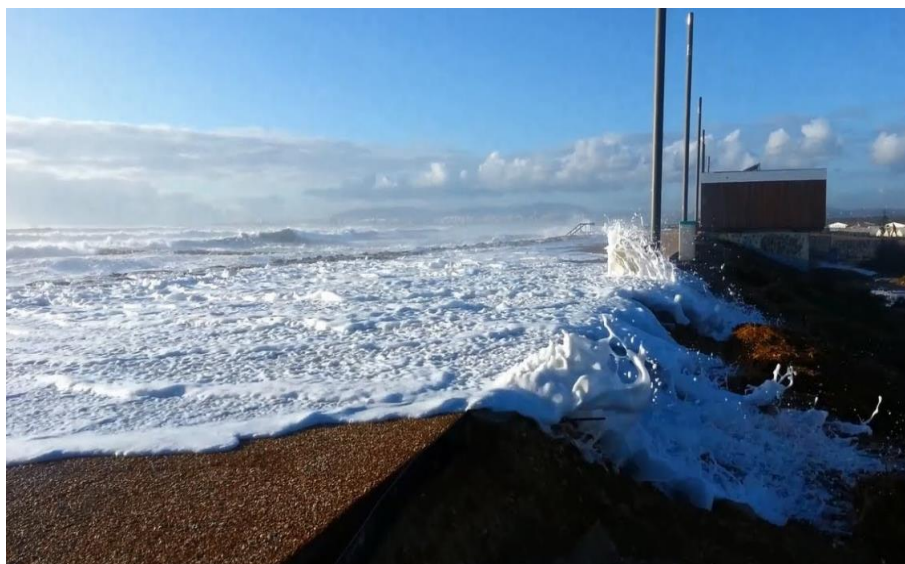




**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**



## **Avaliação do Espraçamento e Inundação nas praias da Costa da Caparica. Modelação com o modelo XBEACH**

**ARTUR JOSÉ PERNIAL HELENO**  
(Licenciado em Engenharia Civil)

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

Orientadores:

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

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Teixeira Cardoso Gamboa

Vogais:

Doutora Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira  
Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

**Janeiro 2017**





**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Civil**

**Avaliação do Espraçamento e Inundação nas praias da  
Costa da Caparica. Modelação com o modelo  
XBEACH**

**ARTUR JOSÉ PERNIAL HELENO**  
(Licenciado em Engenharia Civil)

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

Orientadores:

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

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Teixeira Cardoso Gamboa

Vogais:

Doutora Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira  
Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

**Janeiro 2017**



# Agradecimentos

Agradeço ao Engenheiro João Alfredo dos Santos e à Engenheira Juana Fortes, orientadores da minha dissertação, pela disponibilidade, apoio prestado, preocupação, paciência, incentivo e partilha de conhecimentos e informações, fundamentais para a sua realização.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, que me permitiu aceder às suas instalações e equipamentos, bem como aos colegas que lá trabalham, principalmente ao Engenheiro Pedro Poseiro, que sempre se mostrou prestável e me facultou os dados necessários para a realização deste trabalho.

Ao projeto HIDRALERTA, por me ter proporcionado este trabalho, e à Engenheira Marta Martinho e ao professor José Carlos, da Universidade Nova de Lisboa, por terem realizado o trabalho que serviu de base ao presente trabalho.

À minha mãe, pai, irmã agradeço pelo constante apoio incondicional, incentivo e força, imprescindíveis para a minha formação académica e pessoal.

A todos os meus amigos por todo o apoio e companheirismo prestado, quer a nível académico quer a nível pessoal, sem eles esta etapa tornava-se mais difícil de alcançar.

Um obrigado muito especial à minha Tia Clara e aos meus primos Miguel e Carlitos, pela excelente estadia que me ofereceram durante os últimos anos, sem eles esta formação não era possível de se concretizar.



# Resumo

Este trabalho, enquadrado no projeto HIDRALERTA, visou avaliar as estimativas, determinadas pelo modelo numérico XBEACH, dos valores de *runup* e do caudal galgado em praias. O XBEACH é um modelo numérico de previsão do efeito de tempestades marítimas na erosão e inundação de zonas costeiras, e foi avaliado através da comparação do desempenho do mesmo relativamente a fórmulas empíricas.

Para aplicação do modelo XBEACH consideraram-se os valores de condição de agitação marítima derivados do modelo SWAN, entre os anos 2007 e 2012, e os perfis transversais das praias, determinados através da técnica LIDAR. As praias de estudo são as que constituem a zona costeira da Costa da Caparica, no concelho de Almada.

