perfis são idênticos. Em relação às abordagens de Mase, a estimativa de galgamento utilizando o perfil 1 é sempre ligeiramente superior, com exceção da abordagem com $hb=Hm0/0,6$, onde existem alguns casos onde passa a ocorrer galgamento quando se utiliza o perfil 2. Isto pode ser justificado com o facto da A_{rea} usada nesta fórmula ser superior no perfil 1, o que resulta num declive imaginário superior.

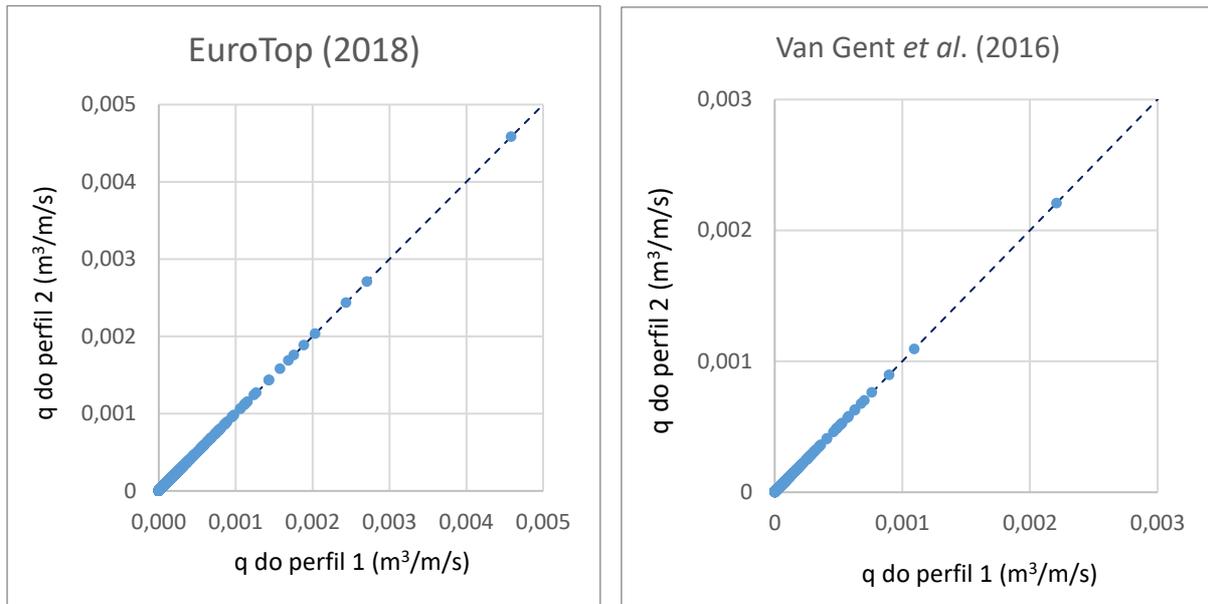


Figura 5.29- Comparação dos resultados obtidos segundo o perfil 1 com os do perfil 2- Eurotop, 2018 (esquerda) e Van Gent *et al.*, 2016 (direita)

