



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **Avaliação do risco de inundação da zona da Costa da Caparica**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território em Engenharia do Ambiente

Autor

**Patrícia Alexandra Antunes das Neves**

Orientador

**José Simão Antunes do Carmo**

**Conceição Juana Fortes**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Julho, 2013**

## AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer aos meus orientadores, ao Eng. José Simão Antunes do Carmo pelo incentivo dado a este trabalho em colaboração com o LNEC, à Eng<sup>a</sup>. Conceição Juana Fortes por toda a ajuda, apoio e dedicação durante todo o presente trabalho e à Eng<sup>a</sup>. Teresa Reis pela co-orientação fundamental neste trabalho.

Gostaria de agradecer à administração do Porto de Lisboa pela utilização dos dados da boia-ondógrafo.

Acima de tudo gostaria de agradecer ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil que me permitiu aceder às suas instalações e equipamentos. Em especial gostaria de agradecer aos colegas Pedro Poseiro pela ajuda dada durante todo o trabalho, incluindo a obtenção dos dados do modelo WWIII, e Rui Reis pela ajuda na aplicação do modelo SWAN. Gostaria de agradecer também ao Paulo Raposeiro, pela disponibilidade de todos os dados fornecidos em relação à Costa da Caparica, e pela disponibilidade de acompanhar-me ao local de estudo para medições da estrutura aderente.

Um agradecimento especial aos meus amigos e colegas que me incentivaram, e me apoiaram em todos os momentos, destacando a Joana Bidarra, Ana Neto pelo apoio e incentivo, e ao Marco Silva e à Joana Rodrigues por toda a ajuda dada na reta final de escrita e formatação do trabalho.

E finalmente agradecer de forma especial e grata aos meus pais e irmão por todo o apoio incondicional dado nos momentos mais difíceis, por partilharem comigo os momentos de alegrias e vitórias, pois sem eles nunca teria sido possível.

Um muito obrigada a todos.

Este trabalho é realizado no âmbito do projeto HIDRALERTA – sistema de previsão de inundações em zonas costeiras e portuárias, da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

---

## RESUMO

As zonas costeiras acolhem um vasto património histórico-cultural associado às funções de defesa das sucessivas atividades económicas e sociais que se têm localizado nestes espaços ao longo do desenvolvimento da sociedade portuguesa. Portugal possui uma extensa costa que se encontra totalmente exposta à severidade e aleatoriedade do regime do regime de agitação marítima, que promove um estado de alerta constante a situações de emergência nas zonas costeiras e portuárias. Posto isto é fundamental um planeamento e uma gestão eficaz de intervenções por parte das entidades responsáveis, com a implementação de sistemas de alerta e a criação de mapas de risco no sentido de diminuir os danos em edifícios e equipamento, ou a perda de vidas humanas.

O presente trabalho pretende avaliar a ocorrência de fenómenos como a inundação e o galgamento em praias e estruturas de defesa costeira existentes na Praia de São João da Caparica, localizada na Costa da Caparica, no município de Almada, no âmbito do projeto HIDRALERTA.

Desta forma, a metodologia aplicada no presente trabalho tem por base uma boa caracterização da agitação marítima partindo de previsões de agitação fornecidas pelo modelo numérico WAVEWATCH III, sendo posteriormente transferidas para uma zona junto à costa. Para essa transferência recorre-se ao modelo espectral SWAN, que é validado com os dados medidos *in situ* por uma boia-ondógrafo posicionada a oeste do Bugio. O período de estudo é de 2007 a 2012.

Obtidas as características de agitação marítima junto à costa procede-se ao cálculo do *run-up* e do galgamento na zona de praia e na zona de praia/estrutura, respetivamente. Posteriormente procede-se ao cálculo do nível máximo de inundação na zona de praia e do cálculo do caudal médio galgado por metro linear de estrutura na estrutura aderente.

A avaliação do risco tem em conta o produto entre o grau de probabilidade de ocorrência e o grau de consequência. O grau de risco é atribuído por intermédio de consulta de tabelas. Nas tabelas estão representadas as descrições preliminares da probabilidade de ocorrência e das consequências da ocorrência. O grau de risco é obtido através de uma matriz de cruzamento dos graus descritos anteriormente. Posteriormente com o grau de risco atribuído é possível obter a aceitabilidade desse grau de risco.

Relativamente aos resultados obtidos, verificou-se que o grau de risco varia consoante a caracterização da agitação marítima que é implementada nos cálculos do *run-up* na zona de praia.

**Palavras-chave:** Risco, inundação, *run-up*, *run-up*/galgamento, modelos empíricos e numéricos, Costa da Caparica, projeto HIDRALERTA.

## ABSTRACT

Coastal areas embrace a vast historical and cultural heritage, associated with defence functions of economic and social activities that have been located in these areas, throughout the development of the Portuguese society. Portugal has an extensive coast which is totally exposed to the severity and randomness of the sea agitation regime, which promotes a constant state of alert to emergency situations in coastal and port areas. Taking this into account, it is essential the implementation of efficient procedures of planning and management by the responsible entities, such as warning systems and preparation of risk maps to decrease damage to buildings and equipment, or loss of human lives.

The present study aims to evaluate the occurrence of phenomena such as floods and overtopping on beaches and coastal defence structures existing in São João da Caparica, located in Costa da Caparica, Almada, within the HIDRALERTA project.

Thus, the methodology applied in the present study is based on a good characterization of sea agitation, based on the sea agitation forecasts supplied by the numeric model WAVEWATCH III, which are subsequently transferred to an area by the coast.

For this transference we rely on the SWAN spectral model, which is validated with the data measured in situ by a float-sea wave graph positioned to the west of Bugio. The study period is from 2007 to 2012.

Once obtained the characteristics of the sea agitation along the coast, the run-up and the overtopping are calculated, respectively, in the beach area and in the beach/structure area. Afterwards, the maximum level of flooding in the beach area is calculated, as well as the average flow overtopped by linear metre of structure in the adherent structure.

The risk evaluation takes into account the product between the occurrence probability degree and the consequence degree. The risk degree is attributed by means of consulting tables. In the tables, the preliminary descriptions of the occurrence probability and of the occurrence consequences are represented. The risk degree is obtained through an intersection matrix of the degrees previously described. Once the risk degree has been attributed it is possible to obtain the acceptability of that degree of risk.

Regarding the results, it was verified that the degree of risk varies according to the characterization of the sea agitation that is implemented in the run-up calculations on the beach area.

**Key-Words:** Risk, flooding, *run-up*, *run-up/overtopping*, empirical and numerical models, Costa da Caparica, HIDRALERTA project.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE QUADROS .....	xi
SIMBOLOGIA .....	xiii
ABREVIATURAS .....	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do trabalho .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia.....	2
1.4 Estrutura da dissertação .....	3
2 ESTADO DA ARTE E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Modelos para a caracterização da agitação marítima junto à costa .....	4
2.2 Formulações para avaliação do run-up/galgamento e das cotas máximas de inundação.....	6
2.3 Metodologias para o cálculo de galgamentos .....	13
2.4 Metodologia de análise de Risco .....	15
3 MODELOS IMPLEMENTADOS.....	17
3.1 Modelo WW3 .....	17
3.2 Modelo SWAN .....	17
3.3 Estudo de Run-up e cálculo do Nível Máximo de Inundação .....	19
3.4 Estudo do run-up/ galgamento .....	24
3.5 Avaliação do Risco .....	29
4 CASO DE ESTUDO .....	35
4.1 Caracterização do local .....	35
4.2 Caracterização da Agitação marítima - Modelo SWAN.....	37
4.2.1 Condições de aplicação do modelo SWAN.....	37
4.2.2 Análise de Resultados.....	40
4.3 Estudo de <i>Run-up</i> e Galgamento.....	46
4.3.1 Condições de aplicação das fórmulas empíricas para o cálculo do run-up .....	47
4.3.2 Análise de Resultados de <i>Run-up</i> .....	51

---

4.3.3	Condições de aplicação das fórmulas empíricas de <i>Run-up</i> /Galgamento .....	58
4.3.4	Análise de Resultados de <i>Run-up</i> /galgamento .....	60
4.3.5	Avaliação do risco de inundação/galgamento .....	65
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	73
	ANEXO A - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DO MODELO SWAN .....	A-1
	ANEXO B - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DO CÁLCULO DE RUN-UP .....	B-1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Praias de <i>New South Wales</i> , Austrália (Google; Maio de 2013) .....	9
Figura 2.2- Relação entre a altura da ondulação estimada visualmente e a altura de espraio ( <i>run-up</i> ), obtida em sete praias do Algarve central, entre 1996 e 1999 (Teixeira, 2009). .....	10
Figura 2.3- Solução para cálculo da altura de espraio ( <i>run-up</i> ), baseada na totalidade dos dados experimentais (Teixeira, 2009). .....	11
Figura 2.4- Localização da Praia de Vale do Lobo (Raposeiro <i>et al.</i> , 2010). .....	12
Figura 2.5- Baía da Praia da Vitória, Açores, com os trechos estudados por Neves <i>et al.</i> (2012) e Rocha (2012). .....	14
Figura 3.1- Esquema representativo do sistema praia e sistemas adjacentes (Adaptado de Silva, 2012). .....	19
Figura 3.2- Esquema exemplificativo da ocorrência de um galgamento sobre uma estrutura de defesa costeira (Afonso, 2011) .....	24
Figura 3.3- Parâmetros de entrada do modelo neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld <i>et al.</i> , 2005). .....	26
Figura 3.4- Esquema exemplificativo do declive imaginário tendo em consideração a configuração da secção transversal de <i>foreshore</i> e da estrutura (Mase <i>et al.</i> , 2013). 27	
Figura 4.1- Localização do caso de estudo (Google earth, 3de junho de 2013). .....	35
Figura 4.2- Fotografias aéreas da Praia de São João da Caparica, cedidas pelo EPRL/IGP... 36	
Figura 4.3- Batimetria da zona de estudo (Arcgis). .....	37
Figura 4.4- Representação dos pontos estudados no presente trabalho. ....	39
Figura 4.5- Comparação da altura significativa na Boia-ondógrafo, modelo SWAN (Ponto P11) e dados ao largo (modelo WW3). .....	40
Figura 4.6- Comparação do período de pico $T_p$ na Boia-ondógrafo, modelo SWAN (Ponto P11) e dados ao largo (modelo WW3). .....	41
Figura 4.7- Direção de onda obtida na boia-ondógrafo. ....	41
Figura 4.8- Comparação entre as direções obtidas no modelo SWAN (Ponto P11) e dados ao largo (modelo WW3). .....	42



---

Figura 4.9- Comparação da altura significativa obtida pelo modelo SWAN (Ponto P2) e dados ao largo (modelo WW3).....	44
Figura 4.10- Comparação do período de pico $T_p$ obtido pelo modelo SWAN (Ponto P2) e dados ao largo (modelo WW3).....	44
Figura 4.11- Comparação entre as direções obtidas no modelo SWAN (Ponto P2) e dados ao largo (modelo WW3).....	45
Figura 4.12- Variação do período médio no ponto P2. ....	46
Figura 4.13- Perfil da praia representativo do local de estudo (adaptado de Raposeiro <i>et al.</i> 2013).....	47
Figura 4.14- Representação do nível máximo de inundação utilizando as metodologias de Hunt (1959) e Holman (1986) para o cálculo do <i>run-up</i> para condições de agitação marítima ao largo. ....	52
Figura 4.15- Representação do nível máximo de inundação utilizando as metodologias de Stockdon <i>et al.</i> (2006) e Nielsen & Hanslow (1991) para o cálculo do <i>run-up</i> para condições de agitação marítima ao largo.....	52
Figura 4.16- Representação do nível máximo de inundação utilizando as metodologias de Ruggiero <i>et al.</i> (2001) e Guza & Thornton (1982) para o cálculo do <i>run-up</i> para condições de agitação marítima ao largo.....	53
Figura 4.17- Representação do nível máximo de inundação utilizando as metodologias de Teixeira (2009) para condições de agitação marítima ao largo.....	53
Figura 4.18- Representação gráfica da média final do nível máximo de inundação dos diferentes autores (exceto Stockdon <i>et al.</i> 2006) utilizando dados <i>in situ</i> medidos na boia-ondógrafo.....	55
Figura 4.19- Representação gráfica da média final do nível máximo de inundação dos diferentes autores (exceto Stockdon <i>et al.</i> 2006) utilizando como características de agitação marítima os resultados obtidos pelo modelo SWAN no ponto P11.....	55
Figura 4.20- Representação do nível máximo de inundação pela metodologia de Holman (1986), com base nas características de agitação marítima junto à costa obtidas pelo modelo SWAN no ponto P2. ....	57
Figura 4.21- Fotografias da estrutura aderente de defesa costeira retiradas no local.....	58
Figura 4.22- Estrutura aderente de defesa costeira com representação das medidas do comprimento do talude e da largura da berma.....	59
Figura 4.23- Representação gráfica dos valores de $R_{máx.}$ com base nas características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo. ....	61
Figura 4.24- Representação gráfica dos valores de $R_{máx.}$ com base nas características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11.....	61

---

Figura 4.25- Representação gráfica dos caudais médios galgados por metro linear de estrutura com base no $R_{máx.(37\%,100)}$ e com base no $R_{máx.(99\%,100)}$ obtidos através das características de agitação marítima medidas na boia-ondógrafo. ....	62
Figura 4.26- Representação gráfica dos caudais médios galgados por metro linear de estrutura com base no $R_{máx.(37\%,100)}$ e com base no $R_{máx.(99\%,100)}$ obtidos através das características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11. ....	62
Figura 4.27- Fotos tiradas no local de danos na estrutura aderente de defesa costeira. ....	64
Figura 4.28- Representação das atividades económicas na Praia de São João da Caparica, Costa da Caparica, Almada. ....	69
Figura A.1- Comparação da altura significativa obtida pelo modelo SWAN (Ponto P6) e dados ao largo (modelo WW3).....	A-1
Figura A.2- Comparação do período de pico $T_p$ obtido pelo modelo SWAN (Ponto P6) e dados ao largo (modelo WW3).....	A-2
Figura A.3- Variação do período médio no ponto P6.....	A-2
Figura A.4- Comparação entre as direcções obtidas no modelo SWAN (Ponto P6) e dados ao largo (modelo WW3).....	A-3
Figura A.5- Comparação da altura significativa obtida pelo modelo SWAN (Ponto P10) e dados ao largo (modelo WW3).....	A-3
Figura A.6- Comparação do período de pico $T_p$ obtido pelo modelo SWAN (Ponto P10) e dados ao largo (modelo WW3).....	A-4
Figura A.7- Variação do período médio no ponto P10.....	A-4
Figura A.8- Comparação entre as direcções obtidas no modelo SWAN (Ponto P10) e dados ao largo (modelo WW3).....	A-5
Figura B.1- Representação do $R_{2\%}$ utilizando as metodologias de Hunt (1959) e Holman (1986) para o cálculo do <i>run-up</i> com condições ao largo. ....	B-1
Figura B.2- Representação do $R_{2\%}$ utilizando as metodologias de Stockdon <i>et al.</i> (2006) e Nielsen <i>et al.</i> (1991) para o cálculo do <i>run-up</i> com condições ao largo. ....	B-1
Figura B.3- Representação do $R_{2\%}$ utilizando as metodologias de Ruggiero <i>et al.</i> (2001) e Guza <i>et al.</i> (1982) para o cálculo do <i>run-up</i> com condições ao largo.....	B-2
Figura B.4- Representação do $R_{2\%}$ utilizando as metodologias de Teixeira (2009) com condições ao largo. ....	B-2
Figura B.5- Representação do $R_{1\%}=R_{máx.}$ utilizando as metodologias de Hunt (1959) e Holman (1986) para o cálculo do <i>run-up</i> com condições ao largo. ....	B-3
Figura B.6- Representação do $R_{1\%}=R_{máx.}$ utilizando as metodologias de Ruggiero <i>et al.</i> (2001) e Guza <i>et al.</i> (1982) para o cálculo do <i>run-up</i> com condições ao largo. ....	B-3

---

Figura B.7- Representação do $R_{1\%}=R_{máx.}$ utilizando as metodologias de Teixeira (2009) com condições ao largo. ....	B-4
Figura B.8- Representação do $R_{1\%}=R_{máx.}$ e do $R_{2\%}$ utilizando a metodologia de Holman ..	B-4
Figura B.9- Representação do $R_{2\%}$ utilizando a metodologia de Mase et al. (2013) com condições ao largo. ....	B-5

---

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1- Elementos, características e processos constituintes do sistema praia (Adaptado de Silva, 2012).....	21
Quadro 3.2- Fórmulas para o cálculo do <i>run-up</i> . ....	22
Quadro 3.3- Fórmulas empíricas para o cálculo de <i>run-up</i> /galgamento (Mase <i>et al.</i> , 2013)..	29
Quadro 3.4- Valores do caudal médio de galgamento admissível para estruturas marítimas (adaptado de Pullen <i>et al.</i> , 2007). ....	31
Quadro 3.5- Valores do caudal médio de galgamento admissível para pessoas (adaptado de Pullen <i>et al.</i> , 2007).....	31
Quadro 3.6- Valores de caudal médio galgado admissível para as diversas alternativas existentes em zonas abrigadas pela estrutura (adaptado de Pullen <i>et al.</i> , 2007). .	32
Quadro 3.7- Probabilidade de Ocorrência de valores que excedem limites pré-estabelecidos, (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011). ....	32
Quadro 3.8- “Consequências” da ocorrência de um evento adverso que excede os limiares pré-estabelecidos, (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011).....	33
Quadro 3.9- Grau de Risco: matriz de cruzamento do grau atribuído à Probabilidade de Ocorrência de um evento adverso e do grau atribuído às Consequências da ocorrência desse evento, (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011). ....	34
Quadro 3.10- Avaliação da aceitabilidade do grau de Risco obtido, (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011). ....	34
Quadro 4.1- Características principais das malhas de cálculo do modelo SWAN.....	38
Quadro 4.2- Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições da Boia-Ondógrafo. ....	43
Quadro 4.3- Níveis de inundação mínimos, máximos e médios calculados com diferentes metodologias utilizando dados <i>in situ</i> medidos pela boia-ondógrafo como características de agitação marítima. ....	54
Quadro 4.4- Comparação entre os valores da média final do nível máximo de inundação: mínimos, máximos e médios da boia-ondógrafo e no ponto P11.....	56
Quadro 4.5- Comparação entre os valores do nível máximo de inundação: mínimos, máximos e médios utilizando as características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo, no ponto P11 e no ponto P2. ....	57

Quadro 4.6- Comparação entre os valores do caudal médio galgado por metro linear de estrutura: mínimos, máximos e médios utilizando as características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo e no ponto P11.....	63
Quadro 4.7- Probabilidade de ocorrência (em %) de acontecimentos com risco de inundação na praia com condições e características de agitação marítima diferentes.....	67
Quadro 4.8- Probabilidade de ocorrência (em %) de acontecimentos com risco de galgamento com condições ao largo e características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo.....	67
Quadro 4.9- Probabilidade de ocorrência (em %) de acontecimentos com risco de galgamento com condições ao largo e características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11. ....	67
Quadro 4.10- Grau de Risco para as zonas em estudo atendendo às características de agitação marítima.....	69

## SIMBOLOGIA

$c_x, c_y$  - velocidades de propagação da onda no espaço

$c_\sigma, c_\theta$  - velocidades de propagação da onda no espetro

$g$  - aceleração da gravidade

$h$  - altura da água no pé da estrutura

$h_b$  - profundidade da água na berma da estrutura; profundidade de rebentação

$h_t$  - altura da água na banquetta do pé do talude

$m$  - declive da praia

$q$  - caudal médio galgado por metro linear da estrutura

$r$  - fator de correlação

$s$  - desvio-padrão

$t$  - tempo

$Ac$  - distância entre o nível médio do mar e a cota da berma superior da estrutura

$A_{rea}$  - área transversal determinada segundo Mase *et al.* (2013)

$B$  - largura da berma da estrutura medida na horizontal

$B_t$  - largura da banquetta no pé do talude

$C.I.$  - cota de inundação

$C_r$  - coeficiente de redução de galgamento

$E$  - energia da onda

$Gc$  - largura da berma superior

$H$  - altura da onda

$H_{m0}$  e  $H_{m0,toe}$  - altura significativa espectral no pé da estrutura

$H_{rms}$  - altura de onda média quadrática junto à costa

$H_s$  - altura significativa da onda

$H_{tr}$  - altura de transição

$H_{0rms}$  - altura de onda média quadrática ao largo

$H_0$  - altura da onda ao largo

$L_0$  - comprimento da onda ao largo

$L_{RU}$  - parâmetro utilizado no cálculo do *run-up* segundo Nielsen & Hanslow (1991)

$M.A.$  - maré astronómica

$N$  - direção espectral da ação da onda

$N.M.$  - nível de maré

$N_{máx. inundação}$  - nível máximo de inundação

$R$  - *run-up*; fator de correlação

$R_{m\acute{a}x.}$  - *run-up* máximo

$R_{m\acute{a}x.(37\%,100)}$  - *run-up* máximo não excedido em 37% dos casos em ensaios com 100 ondas

$R_{m\acute{a}x.(99\%,100)}$  - *run-up* máximo não excedido em 99% dos casos em ensaios com 100 ondas

$R_{m\acute{e}dio}$  - *run-up* médio

$R_s$  - *run-up* significativo (media do terço mais alto dos *run-up*'s)

$R_{1/10}$  - *run-up* correspondente à media do décimo mais alto dos *run-up*'s

$R_{1/3}$  - *run-up* correspondente à média do terço mais alto dos *run-up*'s

$R_{1\%}$  - Valor de *run-up* que excede em 1% o valor medido

$R_{2\%}$  - Valor de *run-up* que excede em 2% o valor medido

$R_c$  - distância entre o nível médio da água e a cota do coroamento da estrutura

$S_{in}$  - representa os fenómenos físicos de geração da energia da onda

$S.M.$  - Sobrelevação metereológica

$S_{nt}$  - representa os fenómenos físicos de redistribuição da energia da onda

$S_{total}$  - representa os fenómenos físicos de geração, redistribuição e dissipação da energia da onda

$T$  - período médio

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

$T_p$  - período de pico do espectro

$T_s$  - período de pico significativo

$Z.H.$  - zero hidrográfico

$\alpha$  - ângulo do talude da estrutura; ângulo do perfil da praia segundo Battjes & Groenendijk (2000)

$\alpha_a$  - ângulo que o talude imediatamente abaixo da berma faz com a horizontal

$\alpha_u$  - ângulo que o talude imediatamente acima da berma faz com a horizontal

$\alpha_b$  - ângulo que a berma faz com a horizontal

$\beta$  - ângulo do perfil da face da praia; ângulo entre a direção da onda incidente e a normal à estrutura

$\tan \beta$  - declive da face da praia

$\xi$  - número de Iribarren

$\xi_0$  - número de Iribarren, determinado com condições ao largo

$\gamma_f$  - parâmetro indicativo da permeabilidade e rugosidade da estrutura

$\theta$  - direção da agitação

$\sigma$  - frequência relativa

## **ABREVIATURAS**

ECMWF – *European Center for Medium-Range Weather Forecast*

INAG - Instituto Nacional da Água

NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

SPH - *Smoothed-particle hydrodynamics*

SWAN – *Simulating Waves Nearshore*

WWIII – *WaveWatch III*



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do trabalho

“A zona Costeira é uma área de equilíbrio frágil e de dinâmica muito complexa, que é necessário conhecer melhor e respeitar, no sentido de preservar e valorizar o património natural, paisagístico e cultural” (INAG).

Portugal, integrando uma longa costa, com características como o seu comprimento de cerca de 900 km, a severidade das condições marítimas e a elevada concentração de população e atividade económica, tem vindo a enfrentar situações de emergência causadas pela adversidade do mar.

Numa tentativa de mitigar a situação adversa, o Homem tem vindo a desenvolver um papel fundamental na implementação de diversos tipos e formas de proteção costeira, que representem um obstáculo à propagação da agitação marítima, abrandando a ação direta da onda, criando condições tranquilas para a entrada e acostagem de navios nos portos ou intervenções de proteção de praias. Entre as principais obras de proteção costeira incluem-se: alimentação artificial de praias, reabilitação de dunas, estruturas de engenharia de tipo longitudinal aderentes, isto é, obras de enrocamento, muros e taludes, estruturas de tipo longitudinal não aderentes como os quebramares destacados ou ainda estruturas transversais, como os esporões.

Já na atualidade, e também numa perspetiva de longo prazo, torna-se clara a necessidade e importância do conhecimento, *à priori*, da agitação marítima, das correntes e dos níveis de maré no local em estudo, sendo uma mais valia para a gestão integrada e sustentada da zona costeira.

Este é um trabalho realizado no âmbito do Projeto HIDRALERTA, cuja ideia base passa pela prevenção de situações de risco em zonas portuárias e costeiras, pela elaboração de mapas de risco que apoiem o planeamento e a gestão de intervenções por parte das autoridades responsáveis, e ainda a atempada emissão de alertas de forma a evitar perdas de vidas humanas e a reduzir prejuízos económicos e ambientais.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o risco de inundação e galgamento na Praia de São João da Caparica. Para tal, é necessário proceder a uma caracterização da agitação marítima, recorrendo a modelos numéricos de propagação de ondas desde o largo até à costa. Junto à costa, é necessário calcular o *run-up*, na zona de praia, e proceder a estudos de *run-up*/galgamento em zonas com estruturas aderentes. Posteriormente, e por fim, é fundamental a avaliação do risco de inundação e galgamento, recorrendo a tabelas previamente elaboradas, permitindo a atribuição do grau de risco de inundação em zonas sensíveis da área de estudo.

## 1.3 Metodologia

O local de estudo escolhido para este trabalho foi a praia de São João da Caparica, localizada no extremo norte da Costa da Caparica, município de Almada. Trata-se de uma praia com comprimento de 1380 m, confinada entre dois esporões, tem origem sedimentar arenosa caracterizada por um sistema de dunas muito frágeis, cujos riscos de inundação e galgamento estão associados à segurança de pessoas, casas e acessos.

Partindo de previsões de agitação marítima fornecidas pelo modelo WAVEWATCH III (Tolman, 2002), pretende-se transferir as previsões da agitação para uma zona junto à costa, já em águas intermédias a pouco profundas. Para o efeito é utilizado o modelo espectral SWAN (Booji *et al.*, 1999), o qual é previamente validado com os dados medidos *in situ* por uma boia-ondógrafo posicionada a oeste do Bugio, na entrada do canal da barra. São utilizados os dados recolhidos no período de 2007 a 2012.

Partindo das características da agitação junto à costa, obtidas com aqueles modelos, recorre-se à aplicação de fórmulas empíricas, para a determinação do *run-up* e do *run-up*/galgamento ao longo de dois perfis diferentes da praia (sem e com estrutura de proteção).

Uma vez obtidos os resultados da implementação de fórmulas empíricas é possível calcular o caudal galgado na zona protegida pela estrutura e o nível máximo de inundação na zona de praia. O nível máximo de inundação é calculado através da soma das contribuições da maré astronómica, da sobrelevação e do  $R_{2\%}$  (valor de *run-up* que excede em 2% o valor medido).

A avaliação do grau de risco à inundação e galgamento baseia-se no produto entre os valores do grau da probabilidade de ocorrência e os valores do grau de consequência. Para a atribuição do respetivo grau é necessário recorrer a tabelas. Nestas tabelas são representadas descrições preliminares da probabilidade de ocorrência e das consequências da ocorrência de valores que excedem limiares pré-estabelecidos. O valor do grau de risco pode ser obtido através de uma matriz de cruzamento do grau atribuído à probabilidade de ocorrência e do grau atribuído às consequências dessa ocorrência. Uma vez obtido o valor do risco é possível obter o grau de aceitabilidade desse mesmo risco.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

A estrutura da dissertação é composta por cinco capítulos principais, sendo que:

Capítulo 1 – Introdução – Apresentação do enquadramento do trabalho, os objetivos do mesmo, uma breve descrição da metodologia aplicada assim como uma breve estruturação da dissertação;

Capítulo 2 – Estado da Arte e Revisão Bibliográfica – Realização de uma revisão bibliográfica, com apresentação de alguns casos de estudo;

Capítulo 3 – Modelos Implementados – Descrevem-se de forma sucinta o modelo numérico WW III, o modelo numérico SWAN, e a formulação empírica aplicada nos cálculos do run-up e do galgamento. O capítulo termina com a descrição da metodologia utilizada para a avaliação do risco;

Capítulo 4 – Caso de Estudo – Apresentação do caso de estudo, fazendo uma breve caracterização do local e descrevendo a aplicação dos modelos anteriormente referidos incluindo a apresentação dos resultados e discussão dos mesmos;

Capítulo 5 – Conclusões e Desenvolvimentos futuros – São apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo da realização do trabalho e recomendados alguns desenvolvimentos futuro.

## 2 ESTADO DA ARTE E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No seu conjunto, a zona costeira de Portugal Continental está sujeita a uma série de riscos naturais que resultam de vários tipos de perigosidades, nomeadamente de erosão costeira, inundação de margens, galgamento do sistema dunar, movimentos de massa, *tsunamis* e degradação ambiental, perdas de *habitats*, e espécies e impactos assinaláveis na qualidade das águas (ANPC, 2010).

Os territórios costeiros têm vindo a concentrar não só uma grande maioria da população portuguesa, mas também de infraestruturas e de atividades económicas. Desta forma, as zonas costeiras têm que assumir uma importância estratégica em termos ambientais, económicos, sociais, culturais e recreativos.

Devido à enorme suscetibilidade das zonas costeiras aos fenómenos de erosão, temporais e situações meteorológicas extremas, ocorrem muitas vezes perdas de território e prejuízos pesados para os recursos naturais. Assim, é necessário realçar a necessidade de intensificar as medidas de salvaguarda dos riscos naturais na faixa costeira, nomeadamente através de monitorização e identificação de zonas de risco, tornando-as aptas a fundamentar os planos de ação necessários a uma adequada proteção, prevenção e socorro.