Para determinar o *runup* na praia sem estrutura de proteção aderente foram utilizadas as fórmulas empíricas propostas por Hunt *et al.* (1959), Holman (1986), Nielsen e Hanslow (1991), Ruggiero *et al.* (2001), Stockdon *et al.* (2006), Guza e Thornton (1982) e Teixeira (2009). Para determinar o caudal galgado nas praias com estrutura de proteção foi aplicado as fórmulas empíricas propostas por Mase *et al.* (2013).

De modo a obter uma avaliação mais rigorosa, foram feitas duas simulações. Numa simulação foi considerada a tempestade 1, selecionada recorrendo a três critérios de seleção. Enquanto que na outra simulação, foi considerada a tempestade 2, selecionada por provocar valores máximos de inundação e galgamento, na aplicação dos modelos empíricos.

Na comparação dos resultados numéricos obtidos observou-se uma boa concordância na variação dos valores, quer do *runup* quer do caudal galgado, determinados pelas diferentes metodologias, registando valores máximos nos mesmos dias. Uma vez que os mesmos variam com o nível do mar, os valores máximos correspondem aos períodos de preia mar e os mínimos aos períodos de baixa mar.

**Palavras chave:** XBEACH, HIDRALERTA, *runup*, galgamento, modelo determinístico, modelo empírico, Costa da Caparica



# Abstract

This study, carried out within the scope of the HIDRALERTA project, aimed to assess the runup and overtopping estimates produced for beaches by the XBEACH numerical model. XBEACH is a numerical model to predict the effects of storms in the erosion and flooding of coastal areas. The performance of the XBEACH model was evaluated by comparing its results to the empirical formulae results.

The XBEACH model was applied for sea-wave conditions obtained with the SWAN spectral model for the period between 2007 and 2012 and for beaches' cross-sections surveyed with the LIDAR technique. The studied beaches are located in the coastal area of Costa da Caparica, in the Almada municipality.

To evaluate runup in beaches with no seawall, the empirical formulae proposed by Hunt et al. (1959), Holman (1986), Nielsen e Hanslow (1991), Ruggiero et al (2001), Stockdon et al. (2006), Guza and Thornton (1982) and Teixeira (2009) were employed. To determine overtopping in beaches with seawall, the empirical formulas proposed by Mase et al. (2013) were employed.

To get a more rigorous evaluation, two sets of two simulations were carried out. In one of them the so-called storm 1, a storm selected using three selection criteria, was considered. In the other simulation, storm 2, which was selected to cause maximum flooding and overtopping, was applied with the empirical models.

XBEACH estimates for both the runup and for the overtopped discharge values show a clear agreement with the empirical models results. Whatever the employed methodology, the maxima values occur at the same days and the results evolution is the same: the large values at high tide and the small values at low tide.

**Key-Words:** XBEACH, HIDRALERTA, runup, runup/overtopping, deterministic models, empirical models, Costa da Caparica



# Letras Latinas

$A$	Direção espectral da ação da onda
$A_s, S_k$	Velocidades orbitais
$Area$	Área transversal segundo a metodologia de Mase <i>et al.</i> (2013)
$c_g$	Velocidade de propagação de onda no espaço
$C_r$	Coefficiente de redução do galgamento propositado pela presença de uma berma de coroamento permeável
$c_\theta$	Velocidades de propagação de onda no espectro
$D_f$	Representação da dissipação de energia das ondas proporcionada pelo atrito do fundo
$D_v$	Representação da dissipação de energia das ondas proporcionada pela vegetação
$D_w$	Representação da dissipação de energia das ondas proporcionada pela rebentação das ondas
$Dir$	Direção de onda
$ds$	Profundidade da água no pé da estrutura
$E_w$	Energia de onda
$f_{cats}$	Fator do período de onda
$f_{Sk}, f_{As}$	Fatores de calibração da velocidade de sedimentação
$g$	Aceleração da gravidade
$G_c$	Largura da berma de coroamento permeável
$H$	Altura de onda
$h$	Altura da coluna de água
$h_b$	Altura da coluna de água no ponto da rebentação da onda
$H_{m0}$	Altura significativa espectral de onda
$H_{rms}$	Altura de onda média quadrática
$H_{s0}$	Altura de onda significativa ao largo
$H_s$	Altura de onda significativa
$H_{rms0}$	Altura de onda média quadrática ao largo
$H_0$	Altura de onda ao largo
$k$	Varição média da turbulência à superfície da água
$k_b$	Varição da turbulência no fundo
$L$	Comprimento de onda
$L_{RU}$	Parâmetro utilizado no cálculo do <i>runup</i> segundo Nielsen e Hanslow (1991)