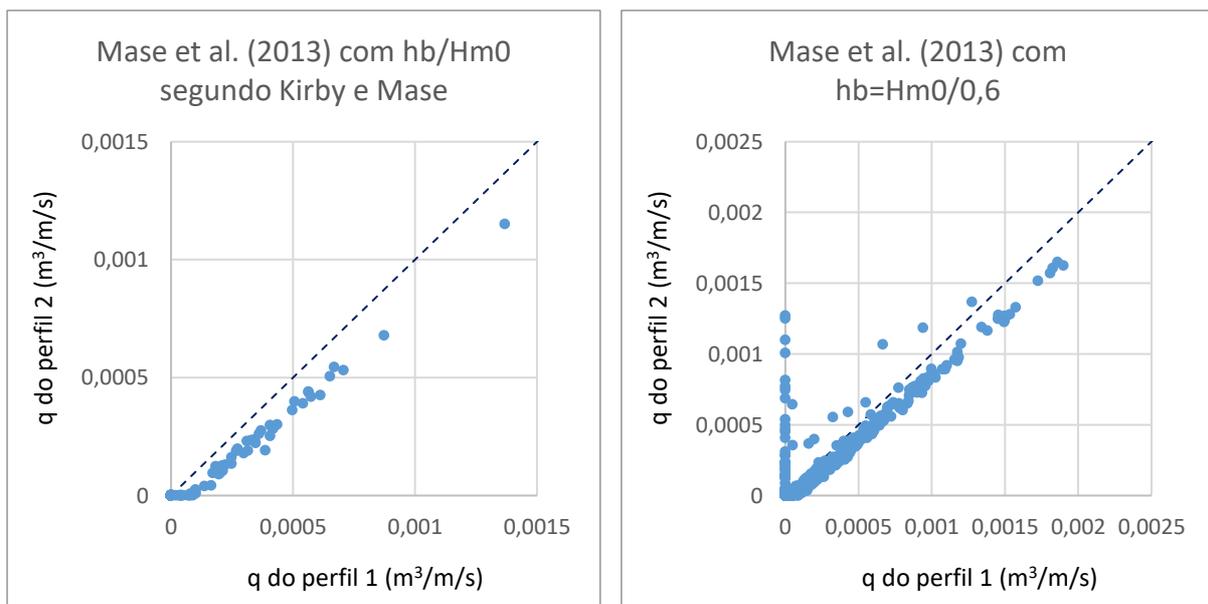


Figura 5.30- Comparação dos resultados obtidos segundo o perfil 1 com os do perfil 2- Mase *et al.* (2013), com hb/Hm0 segundo Kirby (esquerda) e Mase *et al.* (2013), com hb=Hm0/0,6 (direita)

Nas figuras 5.31 e 5.32 encontra-se a comparação entre os resultados obtidos utilizando o perfil 1 e os resultados do perfil 3, nas diversas fórmulas utilizadas. No perfil 3 utilizou-se o declive médio, tendo sido anulada parte da barra e parte da fossa. É possível observar que tanto na abordagem do Eurotop como na de Van Gent os resultados são idênticos, com exceção de alguns casos, onde no perfil 3 deixa de ocorrer galgamento. Em relação às fórmulas de Mase, na abordagem com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase, os resultados são idênticos com os dois perfis, já com $hb=Hm0/0,6$ existem alguns casos onde os resultados obtidos com o perfil 3 são superiores. Isto pode ser justificado com o facto da A_{rea} usada nesta fórmula ser superior no perfil 1, o que resulta num declive imaginário superior.

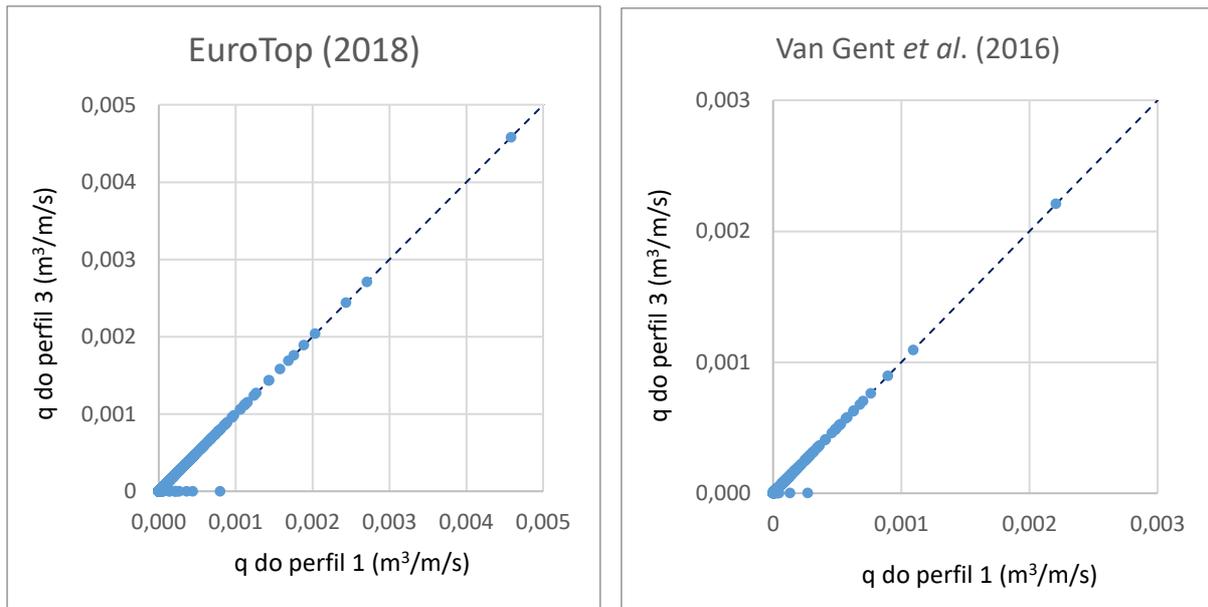


Figura 5.31- Comparação dos resultados obtidos segundo o perfil 1 com os do perfil 3- Eurotop, 2018 (esquerda) e Van Gent *et al.*,2016 (direita)