Para que haja uma visão integrada e fundamentada das potencialidades e dos riscos que afetam as zonas costeiras, de forma a haver uma correta implementação dos planos de ação, é necessário o conhecimento e a identificação das ameaças e riscos a que estas zonas estão sujeitas (ANPC,2010).

### 2.1 Modelos para a caracterização da agitação marítima junto à costa

Torna-se fundamental o conhecimento das propriedades da agitação marítima nas diversas áreas de estudo, pois ocorrem mudanças cíclicas nos regimes de ondas e de correntes que conduzem quer a modificações mais ou menos irregulares dos fundos e da geometria da costa, quer ao transporte de sedimentos, quer ainda a influências em projetos de navegabilidade ou de qualquer obra marítima em que se enquadrem.

O modelo WAVEWATCH III (Tolman 1997, 1999a, 1999b, 2009) é um modelo desenvolvido pelo NOAA/NCEP. Trata-se de uma evolução de modelos anteriores, WAVEWATCH e WAVEWATCH II, desenvolvidos em *Delft University of Technology* e na

NASA, respetivamente. O WAVEWATCH III é diferente dos modelos anteriores no que respeita às equações que resolve, à estrutura do modelo, aos métodos numéricos e às parametrizações físicas (National Weather Service Environmental Modeling Center). A versão do modelo 3.14 tem ainda uma importante vantagem, que é a sua aplicação a águas intermédias a pouco profundas.

O SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) é um modelo numérico de agitação marítima desenvolvido em *Delft University of Technology*. Trata-se de um modelo bastante útil em casos de estudo que envolvam aplicações a escalas oceânicas, que vão sendo reduzidas, cada vez mais refinadas, com transições da escala oceânica para a zona costeira. Este modelo baseia-se na equação de balanço da ação espectral que modela a geração, propagação e dissipação da energia das ondas do mar (Booji et al., 1999; SWAN-Team, 2010a; SWAN-Team, 2010b).

No âmbito da implementação do modelo SWAN, Faria (2009) abordou no seu trabalho uma previsão da agitação na costa Noroeste de Portugal. O objetivo do autor era a reprodução das condições da agitação geradas pelo vento na costa Noroeste Portuguesa e pela comparação dos resultados obtidos com os registos históricos da ondulação na boia de Leixões. Para efeitos de teste, foram usadas duas fontes diferentes para as velocidades do vento (*National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e *European Center for Medium –Range Weather Forecast* (ECMWF)). Na análise de resultados e conclusões o autor verificou que os dados provenientes do NCEP para a altura significativa não apresentavam grandes discrepâncias em termos máximos. Em relação às direções médias associadas ao período de pico, o modelo SWAN, corrido com os dados do NCEP, revelou-se bastante próximo da realidade. Relativamente à fonte ECMWF, no mês de dezembro ficou abaixo das expectativas devido à falta de agitação registada pela boia. O mês de janeiro revelou-se bastante melhor, o que levou o autor a concluir que os dados do ECMWF, numa fase precedente a qualquer projeto de previsão marítima, necessitavam de ser validados para o período sobre o qual o estudo incida. Desta forma, o estudo realizado por este autor foi inconclusivo relativamente à base de dados ECMWF.

Fernandez (2011) e Santos *et al.* (2010) aplicaram o modelo SWAN no âmbito da caracterização da agitação marítima na Praia da Vitória, no Arquipélago dos Açores. As corridas realizadas com o SWAN foram em modo estacionário e não estacionário, e na presença de vento. Nos cálculos foram incluídos os fenómenos físicos de refração, difração, empolamento, dissipação de energia por atrito de fundo, *whitecapping*, interação entre ondas e ainda com diferentes frequências.

Ângelo (2012) abordou a aplicação do SWAN para a caracterização da agitação na zona adjacente ao estuário de Diogo Lopes, no Brasil. O modelo foi forçado na fronteira de mar

através do modelo de escala oceânica WAVEWATCH III. Foram introduzidos dados relativos ao campo de ventos e variação do nível de maré baseados em observações recolhidas na estação meteorológica e maregráfica de Macau, localidade situada em terra. Esta estação foi escolhida devido à falta de dados recolhidos sobre o mar e ainda devido à proximidade à área estudada. A aplicação do modelo realizou-se em regime estacionário e em regime não estacionário. Verificou-se a influência do coeficiente de atrito de fundo, em que foram utilizados cinco valores diferentes, e verificaram-se também duas formulações diferentes de rebentação parcial (*whitecapping*): a formulação KOMEN de crescimento linear (Komen *et al.*, 1984) e a formulação WestH (Westhuysen *et al.*, 2007). Estas análises permitiram o conhecimento das condições de aplicação do modelo SWAN na zona em estudo, onde ocorria conjugação entre as condições modeladas pela brisa, com origem terra – mar e por episódios ocasionais de ondulação. O autor concluiu então que a formulação WestH fornecia melhores resultados, concluiu também que a variação do coeficiente de atrito de fundo se mostrou bastante influente na modelação da altura significativa e no período médio, e ainda que o regime não estacionário não fornecia os melhores resultados, ou seja, que a utilização do regime estacionário constituía a melhor opção.

No caso de estudo da Praia da Galé, Reis *et al.* (2013) aplicou o modelo SWAN na caracterização da agitação marítima. Neste caso foram introduzidos no modelo SWAN os dados da boia-ondógrafo de Faro, para caracterizar a agitação marítima e a maré ao largo. Foram estabelecidos dois casos: no 1º caso foi avaliado o desempenho do modelo SWAN, comparando os resultados numéricos obtidos por simulação com os correspondentes valores obtidos através das medições efetuadas por um ADP (*Acoustic Doppler Profiler*); no 2º caso foram comparados os resultados numéricos do modelo SWAN na posição do ADP, com os quais foi possível definir os regimes geral e médio. Após análise dos resultados obtidos, o autor pôde concluir que o modelo SWAN conseguia reproduzir bastante bem a ordem de grandeza das alturas significativas em relação aos valores medidos *in situ*. No entanto, relativamente aos parâmetros período e direção da onda verificaram-se algumas diferenças. Desta forma, o autor propôs como trabalho futuro a inclusão dos campos de vento.

## **2.2 Formulações para avaliação do run-up/galgamento e das cotas máximas de inundação**

Partindo da caracterização da agitação junto à costa, obtida com os modelos WAVEWATCH III e SWAN, é necessário proceder ao cálculo do *run-up*, e respetivas cotas máximas de inundação, na zona de praia (sem e com estrutura de proteção). Desta forma, ao longo do tempo tem vindo a ser proposto na literatura a aplicação de várias fórmulas empíricas, desenvolvidas e testadas por diversos autores.

Hunt *et al.* (1959) desenvolveram um trabalho com o objetivo de abordar estruturas como por exemplo paredões e quebramares, do ponto de vista da sua forma e eficácia na reflexão e dissipação de energia das ondas incidentes. As conclusões deste trabalho foram obtidas através da análise de testes em modelo físico em laboratório. Com a possibilidade da existência de efeitos de escala e pelo facto de as ondas utilizadas terem sido geradas mecanicamente, ao contrário do que ocorre na natureza, em que as ondas são geradas pelo vento, não foram verificadas variações ao nível do comportamento da onda. Este facto deve-se à diversidade de ondas que formam uma sucessão de ondas. Para fins de dimensionamento, o autor considera as características de onda utilizadas no seu trabalho como sendo a altura de onda significativa. Os autores são de opinião que muitos dos conceitos discutidos no seu trabalho são fundamentais e não sofrem grande variação em estudos realizados em modelos de grandes dimensões, ou com ondas geradas pelo vento. De forma resumida os autores apresentam no seu trabalho as principais características da conceção de estruturas de proteção costeira. A fim de conseguirem que a reflexão das ondas seja reduzida ao mínimo, os autores aplicam diferentes formulações empíricas. Desta forma, considerando estruturas com taludes contínuos impermeáveis, foram então desenvolvidas formulações para o cálculo do *run-up* em situações em que as ondas rebentam sobre a estrutura/praias e situações em que as ondas não rebentam na estrutura/praias. Para estruturas com declives compostos foi desenvolvida uma fórmula empírica para situações de ondas que rebentam sobre a estrutura. Os autores desenvolveram ainda formulações aplicadas a bermas, aplicadas a estruturas com declive contínuo, e aplicadas a estruturas rugosas e porosas cujo fator de redução é tratado como uma medida da eficácia do material para a dissipação da energia da onda que se aproxima. Por fim, consideraram ainda que, como material de construção, os tetrapodes se aplicam, pois incorporam tanto a rugosidade como a porosidade, assim como têm qualidades de bloqueio, podendo ainda ser construídos com qualquer tamanho.

A fim de avaliar a existência de valores extremos de *run-up* em praias naturais Holman (1986) calculou os valores de *run-up* máximos para 149 séries de dados de 35 minutos em condições de uma praia natural. O autor concluiu que a parametrização de dados deve ser feita através do número de Iribarren. Concluiu que as estatísticas dos valores de *run-up* totais (com *setup* incluído) se apresentaram mais dispersas do que sem *setup* (apenas considerando *swash*). Este facto deve-se à dispersão dos dados de *setup* e indica a necessidade de um estudo mais aprofundado. Durante o desenvolvimento do trabalho o autor pôde verificar que em praia arenosas em erosão, sob ataque de tempestades, o número de Iribarren não pode ser calculado *a priori*, uma vez que a inclinação da praia é desconhecida. No entanto, para uma estrutura de inclinação conhecida, o autor propõe uma fórmula que permite estimar razoavelmente o número de Iribarren em situação de tempestade. Assim sendo, este pode ser calculado através da equação (1) :

$$\xi_{0_{storm}} = 6.3\beta \quad (1)$$

Embora os resultados provenientes do desenvolvimento do trabalho deste autor sejam considerados de elevada qualidade, estes são baseados em dados provenientes de um único local de estudo. Assim, é importante a utilização destas formulações em condições tais que as características do local de estudo sejam semelhantes.

Nielsen & Hanslow (1991) desenvolveram um trabalho em que foram medidas distribuições de *run-up's* de ondas em praias naturais, na costa de New South Wales, na Austrália (Figura 2.1). Verificou-se através dos dados de campo que a distribuição de Rayleigh descreve com razoável aproximação o nível máximo atingido pelas ondas individuais, sendo a escala vertical de melhor ajuste proporcional à altura multiplicada pelo número de Iribarren para as praias de maior declive, de acordo com a fórmula para ondas regulares que rebentam sobre as estruturas proposta por Hunt *et al.* (1959). No entanto, para praias planas, a dimensão vertical da distribuição é independente do declive da praia. Concluiu-se que a demarcação, entre as praias íngremes e planas, é pela inclinação da face da praia com o valor aproximado de 0.10.

Nielsen & Hanslow (1991) desenvolveram um trabalho em que foram medidas distribuições de *run-up's* de ondas em praias naturais, na costa de New South Wales, na Austrália (Figura 2.1). Verificou-se através dos dados de campo que a distribuição de Rayleigh descreve com razoável aproximação o nível máximo atingido pelas ondas individuais, sendo a escala vertical de melhor ajuste proporcional à altura multiplicada pelo número de Iribarren para as praias de maior declive, de acordo com a fórmula para ondas regulares que rebentam sobre as estruturas proposta por Hunt *et al.* (1959). No entanto, para praias planas, a dimensão vertical da distribuição é independente do declive da praia. Concluiu-se que a demarcação, entre as praias íngremes e planas, é pela inclinação da face da praia com o valor aproximado de 0.10.





Figura 2.1- Praias de *New South Wales*, Austrália (Google; Maio de 2013)

Também no trabalho desenvolvido por Stockdon *et al.* (2006), com o objetivo de parameterizar de forma empírica os fenómenos de *setup*, *swash* e *run-up*, foram utilizados dados de campo considerando uma ampla gama de condições. O *run-up* depende dinamicamente de dois processos diferentes: tempo médio de *setup* e total de *swash*, sendo cada um parametrizado separadamente. Ao nível da parametrização do *setup*, esta foi obtida através de uma fórmula dimensional do número de Iribarren, que se baseia no declive da praia, na altura da onda e no comprimento de onda em águas profundas. Ao nível da parametrização do fenómeno *swash*, este pode ser caracterizado segundo bandas de frequências infravermelhas.

As relações descritas pelo autor para os fenómenos *setup* e *swash* mostraram grandes desvios sob condições extremas de dissipação em dois locais de campo. Ao nível do desempenho da parametrização do *run-up*, este foi testado em cada local. A diferença média entre o *run-up* estimado e o *run-up* medido foi de -17 cm, indicando uma tendência da parametrização para subestimar picos de elevação do *run-up*. Verificou-se também que em dias em que a zona *foreshore* era variável, o *run-up*, em particular na banda incidente do fenómeno *swash*, variou espacialmente.

Teixeira (2009) desenvolveu um trabalho com o objetivo de definir os elementos necessários para uma delimitação física do leito e da margem das águas do mar. Os resultados apresentados assentam em informação cartográfica à escala 1/2000 e em treze anos de observação e medições experimentais, traduzindo as condições morfológicas atuais. As

fórmulas empíricas desenvolvidas por este autor foram baseadas em dados experimentais recolhidos no terreno do litoral sul do algarve, para proceder ao cálculo da altura do *run-up* das vagas em condições de agitação média do mar. Foram desenvolvidas equações mais simples, que relacionam a altura do espraio, ou seja o *run-up*, com a ondulação incidente, apenas considerando o parâmetro altura da onda. Para o objetivo do trabalho, o nível de *run-up* de interesse corresponde ao *run-up* máximo ( $R_{máx.}$ ), uma vez que é este o nível que traduz o limite da inundação máxima da praia. Durante o período entre 1996 e 1999, procedeu-se a mais de uma centena de medições experimentais em sete praias do litoral do Algarve, onde foram medidas as cotas das linhas de preia-mar e estimada visualmente a altura da ondulação incidente. Em cada observação, o *run-up* máximo ( $R_{máx.}$ ) foi calculado a partir da diferença entre a cota da linha de maré medida e o plano da preia-mar prevista nas tabelas de maré publicada pelo Instituto Hidrográfico. Através da regressão linear apresentada na Figura 2.2, o autor obteve a equação da reta que melhor se ajusta aos dados experimentais.

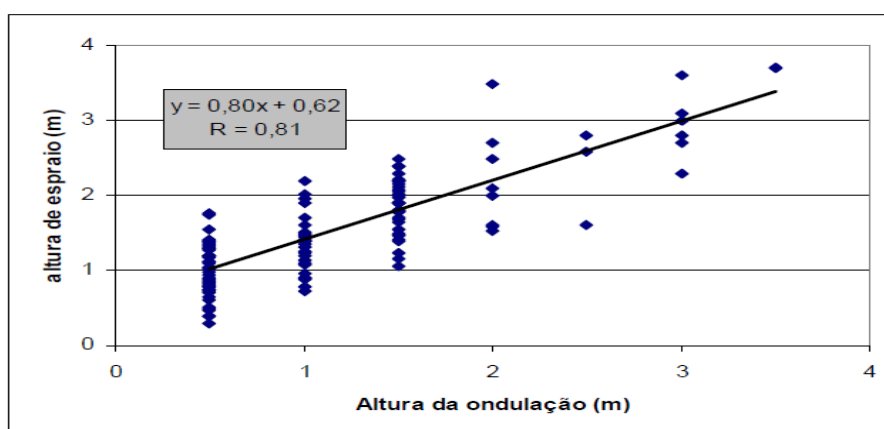


Figura 2.2- Relação entre a altura da ondulação estimada visualmente e a altura de espraio (*run-up*), obtida em sete praias do Algarve central, entre 1996 e 1999 (Teixeira, 2009).

Posteriormente o autor desenvolveu formulações contendo os parâmetros escalares da ondulação e o declive:  $R = c(H, L, \beta)$ . A informação relativa aos parâmetros escalares da ondulação foi retirada dos dados produzidos pela boia-ondógrafo fundeada ao largo de Faro. Relativamente aos dados experimentais, a equação da reta que melhor sintetiza a relação entre o *run-up*, os parâmetros escalares da ondulação ao largo e a inclinação da face da praia, obtida por regressão linear, está representada na Figura 2.3.

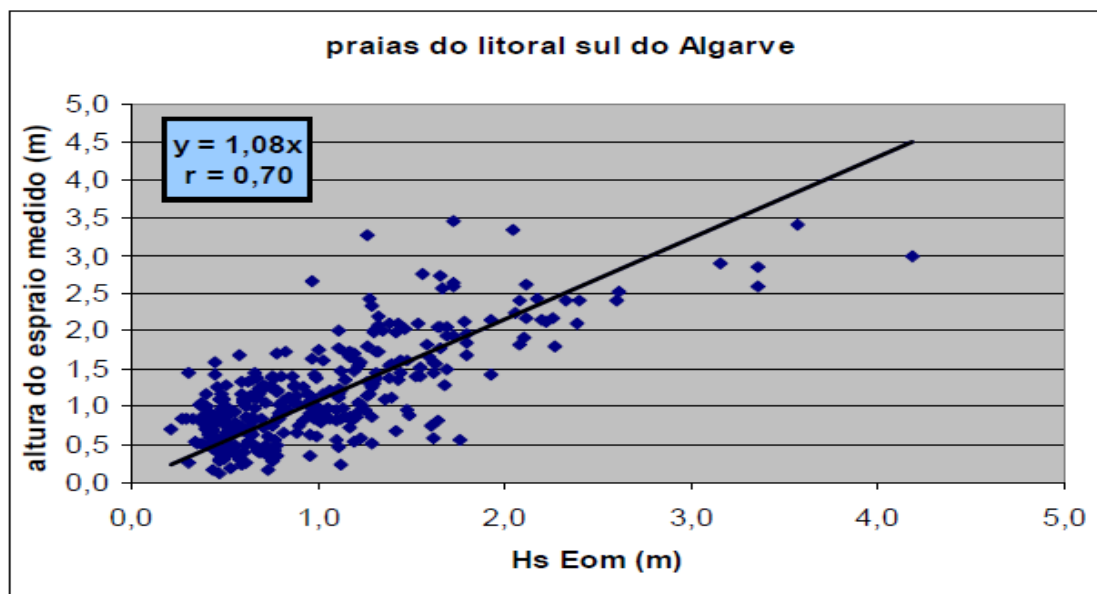


Figura 2.3- Solução para cálculo da altura de espraio (*run-up*), baseada na totalidade dos dados experimentais (Teixeira, 2009).

Ruggiero *et al.* (2001) desenvolveram um modelo de avaliação da suscetibilidade das características da costa à erosão costeira. Este modelo, inclui a análise das probabilidades de valores extremos dos níveis da água devidos às marés afetadas por processos oceanográficos e atmosféricos, bem como o fenómeno de *run-up* resultante de ondas de tempestades em praias. O método foi aplicado a vários locais ao longo da costa de Oregon, revelando diferenças entre eles, dependendo da quantidade de areia na praia e da sua capacidade para amortecer a incidência das ondas. Os autores afirmam ainda que o modelo apesar de ter sido desenvolvido para a costa de Oregon, pode ser usado em outros litorais analisando episódios de marés extremas e fenómenos de *run-up* de ondas de tempestades para locais específicos. Os autores concluíram que as avaliações se correlacionaram bem com as observações qualitativas e quantitativas dos níveis de erosão. Desta forma, com o modelo desenvolvido no trabalho de Ruggiero *et al.* (2001), a ocorrência de erosão pode ser prevista para outros locais usando registos de ondas, de marés e da morfologia da praia. Como trabalhos futuros, o autor propôs a inclusão de forças de impacto, a fim de prever as taxas de erosão em falésias e dunas frontais.



Figura 2.4- Localização da Praia de Vale do Lobo (Raposeiro *et al.*, 2010).

Raposeiro *et al.* (2010) calcularam o nível de *run-up* máximo na Praia de Vale do Lobo, apresentada na Figura 2.4, através das fórmulas propostas por Mase (1989) e Mase *et al.* (2003), desenvolvidas a partir de resultados obtidos em testes de modelo físico, e por fórmulas propostas por Nielsen & Hanslow (1991) e Teixeira (2009), desenvolvidas com base em dados de campo.

Dos cálculos efetuados, Raposeiro *et al.* (2010) concluíram que a relação entre os valores de *run-up* máximo ( $R_{m\acute{a}x.}$ ) dados por Mase (1989) e os valores obtidos por Teixeira (2009) variam entre 1.58 e 2.86, isto é,  $1.58 < R_{m\acute{a}x.Mase}/R_{m\acute{a}x.Teixeira} < 2.86$ . Verificou-se que os resultados obtidos com a metodologia de Nielsen & Hanslow (1991) são muito semelhantes aos resultados obtidos com a metodologia de Teixeira (2009); verificou-se também que a consideração das condições de agitação marítima junto à costa através da aplicação da formulação de Mase *et al.* (2003) não resultava em nenhum melhoramento significativo do ajuste obtido com a formulação de Teixeira (2009). Por fim, verificou-se ainda que os valores máximos das cotas máximas de inundação são semelhantes com a aplicação das metodologias de Nielsen & Hanslow (1991) e Teixeira (2009), e muito inferiores aos valores obtidos pela aplicação da metodologia de Mase (1989).

Em 2011, Sancho *et al.* implementaram uma metodologia para cálculo do *run-up* e posterior cálculo de cotas máximas de inundação no Litoral da Ria Formosa. Para tal, recorreram à aplicação de 10 fórmulas desenvolvidas pelos seguintes autores: Hunt *et al.* (1959), Battjes (1971), Holman & Sallenger (1985), Holman (1986), Nielsen & Hanslow (1991), Raubenheimer & Guza (1996), Stockdon *et al.* (2006) e Teixeira (2009). Com a metodologia implementada, os autores concluíram que as três expressões da autoria de: Holman (1986), Stockdon *et al.* (2006) e Raubenheimer & Guza (1996), desenvolvidas para praias dissipativas, eram desadequadas. Relativamente à primeira expressão de Teixeira (2009), que depende somente da altura significativa da onda, negligenciando o declive da face da praia e o

período da onda, esta sobrestimava o *run-up* no litoral nascente. As restantes formulações forneceram estimativas coerentes entre si e com os dados observados do terreno. Verificou-se um maior *run-up* nos setores orientados a SW.

Raposeiro *et al.* (2013) aplicaram na praia de S. João da Caparica uma metodologia de cálculo do *run-up* e nível máximo de inundação tendo por base o trabalho desenvolvido por Sancho *et al.* (2011). O resultados mostraram que formulações diferentes conduziram a resultados semelhantes em termos de valores médios e máximos de *run-up*. No entanto, as formulações de Raubenheimer & Guza (1996) e Nielsen & Hanslow (1991) apresentaram os valores de *run-up* mais alto e mais baixo, respetivamente, tendo estes sido eliminados para efeitos da determinação do valor médio usado no cálculo dos níveis de inundação. Em termos de níveis de inundação, os resultados confirmaram algumas situações de inundação. Em termos de trabalho futuro, o autor propôs o estabelecimento de um modelo de SIG e uma avaliação do risco de inundação.

### **2.3 Metodologias para o cálculo de galgamentos**

Ainda junto à costa, existem zonas de praia protegidas por estruturas que em situações de emergência podem ser galgadas, colocando em risco pessoas e infraestruturas. Os fenómenos de galgamento podem ser avaliados por diversas metodologias, nomeadamente recorrendo a modelos físicos, a fórmulas empíricas ou a modelos neuronais.

No âmbito do estudo de galgamentos, Afonso (2011) desenvolveu um “Estudo Numérico do Galgamento de Estruturas de Proteção Costeira” com aplicação de um modelo numérico baseado num método de partículas móveis sem necessidade de malha (*SPH – Smoothed-particle hydrodynamics*), como ferramenta para a simulação do galgamento resultante da interação onda-estrutura. Para tal, o modelo foi aplicado num cenário de praia com estrutura de proteção costeira impermeável, e para a qual existem dados de experiências já realizadas no LNEC em modelo físico, definido por um talude duma praia e uma estrutura de defesa. Com a realização do trabalho, o autor concluiu que em relação ao caudal médio galgado o resultado do modelo numérico se aproximou do resultado do modelo experimental, o que levou a uma proposta diferente da estrutura, de modo a permitir a redução da cota de coroamento da mesma. No entanto, apesar de o modelo apresentar potencialidades para aplicações em casos de estudo de engenharia costeira, a sua utilização como ferramenta numérica para a conceção, análise e otimização de estruturas marítimas terá que ser objeto de melhorias. Assim, o autor propôs, como desenvolvimentos futuros, a implementação no modelo da capacidade de geração de ondas, com absorção ativa/dinâmica das ondas refletidas, evitando assim alterações do sinal incidente, e ainda a realização de testes de sensibilidade para melhor perceção dos parâmetros implementados no modelo.

Uma alternativa a esta metodologia, é o recurso a modelos neuronais, com aplicação da ferramenta NN\_OVERTOPPING2, desenvolvida por Coeveld *et al.* (2005).

Em Neves *et al.* (2011), no âmbito da avaliação do risco de galgamento do posto 2 do molhe oeste do Porto de Sines, foi aplicada a ferramenta NN\_OVERTOPPING2. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de avaliar as potencialidades e limitações deste método de cálculo de galgamento no âmbito da avaliação de riscos. Apesar da sua fácil aplicabilidade a diferentes estruturas e da sua rapidez de cálculo, verifica-se que para baixos valores de caudais a ferramenta se encontra frequentemente fora da sua gama de aplicabilidade. Em Neves *et al.* (2012) esta ferramenta foi aplicada a três trechos distintos de estruturas de proteção costeira ou portuária existentes na baía da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores, onde está localizado o porto da Praia da Vitória, Figura 2.5. Os trechos estudados foram: a secção do molhe sul do porto que protege diretamente o cais 12, um trecho da proteção marginal da baía diretamente em frente à entrada da baía da Praia da Vitória e o trecho correspondente ao perfil corrente do enraizamento do esporão existente na mesma zona. A facilidade de utilização da ferramenta foi a principal conclusão do trabalho.

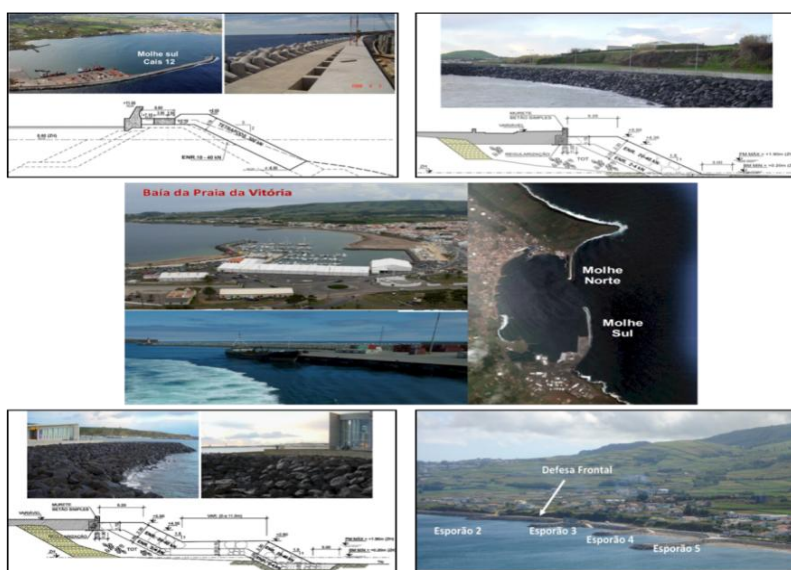


Figura 2.5- Baía da Praia da Vitória, Açores, com os trechos estudados por Neves *et al.* (2012) e Rocha (2012).

Ainda relativamente ao estudo de galgamentos na Praia da Vitória, ilha Terceira, Açores, a autora Rocha (2012) implementou a metodologia já desenvolvida em trabalhos anteriores para o mesmo caso de estudo, mas considerando a variação do nível de maré, tendo como objetivo melhorar a caracterização da agitação. Concluiu assim que a variação do nível de maré é importante, na medida em que influencia quer as alturas significativas de onda quer as direções da agitação, conduzindo a diferenças tanto a nível do número de galgamentos como

da quantidade de caudal médio galgado Silva (2012) e Silva *et al.* (2012) aplicaram a mesma metodologia, no entanto ao nível da caracterização da agitação marítima o nível de maré manteve-se contante. A ferramenta NN\_OVERTOPING2 foi aplicada em duas estruturas portuárias do porto, o molhe principal e a estrutura de retenção das piscinas. Adicionalmente, foi estudado o cálculo do caudal galgado para o molhe principal do porto considerando um conjunto de cenários correspondentes a situações de tempestade. O período de estudo mostrou ser curto, pelo que os galgamentos nas estruturas seleccionadas não ocorreram. Tal deveu-se aos baixos valores das alturas significativas de onda que ocorreram naquele período. No entanto, para o conjunto de cenários correspondentes a tempestades, os autores verificaram e concluíram que os valores de galgamentos na zona do molhe principal seriam significativos, pondo em causa o funcionamento das atividades portuárias. Em conclusão dos seus trabalhos, os autores Afonso (2011), Neves *et al.* (2011), Neves *et al.* (2012), Rocha (2012), Silva (2012) e Silva *et al.* (2012) referiram que a ferramenta NN\_OVERTOPING2 é simples na sua utilização, é rápida no cálculo e de grande abrangência no que diz respeito aos tipos de estruturas e às condições de agitação. Desta forma, podemos concluir que esta ferramenta constitui uma boa alternativa para a estimação do caudal médio galgado, caso não se encontrem disponíveis dados de protótipo, valores de ensaios em modelo físico ou resultados de modelos numéricos.

## **2.4 Metodologia de análise de Risco**

Para apoio à decisão na gestão portuária e costeira, além da correta caracterização da agitação marítima e da análise das respostas das estruturas de proteção portuária e costeira à agitação nelas incidente, é igualmente fundamental desenvolver uma metodologia de avaliação do risco, quer de inundação de praias, quer de galgamento de estruturas. Trata-se de uma metodologia relativamente recente, que passa pela combinação das probabilidades de ocorrência com os valores das consequências, recorrendo a quatro tabelas: uma Tabela de probabilidades de ocorrência, uma Tabela de consequências, uma Tabela de grau de risco e ainda uma Tabela de avaliação da aceitabilidade do grau de risco.