$L_0$	Comprimento de onda ao largo
$Q$	Caudal galgado
$Q_b$	Fração de ondas rebentadas
$R$	<i>Runup</i>
$R_{m\acute{a}x.}$	<i>Runup</i> máximo
$R_{m\acute{a}x.37\%,100}$	<i>Runup</i> máximo não excedido por 37% dos casos em ensaios com 100 ondas
$R_{m\acute{a}x.99\%,100}$	<i>Runup</i> máximo não excedido por 99% dos casos em ensaios com 100 ondas
$R_{m\acute{e}dio}$	<i>Runup</i> médio
$R_s$	<i>Runup</i> significativo
$R_{1/10}$	Média do décimo mais alto dos <i>runup</i> 's
$R_{1/3}$	Média do terço mais alto dos <i>runup</i> 's
$R_{1\%}$	<i>Runup</i> com probabilidade de não excedência de 1%
$R_{2\%}$	<i>Runup</i> com probabilidade de não excedência de 2%
$R_c$	Desnível entre a cota de coroamento da estrutura e o nível médio da água
$S_{m\acute{a}x.}$	Nível do mar (somatório da maré astronómica com a sobrelevação)
$T$	Período médio
$T_p$	Período de pico no espectro
$T_{rep}$	Período de onda
$T_0$	Média do terço superior do período da onda ao largo
$u$	Velocidade da água, na componente horizontal
$u_a$	Velocidade de sedimentação
$u_{rms}$	Velocidade média quadrática
$u^E$	Velocidade Euleriana, na direção x
$v$	Velocidade de sedimentação provocada pela agitação da água
$v^E$	Velocidade Euleriana, na direção y
$v^{n-1}$	Velocidade de sedimentação provocada pela agitação da água no passo anterior
$Z$	Distância vertical entre o ponto mais elevado atingido pelo espraio da onda e o nível médio do mar nesse momento
$Z_{m\acute{a}x.}$	Cotas máximas das dunas ou dos paredões
$Z_d$	Diferença entre a cota da superfície da água e a do coroamento
$z_s$	Altura da água

# Letras Gregas

$\alpha$	Inclinação da estrutura de defesa
$cot\alpha$	Declive da estrutura
$\beta$	Ângulo de incidência da onda
$\tan\beta$	Declive da face da praia
$\xi$	Número de Iribarren
$\xi_0$	Número de Iribarren, determinado com condições ao largo
$\xi_s$	Número de Iribarren, determinado com condições junto à costa
$\theta$	Direção da agitação
$\tan\theta$	Declive do fundo
$\sigma$	Frequência relativa



# Abreviaturas

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
AML	Área Metropolitana de Lisboa
CCL	Clube de Campismo de Lisboa
CM	Correio da Manhã
DHI	Danish Hydraulic Institute
DN	Diário de Notícias
DR	Diário da Região
FORTRAN	Formula Translating System
GLM	Generalized Lagrangian Mean
GNR	Guarda Nacional Republicana
IAHR	International Association for Hydro-Environment Engineering and Research
IGEO	Instituto Geográfico Português
IH	Instituto Hidrográfico
INAG	Instituto da Água
INATEL	Instituto Nacional para Aproveitamento dos Tempos Livres
INE	Instituto Nacional de Estatística
IO-BAS	Institute of Oceanography, Bulgarian Academy of Sciences
ICNB	Instituto da Conservação da Natureza e da Biodiversidade
JN	Jornal de Notícias
JONSWAP	Joint North Sea Wave Project
JR	Jornal da Região
LIDAR	Light Detection and Ranging
LMPMAVE	Limite Máximo de Preia-Mar das Águas Vivas Equinociais
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MA	Maré Astronómica
MATLAB	MATrix LABoratory
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NLSW	Nonlinear Shallow Water
NMA	Nível Médio da Água
NMI	Nível Máximo de Inundação
POOC	Plano de Ordenamento da Orla Costeira
RGP	Recenseamento Geral da População
RTP	Rádio e Televisão de Portugal
Sbeach	Numerical model for simulating storm-induced beach change
SL	Sobrelevação meteorológica
SMC	Sistema de Modelado Costero
SWAN	Simulating Waves Nearshore
TVI	Televisão Independente
UNESCO-IHE	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization - Institute for Water Education
USACE	United States Army Corps of Engineers
WWIII	WaveWatch III
XBEACH	Extreme Beach Erosion
ZH	Zero Hidrográfico