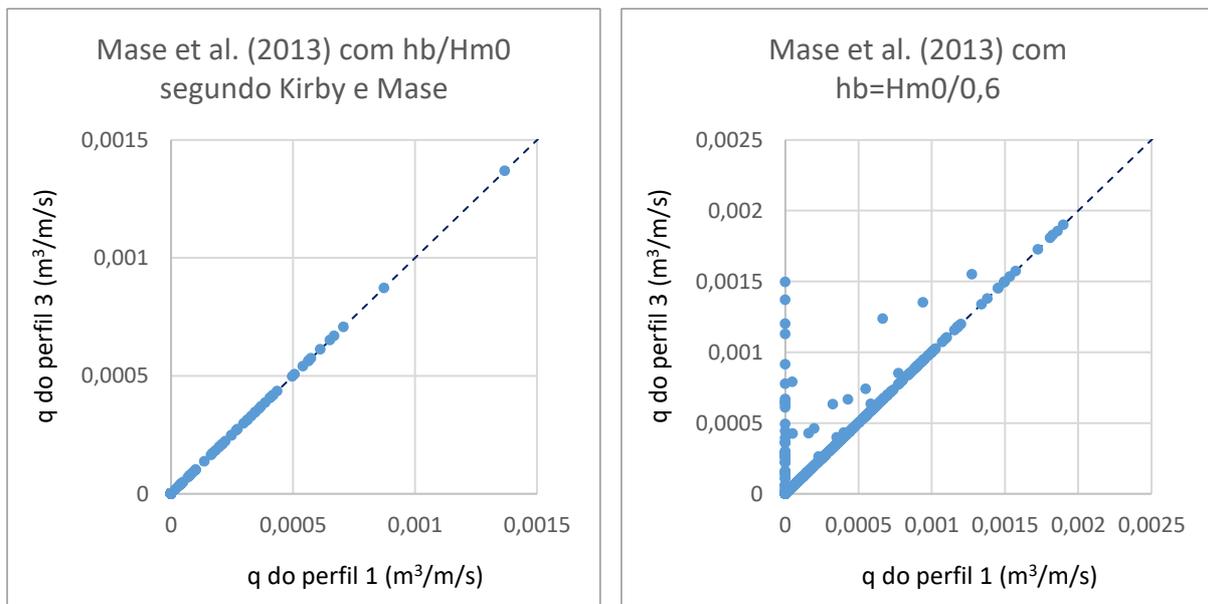


Figura 5.32- Comparação dos resultados obtidos segundo o perfil 1 com os do perfil 3- Mase *et al.* (2013), com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase (esquerda) e Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm0/0,6$ (direita)

A comparação dos resultados obtidos segundo o perfil 1 com os do perfil 4 encontram-se nas figuras 5.33 e 5.34. Recorda-se que no perfil 4 foi anulada a barra. É possível observar que a abordagem do Eurotop é a única que estima que ocorra galgamento com o perfil 4. As restantes fórmulas estimam galgamento nulo. Isto acontece porque o declive do fundo é mais suave, logo a rebentação dissipa mais energia e, desta forma, o espriamento reduz-se e não atinge o coroamento da estrutura. O EuroTop não tem isto em conta porque considera a altura de onda em frente à estrutura e, nos casos onde a inclinação característica é superior a 1:10, considera apenas a inclinação do talude da estrutura.