Esta metodologia foi implementada no trabalho desenvolvido em zona de praia por Raposeiro & Ferreira (2011), no sentido de se realizar uma avaliação do risco de inundação com desenvolvimento de estratégias para um planeamento sustentável na Praia de Vale do Lobo, no Município de Loulé.

Neves *et al.* (2011) aplicaram a metodologia ao Posto 2 do molhe oeste do Porto de Sines. Para tal, analisaram de forma expedita as atividades desenvolvidas na zona abrigada pela estrutura e o impacto na segurança e integridade da própria estrutura marítima, de veículos, equipamento, pessoas e navios, de forma a estabelecer valores preliminares de caudais críticos

admissíveis. O máximo grau de risco encontrado foi associado às consequências do galgamento no equipamento, correspondendo a um risco considerado de aceitável/tolerável.

No trabalho realizado por Neves *et al.* (2012), na baía da Praia da Vitória, Açores, a metodologia foi implementada na secção do molhe sul do porto que protege diretamente o cais 12, num trecho da proteção marginal da baía diretamente em frente à entrada da baía da Praia da Vitória e no trecho correspondente ao perfil corrente do enraizamento do esporão existente na mesma zona. Da avaliação de risco efetuada foi concluído que para o cais 12 e para a defesa frontal o risco é reduzido, sendo necessárias algumas medidas de controlo levadas a cabo pelo porto. Para o enraizamento do esporão 3 o risco revelou-se insignificante, não sendo necessário adotar quaisquer medidas. Como desenvolvimentos futuros, Neves *et al.* (2012) propuseram o desenvolvimento de uma tabela de consequências com custos associados e análise de inundação das áreas em que se verificou a ocorrência de galgamentos.

Rocha (2012) aplicou igualmente a metodologia de avaliação do risco à Praia da Vitória; no entanto, na caracterização da agitação marítima a autora implementou um regime de nível de maré variável. Em termos de conclusões, a autora assinalou que o cais 12 do quebramar sul se apresentava como a estrutura marítima com maior grau de risco associado, grau 4. A estrutura de defesa central e o enraizamento do esporão 3 apresentaram, para o caso de nível de maré variável, um grau de risco de, respetivamente, 2 e 1. Como desenvolvimentos futuros, foi proposta a elaboração de mapas de inundação associados a intervalos de possíveis valores de caudais médios galgados.



## 3 MODELOS IMPLEMENTADOS

No âmbito da realização deste trabalho e desenvolvimento da metodologia apresentada, é necessária a implementação de diversos modelos numéricos. Nesta conformidade, será então feita uma breve descrição de cada um dos modelos numéricos utilizados ao longo deste estudo.

### 3.1 Modelo WW3

O modelo WAVEWATCH III (Tolman, 2002) baseia-se na parametrização dos termos de fonte e dissipação de energia. Trata-se de um modelo principalmente direcionado para a representação de fenómenos em grande profundidade, mas também em profundidades intermédias às quais fornece dados de condições de fronteira para outros modelos numéricos.

### 3.2 Modelo SWAN

O modelo SWAN (acrónimo de *Simulating Waves Nearshore*), trata-se de um software desenvolvido em *Delft University of Technology* que efetua a propagação de ondas desde o largo até junto da costa, sendo mais adequado a domínios de grandes dimensões.

#### Descrição do modelo SWAN

O modelo SWAN, sendo responsável por efetuar a geração, refração, difração e propagação de ondas em zonas marítimas de grandes profundidades, dissipação por excesso de declividade e interação não linear entre ondas, é também responsável pela dissipação devida ao atrito de fundo e rebentação da onda induzida pela diminuição da profundidade. Este modelo tem então como objetivo o transporte das características da agitação marítima desde águas profundas até ao início de águas pouco profundas (SWAN Team, 2010a; SWAN Team, 2010b). Trata-se de um modelo que tem em conta os seguintes fenómenos de agitação marítima:

- Geração da onda pelo vento;
- Propagação no espaço geográfico;
- Dissipação por *whitecapping* (excesso de declividade);

- Dissipação por rebentação da onda;
- Dissipação por atrito no fundo;
- Interações entre ondas;
- Refração;
- Difração;
- Empolamento;
- Interação com obstáculos.

Para a determinação do campo de ondas no espaço e no tempo, este modelo apoia-se na equação de balanço espectral da ação da onda representada na equação (2) em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{total}}{\sigma} \quad (2)$$

Sendo que  $N$  é a densidade espectral da ação da onda em função da frequência relativa  $\sigma$  e da direção  $\theta$ ,  $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ , com  $c_x$  e  $c_y$  a representarem as velocidades de propagação no espaço e  $c_\sigma$  e  $c_\theta$  as velocidades de propagação no espetro.

Assim, da esquerda para a direita, o primeiro termo da equação (2) representa a taxa de variação local da densidade de ação no tempo, os dois termos seguintes representam a propagação no espaço geográfico, seguindo-se a representação da refração induzida pelos fundos e correntes, e por último, ainda no primeiro membro, a variação da frequência relativa devido às variações dos fundos e correntes.

O termo do lado direito da equação de balanço (2) traduz o crescimento da onda pelo vento, pelas trocas de energia devidas a interações não-lineares entre ondas e pela dissipação por processos de rebentação e/ou atrito de fundo.

Desta forma, este termo representativo das fontes e sumidouros,  $S_{total}$ , pode ser descrito pela equação (3):

$$S_{total} = S_{in} + S_{nl} + S_{diss} \quad (3)$$

em que  $S_{in}$  representa a energia gerada pelo vento,  $S_{nl}$  representa as interações não-lineares e  $S_{diss}$  representa a dissipação da energia da onda.

O modelo SWAN foi calibrado com base nos dados obtidos na campanha JONSWAP, conduzida no Mar do Norte (Hasselmann *et al.*, 1973). Desta forma, é importante efetuar uma calibração do modelo quando este é aplicado em outras zonas, desde que existam dados medidos *in situ*, para evitar erros associados. É igualmente importante não aplicar o modelo em zonas onde os fenómenos de difração e reflexão são relevantes, como os casos de portos, baías, ou outras zonas confinadas.

O modelo SWAN utiliza, para a resolução da equação de balanço espectral da onda, um método das diferenças finitas, fazendo a divisão da área de estudo em elementos tão pequenos quanto se pretenda. No entanto, uma maior divisão traduz-se num maior número de elementos, o que conseqüentemente aumenta o esforço computacional exigido. Contudo, este modelo, em particular, dispõe de uma funcionalidade que permite ao utilizador a adição de malhas mais refinadas (*Nested Grid* e *Nested Grid\_1*) no interior da malha geral (*Main Grid*), de maiores dimensões.

### 3.3 Estudo de Run-up e cálculo do Nível Máximo de Inundação

Uma praia, tendo em conta a sua dinâmica e morfologia, pode ser dividida em três zonas distintas: *backshore*, *foreshore* e *nearshore* (Figura 3.1).

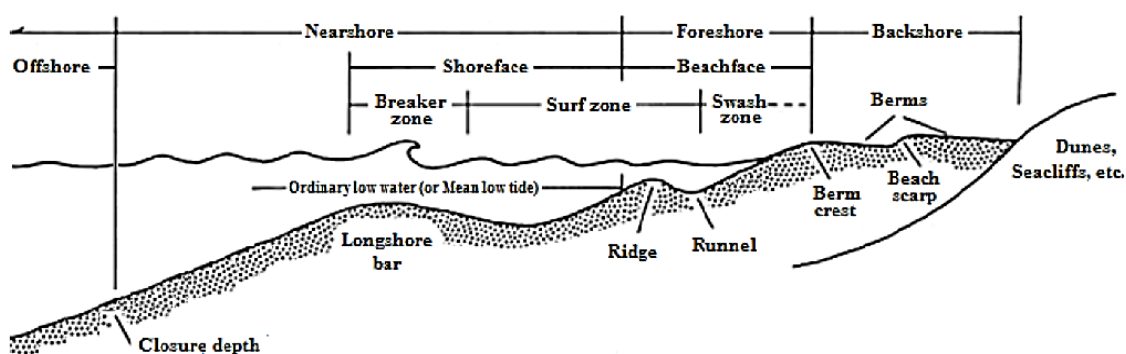


Figura 3.1- Esquema representativo do sistema praia e sistemas adjacentes (Adaptado de Silva, 2012).

O *backshore* (ante-praia) é considerado como sendo a zona limite interior, ou seja, a parte mais elevada da praia com a superfície geralmente horizontal ou ligeiramente inclinada. Trata-se de uma zona que não é afetada pelo *uprush* das ondas, exceto durante a ocorrência de

episódios de forte agitação marítima. Assim, é considerada em regra a parte seca da praia, marcada por uma mudança de material, modificação de morfologia ou transição para uma zona com vegetação permanente, sendo exemplos disso as dunas, as arribas, as escarpas ou estruturas de engenharia costeira.

O *foreshore* ou *beachface* (face da praia) é caracterizado por uma zona de inclinação íngreme em direção ao mar. Dado o seu limite inferior ser atingido no nível de baixa-mar, durante a preia-mar o *foreshore* encontra-se maioritariamente submerso.

Limitada entre o limite inferior do *foreshore* e o limite superior do *offshore*, a zona *nearshore* é aquela em que todo o processo de formação da praia se inicia, fazendo esta parte integrante da própria definição de praia. A praia constitui uma das zonas mais dinâmicas da costa, apresentando alterações que variam no tempo, em escala e na posição relativa. Em função das condições hidrodinâmicas, algumas das características das praias são efémeras, ou seja, uma vez formadas podem apenas permanecer constantes até à próxima mudança de maré, variação sazonal do nível do mar, ou por ação das correntes ou do vento, possuindo posteriormente uma nova aparência que eventualmente se repete ciclicamente. Desta forma, é de grande importância o conhecimento de tais elementos, características e fases do processo de formação destes sistemas, fomentando uma linguagem universal de fácil entendimento (Quadro 3.1).

Quadro 3.1- Elementos, características e processos constituintes do sistema praia (Adaptado de Silva, 2012).

Conceitos	Definição
<b>Backshore ou Backbeach (alta praia ou ante-praia)</b>	Zona superior da praia geralmente seca e constituída por bermas de praia com formação associada a grandes temporais, localizada em posição superior à da atuação das ondas e das marés ordinárias entre a crista da berma e as dunas ou arribas.
<b>Beach face (Face da praia)</b>	Zona da praia em posição inferior à crista de praia, normalmente exposta à atuação da rebentação e do espraio das ondas.
<b>Foreshore</b>	Porção inclinada do perfil de praia compreendido entre a crista da berma de praia (ou, na ausência desta, entre o limite superior da zona abrangida pelo espraio da onda na maré cheia) e a zona da baixa-mar marcada pelo refluxo da onda subsequente ao espraio.
<b>Nearshore</b>	Zona que se estende desde o nível mínimo de baixa-mar para além da zona de surf. Alguns autores englobam a zona de espraio.
<b>Offshore</b>	Zona posterior à formação das ondas, a partir da qual a profundidade deixa de sofrer modificações significativas.
<b>Run-up</b>	Distância vertical entre o nível da água em repouso e o nível mais alto atingido pela onda incidente na face da praia/estrutura.
<b>Shoreface</b>	Zona compreendida entre o nível mínimo de baixa-mar e a zona de rebentação das ondas.
<b>Swash ou Uprush (afluxo, enchente ou espraio)</b>	Movimentação ascendente da massa de água da onda incidente, após a rebentação, através da face da praia.
<b>Swash zone (Zona de espraio ou Ressaca)</b>	Zona da face de praia onde ocorre o espraio da onda.
<b>Surf zone</b>	Zona onde as ondas rebentam, ou onde ocorre a rebentação, se estendendo-se ao longo da face da praia.

No âmbito da realização deste trabalho pretende-se calcular o *run-up* na praia de São João da Caparica. Quando ocorre um espraio, *swash* ou *uprush*, significa que ocorre uma movimentação ascendente da massa de água da onda incidente, após a rebentação, através da face da praia, onde a água atinge níveis superiores aos da superfície de equilíbrio (nível médio do mar nesse instante), sendo o *run-up* a diferença entre esses níveis. A zona afetada pelo *run-up*, designa-se por *swash zone*, ou seja, a zona da face da praia em que ocorre o espraio da onda.

Sendo assim, para o cálculo do *run-up*, e dos respetivos níveis máximos de inundação, têm sido propostas, na literatura, várias fórmulas, todas elas de carácter empírico, que dependem, na sua maioria, da altura significativa, do comprimento da onda, das condições de agitação marítima em águas profundas e do declive da face da praia. Sendo que o *run-up* é uma variável estatística, para efeitos de galgamento do cordão dunar, utiliza-se comumente a

estimativa do *run-up* com probabilidade de não ocorrência de 2%, ou seja, correspondente ao nível que é excedido somente por 2% da série de ondas associada a determinada altura significativa de onda,  $H_s$  (Sancho *et al.*, 2011). Foram então propostas várias fórmulas empíricas, apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2- Fórmulas para o cálculo do *run-up*.

Autores	<i>Run-up</i> , R	
Hunt (1959)	$R_{2\%} = \tan \beta * (H * L_0)^{0.5}$	(4)
	$R_{2\%} = 3 * H$	(5)
Holman (1986)	$R_{2\%} = H_0 * (0.83 * \xi_0 + 0.20)$	(6)
	$R_{2\%} = H_s * (0.78 * \xi_s + 0.20)$	(7)
Nielsen & Hanslow (1991)	$R_{2\%} = L_{RU} (-\ln(0.02))^{0.5}$	(8)
	$L_{RU} = 0.6 * \tan \beta * (H_{orms} L_0)^{0.5}$	(9)
	$L_{RU} = 0.05 * (H_{orms} * L_0)^{0.5}$	(10)
Stockdon <i>et al.</i> (2006)	$R_{2\%} = 0.043 * (H_0 L_0)^{0.5}$	(11)
	$R_{2\%} = 1.1 * (0.35 * \tan \beta * (H_0 L_0)^{0.5} + [(H_0 L_0 (0.563 * (\tan \beta)^{0.5} + 0.004))^{0.5}] / 2)$	(12)
Teixeira (2009)	$R_{máx} = 0.80 * H_s + 0.62$	(13)
	$R_{máx} = 1.08 * H_s * \xi_0$	(14)
Ruggiero <i>et al.</i> (2001)	$R_{2\%} = 0.27 * (\tan \beta * H_0 L_0)^{0.5}$	(15)
	$R_{2\%} = 0.5 * H_0 - 0.22$	(16)
Guza & Thornton (1982)	$R_s = 0.71 * H_0 + 0.035$	(17)

É de notar que as fórmulas apresentadas na Quadro 3.2 têm na sua maioria em conta o número de Iribarren, que por sua vez tem em conta o comprimento de onda,  $L_0$ , e a altura de onda  $H_0$ , ou a altura de onda significativa,  $H_s$ . O número de Iribarren é obtido através da fórmula (18):

$$\xi = \tan \beta / (H / L_0)^{0.5} \quad (18)$$

Este parâmetro tem em conta o comprimento de onda  $L_0$  que pode ser obtido através da fórmula (19):

$$L_0 = g * T_p^2 / (2 * \pi) \quad (19)$$

O comprimento de onda,  $L_0$  tanto pode ser obtido com base no período de pico da onda,  $T_p$ , como com o período significativo da onda  $T_s$ .

Uma vez calculados os valores do *run-up* numa dada zona costeira, é necessário calcular as cotas de inundação, *C.I.* (referido ao Z.H.). Assumindo que o cálculo do mesmo resulta apenas da soma da contribuição da maré astronómica, *M.A.* (referente igualmente ao Z.H.), da sobrelevação meteorológica, *S.M.*, e do *run-up*,  $R_{1\%}$  (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011; Raposeiro *et al.*, 2013) será então pela equação (20):

$$C.I. = M.A. + S.M. + R_{1\%} \quad (20)$$

A equação (20) representa uma forma simplificada do cálculo do nível máximo de inundação, dado que a inundação de uma zona costeira é um fenómeno complexo, devido não só ao número de fatores envolvidos no processo, mas também à interação entre eles.

Assim, para uma dada condição de agitação marítima, e um dado perfil da praia, é determinado o correspondente valor de *run-up*, segundo as fórmulas apresentadas no Quadro 3.2, e o correspondente nível máximo de inundação recorrendo à equação (20).

### 3.4 Estudo do run-up/ galgamento

O fenómeno de galgamento pode ser definido pelo transporte de massa de água sobre o coroamento de determinada estrutura, proveniente da agitação marítima incidente. O galgamento está associado a uma transmissão de energia proveniente da onda incidente, que em parte é dissipada através de vários fenómenos, sendo que a restante, em forma de energia cinética, sofre transformação em energia potencial do escoamento que galga o talude, podendo ter efeitos nefastos. Esta transmissão sobre a estrutura pode ocorrer sob a forma de lâmina contínua de água (*green water*), salpicos (*splash*) ou simplesmente borrifos transportados pelo vento (*spray*).

A grandeza pela qual os galgamentos são expressos é o caudal, que geralmente é apresentado sob a forma de caudal médio galgado por metro linear de estrutura,  $q$  ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ).

A ocorrência de fenómenos de galgamento depende de diversas variáveis associadas à agitação incidente e às características da estrutura de defesa costeira.

Relativamente à agitação marítima, deve-se ter em conta a altura significativa da onda, o período da onda, o comprimento de onda e a direção da onda incidente. Em relação às características da estrutura destacam-se com importância, a distância entre o nível médio da água e a cota de coroamento ( $R_c$ ), a profundidade da água no pé da estrutura ( $h$ ) e o ângulo do talude ( $\alpha$ ). Na Figura 3.2 está representado um esquema exemplificativo da ocorrência de um galgamento sobre uma estrutura costeira.

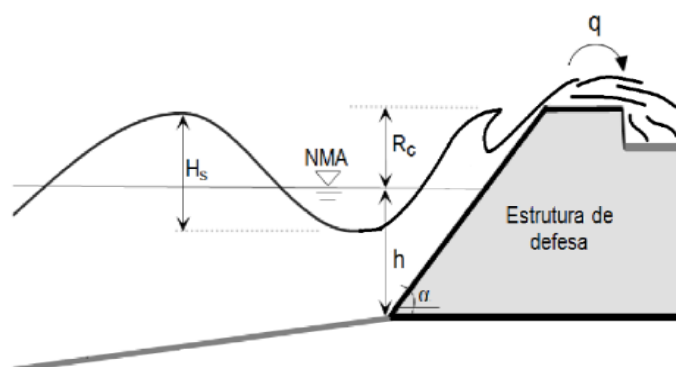


Figura 3.2- Esquema exemplificativo da ocorrência de um galgamento sobre uma estrutura de defesa costeira (Afonso, 2011)

Contudo, mesmo para os casos de serem reduzidos os valores da altura de onda  $H$ , podem ocorrer fenómenos de galgamento devido à influência do nível da maré. Em situações de



---

preia-mar o nível de maré encontra-se consideravelmente acima do nível médio, levando a uma diminuição da distância entre a cota do coroamento da estrutura e o nível da água; existe também uma menor área de talude emerso, o que implica uma menor dissipação de energia, aumentando a probabilidade de ocorrência de galgamentos. É importante referir que, também a configuração geométrica do talude e as características dos materiais que o constituem contribuem para os fenómenos de galgamento, uma vez que algumas geometrias permitem que uma grande parte da energia seja dissipada. A escolha por formas mais complexas, com aplicação de bermas, por exemplo, possibilita a criação de um número elevado de discontinuidades no perfil da estrutura, permitindo uma maior dissipação da energia (Silva, 2012).

Os fenómenos de galgamento são ainda considerados difíceis de modelar do ponto de vista numérico, pois a rebentação das ondas junto ao talude gera grande turbulência, sendo necessário recorrer a ensaios em modelos físicos à escala. Contudo, estes modelos, apesar de simularem geralmente bem a realidade, têm um custo elevado e são bastante morosos. Uma outra hipótese é o recurso à ferramenta NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), desenvolvida no projeto europeu CLASH (Coeveld *et al.*, 2005), com o objetivo de gerar um método de previsão do caudal médio galgado, apoiando-se em testes de ensaios em modelo físico, para várias características de agitação e diferentes tipos de estruturas, recolhidos em diversos laboratórios internacionais.

O NN\_OVERTOPPING2 baseia-se na análise de redes neuronais. As redes neuronais usam um sistema de processamento de caráter empírico que se inspira num sistema de ligações paralelas semelhante ao que ocorre no cérebro humano, possibilitando a interligação de grande diversidade de parâmetros de entrada e saída e fornecendo uma grande flexibilidade na descrição da geometria da estrutura.

Esta ferramenta analisa cerca de 700 redes neuronais, com cerca de 8400 combinações de input-output. Dispõe de 15 parâmetros de entrada divididos entre condições de agitação e geometria da estrutura, conforme Figura 3.3.

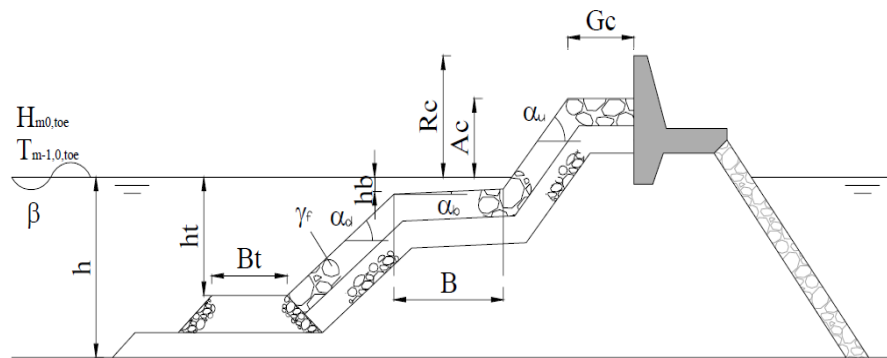


Figura 3.3- Parâmetros de entrada do modelo neuronal NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005).

Em relação à agitação marítima, os parâmetros considerados são: a altura significativa espectral no pé do talude  $H_{m0,toe}$  (m), o ângulo entre a direção da onda incidente e a normal à estrutura  $\beta$  ( $^\circ$ ) e o período médio espectral no pé da estrutura  $T_{m-1,0,toe}$  (s), expresso por (21):

$$T_{m-1,0,toe} = \frac{T_p}{1.1} \quad (21)$$

No entanto, este método de cálculo do caudal médio galgado só é possível em estruturas localizadas no mar. No presente trabalho trata-se de uma estrutura localizada em terra. Desta forma, será feita outra abordagem para o cálculo do caudal galgado.

Baseado no trabalho de Mase *et al.* (2013), a metodologia proposta aborda a ligação entre o *run-up* e o galgamento de estruturas localizadas junto ou acima da linha de costa. No sentido de facilitar a sua aplicação, a metodologia propõe a utilização das características das ondas em águas profundas como parâmetros de entrada e adota o conceito de declive imaginário para avaliação da correspondência entre o comportamento das ondas que rebentam na costa, num modelo e no seu protótipo. O declive imaginário é usado para o cálculo do *run-up*/galgamento, uma vez que o declive da frente da estrutura é frequentemente não uniforme. Saville (1958) propôs pela primeira vez a definição de declive imaginário: uma linha que une dois pontos, um sobre o fundo do mar no ponto de rebentação das ondas, à profundidade  $h_b$  e o outro no limite do *run-up* da onda. Com base no trabalho de Mase *et al.* (2013), aplica-se o declive imaginário tendo em consideração a configuração da secção transversal de *foreshore* e da estrutura, como apresentado na Figura 3.4.

O declive imaginário –  $\tan\beta$  – é obtido através da fórmula (22):

$$\frac{1}{\tan \beta} \approx \cot \beta = \frac{2 * A_{rea}}{(h_b + R)^2} \quad (22)$$

em que  $\tan \beta$  representa o declive imaginário,  $A_{rea}$  representa a área transversal da estrutura e da faixa litoral submersa entre o local de rebentação das ondas e o nível de *run-up*,  $h_b$  representa a profundidade da água no ponto de rebentação da onda e  $R$  representa o *run-up* para ondas regulares

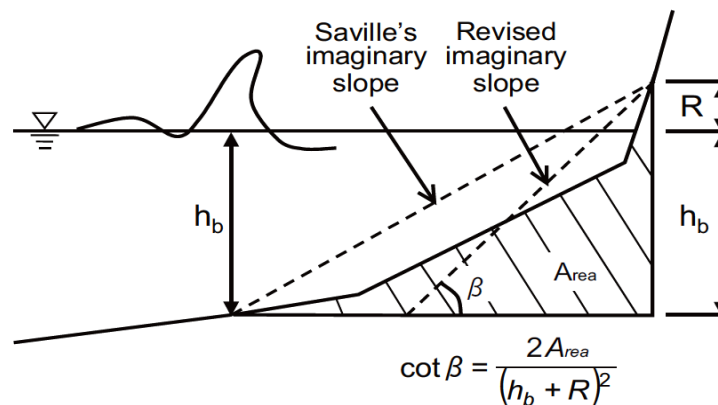


Figura 3.4- Esquema exemplificativo do declive imaginário tendo em consideração a configuração da secção transversal de *foreshore* e da estrutura (Mase *et al.*, 2013).

No desenvolvimento das formulações empíricas para o cálculo do *run-up* foram feitos ensaios em modelo físico por Mase *et al.* (2013). Foram usados dois conjuntos de dados experimentais.

Um primeiro conjunto de dados foi obtido num canal de ondas com 50 m de comprimento, por 1.0 m de largura e 1.2 m de profundidade, equipado com um gerador de ondas com sistema de absorção. A escala do modelo utilizada foi 1:50. Foram testados 3 casos de topografia de praia e estruturas com um talude quase vertical (1:0.5) e outro mais suave (1:3). A profundidade de água *offshore* na secção uniforme do canal foi de 45 cm ou 43 cm, correspondentes a profundidades no pé da estrutura de 0 cm e -2 cm. Um medidor de *run-up* de 70 cm de comprimento foi fixado a 3 mm acima da estrutura. As ondas aleatórias utilizadas nas experiências foram baseadas no espectro de *Bretschneider – Mitsuyasu*. As alturas de

onda significativas testadas foram de 6.0 cm e 12.0 cm (correspondentes a valores de protótipo de 3.0 m e 6.0 m) e os períodos das ondas significativas foram 1.3 s, 1.7 s e 2.1 s (9.0 s, 12.0 s e 15.0 s em protótipo). O número de ondas individuais em cada experiência foi cerca de 200.

O segundo conjunto de dados foi obtido para estruturas perto da costa a partir de experiências realizadas anteriormente para analisar as características de *run-up*. Esta experiência foi realizada a uma escala de 1:45 com as estruturas instaladas num canal de ondas. A profundidade utilizada na parte da secção horizontal do canal foi de 45 cm, 42.5 cm e 40 cm. Os testes realizaram-se numa praia com uma inclinação de 1:20, e sobre estruturas com inclinações de 1:0.5 e 1:3.

Ao nível das formulações empíricas para o cálculo do galgamento, os dados experimentais foram obtidos em estruturas com declives frontais de 1:3, 1:5 e 1:7 instaladas sobre fundos com declives uniformes de 1:10 ou 1:30. Geraram-se ondas aleatórias em conformidade com o espectro de *Bretschneider-Mitsuyasu*, com um período significativo de 1.0 s e declividades em águas profundas de  $H_0/L_0$  de 0.017 e 0.036. As alturas de água adimensionais, no pé do talude,  $h/H_0$ , variaram entre -0.27 e 0.71, e as alturas de coroamento adimensionais,  $R_c/H_0$ , variaram entre 0.5 e 1.5. Um total de 300 condições foram testadas.

No Quadro 3.3 estão representadas as formulações empíricas propostas para o cálculo do *run-up* e posterior cálculo do caudal médio galgado, segundo Mase *et al.* (2013).

Quadro 3.3- Fórmulas empíricas para o cálculo de *run-up*/galgamento (Mase *et al.*, 2013).

<b>Run-up</b>	$R_{2\%} = H_0 * (2.99 - 2.73 * \exp(-0.57 * (\tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0})))$	(23)
	$R_{1/10} = H_0 * (2.72 - 2.56 * \exp(-0.58 * (\tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0})))$	(24)
	$R_{1/3} = H_0 * (2.17 - 2.18 * \exp(-0.70 * (\tan \beta / \sqrt{H_0 / L_0})))$	(25)
<b>Galgamento</b>	$q = \sqrt{gH_0^3} * [0.018 * (R_{m\acute{a}x} / H_0)^{3/2} * \{1 - (Rc / H_0) / (R_{m\acute{a}x} / H_0)\}^{3.200}]$	(26)
	$q = \sqrt{gH_0^3} * [0.018 * (R_{m\acute{a}x} / H_0)^{3/2} * \{1 - (Rc / H_0) / (R_{m\acute{a}x} / H_0)\}^{6.240}]$	(27)

### 3.5 Avaliação do Risco

A gestão de riscos não prevê o futuro mas avalia cenários de “futuros” possíveis e propõe ações para diminuir perdas expectáveis (Almeida, 2010).

Uma metodologia que permita avaliar e gerir o risco associado à inundação em zonas costeiras e galgamento de estruturas de defesa costeira é pois uma mais-valia para a gestão integrada e sustentada da zona costeira, evitando a degradação e perdas irreversíveis dos seus recursos.

A avaliação do risco de inundação e galgamento é baseada na combinação entre os valores de probabilidade de ocorrência e os valores de consequências. Para isso recorre-se a uma metodologia que envolve a definição de três tabelas:

- Tabela de Probabilidade de Ocorrência de um evento adverso, sendo, neste caso a inundação/galgamento causada pelo mar;
- Tabela de Consequências dessa inundação;
- Tabela de Risco de inundação costeira, obtida com base nas tabelas anteriores.