# Índice

Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1. Enquadramento do trabalho .....	1
1.2. Objetivo .....	3
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estrutura da dissertação .....	7
Capítulo 2 – Fundamentos teóricos .....	9
2.1. Caracterização da agitação marítima .....	9
2.1.1. Monitorização da agitação marítima .....	9
2.1.2. Previsão da agitação marítima.....	10
2.2. Caracterização do <i>runup</i> e galgamento em praias .....	12
2.2.1. Conceitos básicos .....	12
2.2.2. Fórmulas empíricas .....	16
2.2.3. Modelo XBEACH .....	27
Capítulo 3 – Caso de estudo: Praias da Costa da Caparica .....	47
3.1. Caracterização do local.....	47
3.1.1. Enquadramento geográfico.....	47
3.1.2. Enquadramento climático .....	48
3.1.3. Enquadramento socioeconómico .....	48
3.1.4. Características ecológicas.....	51
3.2. Evolução e dinâmica da costa.....	53
3.3. Descrição das praias em estudo .....	56
Capítulo 4 – Metodologia.....	59
4.1. Caracterização da agitação marítima .....	59
4.1.1. Ao largo .....	59
4.1.2. Junto à costa .....	62
4.2. Condições de aplicação das fórmulas empíricas .....	66
4.3. Condições de aplicação do modelo XBEACH .....	69
4.3.1. Seleção da tempestade 1 .....	72
4.3.2. Seleção da tempestade 2 .....	77
Capítulo 5 – Análise de resultados .....	79
5.1. Fórmulas empíricas.....	79
5.1.1. Análise dos valores estimados de NMI .....	79
5.1.2. Análise dos valores estimados de galgamento .....	84

5.2. Modelo XBEACH .....	87
5.2.1. Análise dos valores estimados de NMI .....	87
5.2.2. Análise dos valores estimados de galgamento .....	89
5.3. Comparações .....	91
5.3.1. Comparação dos valores estimados de NMI .....	91
5.3.2. Comparação dos valores estimados de galgamento .....	93
Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros .....	99
Referências bibliográficas .....	103
Webgrafia .....	109
Anexo I – Fichas de Praia.....	i
Anexo II – Caracterização da agitação marítima.....	xvii
Anexo III – Ficheiros de <i>input</i> e <i>output</i> dos programas FORTRAN e do modelo XBEACH .....	xxiii
Anexo IV – Caudal galgado obtido pelas fórmulas empíricas .....	xxxii
Anexo V – Caudal galgado obtido pelo modelo XBEACH .....	li

# Índice de Figuras

Figura 1.1. Localização dos pontos que caracterizam a agitação marítima (adaptado do Google Earth).....	4
Figura 1.2. Esquema sintetizado da metodologia adotada para o trabalho.....	6
Figura 2.1. Boia ondógrafo [1] .....	10
Figura 2.2. Perfil de praia comum (USACE, 2002) .....	13
Figura 2.3. Representação do <i>runup</i> (R) [5].....	14
Figura 2.4. Fenómeno de galgamento numa estrutura de proteção aderente (Afonso, 2011) .....	15
Figura 2.5. Esquema dos ficheiros de entrada e de saída do programa que determina o Nível Máximo de Inundação através das formulações empíricas propostas pelos diversos autores .....	21
Figura 2.6. Esquema da reformulação do declive imaginário (Mase <i>et al.</i> , 2013).....	23
Figura 2.7. Diagrama que relaciona a altura de rebentação com a declividade da onda ao largo (Mase <i>et al.</i> , 2013).....	23
Figura 2.8. Esquema dos ficheiros de entrada e de saída do programa que determina o caudal médio galgado através das formulações empíricas propostas por Mase <i>et al.</i> (2013).....	25
Figura 2.9. Propagação das ondas utilizando o modo hidrostático (painel superior) e o modo não hidrostático (painel inferior) no XBEACH [6].....	28
Figura 2.10. Exemplo de ganho (à esquerda) e perda (à direita) de escoamento para as águas subterrâneas (Winter, 1998) .....	31
Figura 2.11. Ondas induzidas pelo navio no laboratório do Instituto Nacional de Engenharia Hidráulica da Alemanha [7] .....	32
Figura 2.12. Grelha definição do domínio no XBEACH (den Bieman, 2013) .....	38
Figura 2.13. Grelha definição das direções das ondas no XBEACH (adaptado de Bieman, 2013).....	39
Figura 2.14. Esquemática do funcionamento do XBEACH .....	41
Figura 2.15. Esquema do funcionamento da metodologia aplicada no modelo XBEACH para determinar o caudal galgado .....	43
Figura 3.1. Localização da zona de estudo (adaptado do Google Earth) .....	47
Figura 3.2. Gráfico climático da Costa da Caparica [10] .....	48
Figura 3.3. Localização da PPAFCC (adaptado de ICNB, 2007) .....	51
Figura 3.4. Vegetação que cobre a PPAFCC [12].....	52
Figura 3.5. Evolução da linha de costa e área urbana (Gomes <i>et al.</i> , 2006).....	54
Figura 3.6. Cronograma das ocorrências e intervenções registadas na Costa da Caparica entre 2007 e 2012 (adaptado de Martinho, 2014).....	55
Figura 3.7. Praia de S. João da Caparica (09/09/2016) .....	56