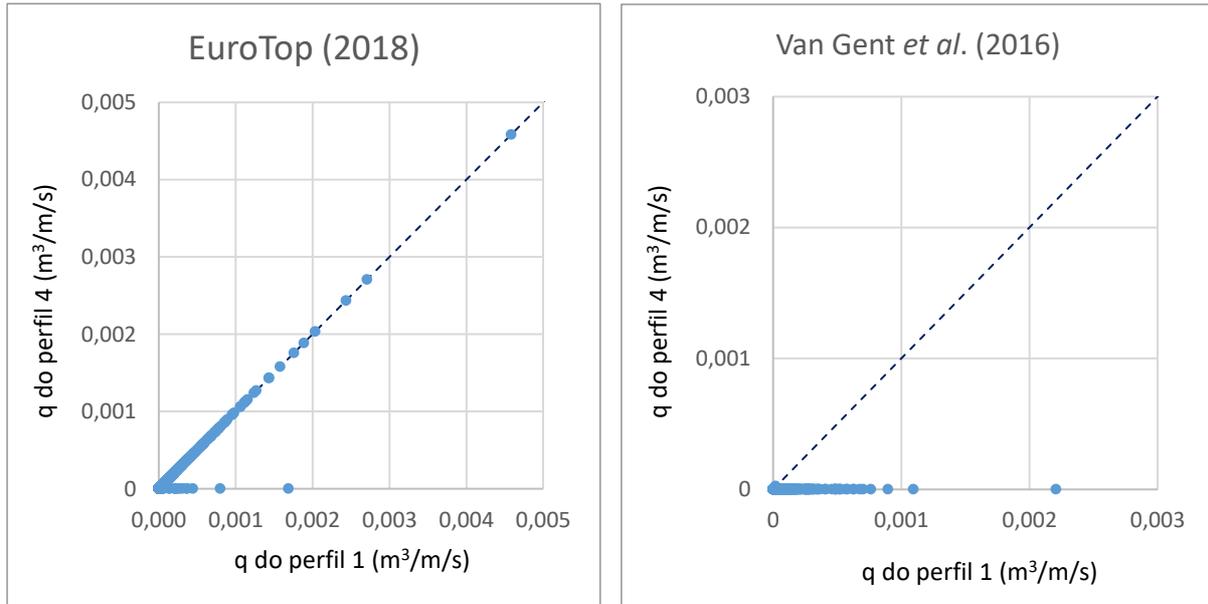


Figura 5.33- Comparação dos resultados obtidos segundo o perfil 1 com os do perfil 4- Eurotop, 2018 (esquerda) e Van Gent *et al.*, 2016 (direita)

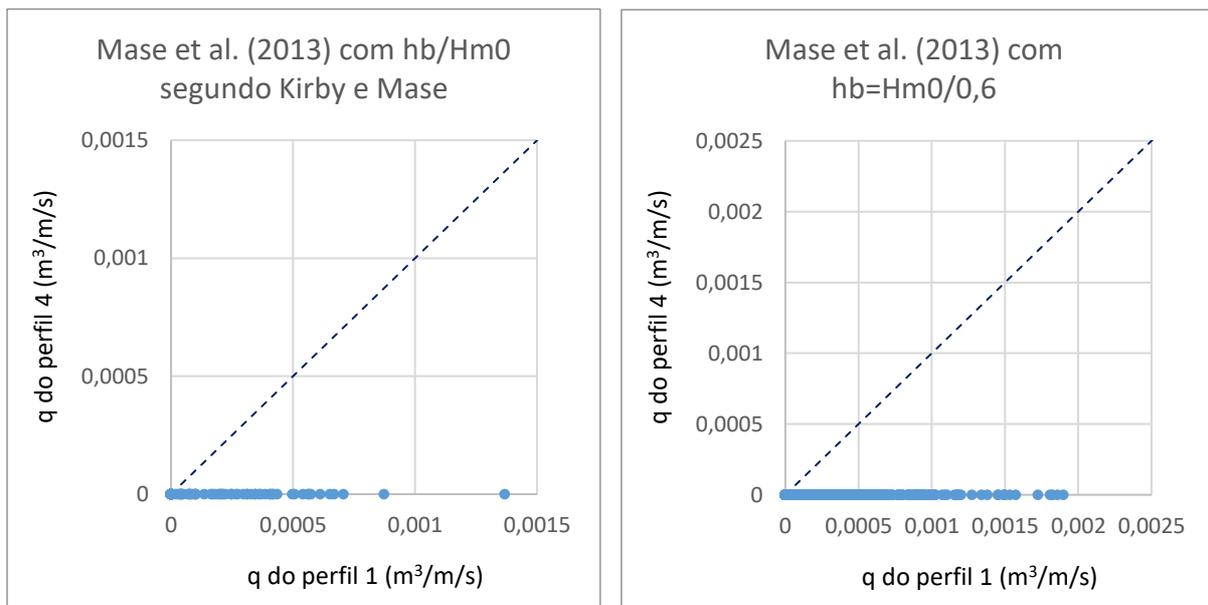


Figura 5.34- Comparação dos resultados obtidos segundo o perfil 1 com os do perfil 4- Mase *et al.* (2013), com hb/Hm_0 segundo Kirby e Mase (esquerda) e Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm_0/0,6$ (direita)