Os conteúdos destas tabelas têm como suporte trabalhos anteriores (Raposeiro & Ferreira, 2011).

Por uma questão de simplificação, foi atribuída uma escala de grau de probabilidade à probabilidade de ocorrência do acontecimento perigoso, e um grau de consequência, em vez do prejuízo associado a este acontecimento, conforme equação (28), em que:

$$\text{Grau de risco} = \text{Grau de probabilidade de ocorrência} * \text{Grau de consequências} \quad (28)$$

### **Probabilidade de Ocorrência**

Para determinar a probabilidade de ocorrência de um evento, é necessário antes de tudo, recorrer a valores limites pré-estabelecidos.

No Quadro 3.5 e Quadro 3.6 estão representados os valores admissíveis de galgamento numa estrutura de defesa costeira.

Com base nas tabelas mencionadas anteriormente e com base num valor limite pré-estabelecido para análise do nível máximo de inundação, recorre-se ao Quadro 3.7, que contém uma descrição preliminar da Probabilidade de Ocorrência do nível máximo de inundação e valores de caudais que excedem limites pré-estabelecidos tendo em conta uma determinada série temporal de registos.

Esta Probabilidade de Ocorrência é definida segundo uma escala de 5 graus, correspondentes a intervalos de probabilidade de ocorrência de eventos adversos. A estes intervalos é atribuída uma descrição qualitativa da Probabilidade de Ocorrência.

Quadro 3.4- Valores do caudal médio de galgamento admissível para estruturas marítimas (adaptado de Pullen *et al.*, 2007).

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

Quadro 3.5- Valores do caudal médio de galgamento admissível para pessoas (adaptado de Pullen *et al.*, 2007).

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

Quadro 3.6- Valores de caudal médio galgado admissível para as diversas alternativas existentes em zonas abrigadas pela estrutura (adaptado de Pullen *et al.*, 2007).

<b>Condições e tipo de danos</b>	<b>Caudal médio – q (l/s/m)</b>
Danos significativos ou afundamento de grandes barcos	50
Afundamento de barcos pequenos localizados a 5-10m da estrutura	10 <sup>(1)</sup>
Danos em grandes barcos	
Danos em edifícios	1 <sup>(2)</sup>
Danos em equipamentos localizados a 5 – 10m da estrutura	0.4 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Limites relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima.

<sup>(2)</sup> Limites relacionados com o galgamento efetivo obtido no edifício.

Quadro 3.7- Probabilidade de Ocorrência de valores que excedem limites pré-estabelecidos, (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011).

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

### **Grau de Consequência**

No Quadro 3.8 está representada uma descrição preliminar das Consequências da ocorrência de valores de nível máximo de inundação/valores de caudal que excedem limites pré-estabelecidos, de forma geral. Esta tabela tem em linha de conta o meio recetor perante a ocorrência da inundação/galgamento, tendo como objetivos a identificação de valores naturais, culturais, antrópicos e socioeconómicos.

Os critérios considerados têm em conta o reconhecimento dos *habitats* com valor ecológico, a ocupação do solo, a densidade da construção e a localização das edificações em relação à proximidade do elemento potencialmente “agressor”, a permanência das habitações e outros valores absolutamente únicos cuja perda seria irreparável.



Quadro 3.8- “Consequências” da ocorrência de um evento adverso que excede os limiares pré-estabelecidos, (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011).

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

### **Grau de Risco**

No âmbito da metodologia apresentada para obtenção do grau de Risco, trata-se de uma avaliação qualitativa do risco de inundação, que resulta do produto dos graus atribuídos à Probabilidade de Ocorrência de um evento adverso (Quadro 3.7) e às Consequências da ocorrência desse evento adverso (Quadro 3.8). Posteriormente, recorre-se a uma matriz de cruzamento entre os dois graus, representada na (Quadro 3.9), seguindo-se a (Quadro 3.10) que representa a descrição da avaliação da aceitabilidade do grau de Risco obtido na tabela anterior.

Quadro 3.9- Grau de Risco: matriz de cruzamento do grau atribuído à Probabilidade de Ocorrência de um evento adverso e do grau atribuído às Consequências da ocorrência desse evento, (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011).

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

Quadro 3.10- Avaliação da aceitabilidade do grau de Risco obtido, (adaptado de Raposeiro & Ferreira, 2011).

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

## 4 CASO DE ESTUDO

Neste capítulo pretende-se efetuar uma caracterização geral do local, apresentando as condições de aplicação, resultados e análises efetuadas com o modelo numérico SWAN para a caracterização da agitação marítima. Segue-se a apresentação dos resultados das formulações empíricas para o cálculo do *run-up* na zona de praia e do *run-up*/galgamento na zona em que há presença de uma estrutura de proteção costeira. Por fim, pretende-se avaliar o risco de inundação da zona de estudo recorrendo às tabelas já anteriormente apresentadas.

### 4.1 Caracterização do local

A praia de São João da Caparica localiza-se no extremo norte da Costa da Caparica, município de Almada (Figura 4.1). Trata-se de uma praia relativamente grande, representando uma área balnear de grande importância para as cidades de Lisboa e Almada. No entanto, constitui ainda um ponto de lazer para moradores e turistas durante todo o ano.



Figura 4.1- Localização do caso de estudo (Google earth, 3de junho de 2013).

A praia de São João da Caparica tem um comprimento de 1380 m, confinada entre dois esporões. O esporão Norte tem um comprimento de 350 m, sendo que o esporão localizado a sul tem um comprimento de 150 m (Figura 4.2).

Junto ao esporão sul encontra-se ainda uma estrutura longitudinal aderente constituída por 2 camadas, a primeira com enrocamento, a segunda com enrocamento de menor dimensão e com um núcleo constituído por T.O.T., areias e pedras de pequenas dimensões. A praia é de origem sedimentar arenosa e é caracterizada por um sistema dunar pequeno e frágil, com uma série de construções de madeira (bares e restaurantes) localizados na duna frontal.



Figura 4.2- Fotografias aéreas da Praia de São João da Caparica, cedidas pelo EPRL/IGP.

A localização da praia de São João da Caparica está submetida às ações das marés astronómicas e meteorológicas, bem como às ações resultantes da interação da agitação incidente. Além da exposição à agitação marítima e à propagação da maré, o local sofre ainda influência do rio Tejo, pois trata-se de um subsistema hidromorfológico de transição entre o sistema estuarino e o sistema costeiro. Na problemática da zona destaca-se a migração da restinga (Cova do Vapor - Bugio) no sentido de terra e o seu conseqüente desaparecimento que levou à exposição direta da frente urbana às ações do mar, especialmente durante a ocorrência de tempestades.

Ao longo dos anos a zona da costa da Caparica veio a registar várias transformações fisiográficas, com o recuo da linha de costa e consequente emagrecimento da praia, e o recuo do cordão dunar, resultando em destruição de apoios de praia e episódios de galgamento/inundação. Em 1969 foi construída a primeira estrutura aderente, seguindo-se em 1971 a construção de cerca de 7 esporões. No entanto, os invernos têm sido destruidores, obrigando a reparações nos esporões, na estrutura longitudinal aderente e a alimentações artificiais constantes da praia. Posto isto, a praia de São João da Caparica constitui um local de riscos relacionados com a incapacidade das estruturas existentes, bem como a potenciais inundações, pondo em alerta os moradores e os proprietários de estabelecimentos.

## 4.2 Caracterização da Agitação marítima - Modelo SWAN

### 4.2.1 Condições de aplicação do modelo SWAN

Na Figura 4.3 encontra-se representada a batimetria da zona da zona de estudo, bem como a representação dos limites das malhas de cálculo.

#### Batimetria, Condições de Fronteira ao Largo, Ventos e Marés

A execução do modelo SWAN requer a introdução de diferentes dados de base, relativos às variáveis físicas que caracterizam a agitação ao largo, os ventos e as marés.

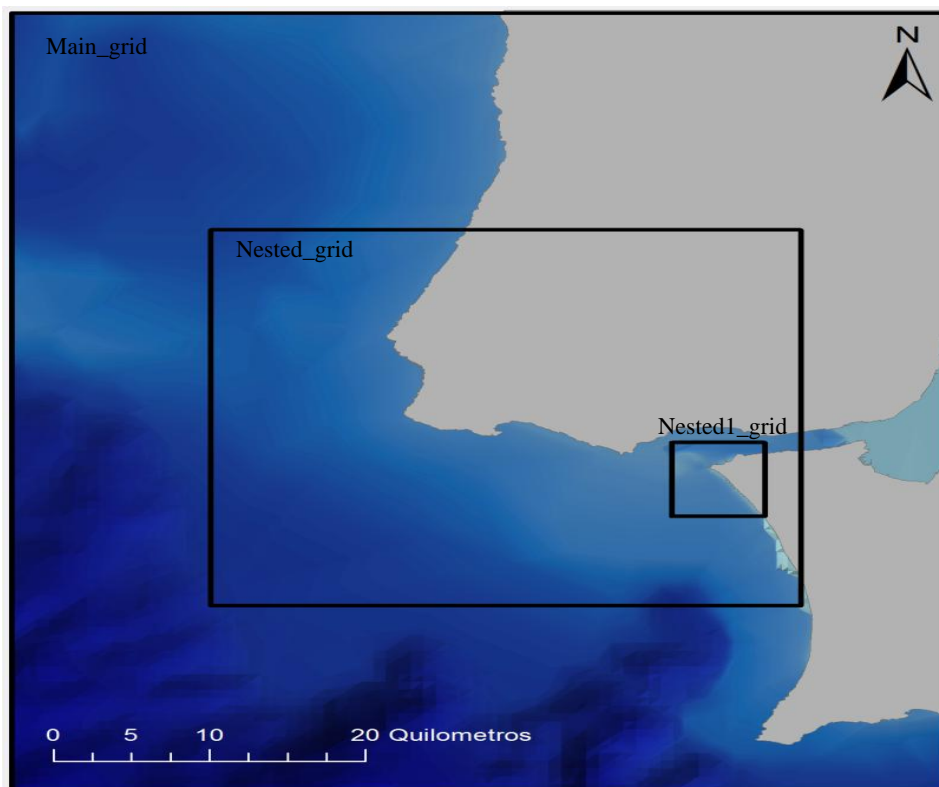


Figura 4.3- Batimetria da zona de estudo (Arcgis).

As condições de forçamento do modelo SWAN ao largo, fornecidas pelo modelo de escala oceânica de 3ª geração, WWIII (Tolman, 2002), fornecem uma previsão das características da agitação marítima na região da Costa da Caparica, ou seja, os valores para  $H_{mo}$  (altura significativa espectral),  $T_p$  (período de pico) e  $\theta$  (direção de onda para a frequência de pico) com uma periodicidade de 6 horas, no período de outubro 2007 a dezembro de 2012. Estes valores foram obtidos com a ajuda de um *software* desenvolvido para o download automático no ponto de coordenadas geográficas (-9.748801 W, 38.56720 N) (Poseiro, 2013)

Na realização deste trabalho não se considerou o campo de ventos, pois não foi possível obter a informação necessária.

Relativamente ao nível de maré, este foi considerado variável, recorrendo aos valores do nível de maré fornecidos pelo marégrafo de Cascais (IGEO), tendo já incluída a sobrelevação do nível do mar ou “*storm surge*”. Esta sobrelevação descreve a subida temporária do nível do mar como consequência das condições meteorológicas inconstantes, nomeadamente de variações no campo da pressão atmosférica e/ou da ação de ventos fortes e prolongados.

### **Domínio computacional**

O modelo SWAN utiliza malhas rectangulares. As características de cálculo destas malhas são as seguintes: *Main Grid* de 60000 m de comprimento por 79000 m de largura, a *Nested Grid* com 37500 m de comprimento por 38000 m de largura e, por fim, a *Nested Grid\_1* com 5900 m de comprimento por 7400 m de largura, (Quadro 4.1).

Quadro 4.1- Características principais das malhas de cálculo do modelo SWAN.

<i>Malhas</i>	$\Delta x$ (m)	$\Delta y$ (m)	<i>Comprimento Total xx (m)</i>	<i>Comprimento Total yy (m)</i>	<i>Número de elementos na direção xx</i>	<i>Número de elementos na direção yy</i>
<i>Main Grid</i>	1000	1000	60000	79000	120	158
<i>Nested Grid</i>	250	250	37500	38000	375	380
<i>Nested Grid_1</i>	100	100	5900	7400	59	74

### **Características das simulações**

As simulações com o modelo SWAN foram realizadas para o período entre outubro de 2007 e dezembro de 2012, em modo estacionário. As principais características das simulações tiveram em conta:

- A versão SWAN 40.72, sem considerar a interação com ventos e correntes;

- O espectro direcional em frequência de 23 intervalos, de 0.04 a 1 Hz, com distribuição logarítmica, e uma discretização em direção que cobre 360°, dividida em 90 intervalos. Este espectro é do tipo JONSWAP de forma a assumir os parâmetros obtidos na campanha do Mar do Norte;
- Um coeficiente de rebentação constante de 0.65 para todo o período;
- Inclusão do fenómeno físico de difração;

Desta forma, os dados de forçamento do modelo SWAN foram inseridos em três das quatro fronteiras, nas fronteiras oeste, norte e sul, de forma a simular a agitação marítima.

Os resultados foram obtidos em todo o domínio de cálculo e em pontos específicos.

Foram escolhidos quatro pontos específicos. O ponto P11, com coordenadas planimétricas (90906.881,184767.79), onde se encontra o equipamento Boia-Ondógrafo TRIAXYS, com localização a oeste do Bugio, na entrada do canal da barra; os pontos P2 (101930.66,188312.63) e P6 (102360.97,187896.11) localizados na batimétrica -9 m (Z.H.) que já se encontra totalmente paralela à costa. Estes pontos são considerados importantes pois encontram-se no local de estudo em frente à praia e em frente à estrutura, respetivamente, como se pode visualizar na Figura 4.4. O ponto P10 (102300,188300) também é considerado importante, pois encontra-se já em águas intermédias a pouco profundas. Note-se que o sistema de coordenadas dos pontos é *Datum* Lisboa, com projeção *Hayford Gauss* do Instituto geográfico do Exército.

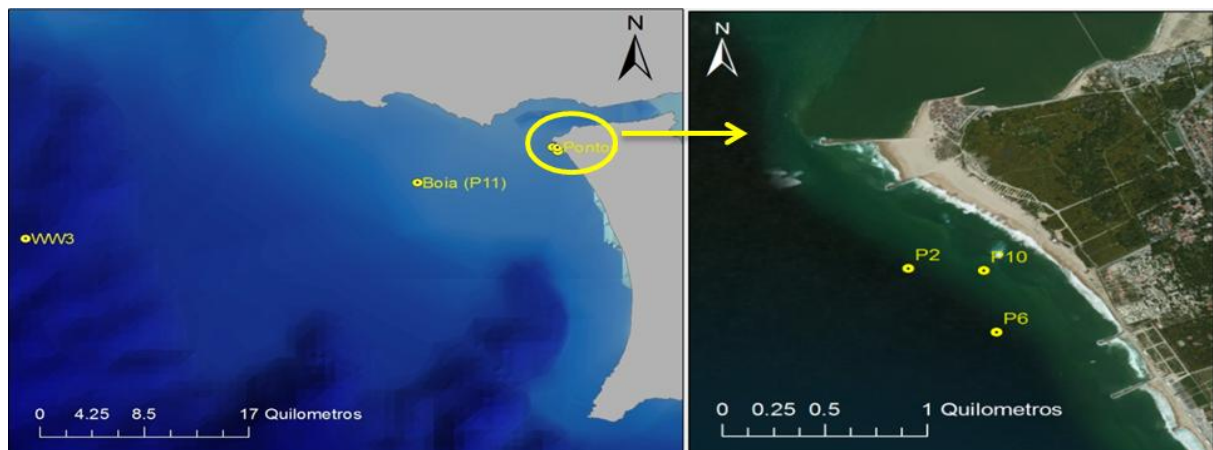


Figura 4.4- Representação dos pontos estudados no presente trabalho.

As simulações com o modelo SWAN foram realizadas com os seguintes objetivos:

- Obter as características da agitação marítima no ponto da boia (P11), para avaliação do desempenho do modelo. São assim comparados os resultados numéricos com as medições da boia nesse período;
- Obter as características da agitação marítima nos pontos P2 e P6, pois representam as características da agitação marítima em frente à praia e em frente à estrutura, respetivamente;
- Obter as características da agitação marítima no ponto P10, pois representa a caracterização da agitação marítima em águas intermédias a pouco profundas.

#### 4.2.2 Análise de Resultados

Na Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8, comparam-se os resultados obtidos pelo modelo numérico SWAN com os registos da boia, em termos de altura significativa  $H_s$ , período de pico  $T_p$  e direção média das ondas  $\theta$ . Os valores são apresentados sob a forma de gráficos representando os dados ao largo fornecidos pelo modelo WAVEWATCH III, a agitação medida na boia e os resultados obtidos pelo modelo numérico SWAN para o local onde se situa a boia.

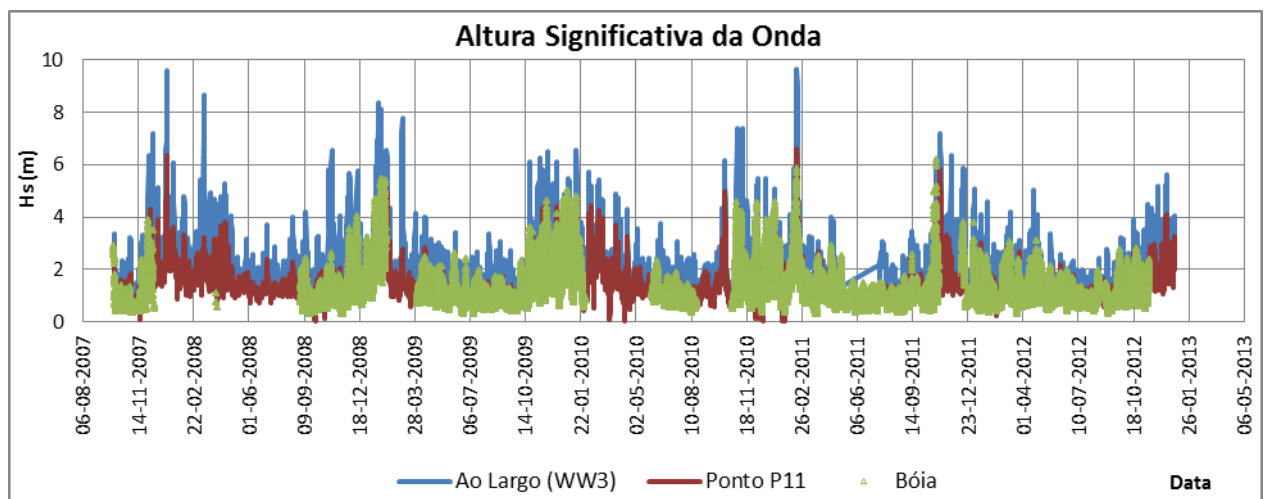


Figura 4.5- Comparação da altura significativa na Boia-ondógrafo, modelo SWAN (Ponto P11) e dados ao largo (modelo WW3).



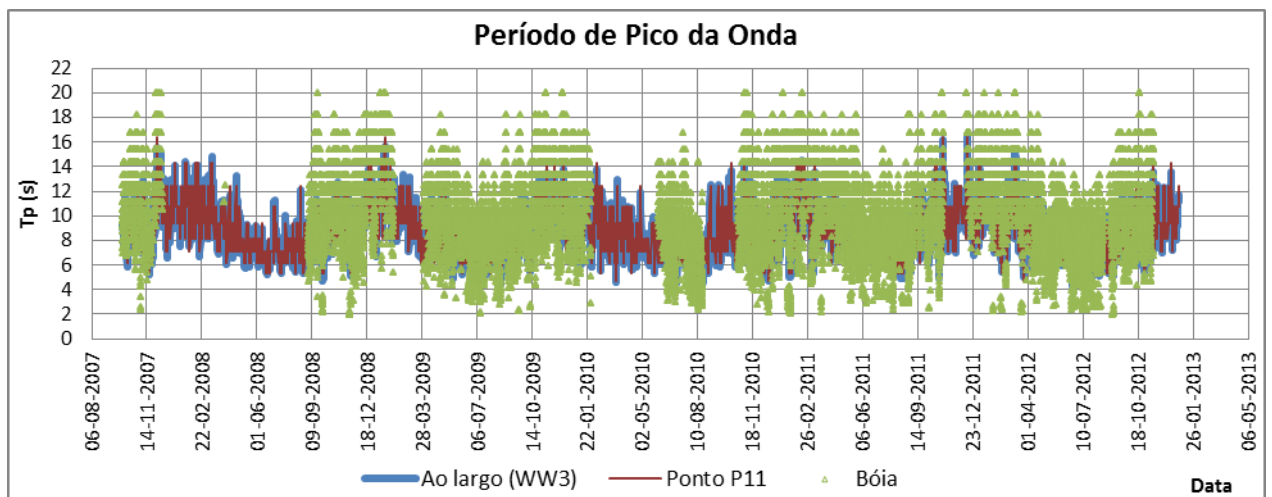


Figura 4.6- Comparação do período de pico  $T_p$  na Boia-ondógrafo, modelo SWAN (Ponto P11) e dados ao largo (modelo WW3).

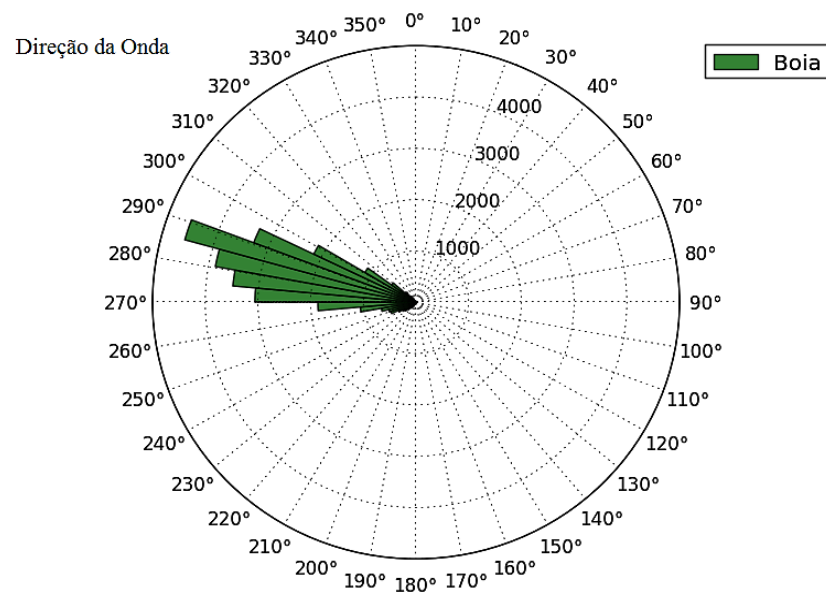


Figura 4.7- Direção de onda obtida na boia-ondógrafo.

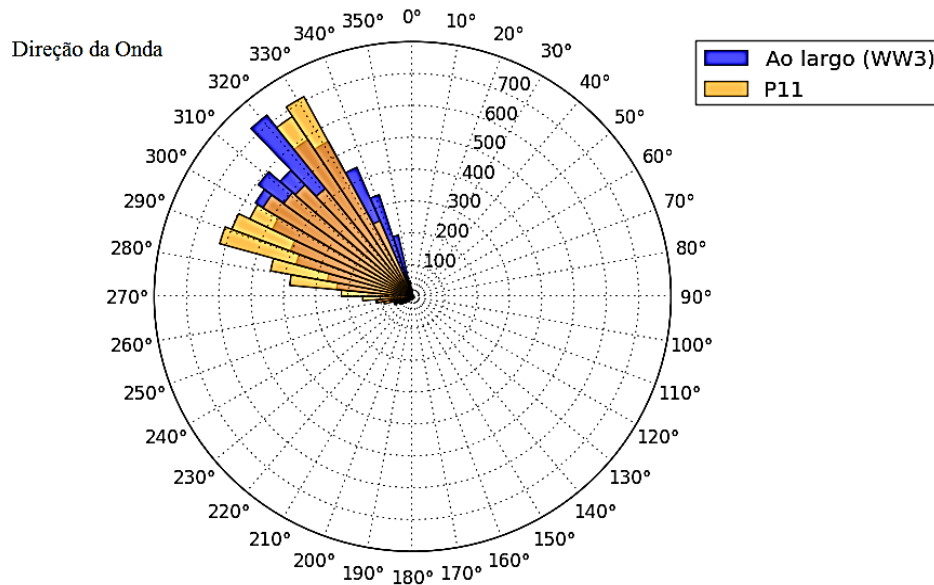


Figura 4.8- Comparação entre as direções obtidas no modelo SWAN (Ponto P11) e dados ao largo (modelo WW3).

Da análise dos gráficos de comparação entre os dados medidos na boia-ondógrafo, os resultados obtidos do modelo SWAN e ainda os dados ao largo obtidos pelo modelo WW3, verifica-se que, os resultados do modelo SWAN em termos de altura significativa  $H_s$ , seguem a agitação real, medida na boia-ondógrafo. Contudo, verificam-se períodos com ausências de dados *in situ*, provavelmente, devido à inoperacionalidade da boia nesses períodos de ausência. Em relação ao período de pico  $T_p$ , este mantém a mesma variação desde o largo até junto à costa. Contudo, os valores obtidos pelo modelo SWAN apresentam grandes diferenças relativamente aos valores medidos *in situ*, na boia-ondógrafo, devido provavelmente a uma previsão do modelo WW3 pouco precisa, ou a algum problema relacionado com a boia-ondógrafo. Relativamente à direção  $\theta$ , verificam-se algumas diferenças, ainda que pequenas, entre os valores dos ângulos medidos *in situ* e os valores dos ângulos obtidos pelo modelo SWAN. As direções obtidas pelo modelo SWAN apresentam-se próximas das previsões do modelo WW3.

No sentido de se avaliarem melhor as diferenças entre os resultados numéricos e os dados *in situ* da boia-ondógrafo, efetuou-se uma breve análise estatística às diferenças em relação à altura significativa  $H_s$ , ao período de pico  $T_p$  e à direção média de onda  $\theta$ , em termos de valores mínimos, máximos, média e desvio-padrão (Quadro 4.2).

O desvio-padrão  $s$  trata-se de uma ferramenta que permite obter a dispersão dos valores  $x_i$  da amostra total  $n$  em torno da média  $\bar{x}$ , e expressa-se da seguinte forma (29):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (29)$$

No presente trabalho, o desvio-padrão permite verificar se as diferenças entre o modelo numérico e os valores medidos *in situ*, na boia-ondógrafo, se afastam significativamente ou não da diferença média.

Quadro 4.2- Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições da Boia-Ondógrafo.

Diferença	Mínimo	Máximo	Média	Desvio-padrão
<b><i>H<sub>s</sub></i> (m)</b>	0.28	1.71	0.29	0.04
<b><i>T<sub>p</sub></i> (s)</b>	2.76	3.57	1.92	1.00
<b>Direção</b>	0.10	0.19	20.78	1.83

Através da análise do Quadro 4.2, verifica-se que em média os resultados numéricos em termos de altura significativa apresentam uma diferença de 0.23 m face aos valores medidos, em termos de período de pico existe uma diferença de 1.92 s e em termos de direção uma diferença de aproximadamente 21°. Em termos de altura significativa e de período de pico as diferenças médias apresentadas não são significativas, contudo, em termos de direção a diferença de 21° já se torna relevante. No que toca às diferenças em termos de valores mínimo e máximo, as diferenças apresentadas, não são relevantes.

Para os restantes pontos selecionados: Pontos P2, P6 e P10, obtiveram-se os valores dos parâmetros de altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ), período médio ( $T$ ), e direção média ( $\theta$ ). Estes resultados são aqui apresentados sob a forma de gráficos e comparados com os valores ao largo, obtidos pelo modelo WAVEWATCH III.

O ponto P2 constitui um ponto representativo no presente trabalho, na medida em que se encontra em frente à praia em estudo e os resultados obtidos pelo modelo SWAN neste mesmo ponto serão utilizados no cálculo do *run-up*, utilizando as características da agitação marítima junto à costa.

Desta forma, a Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.12 e Figura 4.11 representam os resultados obtidos pelo modelo SWAN no ponto P2 em comparação com os dados ao largo obtidos pelo modelo WAVEWATCH III.

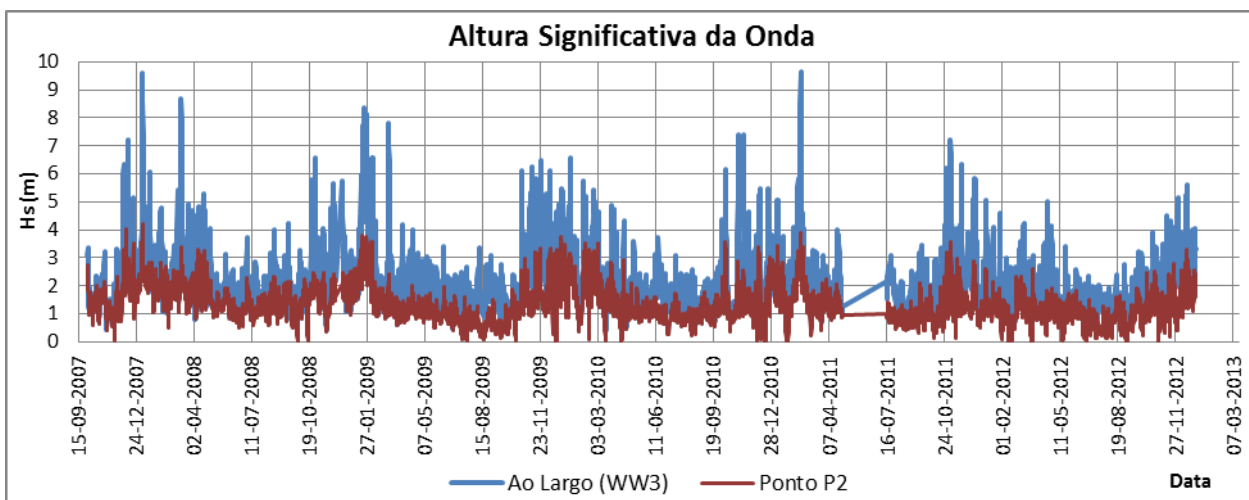


Figura 4.9- Comparação da altura significativa obtida pelo modelo SWAN (Ponto P2) e dados ao largo (modelo WW3).