Figura 3.8. Praia Nova (09/09/2016).....	56
Figura 3.9. Zona sem e com estrutura de proteção aderente na praia de S. João da Caparica (adaptado do Google Earth).....	57
Figura 3.10. Constituição das estruturas de proteção (09/09/2016) .....	57
Figura 4.1. Histograma que relaciona a altura de onda significativa ao largo ( $Hs0$ ) e a direção de onda ao largo ( $Dir$ ) .....	61
Figura 4.2. Histograma que relaciona o período de pico ( $Tp$ ) e a direção de onda ( $Dir$ ) .....	61
Figura 4.3. Histograma que relaciona a altura de onda significativa ao largo ( $Hs0$ ) e o período de pico ( $Tp$ ) .....	62
Figura 4.4. Altura de onda significativa no ponto P1 .....	63
Figura 4.5. Altura significativa de onda no ponto P4.....	63
Figura 4.6. Período de pico no ponto P1 .....	64
Figura 4.7. Período de pico no ponto P4 .....	64
Figura 4.8. Direção de onda no ponto P1 .....	65
Figura 4.9. Direção de onda no ponto P4 .....	66
Figura 4.10. Perfil da Praia de S. João da Caparica (S1) (azul), obtido através da técnica LIDAR, e linha adaptada para representar a face do perfil da praia (vermelho) 67	
Figura 4.11. Perfil da Praia do CDS (S4) (azul), obtido através da técnica LIDAR, e perfil adaptado para representar o mesmo (vermelho) .....	69
Figura 4.12. Excertos de relatos de ocorrências nas praias da Costa da Caparica .....	76
Figura 4.13. Danos dos processos erosivos devido à tempestade sentida em janeiro de 2008 [17].....	76
Figura 5.1. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Hunt (1959) e Holman (1986) para a tempestade 1 .....	80
Figura 5.2. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Stockdon <i>et al.</i> (2006) e Nielsen e Hanslow (1991) para a tempestade 1 .....	80
Figura 5.3. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Ruggiero <i>et al.</i> (2001) e Guza e Thornton (1982) para a tempestade 1 .....	80
Figura 5.4. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir das duas metodologias de Teixeira (2009) para a tempestade 1 .....	81
Figura 5.5. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Hunt (1959) e Holman (1986) para a tempestade 2.....	82
Figura 5.6. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Stockdon <i>et al.</i> (2006) e Nielsen e Hanslow (1991) para a tempestade 2 .....	82
Figura 5.7. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Ruggiero <i>et al.</i> (2001) e Guza e Thornton (1982) para a tempestade 2.....	83
Figura 5.8. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir das duas metodologias de Teixeira (2009) para a tempestade 2 .....	83

Figura 5.9. <i>Runup</i> na secção S4, determinado através da metodologia de Mase <i>et al.</i> (2013), método 2, para a tempestade 1 .....	85
Figura 5.10. Caudal médio galgado na secção S4, determinado através da metodologia de Mase <i>et al.</i> (2013), método 2, para a tempestade 1 .....	85
Figura 5.11. <i>Runup</i> na secção S4, determinado através da metodologia de Mase <i>et al.</i> (2013), método 2, para a tempestade 2 .....	86
Figura 5.12. Caudal médio galgado na secção S4, determinado através da metodologia de Mase <i>et al.</i> (2013), método 2, para a tempestade 1 .....	86
Figura 5.13. Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1 .....	87
Figura 5.14. Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2 .....	88
Figura 5.15. Caudal instantâneo galgado na secção S4, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1 .....	89
Figura 5.16. Caudal instantâneo galgado na secção S4, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2 .....	90