Por fim, na Figura 5.35 encontra-se a comparação entre os resultados obtidos utilizando o perfil 1 e os do perfil original, segundo a abordagem de Mase. O perfil original só foi possível utilizar nesta abordagem, por não ser sempre crescente. Em relação à fórmula com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase os resultados segundo estes dois perfis são iguais, já com $hb=Hm0/0,6$ obteve-se resultados superiores quando se utilizou o perfil original. Este aumento da estimativa não vai ao encontro do que era espectável, uma vez que utilizando o perfil original, a A_{rea} seria menor, o que devia originar maiores caudais de galgamento.

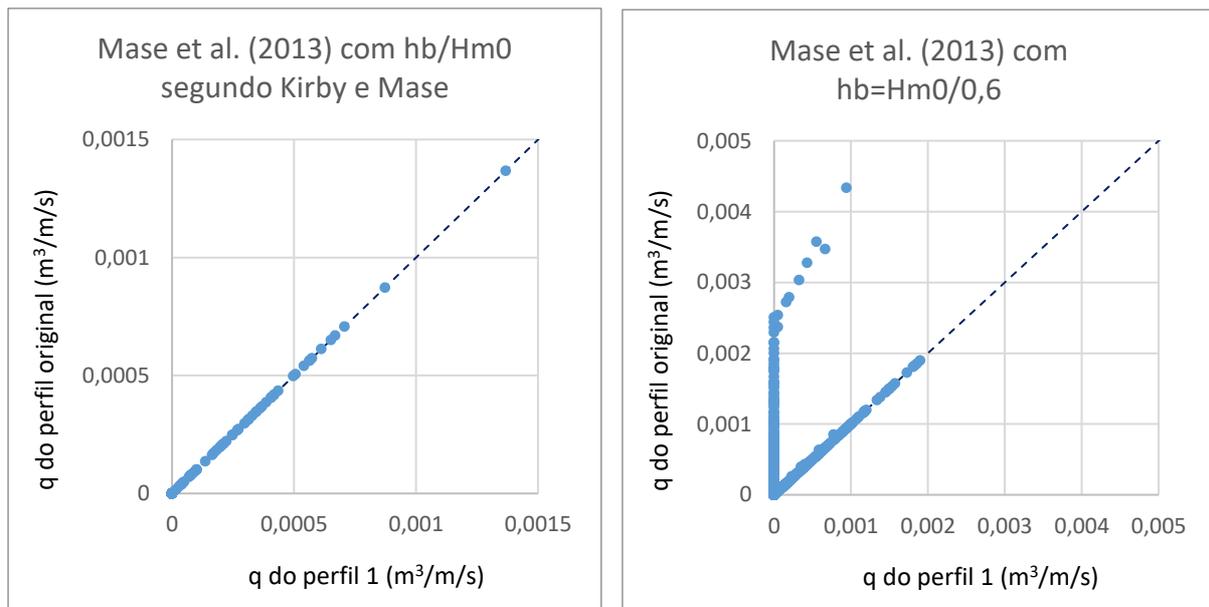


Figura 5.35- Comparação dos resultados obtidos segundo o perfil 1 com os do perfil original- Mase *et al.* (2013), com $hb/Hm0$ segundo Kirby e Mase (esquerda) e Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm0/0,6$ (direita)

Tendo em conta todos os gráficos anteriormente apresentados, é possível concluir que a barra presente no fundo do mar em frente à estrutura contribui para a ocorrência de galgamento, uma vez que nos dois primeiros perfis, onde esta se encontra mais definida, as estimativas de galgamento são superiores. Já no perfil 4, onde a barra foi eliminada, a estimativa de galgamento é muito baixa em todas as fórmulas utilizadas. Por este motivo, em situações como esta, o perfil original deve ser alterado de forma a manter o formato da barra. Dessa forma a estimativa de galgamento é mais gravosa, tornando os resultados mais seguros para fins de dimensionamento e projeto. Assim sendo, neste caso o perfil mais fidedigno seria o perfil 1.