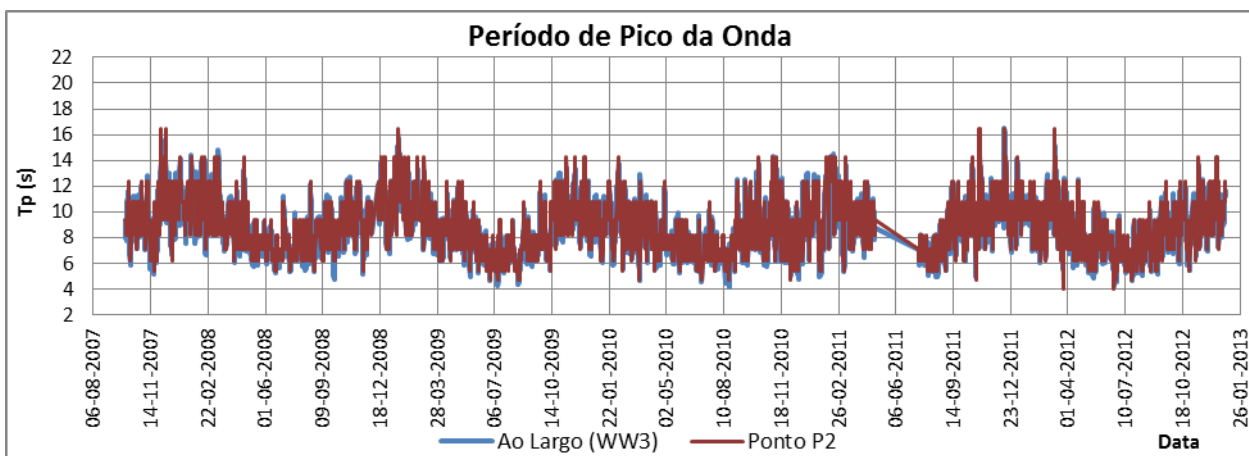


Figura 4.10- Comparação do período de pico  $T_p$  obtido pelo modelo SWAN (Ponto P2) e dados ao largo (modelo WW3).

Desta forma, da análise da Figura 4.9 verifica-se a redução considerável da altura significativa do ponto P2 desde a posição ao largo até junto à costa, devido ao fenómeno de refração.

Na Figura 4.10, verifica-se que o período de pico no ponto P2 mantém a mesma variação desde o largo até junto à costa. Na Figura 4.12, verifica-se que o período médio no ponto P2 varia entre 3.5 s e 16.26 s.

Na Figura 4.11, estão representadas as direções no Ponto P2 e ao largo, em que se verifica uma ligeira diferença nos ângulos de direção. Contudo, verifica-se que a maioria da agitação marítima vem de Noroeste, variando entre 220° e 290° no ponto P2 e variando entre 289° e 350° ao largo.

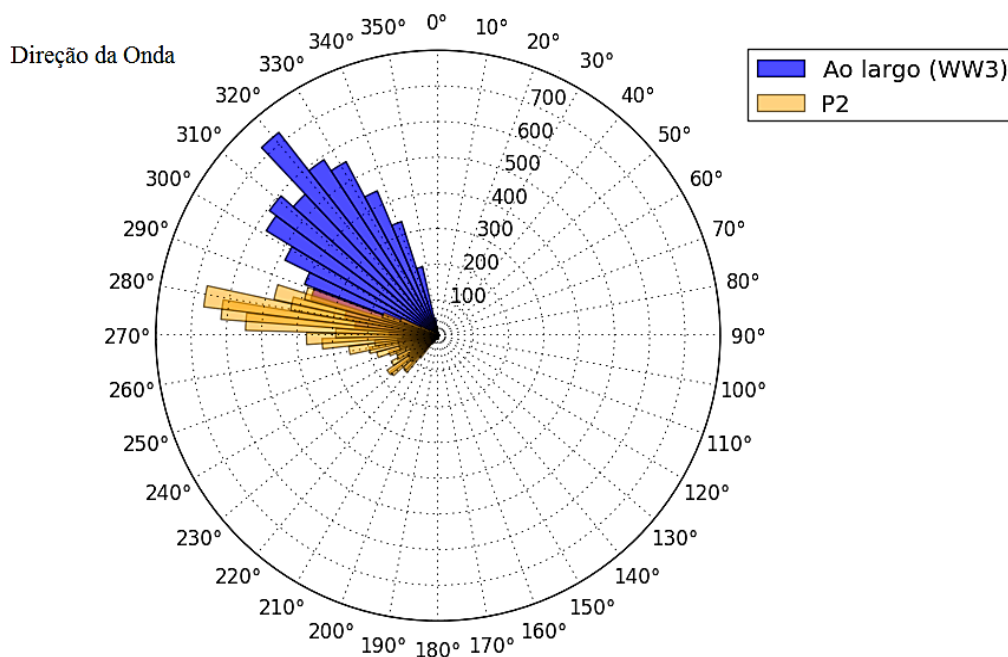


Figura 4.11- Comparação entre as direções obtidas no modelo SWAN (Ponto P2) e dados ao largo (modelo WW3).

Os pontos P6 e P10 embora não sejam relevantes para os estudos não deixam de ser igualmente importantes por isso apresentam-se no Anexo A. A nível de resultados, estes assemelham-se aos obtidos no ponto P2. Ao nível da representação gráfica do período médio nos pontos P6 e P10, verifica-se que varia entre 3.5 s e 20.47 s no ponto P6 e entre 3.5 s e 20.52 s no ponto P10. Ao nível da direção, verifica-se que a esta varia no ponto P6 essencialmente entre os valores de 215° e 290°. No ponto P10 a direção varia entre 215° a 285°. Note-se que relativamente aos dados ao largo, cuja variação de direção é entre 289° e 350°, verifica-se uma ligeira diferença face aos valores obtidos nos pontos P6 e P10. No entanto, esta diferença não é significativa, sendo mesmo esperada.

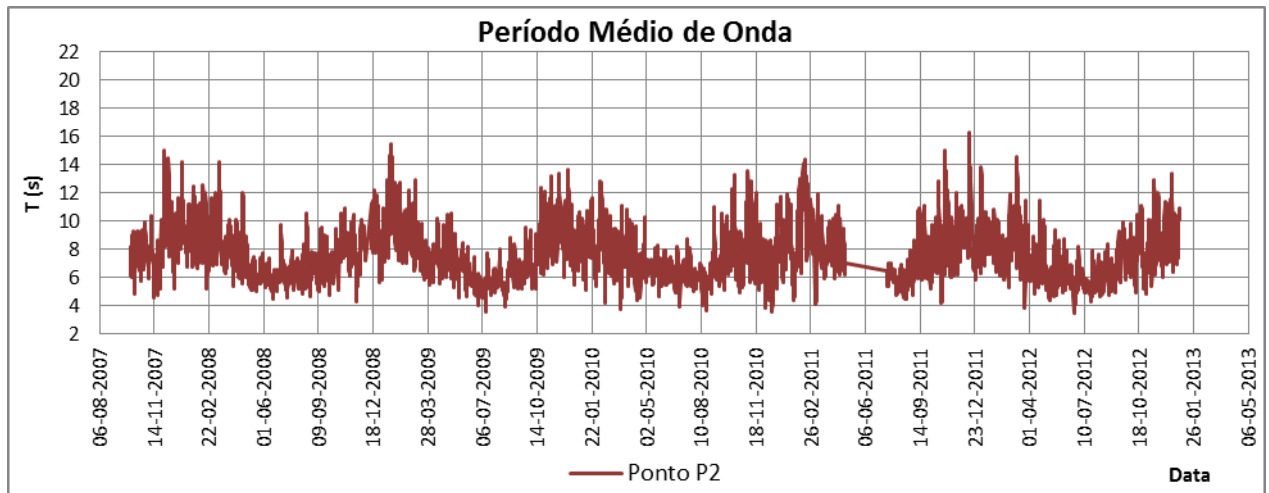


Figura 4.12- Variação do período médio no ponto P2.

### 4.3 Estudo de *Run-up* e Galgamento

Os cálculos expeditos do *run-up* e *run-up*/galgamento em praias e praias/estruturas, respetivamente são efetuados utilizando formulações empíricas, baseadas em medições de campo ou em ensaios em modelos físicos reduzidos.

Desta forma, para a zona de praia o *run-up* foi estimado através da aplicação das fórmulas propostas por: Hunt (1959), obtida com base em ensaios em modelo físico; Holman (1986), Stockdon *et al.* (2006), Nielsen & Hanslow (1991), Ruggiero *et al.* (2001), Guza & Thornton (1982) e Teixeira (2009), obtidas com base em dados de campo (praias naturais).

Na zona de praia em que existe uma estrutura aderente de defesa costeira, foi estimado o galgamento com base na aplicação das fórmulas empíricas de Mase *et al.* (2013), obtidas com base em ensaios em modelo físico.

Assim para uma dada condição de agitação marítima (altura, período e direção de onda) ao largo ou junto à costa, em conjunto com as características da praia/estrutura, são aplicadas as fórmulas mencionadas anteriormente, obtêm-se as estimativas dos valores de *run-up*, por exemplo: *run-up* máximo,  $R_{máx.}$ ; *run-up* excedido apenas por 1% de todos os *run-up*,  $R_{1\%}$ ; *run-up* excedido por 2% de todos os *run-up*,  $R_{2\%}$ ; *run-up* médio,  $R_{médio}$ ; *run-up* significativo (médio do terço mais alto dos *run-up*),  $R_s$ ; *run-up* correspondente à média do décimo mais alto dos *run-up*,  $R_{1/10}$ ; *run-up* correspondente à média do terço mais alto dos valores de *run-up*,  $R_{1/3}$ ; caudal médio galgado por metro linear de estrutura,  $q$ . O perfil representativo da praia em estudo utilizado no presente trabalho está representado na Figura 4.13.

O ângulo do perfil de praia (em graus) introduzido nos cálculos de *run-up* e de galgamento corresponde ao valor de  $3.5763^\circ$ .

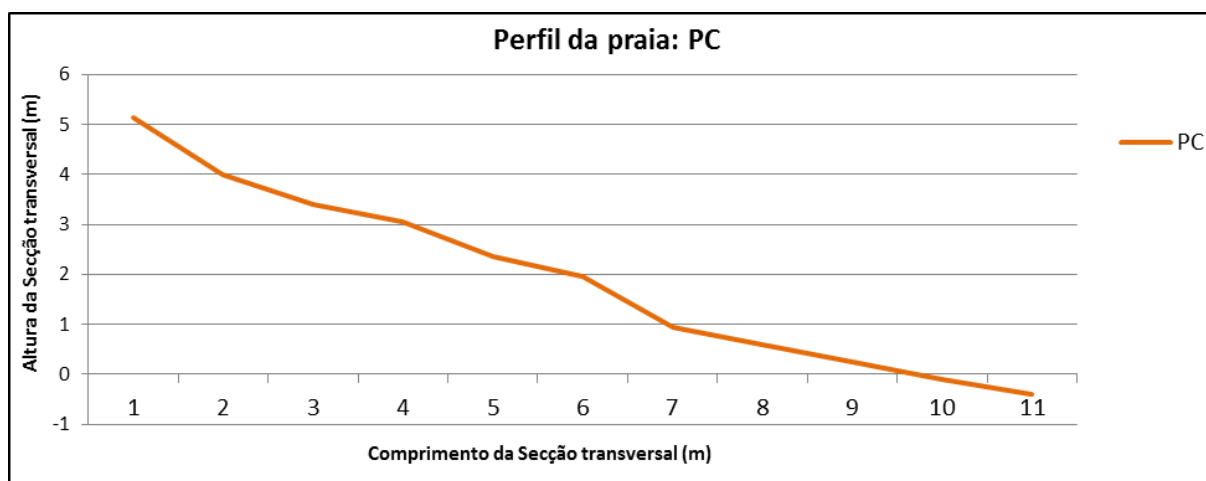


Figura 4.13- Perfil da praia representativo do local de estudo (adaptado de Raposeiro *et al.* 2013).

#### 4.3.1 Condições de aplicação das fórmulas empíricas para o cálculo do run-up

A aplicação das fórmulas empíricas apresentadas seguidamente tem em consideração as características da agitação marítima (altura, período e direção de onda) em águas profundas, ou seja ao largo, exceto uma. Para este efeito, os dados utilizados no presente trabalho são dados medidos *in situ*, resultantes da boia-ondógrafo. Note-se que cada autor desenvolveu as respetivas fórmulas empíricas com base na caracterização da agitação marítima ao largo, exceto Holman (1986), que desenvolveu no seu trabalho duas fórmulas, uma utilizando condições de agitação ao largo e outra utilizando condições de agitação junto à costa. É importante referir que o termo “ao largo” varia de autor para autor, importando apenas o facto de não ser um local em frente à praia. Por exemplo, Holman (1986) utiliza dados de uma boia-ondógrafo localizada a 20 m de profundidade, Nielsen *et al.* (1991) utiliza dados de uma boia-ondógrafo localizada a 80 m de profundidade. Stockdon *et al.* (2006) consideraram como sendo ao largo, águas num intervalo de 7 a 20 m de profundidade. No presente trabalho, o termo “ao largo” considera dados relativos à boia-ondógrafo que se encontra a uma profundidade de 30 m.

- Hunt *et al.* (1959)

As condições de aplicação das fórmulas desenvolvidas pelos autores diferenciam-se, em casos em que se esteja perante *breaking waves*, sendo aí utilizada a equação (4) ou *surging waves* em que se utiliza a equação (5), isto é, se estamos perante ondas que reduzem a sua energia

na zona de rebentação devido à profundidade da água, ou ondas que não rebentam, e acabam por surgir já na praia/estrutura.

Assim sendo:

Para o caso de se verificar a seguinte condição  $(H/T^2)^{0.5} > \tan \beta$ ;  $\alpha \geq 45^\circ$ ;  $H \approx H_0$  a equação que deve ser aplicada no cálculo do *run-up* é a equação (4), apresentada no Quadro 3.2. No caso da condição a ser verificada ser  $(H/T^2)^{0.5} < \tan \beta$ ;  $\alpha \geq 45^\circ$ ;  $H \approx H_0$  então a equação a ser aplicada no cálculo do *run-up* é a equação (5), apresentada no Quadro 3.2.

- Holman (1986)

As condições de aplicação das fórmulas desenvolvidas por este autor respeitam a características da agitação a uma profundidade de 20 m ( $H_0, \xi_0$ ) obtidas numa boia, ou a características da agitação a uma profundidade de 6 m ( $H_s, \xi_s$ ) considerando ou não o *setup*. Por *setup* entende-se o aumento significativo do nível da água, devido à presença de ondas, e encontra-se principalmente presente na zona de rebentação. Trata-se de um fenómeno particularmente preocupante durante eventos de tempestade, quando os efeitos de grandes ondas geradas pelo vento são capazes de aumentar o nível médio do mar aumentando assim os riscos de danos nas infraestruturas do litoral. Desta forma, no presente trabalho, as fórmulas a serem aplicadas incluem o *setup*.

Assim, para características da agitação ao largo, com *setup* incluído, a equação (6) apresentada no Quadro 3.2 deve ser aplicada. Esta tem em conta a altura de onda ao largo, assim como o número de Iribarren, apresentado na equação (18) considerando que o comprimento de onda  $L_0$ , apresentado na equação (19), tem em conta o período de pico da onda,  $T_p$ .

Holman (1986) desenvolveu ainda outra fórmula considerando as características de agitação marítima junto à costa. Esta encontra-se apresentada no Quadro 3.2, equação (7).

O número de Iribarren é obtido pela equação (18), tendo em consideração o comprimento de onda  $L_0$  e período significativo de onda, obtido pela equação (30).

$$T_s = T_p / 1.05 \quad (30)$$



Para estas condições junto à costa é importante salientar o facto de os valores de  $H_s$  e  $T_p$  serem obtidos com base nos resultados da transferência de dados de agitação marítima do largo até junto à costa utilizando o modelo SWAN. No entanto, o modelo SWAN não fornece diretamente o valor de  $H_s$ , mas sim o de  $H_{m0}$  (altura de onda significativa espectral). Desta forma é necessário recorrer ao método de Battjes & Groenendijk (2000), que a partir do valor de  $H_{m0}$  fornecido pelo SWAN calcula o correspondente valor de  $H_s$ . O valor de  $T_p$  é obtido diretamente pelo modelo SWAN.

O procedimento de Battjes & Groenendijk (2000) para determinação do valor de  $H_s$  é simples. Em primeiro lugar é necessário calcular a altura de onda média quadrática,  $H_{rms}$ , junto à costa através da equação (31), em que o parâmetro  $H_{m0}$  é a altura de onda significativa espectral no ponto junto à costa, dada pelo SWAN, e o parâmetro  $h$  é a profundidade a que se encontra o ponto escolhido de amostragem.

$$H_{rms} = [0.6725 + 0.2025 (H_{m0}/h)] * H_{m0} \quad (31)$$

Posteriormente é necessário determinar a altura de transição,  $H_{tr}$ , segundo a distribuição composta de Weibull (CWD) pela equação (32), sendo que  $\alpha$  é o ângulo do perfil de praia.

$$H_{tr} = (0.35 + 5.8 * \tan \alpha) * h \quad (32)$$

Posto isto, procede-se ao cálculo do valor de  $H_{tr}/H_{rms}$ . Com recurso à tabela apresentada em Battjes & Groenendijk (2000) é possível obter-se o valor de  $H_s/H_{rms}$  e assim obter o valor de  $H_s$  com base nos valores de  $H_s/H_{rms}$  e  $H_{rms}$ , calculados anteriormente.

Para as condições junto à costa é importante também ter em linha de conta o efeito da direção da onda. Desta forma, em primeiro lugar é necessário ter em consideração um parâmetro  $\gamma_\beta$ . Este parâmetro é obtido de diferentes formas dependendo do tipo de crista de onda que seja adotado. Na natureza as ondas são de crista curta (Pullen *et al.*, 2007), portanto será este o tipo de crista adotado no presente trabalho.

Desta forma a equação (33) representa a forma de obter o parâmetro  $\gamma_\beta$ :

$$\gamma_\beta = \begin{cases} 1 & 0^\circ \leq |\beta| \leq 20^\circ \\ 1 - 0.0022 |\beta| & 20^\circ < |\beta| \leq 80^\circ \\ 0.824 & |\beta| > 80^\circ \end{cases} \quad (33)$$

- Nielsen & Hanslow (1991)

No âmbito do seu trabalho, os autores desenvolveram a equação (8) do Quadro 3.2, que contém a variável  $L_{RU}$  a qual depende do tipo de praia em estudo.

Assim, para casos de praias refletivas (com inclinação  $m = \tan \beta \geq 0.1$ ) a equação a ser usada é a equação 9 do Quadro 3.2. Nos casos em que as praias são do tipo dissipativo (com inclinação  $m = \tan \beta < 0.1$ ) deve ser aplicada a equação 10 do Quadro 3.2.

- Stockdon et al. (2006)

Segundo Stockdon *et al.* (2006) o desenvolvimento das formulações empíricas tem em conta o tipo de praia em estudo. Assim, para praias dissipativas, cuja condição é a de  $\xi < 0.3$  a equação que é aplicada é a equação (11) do Quadro 3.2. Para casos de praias em que se verifique a condição,  $\xi > 0.3$  é aplicada a equação (12) apresentada no Quadro 3.2.

- Teixeira (2009)

No âmbito do seu trabalho, o autor desenvolveu uma equação mais simples, a equação 13 do Quadro 3.2, para o cálculo de  $R_{máx.}$ , relacionando apenas este parâmetro com o parâmetro da altura de onda.

Posteriormente desenvolveu outra equação, a equação 14 do Quadro 3.2, contendo os parâmetros escalares da ondulação e o declive  $R=c(H,L,\beta)$ .

Note-se que o número de Iribarren presente na equação 14 do Quadro 3.2 tem em consideração o comprimento de onda  $L_0$  com base no período de pico da onda.

- Ruggiero *et al.* (2001)

Com base no trabalho desenvolvido por Ruggiero *et al.* (2001) as equações aplicadas dependem do número de Iribarren. Assim para a condição  $0.1 < \xi_0 < 0.5$ , a equação utilizada é a equação (16) do Quadro 3.2. Por outro lado, caso se verifique a condição  $0.5 < \xi_0 < 3.5$ , a equação a aplicar é a equação (15) do Quadro 3.2.

- Guza & Thornton (1982)

A equação desenvolvida pelos autores e a ser aplicada no cálculo do *run-up*, é a equação 17 do Quadro 3.2. É de notar que o *run-up* calculado por este autor é o *run-up* significativo (média do terço mais alto dos valores de *run-up*).

Posto isto, com base nos resultados obtidos através das equações anteriormente descritas, assumindo uma distribuição de Rayleigh para os valores de *run-up* individuais e no sentido de

obter outros valores de *run-up*, tais como:  $R_s$ ,  $R_{médio}$ ,  $R_{1\%}$  e  $R_{máx.}$ ; é necessário ter em conta as relações (34), (35) e (36):

$$R_s = R_{2\%} / 1.4 \quad (34)$$

$$R_{médio} = 0.63 * R_s \quad (35)$$

$$R_{1\%} = 1.52 * R_s \quad (36)$$

O valor de  $R_{máx.}$  na realidade é difícil de ser estimado a menos que fossem realizados ensaios em laboratório. Na impossibilidade de tal, no presente trabalho, o valor de  $R_{máx.}$  será igual ao valor de  $R_{1\%}$ , pois considera-se ser uma boa aproximação.

Para o cálculo da cota máxima de inundação pela equação (20) são necessários três parâmetros: maré astronómica, sobre-elevação e  $R_{2\%}$ . No entanto, no presente trabalho o cálculo do nível máximo de inundação envolverá o nível de maré (que já inclui a componente da maré astronómica e a sobre-elevação), obtida pelo marégrafo de Cascais e pelo  $R_{máx.}$ , ou seja pelo  $R_{1\%}$ , que nos dará a cota máxima de inundação. Esta cota máxima de inundação servirá posteriormente para a análise do risco de inundação.

#### **4.3.2 Análise de Resultados de *Run-up***

##### **Utilização de condição de agitação ao largo**

Para o cálculo da cota máxima de inundação que também pode ser denominada como nível máximo de inundação, foram tidos em conta os valores do nível de maré obtidos pelos marégrafo de Cascais e foram estimados valores de  $R_{máx.}$  pelas metodologias de vários autores apresentadas anteriormente no Quadro 3.2, para as condições de agitação marítima ao largo, isto é, utilizando como características de agitação marítima os dados *in situ*, medidos na boia-ondógrafo. Para efeitos de comparação com a agitação real são feitos cálculos de *run-up* utilizando características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11, situado no local correspondente à localização da boia-ondógrafo. O período de tempo considerado é de 2007 a 2012. Para o cálculo do nível de inundação pela metodologia de Holman (1986) com base na agitação marítima junto à costa, foram tidos em conta os valores do nível de maré obtidos pelo marégrafo de Cascais e foram estimados os valores de  $R_{máx.}$  utilizando características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P2, localizado em frente à praia. Posto isto, na Figura 4.14 Figura 4.15 Figura 4.16e Figura 4.17 são apresentados os resultados obtidos.

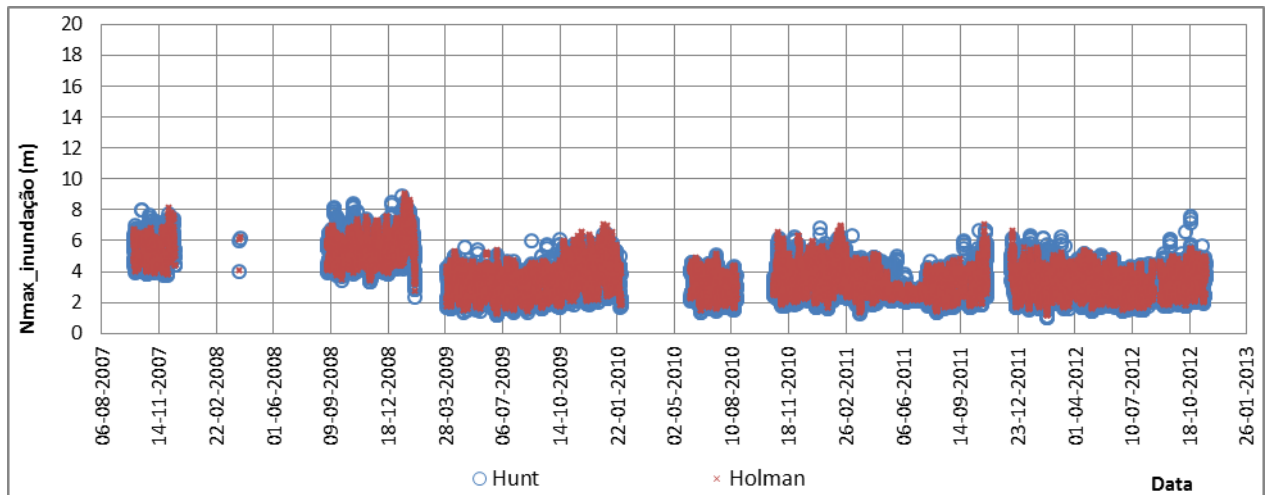


Figura 4.14- Representação do nível máximo de inundação utilizando as metodologias de Hunt (1959) e Holman (1986) para o cálculo do *run-up* para condições de agitação marítima ao largo.

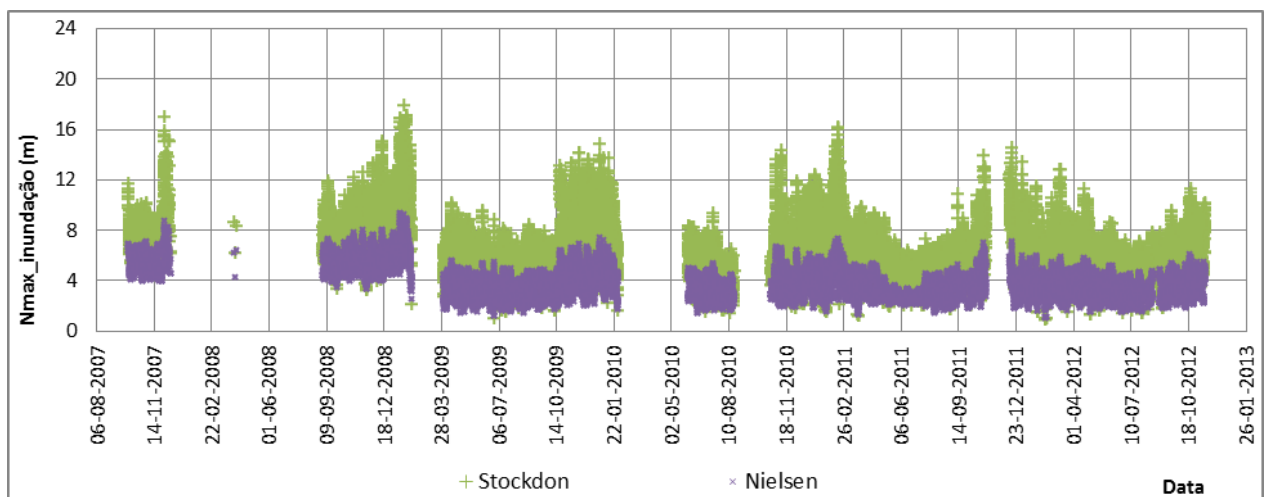


Figura 4.15- Representação do nível máximo de inundação utilizando as metodologias de Stockdon *et al.* (2006) e Nielsen & Hanslow (1991) para o cálculo do *run-up* para condições de agitação marítima ao largo.