# Índice de Tabelas

Tabela 1.1. Identificação dos pontos utilizados, com a designação das praias segundo a APA .....	4
Tabela 1.2. Identificação das secções utilizadas, com designação das praias segundo a APA .....	4
Tabela 2.1. Principais conceitos do sistema praia (Silva, 2012) .....	14
Tabela 2.2. Fórmulas adotadas num cálculo do <i>runup</i> em praias sem estrutura de proteção aderente e respetivos autores (adaptado de Martinho, 2014).....	19
Tabela 2.3. Condições de aplicação na formulação de Mase <i>et al.</i> (2013) .....	22
Tabela 2.4. Fórmulas adotadas para determinar o caudal galgado (Mase <i>et al.</i> , 2013) para praias com estrutura de proteção aderente .....	24
Tabela 2.5. Parâmetros do XBEACH importantes para o presente projeto e respetiva descrição, unidade, intervalo recomendado e valor padrão .....	36
Tabela 2.6. Exemplos de resultados do modelo XBEACH.....	40
Tabela 3.1. População geral da Costa da Caparica.....	49
Tabela 3.2. População da Costa da Caparica distribuída por grupos etários.....	50
Tabela 3.3. Comparação da população da Costa da Caparica com o País .....	50
Tabela 4.1. Valores médios mensais das características da agitação marítima ao largo entre 2007 e 2012.....	60
Tabela 4.2. Valores máximos anuais das características da agitação marítima ao largo entre 2007 e 2012.....	60
Tabela 4.3. Valores máximos e médios da altura de onda significativa nos vários pontos .....	64
Tabela 4.4. Valores máximos e médios do período de pico nos vários pontos .....	65
Tabela 4.5. Valores máximos e médios da direção de onda nos vários pontos.....	66
Tabela 4.6. Valores das características da agitação marítima ao largo entre 02/01/2008 e 05/01/2008 .....	73
Tabela 4.7. Valores das características da agitação marítima ao largo entre 12/02/2011 e 18/02/2011 .....	74
Tabela 4.8. Cotas máximas das praias ( <i>Z<sub>máx.</sub></i> ) e valor máximo do nível do mar ( <i>S<sub>máx.</sub></i> ) .....	75
Tabela 5.1. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através das metodologias das diferentes formulações empíricas para a tempestade 1.....	81
Tabela 5.2. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através das metodologias das diferentes formulações empíricas para a tempestade 2.....	83
Tabela 5.3. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1.....	88

Tabela 5.4. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2.....	89
Tabela 5.5. Valores extremos e média do caudal instantâneo galgado na secção S4, determinados através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1.....	90
Tabela 5.6. Valores extremos e média do caudal instantâneo galgado na secção S4, determinados através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2.....	90
Tabela 5.7. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através das metodologias das diferentes formulações empíricas e do modelo numérico, para a tempestade 1 e 2.....	91
Tabela 5.8. Valores máximos e médios da altura de onda significativa no ponto P1, referentes à tempestade 1, entre o dia 2 e 5 de janeiro de 2008, e à tempestade 2, entre o dia 12 e 18 de fevereiro de 2011.....	92
Tabela 5.9. Valores máximos do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através das formulações empíricas e do modelo numérico, e as respetivas datas e horas em que ocorreram.....	93
Tabela 5.10. Comparação dos valores médios, a cada 6 horas, na secção S4, determinados através das formulações empíricas e do modelo numérico, com as respetivas datas e horas em que ocorreram, para a tempestade 1 .....	94
Tabela 5.11. Comparação dos valores médios, a cada 6 horas, na secção S4, determinados através das formulações empíricas e do modelo numérico, com as respetivas datas e horas em que ocorreram, para a tempestade 2 .....	95
Tabela 5.12. Valores máximos e médios da altura de onda significativa no ponto P4, referentes à tempestade 1, entre o dia 2 e 5 de janeiro de 2008, e à tempestade 2, entre o dia 12 e 18 de fevereiro de 2011 .....	96
Tabela 5.13. Valores máximos do caudal galgado nas secções S2, S3, S4, S5, S6 e S7, determinados através das metodologias das diferentes formulações empíricas e do modelo numérico, para as tempestades 1 e 2.....	96

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1. Enquadramento do trabalho

“As zonas costeiras assumem uma importância estratégica em termos ambientais, económicos, sociais, culturais e recreativos, concentrando cerca de 3/4 da população portuguesa e contribuindo com 85% do PIB do país” (APA, 2012).

A costa Portuguesa, é um dos destinos de eleição, quer do povo português, quer daqueles que visitam Portugal, vindos de outros países. Face às condições adversas do mar, que colocam em perigo a segurança de pessoas e bens com impactos negativos para a economia, sociedade e património natural, e atendendo ao aumento da frequência desses acontecimentos adversos, em paralelo com a sua severidade, têm-se realizado várias intervenções de engenharia. Nessas intervenções incluem-se a construção/remodelação de estruturas de proteção (muros e taludes, molhes, quebra-mares e esporões), bem como sucessivas alimentações artificiais de praias e de reabilitação de dunas.