6. Conclusões

6.1. Considerações Gerais

Esta dissertação teve como principal objetivo o cálculo do galgamento da estrutura de defesa longitudinal aderente da praia da Vagueira, localizada em Aveiro. Trata-se de uma zona com graves problemas de erosão, onde, em condições de agitação marítima adversas, a segurança de pessoas e bens na retaguarda da estrutura é posta em causa. Devido ao impacto das alterações climáticas, é espetável que os fenómenos erosivos e a frequência e intensidade dos fenómenos de galgamento e inundações costeiras aumentem no futuro.

Para o cálculo do galgamento da estrutura foram utilizados 58.076 casos de agitação marítima e nível do mar, registados de seis em seis horas entre 1979 e 2018.

A estrutura em estudo localiza-se numa zona de profundidades muito baixas, ficando por vezes totalmente emersa. Tendo em conta as características da estrutura, foram utilizadas as seguintes abordagens para calcular o caudal de galgamento:

- EuroTop (2018)- *Main Value Approach*;
- EuroTop (2018)- *Design Approach*;
- Goda (2009);
- Goda (2009), modificado por Altomare *et al.* (2020);
- Van Gent *et al.* (2016);
- Van Gent *et al.* (2016), modificado por Altomare *et al.* (2020);
- Mase *et al.* (2013), com hb/Hm_0 segundo Kirby e Mase;
- Mase *et al.* (2013), com $hb=Hm_0/0,6$.

A maioria destas fórmulas necessita do perfil do fundo do mar para estimar o caudal de galgamento. O perfil do fundo em frente à estrutura é composto por uma barra e uma fossa, que influenciam o comportamento da onda. No entanto, com exceção das abordagens de Mase *et al.* (2013), é necessário que o perfil seja sempre crescente para poder ser usado. Por este motivo foram criados quatro perfis diferentes, sempre crescentes, adaptados do perfil original para que fosse possível aplicar as fórmulas e analisar de que forma a escolha do perfil influencia os resultados.

Foi possível concluir que a barra presente no fundo do mar, em frente à estrutura, contribui significativamente para a ocorrência de galgamento, visto que nos perfis onde esta se encontrava mais definida foram obtidas estimativas de galgamento superiores em todas as fórmulas utilizadas. Por este motivo, em situações como esta, o perfil original deve ser alterado de forma a manter o formato da barra. Dessa forma a estimativa de galgamento é mais gravosa, tornando os resultados mais seguros para fins de dimensionamento e projeto.

Em relação aos resultados obtidos segundo as diferentes fórmulas utilizadas, a que originou resultados mais distintos das outras fórmulas foi a abordagem de Goda, possivelmente por ser a única que não tem em conta o perfil do fundo do mar, com resultados muito superiores aos das restantes fórmulas. Com exceção da abordagem de Goda, todas as fórmulas obtiveram resultados na mesma gama de valores, ainda que exista alguma divergência nos resultados obtidos.

Relativamente às estimativas máximas de galgamento, verificou-se que estas ocorrem em situações de agitação marítima com uma altura de onda significativa média de 4,46m, período de pico médio de 17,8s, direção média de 284° e um nível do mar médio de 3,55m. Embora algumas abordagens considerem a altura de onda mais favorável ao galgamento do que

o período de pico, em todas o nível do mar é o fator mais condicionante para ocorrência de galgamento.

6.2. Desenvolvimentos Futuros

São apresentadas, em seguida, algumas propostas para a continuação do trabalho realizado nesta dissertação.

Em relação à aplicação das fórmulas ao caso de estudo, seria interessante replicar o trabalho feito para os restantes perfis da estrutura, uma vez que nesta dissertação apenas se calculou o galgamento no perfil central.

No que diz respeito às fórmulas que utilizam a altura de onda no pé do talude, só foi possível, nesta dissertação, calcular o galgamento nos casos em que o nível do mar se encontra acima do pé do talude. Quando questionado, o 1º autor do artigo Altomare *et al.* (2016) e (2020), Corrado Altomare, sobre a utilização das fórmulas propostas nestes artigos, o autor sugeriu a utilização do programa numérico SWASH para calcular a altura de onda no pé do talude. Deste modo seria interessante seguir a sua sugestão de forma a estimar o galgamento para todas as condições de agitação.