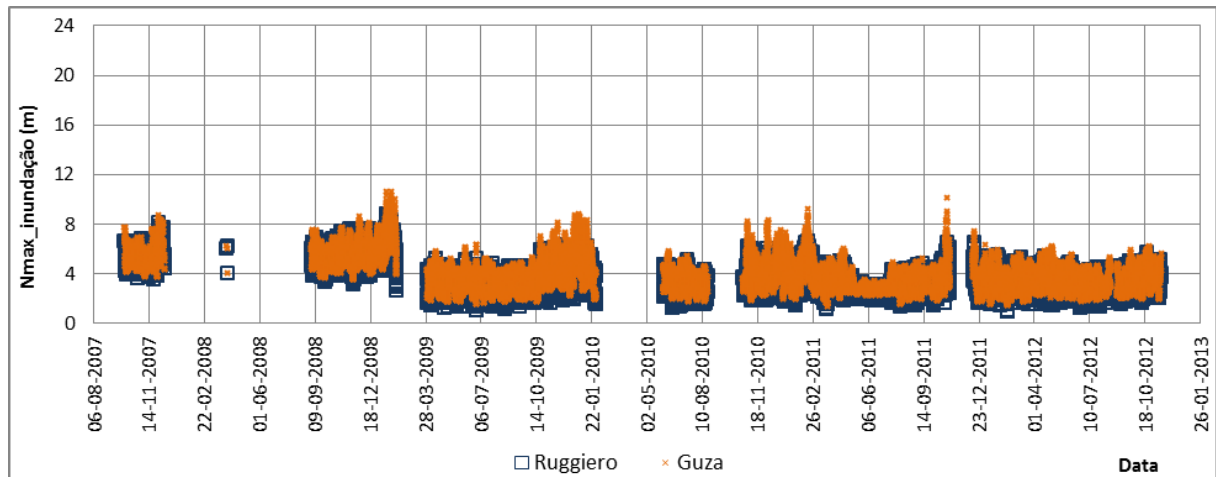


Figura 4.16- Representação do nível máximo de inundação utilizando as metodologias de Ruggiero et al. (2001) e Guza & Thornton (1982) para o cálculo do *run-up* para condições de agitação marítima ao largo

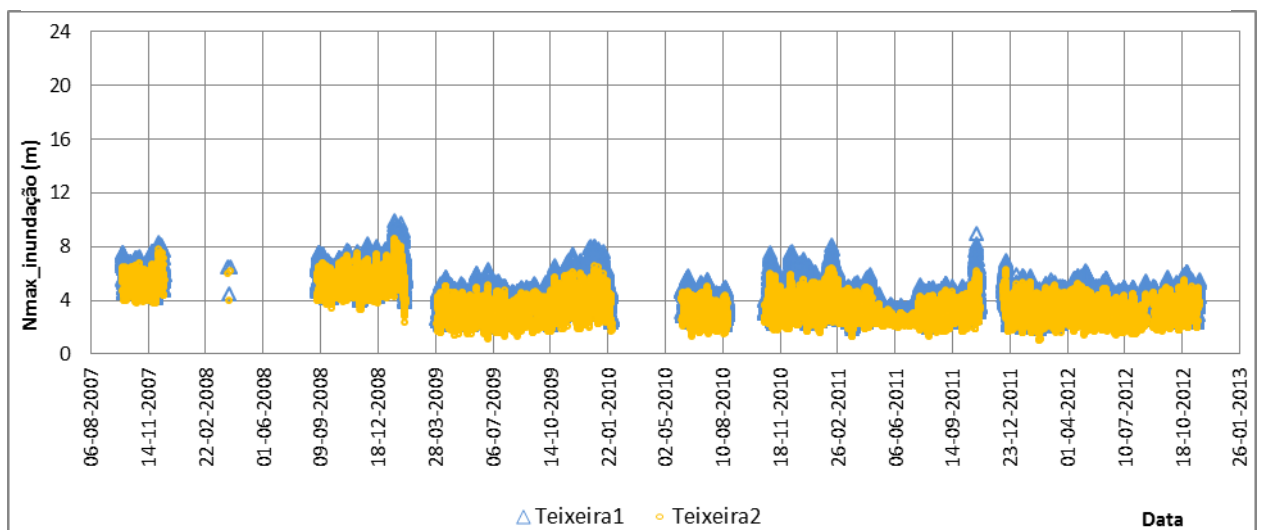


Figura 4.17- Representação do nível máximo de inundação utilizando as metodologias de Teixeira (2009) para condições de agitação marítima ao largo.

No Quadro 4.3 é possível comparar as diferentes metodologias com base nos valores mínimos, máximos e médios.

Quadro 4.3- Níveis de inundação mínimos, máximos e médios calculados com diferentes metodologias utilizando dados *in situ* medidos pela boia-ondógrafo como características de agitação marítima.

<b>Autores</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>
<b>Hunt (1959)</b>	0.986	8.862	3.548
<b>Holman (1986)</b>	1.121	9.049	3.669
<b>Stockdon <i>et al.</i> (2006)</b>	0.935	17.933	6.330
<b>Nielsen <i>et al.</i> (1991)</b>	1.048	9.376	3.839
<b>Ruggiero <i>et al.</i> (2001)</b>	0.957	8.801	3.634
<b>Guza <i>et al.</i> (1982)</b>	1.366	10.635	3.970
<b>Teixeira (2009)</b>	1.836	9.848	4.184
	0.995	8.541	3.562

Com base na análise do Quadro 4.3, é possível verificar que os níveis mínimos do nível de inundação variam entre 0.935 m e 1.836 m. Relativamente aos valores máximos, estes variam entre 8.541 m e 17.933 m. A média de valores das cotas máximas de inundação varia entre 3.548 m e 6.330 m. Verifica-se que, utilizando metodologias desenvolvidas por diferentes autores com dados de praias localizadas em sítios diferentes, os resultados obtidos não apresentam diferenças significativas, com a exceção da metodologia desenvolvida por Stockdon *et al.* (2006) que atinge uma cota máxima de 17.933 m e que apresenta uma média de 6.330 m. Com base nisto, face aos resultados obtidos pela metodologia de Stockdon *et al.* (2006) serem claramente diferentes relativamente aos restantes resultados, optou-se por não se considerar a mesma para o passo seguinte do presente trabalho, que é a avaliação do risco.

Na Figura 4.18 e na Figura 4.19 encontram-se representados os valores da média das cotas de inundação (ou níveis de inundação máximos), ou seja, uma média dos valores de todos os autores, exceto Stockdon *et al.* (2006), ao longo do período de estudo utilizando os dados *in situ* medidos na boia-ondógrafo e os resultados obtidos pelo modelo SWAN no ponto P11 como características de agitação marítima, respetivamente

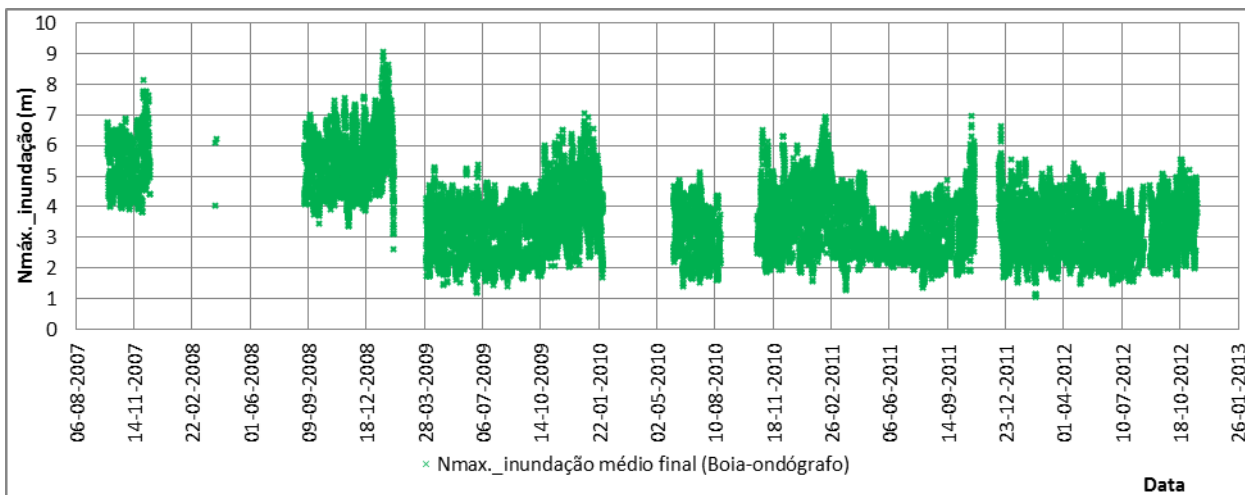


Figura 4.18- Representação gráfica da média final do nível máximo de inundação dos diferentes autores (exceto Stockdon *et al.* 2006) utilizando dados *in situ* medidos na boia-ondógrafo

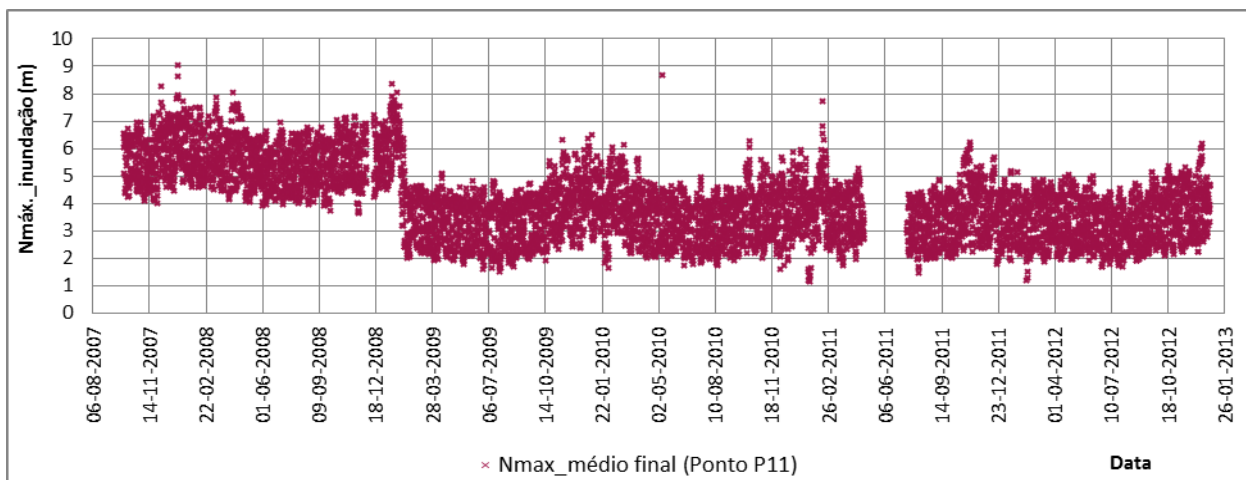


Figura 4.19- Representação gráfica da média final do nível máximo de inundação dos diferentes autores (exceto Stockdon *et al.* 2006) utilizando como características de agitação marítima os resultados obtidos pelo modelo SWAN no ponto P11.

Da análise da representação gráfica na Figura 4.18 verifica-se que, os valores médios do nível máximo de inundação médio variam entre 1.048 m e 9.049 m. Na Figura 4.19 pode-se verificar que os valores do nível máximo de inundação, utilizando como características de agitação marítima os resultados obtidos pelo modelo SWAN no ponto P11, variam entre 1.150 m e 9.039 m.

No Quadro 4.4 estão representados os valores do nível máximo de inundação médio final em termos de valores mínimos, máximos e médios obtidos com características da agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo e obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11.

Quadro 4.4- Comparação entre os valores da média final do nível máximo de inundação: mínimos, máximos e médios da boia-ondógrafo e no ponto P11.

	<b>N<sub>máx.</sub> inundação</b>		
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>
<b>Boia-ondógrafo</b>	1.048	9.049	3.675
<b>Ponto P11 (modelo SWAN)</b>	1.150	9.039	4.023

Pela análise do Quadro 4.4 entre os resultados obtidos pela caracterização da agitação marítima obtida na boia-ondógrafo e a obtida pelo modelo SWAN no ponto P11, verifica-se que, as diferenças são pouco significativas em termos de valor mínimo (a diferença entre os resultados é cerca de 0.102 m). e em termos de valor máximo (a diferença é de 0.01 m). No que diz respeito ao valor médio, as diferenças já são mais notórias: a diferença é de 0.345 m.

#### **Utilização de condição de agitação junto à costa**

Na Figura 4.20 encontram-se representados graficamente os resultados obtidos para o nível máximo de inundação junto à costa.

Pela análise da Figura 4.20 verifica-se que os valores variam entre 0.78 m e 7.72 m, sendo que a média é de 3.34 m.

No Quadro 4.5 apresentam-se os valores mínimo, máximo e médio dos resultados da média final do nível máximo de inundação, com características de agitação marítima ao largo obtidas na boia-ondógrafo, e pelo modelo SWAN nos pontos P11 e P2.



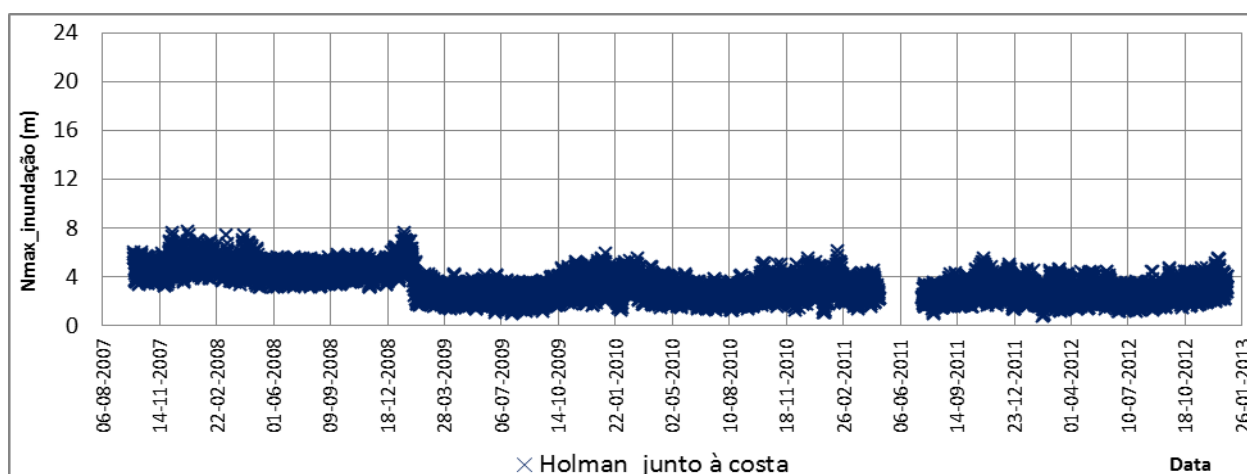


Figura 4.20- Representação do nível máximo de inundação pela metodologia de Holman (1986), com base nas características de agitação marítima junto à costa obtidas pelo modelo SWAN no ponto P2.

Quadro 4.5- Comparação entre os valores do nível máximo de inundação: mínimos, máximos e médios utilizando as características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo, no ponto P11 e no ponto P2.

Dados obtidos em:	$N_{\text{máx. inundação}}$		
	Mínimo	Máximo	Média
Boia-ondógrafo	1.048	9.049	3.675
Ponto P11 (modelo SWAN)	1.150	9.039	4.023
Ponto P2 (modelo SWAN)	0.778	7.725	3.336

Pela análise do Quadro 4.5, de uma forma geral, os valores do nível máximo de inundação com base nas características de agitação junto à costa (valores do ponto P2) apresentam-se ligeiramente mais baixos comparativamente com os valores obtidos com base nas características de agitação marítima ao largo. Contudo correspondem a diferenças pouco significativas.

Foram ainda calculados da mesma forma os valores dos parâmetros  $R_{2\%}$  e  $R_{1\%}=R_{\text{máx.}}$  com valores medidos na boia-ondógrafo. Os mesmos parâmetros foram calculados com valores calculados no ponto P11 e ainda com valores junto à costa. Calcularam-se também os parâmetros  $R_s$  e  $R_{\text{médio}}$  contudo, dada a sua irrelevância no âmbito do presente trabalho, não são apresentadas figuras correspondentes.

No anexo B são apresentadas as figuras correspondentes aos valores calculados com valores medidos na boia-ondógrafo e valores calculados no ponto P2. Não são apresentados os valores de  $R_{2\%}$  e  $R_{1\%}=R_{\text{máx.}}$  calculados no P11 porque como se pode observar no Quadro 4.5,

estes são muito semelhantes aos resultados obtidos com os valores medidos na boia-ondógrafo.

#### 4.3.3 Condições de aplicação das fórmulas empíricas de *Run-up*/Galgamento

A estrutura em análise no presente trabalho localiza-se em terra, que se encontra apresentada na Figura 4.21.



Figura 4.21- Fotografias da estrutura aderente de defesa costeira retiradas no local.

A Figura 4.22 apresenta as medidas da estrutura aderente de defesa costeira relativamente ao comprimento do talude e da largura da berma. Note-se que a cota de coroamento constitui um parâmetro importante no cálculo do caudal médio galgado e assume o valor de 5.916 m.



Figura 4.22- Estrutura aderente de defesa costeira com representação das medidas do comprimento do talude e da largura da berma.

Desta forma, para o estudo do galgamento dessa estrutura será aplicada a metodologia de Mase *et al.* (2013) em que se efetua o cálculo do *run-up* na parte da praia em frente a estrutura, com posterior cálculo do caudal que é galgado sobre a estrutura.

Desta forma as equações (23), (24) e (25) representam os valores de *run-up* correspondentes a  $R_{2\%}$ ,  $R_{1/10}$  e  $R_{1/3}$ , respetivamente.

Para posterior cálculo do caudal médio galgado por metro linear de estrutura, entrará em consideração o valor de  $R_{máx.}$ . Os autores desenvolveram duas formas de calcular o caudal médio galgado, tendo em conta valores de  $R_{máx.}$  diferentes.

Assim para o cálculo de  $R_{máx.(37\%, 100)}$ , ou seja, do valor de *run-up* máximo não excedido em 37% dos casos em ensaios com 100 ondas, assumindo a distribuição de Rayleigh, é dado pela seguinte equação (37):

$$R_{máx.} \approx 1.52 * R_{1/3} \approx 1.09 * R_{2\%} \quad (37)$$

A equação que permite obter o caudal com base no  $R_{máx.(37\%, 100)}$  é a equação (26) do Quadro 3.3.

Para se obter um valor de  $R_{máx.(99\%, 100)}$ , ou seja, um valor de *run-up* máximo não excedido em 99% dos casos em ensaios com 100 ondas, assumindo a distribuição de Rayleigh, utiliza-se a equação (38):

$$R_{m\acute{a}x} \approx 2.15 * R_{1/3} \approx 1.54 * R_{2\%} \quad 38$$

Note-se que o valor de  $R_{m\acute{a}x}$ , deve ter em conta um fator de rugosidade  $\gamma_f$ . Este fator admite diferentes valores dependendo do tipo de estrutura. No presente trabalho adotou-se o valor de  $\gamma_f=0.5$ , tratando-se de um valor intermédio entre valores atribuídos a estruturas permeáveis e estruturas impermeáveis, pois a estrutura de defesa costeira em estudo, apesar de ser permeável, está localizada num sítio em que frequentemente os vazios são preenchidos por areia.

Desta forma, a equação a ser aplicada para o cálculo do caudal médio galgado neste caso será a equação 27 do Quadro 3.3. Posteriormente ao cálculo do caudal é necessário ter em conta um coeficiente de redução do galgamento que tem por base o tamanho da berma. No caso de uma estrutura de talude simples, com um valor de berma com pelo menos três vezes o diâmetro nominal de uma camada simples de enrocamento então haverá mais energia a ser dissipada. O fator de redução é dado pela equação 39:

$$C_r = 3.06 * \exp(-1.5 * G_c / H_{m0}) \quad 39$$

Com,  $C_r < 1$  e  $G_c/H_{m0} < 0.75$ . Caso contrário o fator de redução assume o valor igual a um.

#### 4.3.4 Análise de Resultados de *Run-up*/galgamento

Com a aplicação da metodologia de Mase *et al.* (2013) obtiveram-se os resultados relativamente a cada  $R_{m\acute{a}x}$  calculados e o respetivo caudal. Para tal utilizaram-se as características de agitação marítima ao largo obtidas na boia-ondógrafo e as obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11.

Na Figura 4.23 e na Figura 4.24 apresentam-se resultados para os diferentes  $R_{m\acute{a}x}$  com base nas características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo.

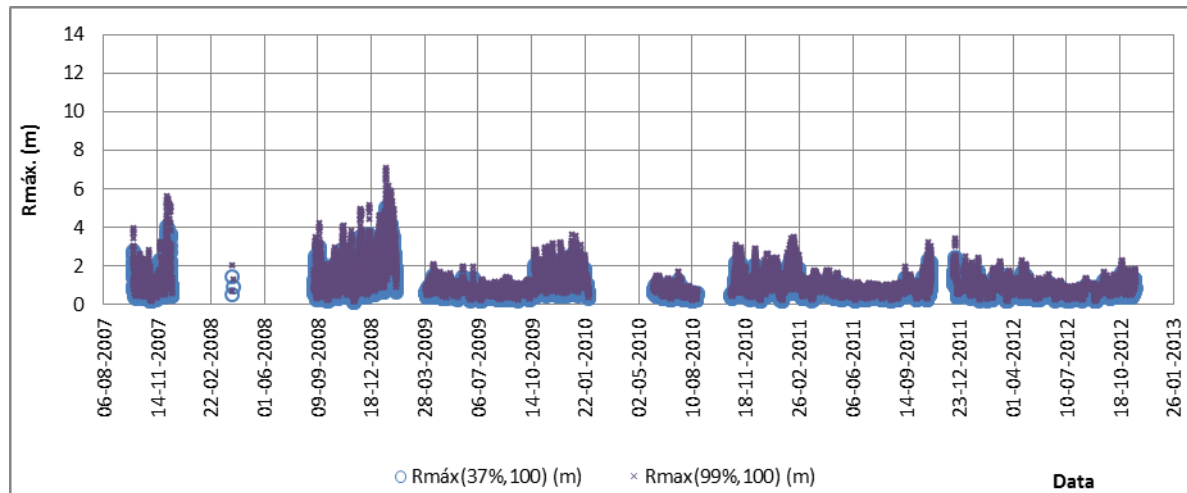


Figura 4.23- Representação gráfica dos valores de  $R_{máx.}$  com base nas características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo.

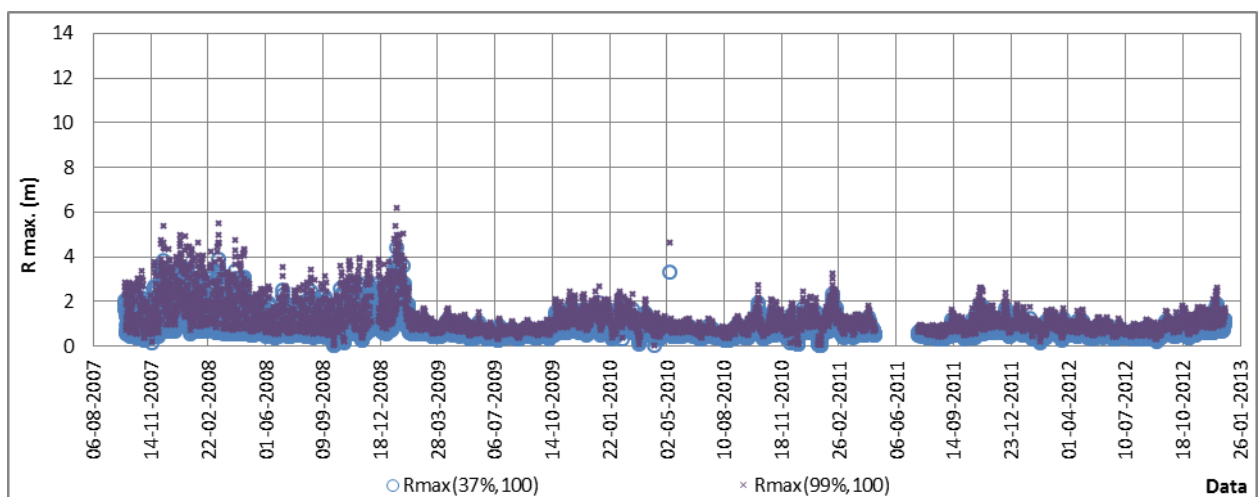


Figura 4.24- Representação gráfica dos valores de  $R_{máx.}$  com base nas características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11.

Pela análise gráfica da Figura 4.23 verifica-se que os valores de  $R_{máx.(99\%,100)}$ , variam entre 0.14 m e 7.05 m, e os valores de  $R_{máx.(37\%,100)}$  variam entre 0.10m e 4.99 m.

Analisando graficamente a Figura 4.24, tal como os resultados obtidos com base na agitação marítima obtida na boia-ondógrafo, os valores de  $R_{máx.(99\%,100)}$  atingem valores, entre 0.02 m e 6.156 m, relativamente superiores aos valores de  $R_{máx.(37\%,100)}$  que variam entre 0.01 m e 4.36 m. Com os resultados obtidos de  $R_{máx.}$  procedeu-se ao cálculo do caudal médio galgado tendo em conta o tipo de estrutura e a largura da berma.

Na Figura 4.25 e na Figura 4.26 apresentam-se os caudais médios galgados por metro linear de estrutura.

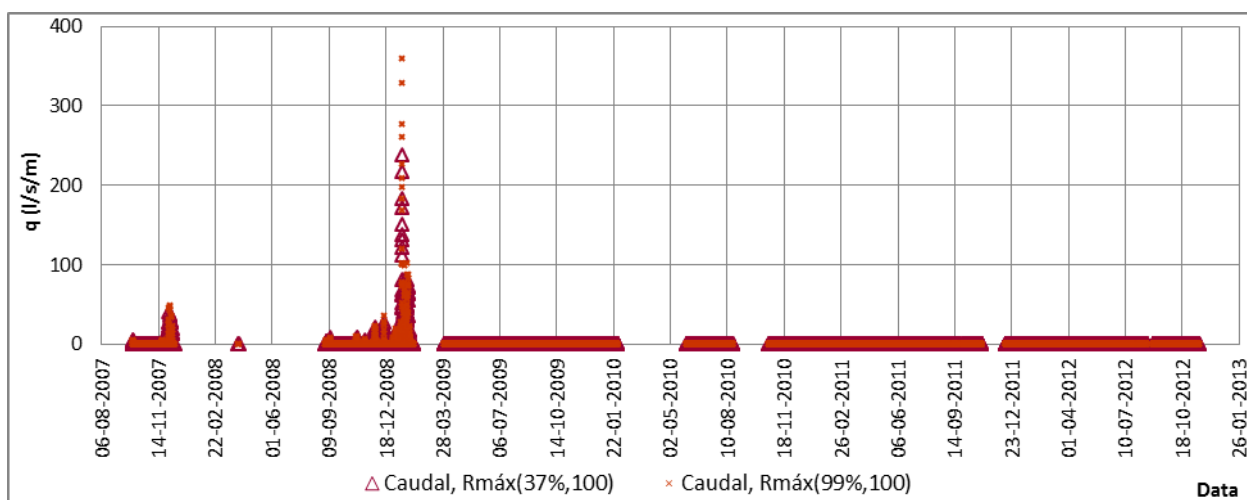


Figura 4.25- Representação gráfica dos caudais médios galgados por metro linear de estrutura com base no  $R_{máx}(37\%,100)$  e com base no  $R_{máx}(99\%,100)$  obtidos através das características de agitação marítima medidas na boia-ondógrafo.

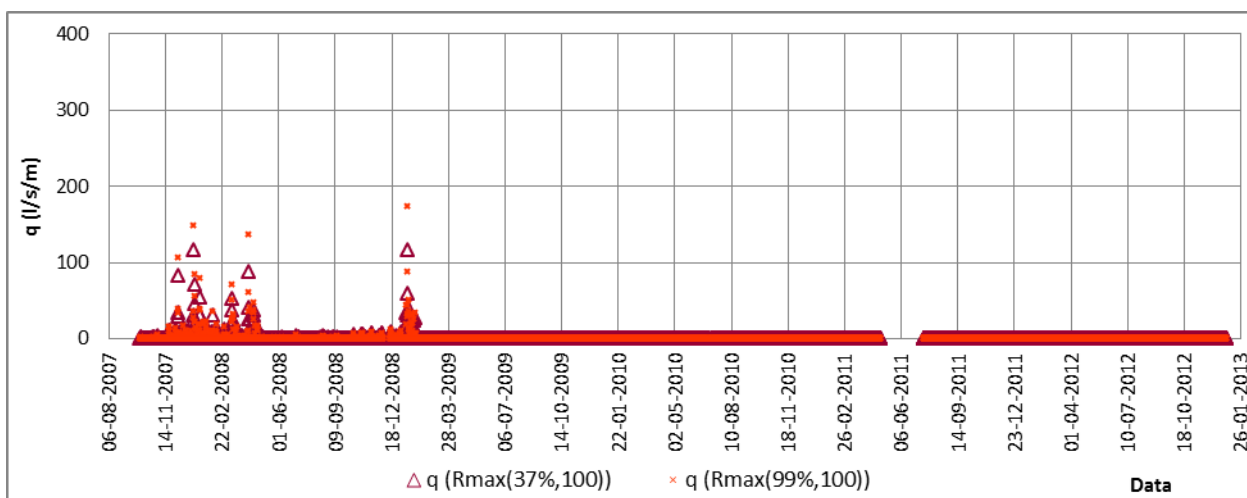


Figura 4.26- Representação gráfica dos caudais médios galgados por metro linear de estrutura com base no  $R_{máx}(37\%,100)$  e com base no  $R_{máx}(99\%,100)$  obtidos através das características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11.

Pela análise da Figura 4.25, verifica-se a ocorrência de caudais muito elevados no período de janeiro de 2009. Os picos máximos atingidos são de 237.06 l/s/m com  $R_{máx}(37\%,100)$  e de 358.98 l/s/m com  $R_{máx}(99\%,100)$ .

Analisando a Figura 4.26 verificam-se alguns picos máximos no período entre o mês de dezembro de 2007 ao mês de janeiro de 2009. Com base no  $R_{máx.(37\%,100)}$  os valores de caudal atingem um valor máximo de 116.72 l/s/m, enquanto que os valores de caudal com base no  $R_{máx.(99\%,100)}$  atingem um valor máximo de 173.25 l/s/m. Posto isto, no Quadro 4.6 apresentam-se os valores de caudal médio galgado por metro linear de estrutura em termos de valores mínimos, máximos e médios.

Quadro 4.6- Comparação entre os valores do caudal médio galgado por metro linear de estrutura: mínimos, máximos e médios utilizando as características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo e no ponto P11.

	Caudal médio galgado por metro linear de estrutura					
	Mínimo		Máximo		Média	
	$R_{máx.(37\%,100)}$	$R_{máx.(99\%,100)}$	$R_{máx.(37\%,100)}$	$R_{máx.(99\%,100)}$	$R_{máx.(37\%,100)}$	$R_{máx.(99\%,100)}$
<b>Boia-ondógrafo</b>	0.00	0.00	237.06	358.98	0.25	0.31
<b>Ponto P11 (modelo SWAN)</b>	0.00	0.00	116.72	173.25	0.37	0.47

Analisando o Quadro 4.6 é possível verificar que ao nível de valores máximos, dos resultados com base nas características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11 se apresentam inferiores relativamente aos resultados obtidos na boia-ondógrafo. Contudo relativamente aos valores médios, estes apresentam-se superiores no caso em que as características da agitação marítima são obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11.

Os valores obtidos para os caudais são relativamente elevados. Tal não é de estranhar pois dada a zona de estudo que se trata, os testemunhos locais apontam para inúmeros eventos extremos ocorridos ao longo dos anos, com avanços do mar sobre o cordão dunar e galgamento da estrutura em estudo. Mais ainda. Os efeitos que esses galgamentos têm tido na estrutura são visíveis.