No entanto, apesar destas intervenções, são vários os episódios de problemas causados pela agitação marítima ao longo da costa portuguesa, nomeadamente no que diz respeito a inundação e galgamento de zonas costeiras e portuárias. Surge assim cada vez mais a necessidade de prevenir e alertar atempadamente as autoridades competentes para a ocorrência de situações de emergência, que deste modo possam em tempo útil acionar medidas de mitigação para evitar danos em pessoas e bens.

Neste contexto, está a ser implementado o sistema HIDRALERTA (Fortes *et al.*, 2013c), um sistema de previsão e de avaliação de risco associado ao galgamento e inundação em zonas costeiras e portuárias, que se baseia em medições e previsões da agitação marítima ao largo.

O sistema HIDRALERTA recorre a redes neuronais e fórmulas empíricas, para a determinação dos valores de galgamento e/ou de cotas de inundação em áreas específicas, associados a estados de agitação previstos ou medidos. A comparação destes valores com valores máximos admissíveis pré-estabelecidos permite:

- i) A avaliação, em tempo real, de situações de emergência e a emissão de alertas dirigidos às entidades competentes sempre que se preveja estar em causa a segurança de pessoas, bens ou atividades desenvolvidas;

- ii) A construção de mapas de risco, considerando séries temporais longas de previsões da agitação marítima ou cenários pré-definidos associados a mudanças climáticas e/ou a eventos extremos.

Assim, este sistema é uma ferramenta de apoio à gestão de zonas costeiras e portuárias. Para além de identificar situações de emergência, possibilita, atempadamente, adotar medidas para evitar grandes danos causados por galgamentos e inundações, principalmente, perdas de vidas e prejuízos económicos e ambientais.

Esta metodologia já foi aplicada para diversos casos, entre os quais as praias de Vale do Lobo (Raposeiro *et al.*, 2010; Raposeiro e Ferreira, 2011) e as praias adjacentes à Costa da Caparica (Neves, 2013; Neves *et al.*, 2013; Raposeiro *et al.*, 2013, Martinho, 2014) e os portos da Praia da Vitória, na ilha Terceira (Rocha, 2012; Poseiro *et al.*, 2014), e da Ponta Delgada, na ilha de São Miguel (Silva *et al.*, 2012).

No entanto, este sistema apresenta algumas limitações, entre as quais o fato de utilizar métodos simples e expeditos para o cálculo do *runup*, do galgamento e de inundação.

Com efeito, para o cálculo da inundação em zonas costeiras, sem e com estruturas de proteção, são utilizadas fórmulas empíricas da literatura que estimam o *runup* e/ou o galgamento (Fortes *et al.*, 2013c). Para o caso de galgamento (*overtopping*) de zonas com estruturas portuárias, recorre-se à ferramenta de redes neuronais artificiais NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), que fornece o caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura.

No caso particular das praias, todas estas metodologias não têm em conta a propagação de onda sobre o perfil de praia e as transformações na morfologia que esse perfil pode sofrer por incidência das ondas, para além de serem desenvolvidas para situações muito específicas de praias, admitindo um conjunto de hipóteses e parâmetros para as quais se tem sempre de verificar a sua aplicabilidade em novos casos de estudo.

Neste sentido, considera-se importante recorrer a um modelo de previsão de inundação/galgamento onde os fenómenos relevantes sejam melhor descritos. O modelo XBEACH (Roelvink *et al.*, 2009) é uma alternativa a considerar, no sentido do sistema HIDRALERTA se tornar um sistema mais fiável e robusto.

## 1.2. Objetivo

De modo a melhorar o cálculo do *runup*, do galgamento e da inundação no sistema HIDRALERTA, é objetivo deste trabalho a aplicação e avaliação do desempenho do modelo numérico de previsão do efeito de tempestades marítimas na erosão e inundação de zonas costeiras, XBEACH (Roelvink *et al.*, 2009). O XBEACH é um modelo bidimensional capaz de simular a propagação de ondas, bem como o transporte de sedimentos e as alterações morfológicas causadas por tempestades em áreas costeiras, praias, dunas e ilhas barreira.

O caso de aplicação foi a zona da Costa da Caparica, mais concretamente, da Praia de S. João da Caparica até à Praia Nova.

O modelo XBEACH foi aplicado para um conjunto de tempestades seleccionadas com base em dados de agitação marítima fornecidos por dois modelos de previsão da agitação marítima, o modelo WAVEWATCH III (Tolman, 1991) e o modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999).

Os resultados numéricos em termos de espraiamento (*runup*) e, associadamente, de inundação e de galgamento, para as várias praias da Costa da Caparica, foram comparados com os valores obtidos por fórmulas empíricas, permitindo assim avaliar o desempenho do modelo XBEACH.