Por fim, seria interessante comparar os resultados obtidos com dados do galgamento registados *in situ*.

Bibliografia

- Altomare, C., Suzuki, T., Chen, X., Verwaest, T., & Kortenhaus, A. (2016). Wave overtopping of sea dikes with very shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 116, 236–257. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.07.002>
- Altomare, Corrado, Suzuki, T., & Verwaest, T. (2020). Influence of directional spreading on wave overtopping of sea dikes with gentle and shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 157(May 2019), 103654. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103654>
- Bairrão, M., Neves, M. D. G., Reis, M. T., & Pinto, F. T. (2016). Galgamento de uma estrutura portuária protegida por um quebra-mar submerso: O caso do Porto de Leixões, Portugal. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 16(2), 121–131. <https://doi.org/10.5894/rgci568>
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. A., & Pozueta, B. (2005). Neural network manual for NN_Overtopping program. *Clash Wp8*. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Abf81b442-f3ed-4a6f-9b62-0c1dbb1e4c6c>
- Dalrymple, R. G. D. R. A. (2012). CEM part II chap 1. *Journal of Visceral Surgery*, 1100(April). <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23139152>
- Filipe Duarte Santos, António Mota Lopes, Gabriela Moniz, Laudemira Ramos, R. T. (2014). *Gestão Integrada da Zona Costeira*.
- Fortes, C. J. E. M.; Neves, M. G.; Capitão, R.; Pinheiro, L. (2020). *Avaliação do galgamento costeiro sem e com um quebramar destacado na frente da praia da Vagueira* (p. 4).
- Goda, Y. (2009). Derivation of unified wave overtopping formulas for seawalls with smooth, impermeable surfaces based on selected CLASH datasets. *Coastal Engineering*, 56(4), 385–399. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.09.007>
- Goda, Y. (2010). Reanalysis of regular and random breaking wave statistics. *Coastal Engineering Journal*, 52(1), 71–106. <https://doi.org/10.1142/S0578563410002129>
- INE. (2012). *Anuário Estatístico da Região*.
- Maia, A., Bernardes, C., & Alves, M. (2015). Cost-benefit analysis of coastal defenses on the Vagueira and Labrego beaches in North West Portugal. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15(1), 81–90. <https://doi.org/10.5894/rgci521>
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S., & Reis, M. T. (2013). Wave Runup and Overtopping at Seawalls Built on Land and in Very Shallow Water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139(5), 346–357. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000199](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000199)
- Negm, A., & Nassar, K. (2016). Determination of Wave Reflection Formulae for Vertical and Sloped Seawalls Via Experimental Modelling. *Procedia Engineering*, 154, 919–927. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.502>
- Pereira, R. C., Pinto, F. T., Silva, R., & Neves, L. Das. (2013). Avaliação experimental da influência de diferentes configurações da cabeça de quebramares destacados no comportamento morfológico da praia adjacente. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 13(May), 301–316. <https://doi.org/10.5894/rgci398>
- Silva, P. M. M. (2019). *Cálculo de galgamento em estruturas marginais . O caso de Cova Gala* .
- Soraia M. Romão; Paulo R. Baptista; Cristina A. Bernardes. (2015). Balanço sedimentar costeiro no troço litoral entre a praia da Barra e a praia de Mira. *VIII Congresso Sobre Planeamento e Gestão Das Zonas Costeiras Dos Países de Expressão Portuguesa*, 104.

- Van Gent, M. R. A., N.W.H. Allsop, T. Bruce, J. De Rouck, A. Kortenhaus, T. Pullen, H. Schüttrumpf, P. Troch, & B. Zanuttigh. (2018). *Eurotop*.
- Yuhi, M., Mase, H., Kim, S., Umeda, S., & Altomare, C. (2021). Refinement of integrated formula of wave overtopping and runup modeling. *Ocean Engineering*, 220(October 2020), 108350. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108350>



2020

Gonçalo Seixas Barreto Santos Rosa

Cálculo do galgamento em estruturas de defesa adre-
rente. O caso da Vagueira.