Na Figura 4.27 apresentam-se fotografias da estrutura tiradas no local.



Figura 4.27- Fotos tiradas no local de danos na estrutura aderente de defesa costeira.

É possível verificar analisando a Figura 4.27, alguns danos na estrutura aderente de defesa costeira, devido a avanços consecutivos do mar.

O parâmetro  $R_{2\%}$  embora não seja diretamente relevante para o estudo não deixa de ser igualmente importante por isso está representado no anexo B.

Os parâmetros  $R_{1/10}$  e  $R_{1/3}$  foram também calculados com valores medidos na boia-ondógrado e calculados com valores calculados no ponto P11. No entanto, dada a sua irrelevância no âmbito do presente trabalho, não são apresentadas figuras correspondentes.

.No Anexo B é apresentada a figura correspondente ao parâmetro  $R_{2\%}$  calculado com valores medidos na boia-ondógrafo e calculado com valores calculados no ponto P11. Pela análise da figura verifica-se que os valores de  $R_{2\%}$  calculados com valores medidos na boia-ondógrafo se apresentam geralmente superiores aos valores calculados com valores calculados no ponto P11, ainda que as diferenças não sejam muito significativas

Note-se que os cálculos do *run-up* e do galgamento foram realizados recorrendo a programas FORTRAN desenvolvidos por Fortes *et al.* (2013a), Fortes *et al.* (2013b) e Fortes *et al.* (2013c).



#### 4.3.5 Avaliação do risco de inundação/galgamento

Para a avaliação do risco de inundação na praia, no local de estudo, como referido haverá que:

- Definição da cota máxima de inundação da praia;
- Determinação da probabilidade de ocorrência de inundação com base na definição da cota máxima de inundação mencionada no ponto acima e classificação dessa probabilidade atendendo aos graus definidos na tabela de probabilidades de ocorrência (Quadro 3.7);
- Análise das consequências de ocorrência de inundação e definição do grau de consequências;
- Multiplicação do valor do grau de probabilidade de ocorrência pelo valor do grau de consequências para obter o grau de risco de ocorrência de inundação não admissíveis nessa subzona. Com os valores do grau de risco nas diversas subzonas podem-se construir mapas de risco.

Para a avaliação do risco de galgamento na estrutura aderente, no local de estudo, haverá que:

- Definição dos limites admissíveis para o caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento considerando o perfil transversal da estrutura e a utilização da zona protegida pela estrutura;
- Determinação da probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis, com base na resposta da estrutura à agitação incidente e nos limites mencionados no ponto acima, e classificação dessa probabilidade atendendo aos graus definidos na tabela de probabilidades de ocorrência (Quadro 3.7);
- Análise das consequências de ocorrência de galgamentos e definição do grau de consequências;
- Multiplicação do valor do grau de probabilidade de ocorrência pelo valor do grau de consequências para obter o grau de risco de ocorrência de galgamentos não admissíveis nessa subzona. Com os valores do grau de risco nas diversas subzonas podem construir-se mapas de risco.

Haverá que primeiramente estabelecer os valores da cota máxima da praia e os valores limites do caudal médio galgado por metro linear da estrutura referidos anteriormente.

Para esse efeito, considera-se que:

- Para a zona de praia, o perfil representativo desta contém uma cota máxima de 5.1 m, portanto acima desta cota ocorre galgamento do cordão dunar e inundação da zona protegida pelo mesmo;
- A estrutura de defesa costeira apresenta uma geometria que se enquadra numa estrutura de defesa com talude no tardo, sem danos no coroamento e no tardo caso estes se encontrem bem protegidos (50-200 l/s/m);
- Relativamente às pessoas, a zona em estudo enquadra-se na condição de que as pessoas estão totalmente desprevenidas que não conseguem observar a agitação incidente, que podem facilmente ficar assustadas ou perturbadas, com vestuário inapropriado para se molharem ou que se desloquem numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas, devido ao parque de campismo localizado imediatamente atrás da estrutura (l/s/m);
- Danos nos edifícios (infraestruturas do parque, receções e balneários) dentro do parque de campismo localizado atrás da estrutura de defesa costeira (1 l/s/m);
- Danos em equipamentos localizados a 5-10 m da estrutura (0.4 l/s/m);
- Não são considerados os veículos nesta zona uma vez que estes não são afetados pelo galgamento da estrutura.

Assim, perante os valores-limites adotados para a cota máxima e para o caudal médio galgado por metro linear de estrutura quer para a praia quer para a estrutura, obtêm-se as probabilidades de ocorrência de valores que excedem os limites pré-estabelecidos considerando os valores de caudais obtidos (Figura 4.25 e Figura 4.26). No Quadro 4.7 indica-se a probabilidade de ocorrência de eventos adversos de inundação na praia. No Quadro 4.8 e Quadro 4.9 estão apresentadas as probabilidades de ocorrência de galgamentos na estrutura tendo por base as condições ao largo com características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo e pelo modelo SWAN no ponto P11.

Quadro 4.7- Probabilidade de ocorrência (em %) de acontecimentos com risco de inundação na praia com condições e características de agitação marítima diferentes.

Dados provenientes de:	Ao largo		Junto à costa
	Boia-ondógrafo	Ponto P11 (modelo SWAN)	Ponto P2 (modelo SWAN)
<b>Praia</b>	13	20	9

Quadro 4.8- Probabilidade de ocorrência (em %) de acontecimentos com risco de galgamento com condições ao largo e características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo.

		Ao largo (boia-ondógrafo)			
		Estrutura	Pessoas	Edifícios	Equipamentos
Estrutura	$R_{\text{máx.}(37\%,100)}$	0.01	3.02	1.56	1.85
	$R_{\text{máx.}(99\%,100)}$	0.02	3.22	1.60	1.90

Quadro 4.9- Probabilidade de ocorrência (em %) de acontecimentos com risco de galgamento com condições ao largo e características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11.

		Ao largo (modelo SWAN- Ponto P11)			
		Estrutura	Pessoas	Edifícios	Equipamentos
Estrutura	$R_{\text{máx.}(37\%,100)}$	0.00	7.11	3.28	4.54
	$R_{\text{máx.}(99\%,100)}$	0.00	7.35	3.39	4.68

Analisando o Quadro 4.7 verifica-se que, na zona de praia a ocorrência de eventos com base nos dados ao largo com características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo têm uma probabilidade de ocorrência de 13%. Relativamente às características obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11 assumem uma probabilidade de ocorrência de 20%. Pela consulta da tabela de probabilidades (Quadro 3.7) estes valores encontram-se num intervalo de 10-25%, ou seja, assumem um grau de probabilidade de ocorrência de 3, denominando-se

por acontecimento Ocasional. Desta forma verifica-se que independentemente da caracterização da agitação marítima obtida ser de origem na boia-ondógrafo ou pelo modelo SWAN, o grau de probabilidade de ocorrência é o mesmo. Relativamente à ocorrência de eventos com base nas condições junto à costa com características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P2, a probabilidade de ocorrência é de 9%, ou seja encontra-se no intervalo de 1-10%, sendo o grau atribuído à probabilidade de ocorrência de 2, denominando-se o acontecimento Raro.

No Quadro 4.8 e no Quadro 4.9, verifica-se que os valores de probabilidade de ocorrência com base nas características de agitação marítima obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11, são ligeiramente superiores às características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo.

No Quadro 4.8 verifica-se que relativamente aos valores com base no  $R_{máx(37\%,100)}$  e no  $R_{máx(99\%,100)}$  são próximos, não sendo as suas diferenças significativas em termos de grau de probabilidade atribuído. Desta forma, com base no Quadro 3.7, é possível verificar em que intervalo se encontra a probabilidade de ocorrência, atribuindo-se um grau e denominando o tipo de acontecimento respetivo. Assim, na categoria de estrutura as probabilidades de ocorrência encontram-se dentro do intervalo 0-1%, então o grau de probabilidade de ocorrência é de 1 - acontecimento Improvável. Na categoria de pessoas os valores de probabilidade de ocorrência encontram-se no intervalo 1-10%, sendo atribuído um grau de probabilidade de ocorrência de 2 - acontecimento Raro. No que toca as categorias de Edifícios e Equipamentos, os valores de probabilidade de ocorrência encontram-se no intervalo de 1-10%, ou seja, com um grau de 2 para a probabilidade de ocorrência - acontecimento Raro.

Da análise do Quadro 4.9, verifica-se a mesma proximidade entre os valores com base nos  $R_{máx(37\%,100)}$  e  $R_{máx(99\%,100)}$ . Desta forma, pode-se atribuir o mesmo grau de probabilidade de ocorrência. Desta forma, na categoria de estrutura o grau de probabilidade de ocorrência é de 1, pois os valores apresentam-se no intervalo de 0-1% - acontecimento Improvável. Relativamente à categoria das pessoas, os valores encontram-se no intervalo 1-10%, ou seja, é atribuído um grau de 2 - acontecimento Raro. Na categoria de Edifícios e Equipamentos a diferença entre os valores é pouco significativa na atribuição do grau de probabilidade de ocorrência, sendo este um grau de 2, - acontecimento Raro.

Definido o grau associado à probabilidade de ocorrências, segue-se com a determinação do grau de consequências associadas a essas ocorrências.

Para a definição do grau de consequências adotou-se o Quadro 3.8.

No presente trabalho, o grau de consequências considerado adequado ao local de estudo é o grau 5, pelo facto do local possuir uma infraestrutura de proteção costeira, locais com estruturas para atividades económicas relevantes para a zona, (bares, restaurantes e parque de campismo) como se pode verificar na Figura 4.28 e ainda por se tratar de um local pouco

estável devido ao desaparecimento da restinga (Cova do Vapor- Bugio) e do conseqüente emagrecimento da praia que possui um cordão dunar pequeno e frágil. Posto isto, as conseqüências da ocorrência de eventos extremos no local de estudo consideram-se sérias.

Com a caracterização do grau de probabilidade de ocorrências na praia e na estrutura e do grau de conseqüências dessas ocorrências, obtém-se o grau de risco através do produto dos dois graus mencionados anteriormente.



Figura 4.28- Representação das atividades económicas na Praia de São João da Caparica, Costa da Caparica, Almada.

Desta forma, no Quadro 4.10 apresentam-se os resultados do grau de risco associado ao local de estudo.

Quadro 4.10- Grau de Risco para as zonas em estudo atendendo às características de agitação marítima.

	Praia		Estrutura			
	Ao largo	Na Costa	Ao Largo			
			Estrutura	Pessoas	Edifícios	Equipamentos
<b>Grau de probabilidade de ocorrência</b>	3	2	1	2	2	2
<b>Grau de conseqüências</b>	5	5	5	5	5	5
<b>Grau de risco</b>	15	10	5	10	10	10
<b>Aceitabilidade</b>	Indesejável	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Reduzido	Reduzido

O Quadro 4.10 mostra que apesar de estarmos perante locais de estudo diferentes, praia e estrutura, com características de agitação diferentes (na costa e ao largo), o grau de risco classifica-se como sendo Reduzido, exceto na zona da praia quando foram consideradas características de agitação ao largo (risco Indesejável). Isto deve-se ao facto do valor de probabilidade de ocorrência ser o mais elevado em relação aos outros, ainda que a diferença não seja grande, influencia o grau de risco final.

Atendendo a avaliação dos dois locais de estudo e atendendo ao período temporal analisado no presente trabalho pode-se avaliar que a praia de São João da Caparica apresenta um risco indesejável relativamente ao fenómeno de inundação da praia com base nas características de agitação marítima ao largo obtidas na boia-ondógrafo. Relativamente ao fenómeno galgamento, o risco apresenta-se como sendo reduzido.

## 5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho teve como principal objetivo a avaliação do risco associado à ocorrência de inundação/galgamento na praia de São João da Caparica, Costa da Caparica, Almada. Atendendo às características da praia estudaram-se dois locais: a zona da praia e a zona de praia com uma estrutura aderente de defesa costeira.

Seguiu-se a metodologia desenvolvida e aplicada no âmbito do projeto HIDRALERTA a qual consiste na determinação das características da agitação marítima em frente à praia, ao cálculo do *run-up* e do galgamento na zona da praia e em frente à estrutura aderente, e à avaliação do risco associado à ocorrência de eventos de inundação/galgamento com valores superiores aos limites pré-estabelecidos. Para a avaliação do risco, considerou-se o produto do grau de probabilidade de ocorrência desses eventos pelo grau de consequências dessa ocorrência.

Assim, inicialmente foram caracterizados os regimes de agitação marítima partindo de previsões da agitação marítima fornecida pelo modelo WAVEWATCH III, e transferiram-se as mesmas para junto à costa. Para essa transferência foi utilizado o modelo espectral SWAN, tendo sido validado com os dados medidos *in situ* por uma boia-ondógrafo posicionada a oeste do Bugio. O período de dados escolhido foi de 2007 a 2012. No presente trabalho, o nível de maré foi considerado variável; contudo, não foram considerados os campos de ventos, por falta de informação.

Comparando os valores resultantes do modelo SWAN no ponto P11 (com a sua localização onde se encontra o equipamento boia-ondógrafo, a oeste do Bugio) com os valores oriundos da boia-ondógrafo, verifica-se uma boa concordância em termos de andamento e magnitude entre resultados numéricos e medidos. A altura significativa está perfeitamente representada, contudo os valores referentes ao período e direção da agitação exibem algumas diferenças face aos medidos, o que será um assunto merecedor de um estudo mais aprofundado para melhoramento nestas características (através de um melhor ajuste dos parâmetros do modelo numérico).

Obtidas as características junto à costa com os modelos referidos anteriormente procedeu-se ao cálculo do *run-up* na praia por aplicação de fórmulas empíricas, com base nas características da agitação marítima ao largo, obtidas na boia-ondógrafo e obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11 e com base nas características de agitação junto à costa obtidas pelo modelo SWAN no ponto P2 (localizado na batimétrica -9 m (Z.H.), junto à costa). O nível máximo de inundação na praia é obtido com o valor de *run-up* máximo somado ao nível de maré obtida pelo marógrafo de Cascais. Apesar de terem sido utilizadas diferentes

metodologias desenvolvidas para praias diferentes e por diversos autores, pode-se concluir que as diferenças nos valores de nível máximo de inundação não foram relevantes comparando as condições ao largo com características de agitação marítimas obtidas de formas diferentes. Comparando os resultados do nível máximo de inundação com condições ao largo com os resultados obtidos com condições junto à costa as diferenças também se revelaram pouco significantes, apesar de serem superiores. Desta forma, pode-se concluir que neste caso de estudo, a utilização de condições ao largo ou junto à costa da agitação marítima não tem grande influência nos resultados.

Na zona da estrutura de defesa costeira, foi calculado o *run-up* e o galgamento com base nas condições ao largo, com características de agitação marítima obtidas na boia-ondógrafo e pelo modelo SWAN no ponto P11. Os resultados obtidos indicam que apesar da ocorrência de alguns valores bastante elevados de caudal médio galgado, a frequência de galgamentos é baixa, quer quando se consideram as características de agitação obtidas na boia-ondógrafo, quer quando se consideram as características de agitação obtidas pelo modelo SWAN no ponto P11. Note-se que o principal interesse de utilizar a agitação marítima com base no modelo SWAN no ponto P11 no presente trabalho é a comparação com os resultados obtidos utilizando a agitação real medida na boia-ondógrafo. Mas no futuro, o objetivo é utilizar alternativamente a modelação numérica quando a boia-ondógrafo não está a funcionar ou para utilização sistemática de previsões.

Com base nos valores admitidos como limites para o nível máximo de inundação e de caudal médio de galgamento e com base nas consequências associadas à ultrapassagem desses valores limites obteve-se o grau de risco.

Na zona de praia com base na caracterização da agitação marítima ao largo utilizada obteve-se um grau de risco 3, ou seja, risco indesejável. Este facto permite aferir que devem ser realizadas investigações detalhadas e monitorização e realizarem-se análises de custo-benefício. Para as restantes condições em que foi avaliado o risco, obteve-se um grau 2, ou seja, risco reduzido, o que leva a crer ser tolerável caso se selecionem um conjunto de medidas para o seu controlo.

Como desenvolvimentos futuros, sugere-se ao nível da caracterização da agitação incidente a implementação do campo de ventos. Relativamente à avaliação de risco, sugere-se uma abordagem mais detalhada na descrição das consequências, ou seja, para o local que foi objeto de estudo deve realizar-se um estudo intensivo de forma a se obter informação mais pormenorizada. Por fim sugere-se a produção de mapas de inundação.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afonso, L. C. (2011). *Estudo numérico do galgamento de estruturas de protecção costeira*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Almeida, B. A. (Maio de 2010). Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra. Obtido de [http://www.uc.pt/fluc/nicif/riscos/Documentacao/Congressos/Apresentacoes\\_IICI\\_VI\\_ENR/Antonio\\_Betamio\\_de\\_Almeida\\_RISCO\\_E\\_GESTAO\\_DO\\_RISCO](http://www.uc.pt/fluc/nicif/riscos/Documentacao/Congressos/Apresentacoes_IICI_VI_ENR/Antonio_Betamio_de_Almeida_RISCO_E_GESTAO_DO_RISCO)
- Ângelo, J. (2012). *Aplicação do SWAN na Caracterização da agitação na zona adjacente ao estuário de Diogo Lopes, Brasil*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- ANPC. (2010). *Riscos Costeiros - Estratégias de prevenção, mitigação e protecção, no âmbito do planeamento de emergência e do ordenamento do território*. Cadernos Técnicos PROCIV, Autoridade Nacional de Protecção Civil.
- Battjes, J. A. (1971). Run-up Distributions of waves breaking on slopes. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*.
- Battjes, J. A., & Groenendijk, H. W. (2000). Wave height distributions on shallow foreshores.
- Booji, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104, 7649-7666.
- Coeveld, E. M., Van Gent, M. R., & Pozueta, B. (2005). Neural Network, Manual NN\_OVERTOPPING2. 38. Delft, Netherlands.
- Faria, C. (2009). *Previsão da Agitação na Costa Noroeste Portuguesa - Implementação do SWAN*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- Fernandez, J. R. (2011). *Internship Report*. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Fortes, C. J., Reis, M. T., & Neves, P. (2013a)). *Calcula\_Runup\_NovasEquações\_condiçõeslargos\_1.f. Programa de cálculo do run-up e do nível máximo de inundação utilizando várias formulações empíricas, utilizando a linguagem Fortran*. Relatório LNEC.
- Fortes, C. J., Reis, M. T., & Neves, P. (2013b)). *Calcula\_Runup\_Holman\_condicoescosta.f. Programa de cálculo do runup e do nível máximo de inundação utilizando várias formulações empíricas, utilizando a linguagem Fortran*. Relatório LNEC.
- Fortes, C. J., Reis, M. T., & Neves, P. (2013c)). *Calcula\_Runup\_galgamento\_Mase.f. Programa de cálculo do runup e do nível máximo de inundação utilizando várias formulações empíricas, utilizando a linguagem Fortran*. Relatório LNEC.

- Guza, R. T., & Thornton, E. B. (1982). Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 87 (C1), 483-491.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., et al. (1973). *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsche Hydrographische Zeitschrift.
- Holman, R. A. (1986). Extreme Value Statistics for wave Run-up on a natural beach. In *Coastal Engineering* (pp. 527-544).
- Holman, R. A., & Sallenger, J. A. (1985). Setup and Swash on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research*.
- Hunt, I. A. (1959). Design of seawalls and breakwaters. *Journal of Waterways and Harbours Division*, 85, 123-152.
- IGEO. (2013). Obtido em 2013, de Instituto Geográfico Português: <http://www.igeo.pt/produtos/Geodesia/maregrafos.htm>
- INAG. (s.d.). *Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira - Instituto Nacional da água*. Obtido de [http://engizc.inag.pt/doc/ENGIZC/3\\_zonacosteira.pdf](http://engizc.inag.pt/doc/ENGIZC/3_zonacosteira.pdf)
- Instituto Hidrográfico. (s.d.). Obtido em 2013, de <http://www.hidrografico.pt/previsao-mares.php>
- Komen, G. J., Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1984). On the Existence of a Fully Developed Wind - Sea Spectrum.
- Mase, H. (1989). Random wave runup height on gentle slope . *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*.
- Mase, H., Hedges, T. S., Shareef, M., & Nagahashi, S. (2003). Wave overtopping formula for gentle slopes incorporating wave run-up. *Proc.Coastal Engineering*.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S., & Reis, M. T. (2013). Wave Runup and overtopping at seawalls built on land an in very shallow water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*.
- National Weather Service Environmental Modeling Center. (s.d.). Obtido em 2013, de NWS/NOAA: <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>
- Neves, D. R., Reis, M. T., Fortes, C. J., & Santos, J. A. (2011). Avaliação do risco de galgamento no posto 2 do molhe oeste do porto de Sines. *11º Congresso da água; APRH - Associação Portuguesa de Recursos Hídricos*. Porto.
- Neves, D. R., Santos, J. A., Fortes, C. J., Reis, M. T., Rodrigues, S., Simões, A., et al. (2010). Avaliação do risco para a navegação em dois portos portugueses. (*SEMENGO - 2010*). Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Neves, D. R., Santos, J. A., Reis, M. T., Fortes, C. J., Simões, A., Azevedo, E. B., et al. (2012). Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal. *Revista da Gestão Costeira Integrada*.
- Nielsen, P., & Hanslow, D. J. (1991). Wave Runup Distributions on Natural Beaches. *Journal of Coastal Research*, 7.

- Poseiro, P. (2013). *Manual do HIDRALERTA*. LNEC, Departamento de Hidraulica e Ambiente - Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas.
- Pullen, T., Allsop, N. W., Bruce, T., Kortenhuis, A., Schüttrumpf, H., & van der Meer, J. (2007). *EurOtop. wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*.
- Raposeiro, P. D., & Ferreira, J. C. (2011). Evaluation of Coastal Flood Risk Areas and Adaption Strategies for a Sustainable Planning. *Journal of Coastal Research*.
- Raposeiro, P. D., Fortes, C. J., Capitão, R., Reis, M. T., Ferreira, J. C., Pereira, M. T., et al. (2013). Preliminary phases of the Hidralerta System: Assessment of the flood levels at S. João da Caparica beach, Portugal. *Journal of Coastal Research*.
- Raposeiro, P. D., Reis, M. T., Fortes, C. J., & Ferreira, J. C. (2010). Análise de Cotas de Inundação na Praia de Vale do Lobo. *10º Congresso da Água, APRH*.
- Raubenheimer, B., & Guza, R. T. (1996). Observations and predictions of run-up. *Journal of Geophysical Research*, 101.
- Reis, R., Gabriel, S., Fortes, C. J., & Moura, D. (2013). *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima: Praia da Galé*. LNEC, Lisboa.
- Rocha, T. (2012). *Avaliação do Galgamento de Estruturas Portuárias: Aplicação ao Porto da Praia da Vitória, Açores*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J., & Beach, R. A. (2001). Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17, 407-419.
- Sancho, F., Oliveira, F. S., & Freire, P. (2011). Níveis Máximos do espraiamento no Litoral da Ria Formosa. *7º Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*.
- Santos, J. A., Rodrigues, S., Pinheiro, L., Fortes, C. J., Simões, A., & Azevedo, E. B. (2010). Influência do vento local na transferência da agitação marítima para o porto de Praia da Vitória. *10º Congresso da Água - Marcas d'Água*. Algarve.
- Saville, J. T. (1958). Run-up on composite slopes. *Proc. 6th Int. Conf. Coastal Eng.* (pp. 691-699). Gainesville, Florida: Asce.
- Silva, D. (2012). *Avaliação do Galgamento de Estruturas Portuárias*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil.
- Silva, D., Fortes, C. J., Reis, M. T., Carmo, J. S., Simões, A., & Rodrigues, C. (2012). Avaliação do Galgamento de Estruturas Portuárias: Porto de Ponta Delgada. *Recursos Hídricos*, 33.
- Silva, S. A. (2012). *Gestão de Praias da Costa de Caparica, A capacidade de carga, o valor da onda, a segurança e informação*. Dissertação de Mestrado.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger Jr., A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*.

- SWAN-Team-(2010a). (s.d.). SWAN: Scientific and Technical Documentation. (*SWAN Cycle III version 40.85*). Faculty of Civil Engineering and Geosciences of Delft University of Technology, Netherlands.
- SWAN-Team-(2010b). (s.d.). "SWAN: User Manual"– SWAN Cycle III version 40.85. (*SWAN Cycle III version 40.85*). Faculty of Civil Engineering and Geosciences of Delft University of Technology, Netherlands.
- Teixeira, S. B. (2009). *Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve*. Administração da Região Hidrográfica do Algarve, Faro.
- Tolman, H. (2002). User Manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22.
- Tolman, H. L. (1997). *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note.
- Tolman, H. L. (1999a). *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note.
- Tolman, H. L. (1999b). *WAVEWATCH-III version 1.18: Generating GRIB files*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note.
- Tolman, H. L. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note.
- Westhuysen, A. J., Zijlema, M., & Battjes, J. A. (2007). Nonlinear saturation - based whitecapping dissipation in SWAN for deep and shallow water.

## ANEXO A - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DO MODELO SWAN

Nas seguintes figuras estão representadas as distribuições de alturas significativas, períodos de pico, períodos médios e direções nos pontos P6 e P10, obtidas no modelo SWAN com comparação com os dados ao largo.

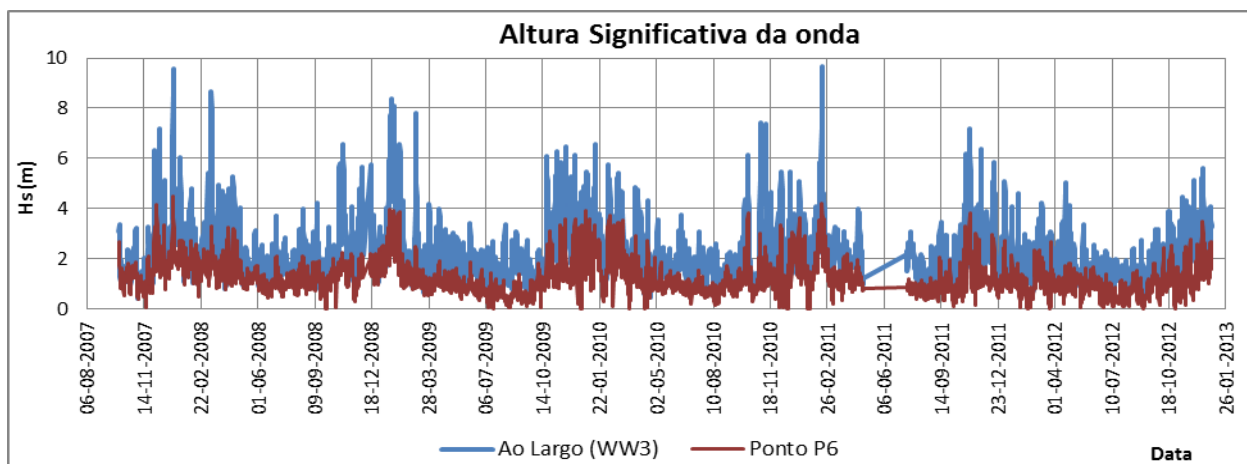


Figura A.1- Comparação da altura significativa obtida pelo modelo SWAN (Ponto P6) e dados ao largo (modelo WW3).

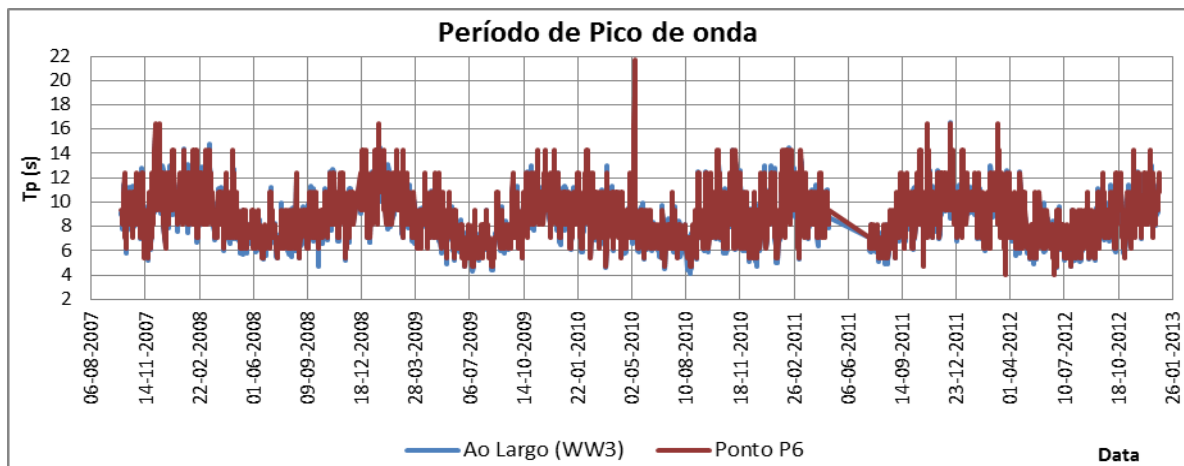


Figura A.2- Comparação do período de pico  $T_p$  obtido pelo modelo SWAN (Ponto P6) e dados ao largo (modelo WW3).

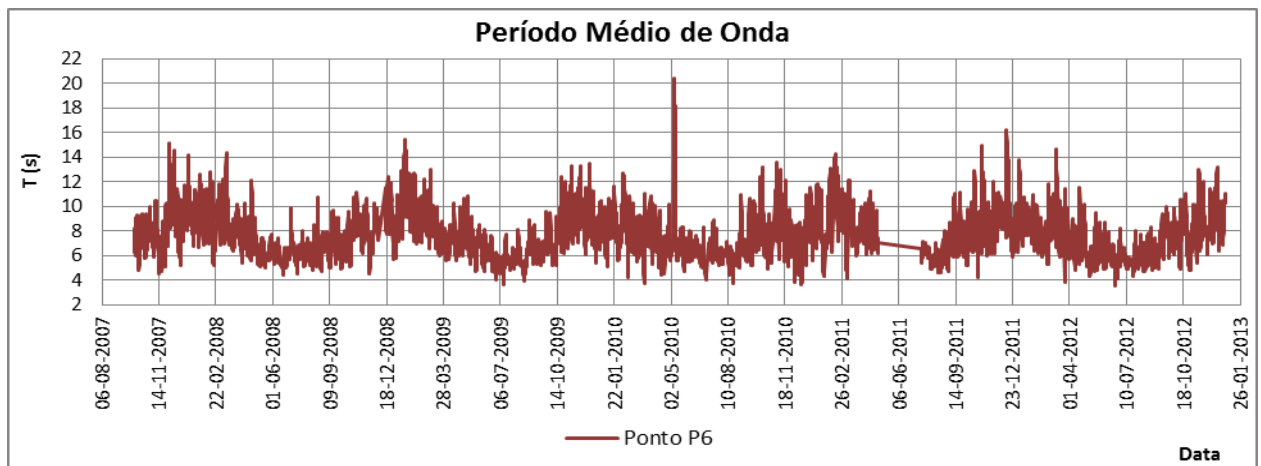


Figura A.3- Variação do período médio no ponto P6.

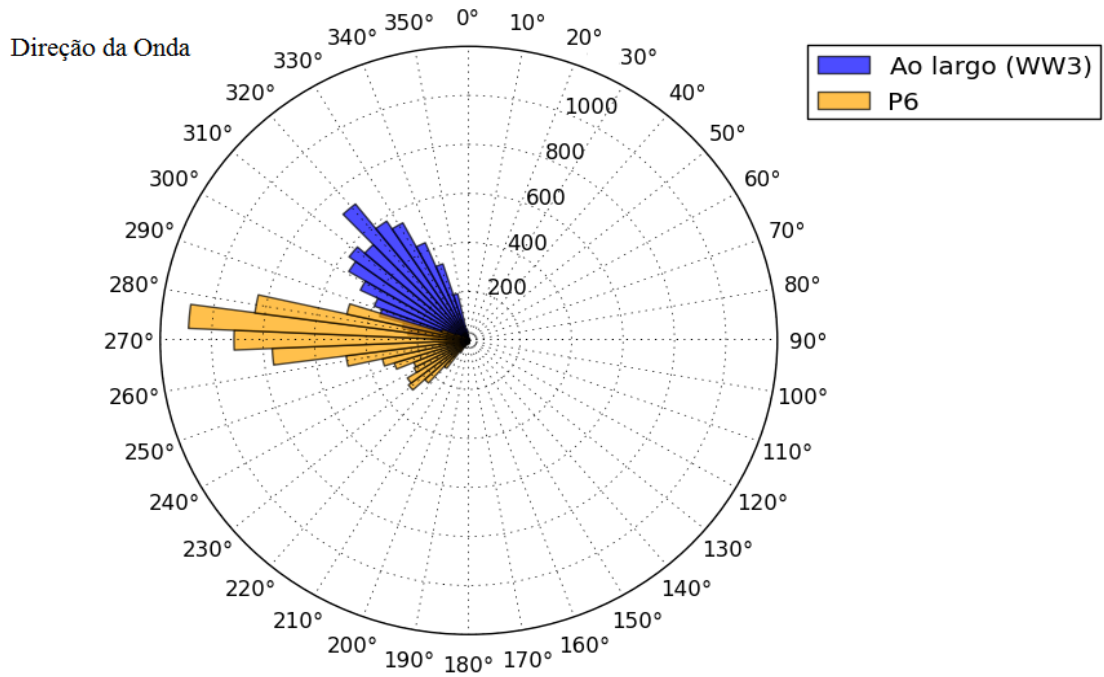


Figura A.4- Comparação entre as direcções obtidas no modelo SWAN (Ponto P6) e dados ao largo (modelo WW3).

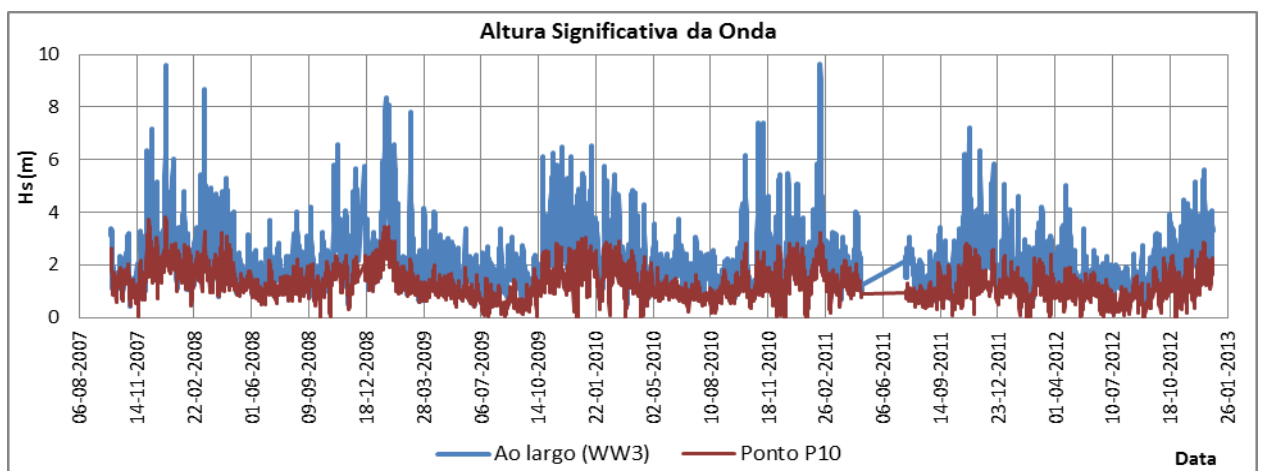


Figura A.5- Comparação da altura significativa obtida pelo modelo SWAN (Ponto P10) e dados ao largo (modelo WW3).

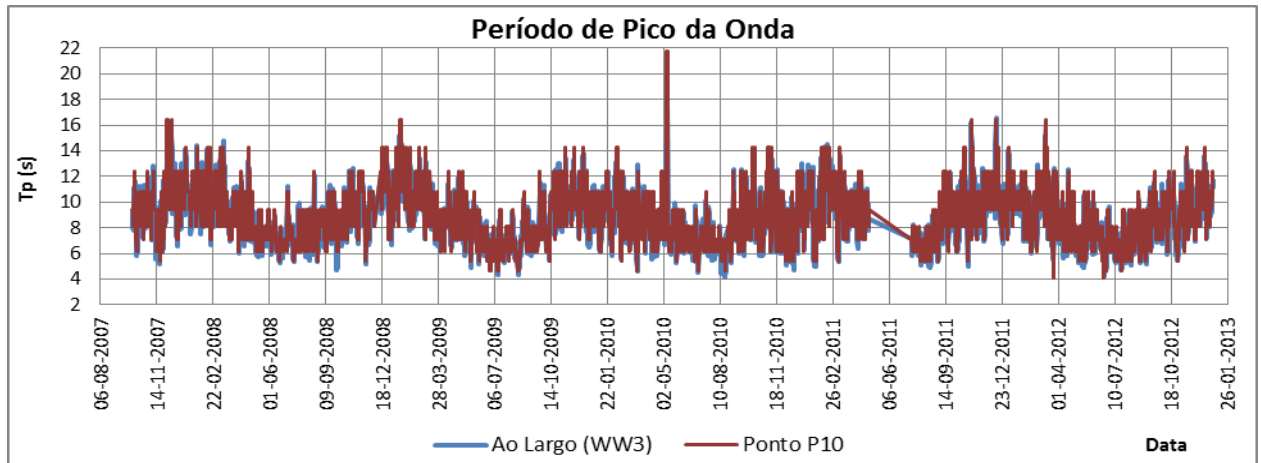


Figura A.6- Comparação do período de pico  $T_p$  obtido pelo modelo SWAN (Ponto P10) e dados ao largo (modelo WW3).

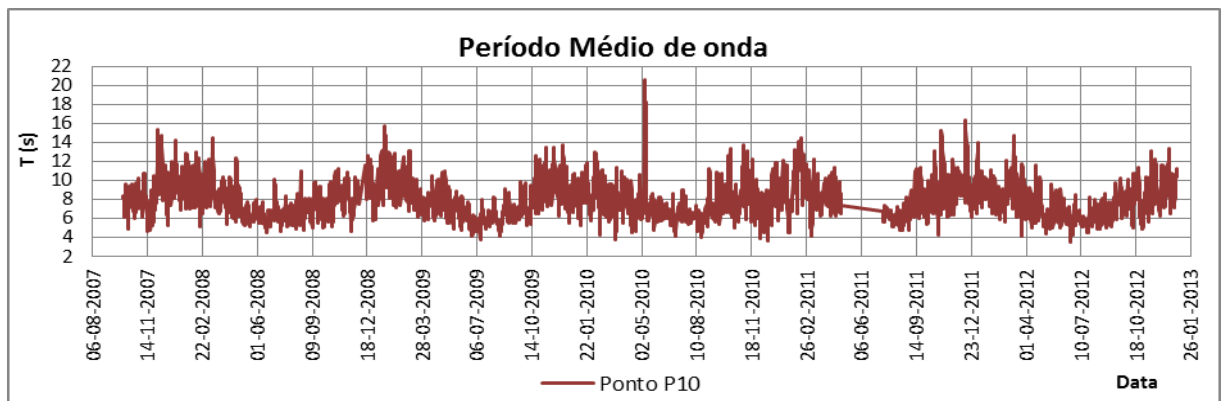


Figura A.7- Variação do período médio no ponto P10



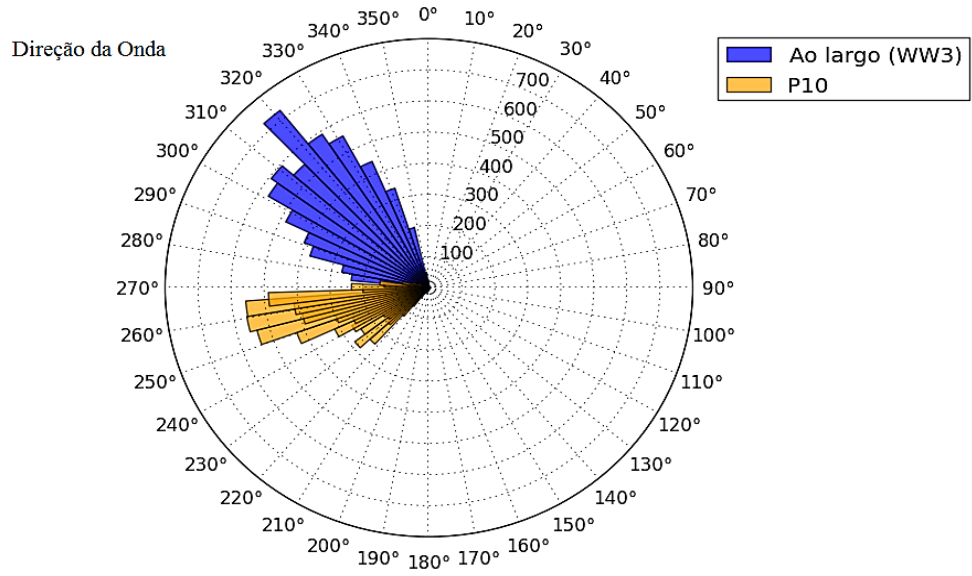


Figura A.8- Comparação entre as direções obtidas no modelo SWAN (Ponto P10) e dados ao largo (modelo WW3).

## ANEXO B - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DO CÁLCULO DE RUN-UP

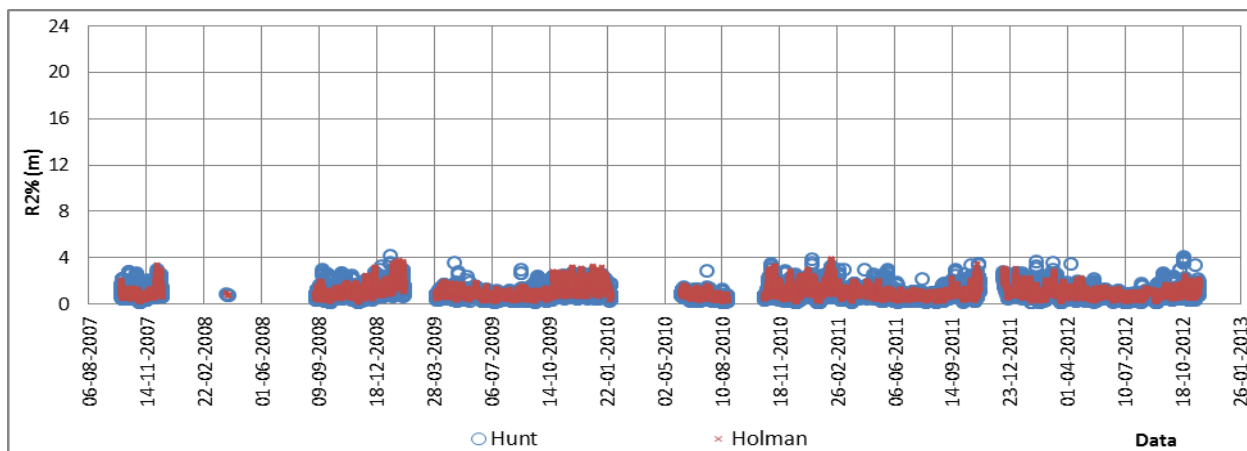


Figura B.1- Representação do  $R_{2\%}$  utilizando as metodologias de Hunt (1959) e Holman (1986) para o cálculo do *run-up* com condições ao largo.

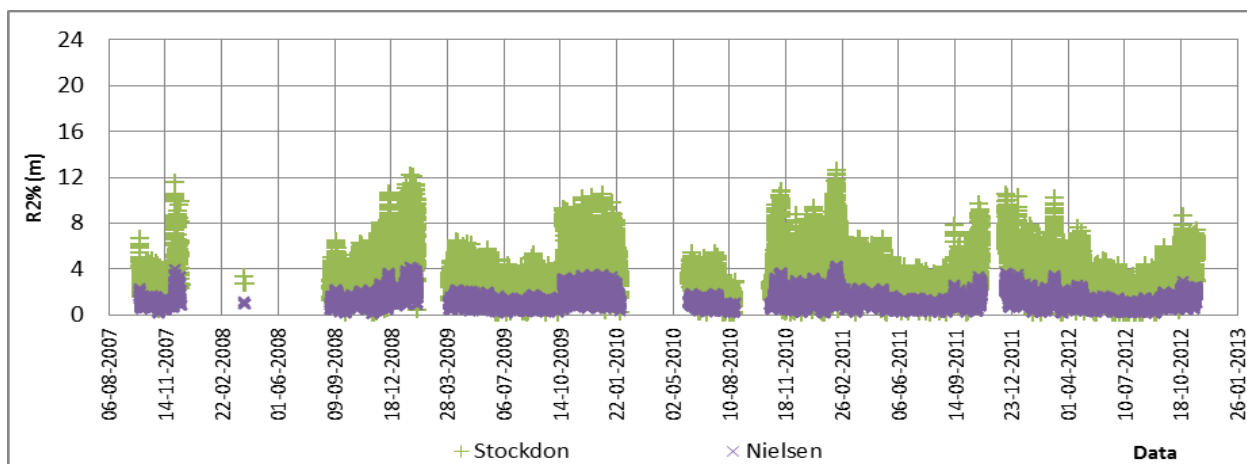


Figura B.2- Representação do  $R_{2\%}$  utilizando as metodologias de Stockdon *et al.* (2006) e Nielsen *et al.* (1991) para o cálculo do *run-up* com condições ao largo.

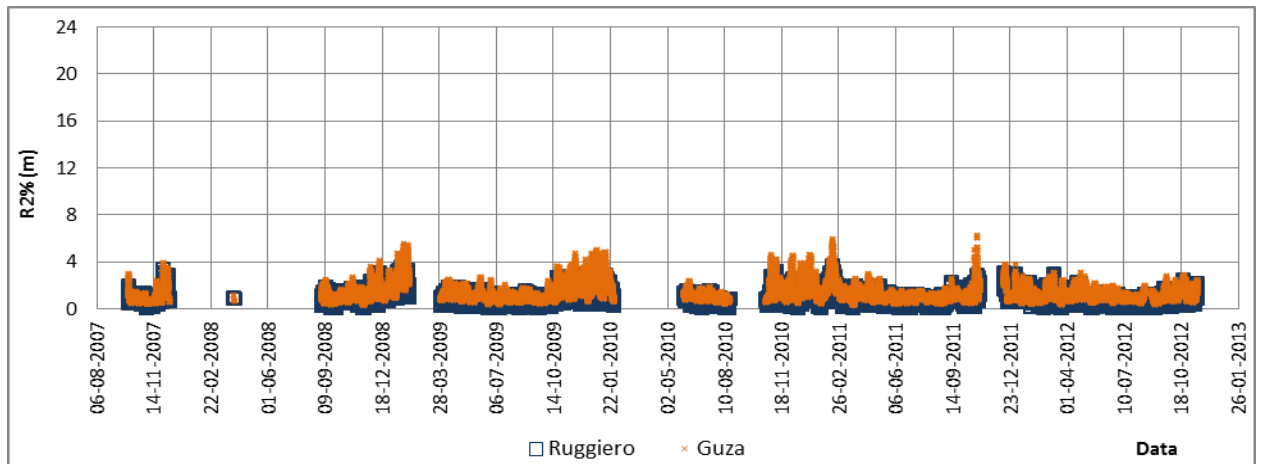


Figura B.3- Representação do  $R_{2\%}$  utilizando as metodologias de Ruggiero *et al.* (2001) e Guza *et al.* (1982) para o cálculo do *run-up* com condições ao largo.

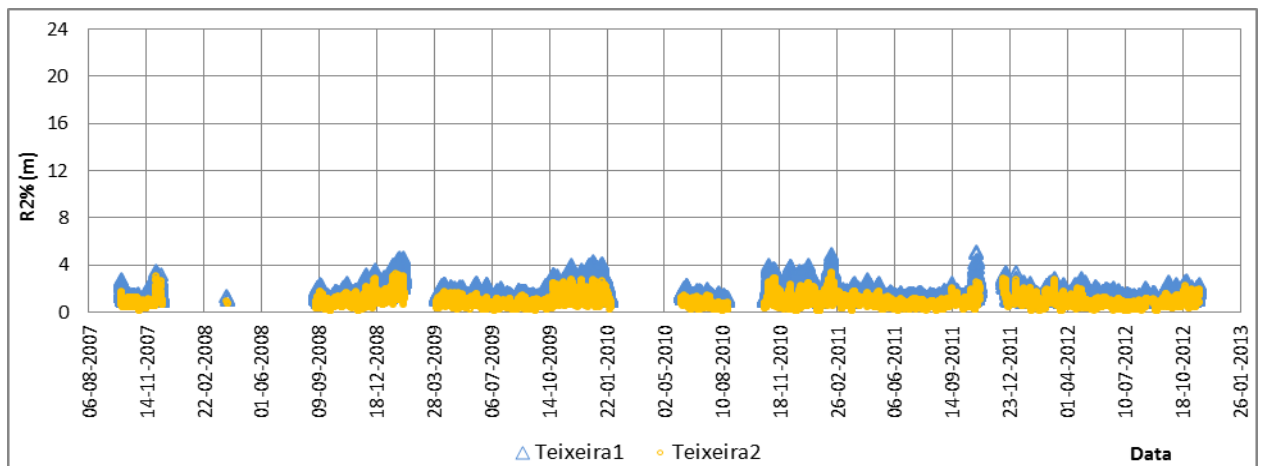


Figura B.4- Representação do  $R_{2\%}$  utilizando as metodologias de Teixeira (2009) com condições ao largo.

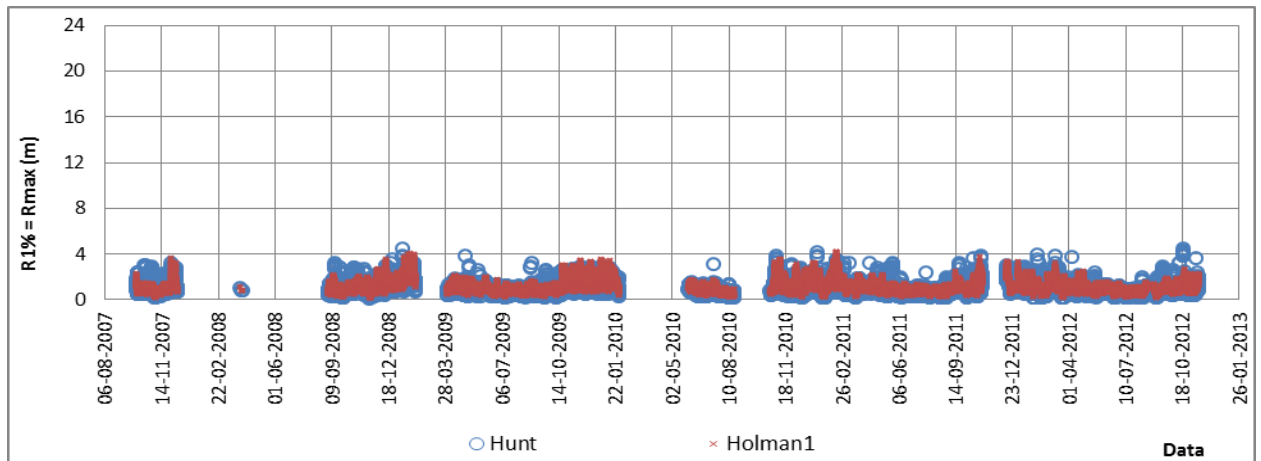


Figura B.5- Representação do  $R_{1\%} = R_{\max}$ , utilizando as metodologias de Hunt (1959) e Holman (1986) para o cálculo do *run-up* com condições ao largo.

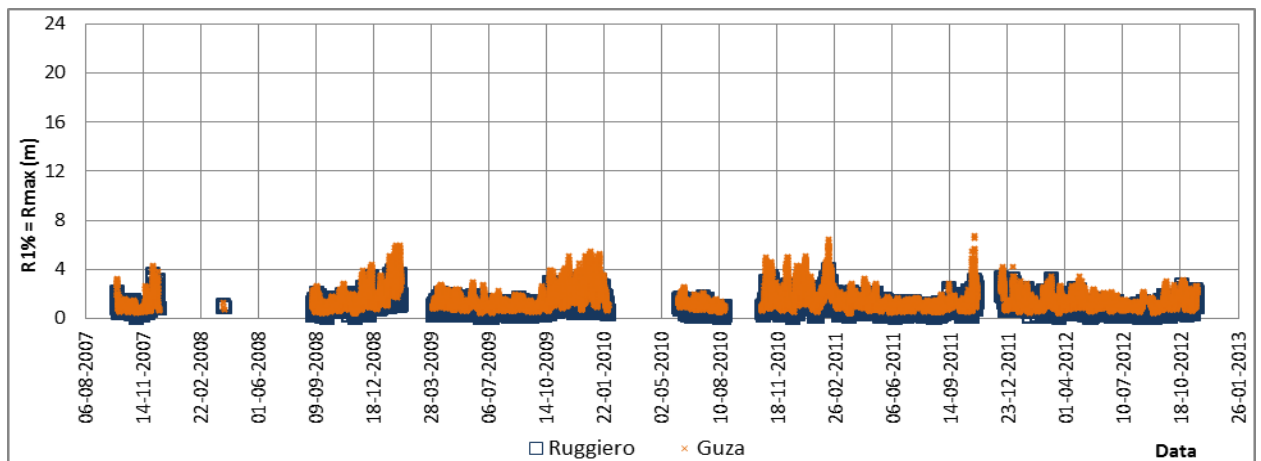


Figura B.6- Representação do  $R_{1\%} = R_{\max}$ , utilizando as metodologias de Ruggiero *et al.* (2001) e Guza *et al.* (1982) para o cálculo do *run-up* com condições ao largo.

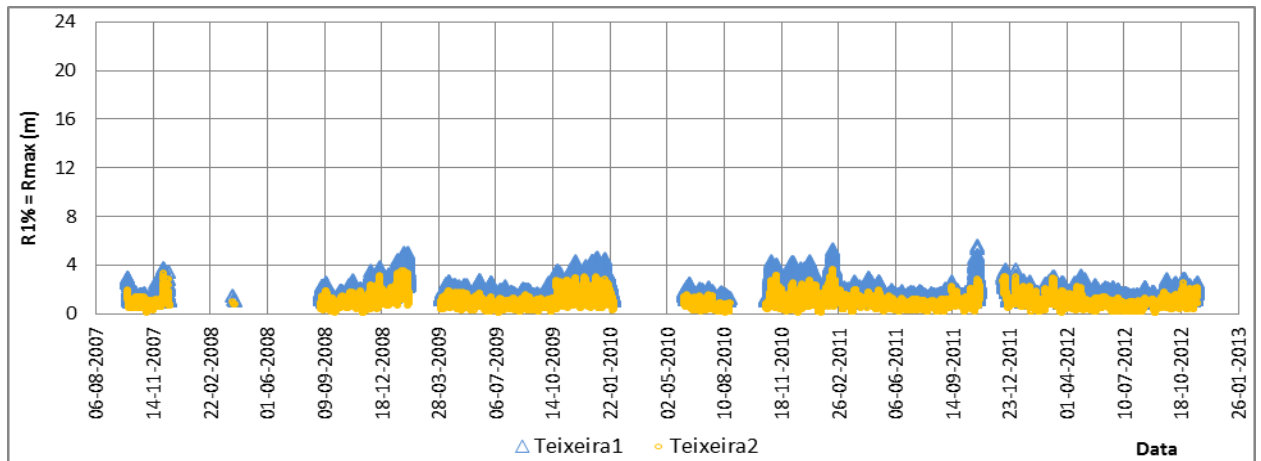


Figura B.7- Representação do  $R_{1\%}=R_{m\acute{a}x}$ . utilizando as metodologias de Teixeira (2009) com condições ao largo.

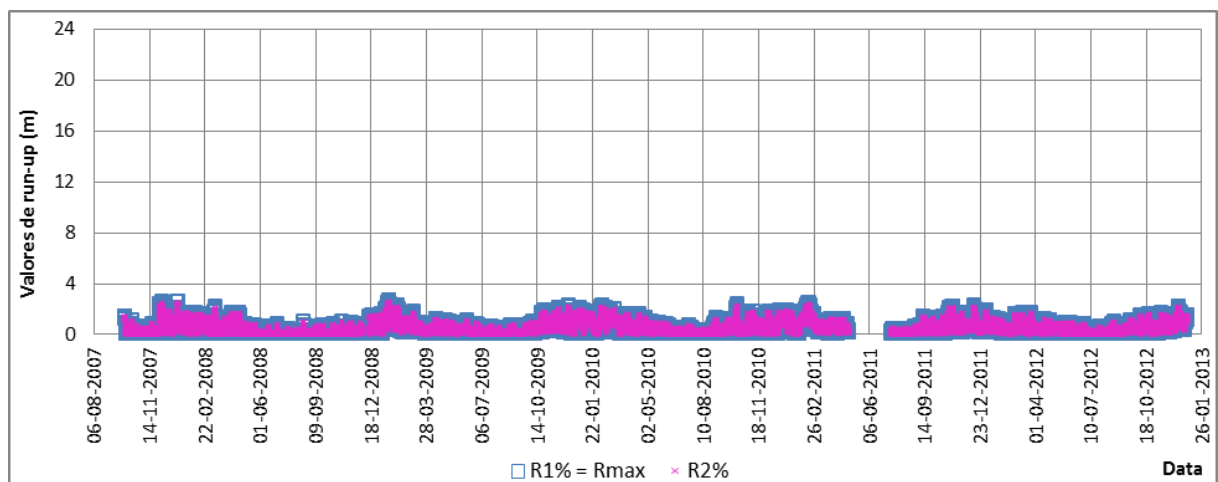


Figura B.8- Representação do  $R_{1\%}=R_{m\acute{a}x}$ . e do  $R_{2\%}$  utilizando a metodologia de Holman

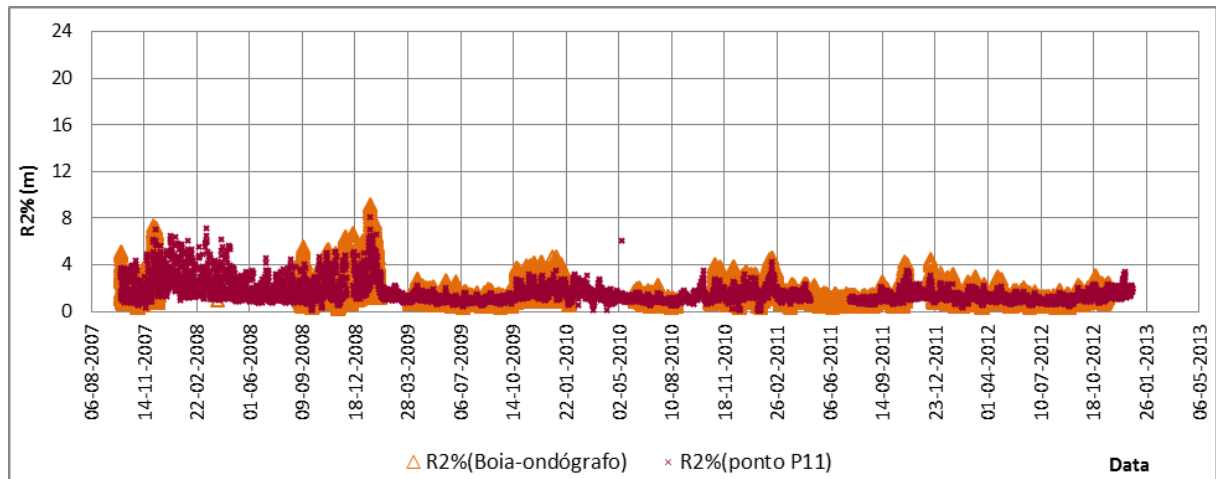


Figura B.9- Representação do  $R_{2\%}$  utilizando a metodologia de Mase et al. (2013) com condições ao largo.