## 1.3. Metodologia

Para caracterizar a agitação marítima, na zona da Costa da Caparica, utilizaram-se os resultados de Martinho (2014) correspondentes a um período de tempo de sensivelmente 5 anos, compreendidos entre outubro de 2007 e dezembro de 2012. Para a obtenção desses valores foram utilizados dois modelos numéricos.

Um dos modelos, WAVEWATCH III (WWIII) de larga escala, serviu para a caracterizar a agitação marítima ao largo da Costa da Caparica. O outro modelo utilizado, SWAN, serviu para caracterizar, tendo em conta os resultados obtidos do modelo anterior, a agitação marítima em determinados pontos junto à costa, como está indicado na Figura 1.1 e na Tabela 1.1 em coordenadas cartesianas, no sistema de projeção European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89).



Figura 1.1. Localização dos pontos que caracterizam a agitação marítima (adaptado do Google Earth)

Tabela 1.1. Identificação dos pontos utilizados, com a designação das praias segundo a APA

Ponto	Praia	Coordenada M (m)	Coordenada P (m)	Batimetria (m ZH)
<b>P1</b>	Praia de S. João da Caparica	-98065.88	-111379.15	8.94
<b>P2</b>	Praia do Norte	-97255.29	-112424.37	9.21
<b>P3</b>	Praia Santo António da Caparica	-97107.91	-112746.21	9.04
<b>P4</b>	Praia do CDS (do marcelino)	-96925.16	-112963.60	9.28
<b>P5</b>	Praia do Tarquíneo/Paraíso	-96739.46	-113343.01	8.78
<b>P6</b>	Praia do Dragão Vermelho	-96577.34	-113614.56	9.31
<b>P7</b>	Praia Nova	-96371.01	-113873.65	9.13

Tabela 1.2. Identificação das secções utilizadas, com designação das praias segundo a APA

Secção	Praia
<b>S1</b>	Praia de S. João da Caparica
<b>S2</b>	Praia do Norte
<b>S3</b>	Praia Santo António da Caparica
<b>S4</b>	Praia do CDS
<b>S5</b>	Praia do Tarquíneo/Paraíso
<b>S6</b>	Praia do Dragão Vermelho
<b>S7</b>	Praia Nova

Os pontos P1 a P7 correspondem a uma determinada praia e todas as praias pertencem ao concelho de Almada, freguesia da Costa da Caparica, caracterizadas por secções (Figura 1.1 e Tabela 1.2) identificadas através da técnica LIDAR (*Light Detection and Ranging*) – Modelo Altimétrico de Grande Precisão.

Numa primeira fase, para cada secção, foram aplicadas as fórmulas empíricas, para determinar o *runup*, o Nível Máximo de Inundação (NMI) e o caudal médio galgado, considerando os 5 anos de dados de agitação marítima obtidos no ponto correspondente a cada secção. O NMI é obtido pela soma do espraiamento (*runup*) com o nível do mar tendo ainda em consideração o efeito da sobrelevação meteorológica do nível do mar (*storm surge*).

Numa segunda fase, com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo XBEACH efetuou-se a comparação dos resultados numéricos (NMI e caudal médio galgado) com as fórmulas empíricas. No entanto, devido ao elevado tempo de cálculo do modelo para cada condição de agitação marítima não foi possível efetuar os cálculos para toda a série temporal de 5 anos. Decidiu-se assim, apenas aplicar o modelo para um conjunto de condições de agitação marítima selecionadas.

As condições de agitação selecionadas correspondem a duas situações de tempestade designadas por tempestade 1 e tempestade 2.

A tempestade 1 foi selecionada recorrendo a 3 critérios de seleção, baseados na altura de onda significativa ao largo ( $H_{s0}$ ) (com base nos resultados do WWIII), no nível do mar ( $S_{m\acute{a}x.}$ ) e em acontecimentos relatados pelos meios de comunicação.

A tempestade 2 foi selecionada com base nos resultados das fórmulas empíricas, sendo selecionada aquela que conduziu aos valores máximos de *runup*, de NMI e de galgamento. Para esta tempestade, pretende-se avaliar se o XBEACH conduz a valores superiores comparativamente aos obtidos para a tempestade 1.

Para essas condições de tempestades, e para as características de cada praia, obtiveram-se os resultados numéricos em termos *runup* e de galgamento. Na determinação do *runup*, o modelo regista a variação da cota da superfície da água, incluindo o espraio, e na determinação do galgamento, o modelo regista, no coroamento da estrutura de proteção, o nível de água e a velocidade da mesma, que determinam o caudal galgado.

O esquema seguinte fornece, de forma sintetizada, a metodologia adotada para a realização deste trabalho.

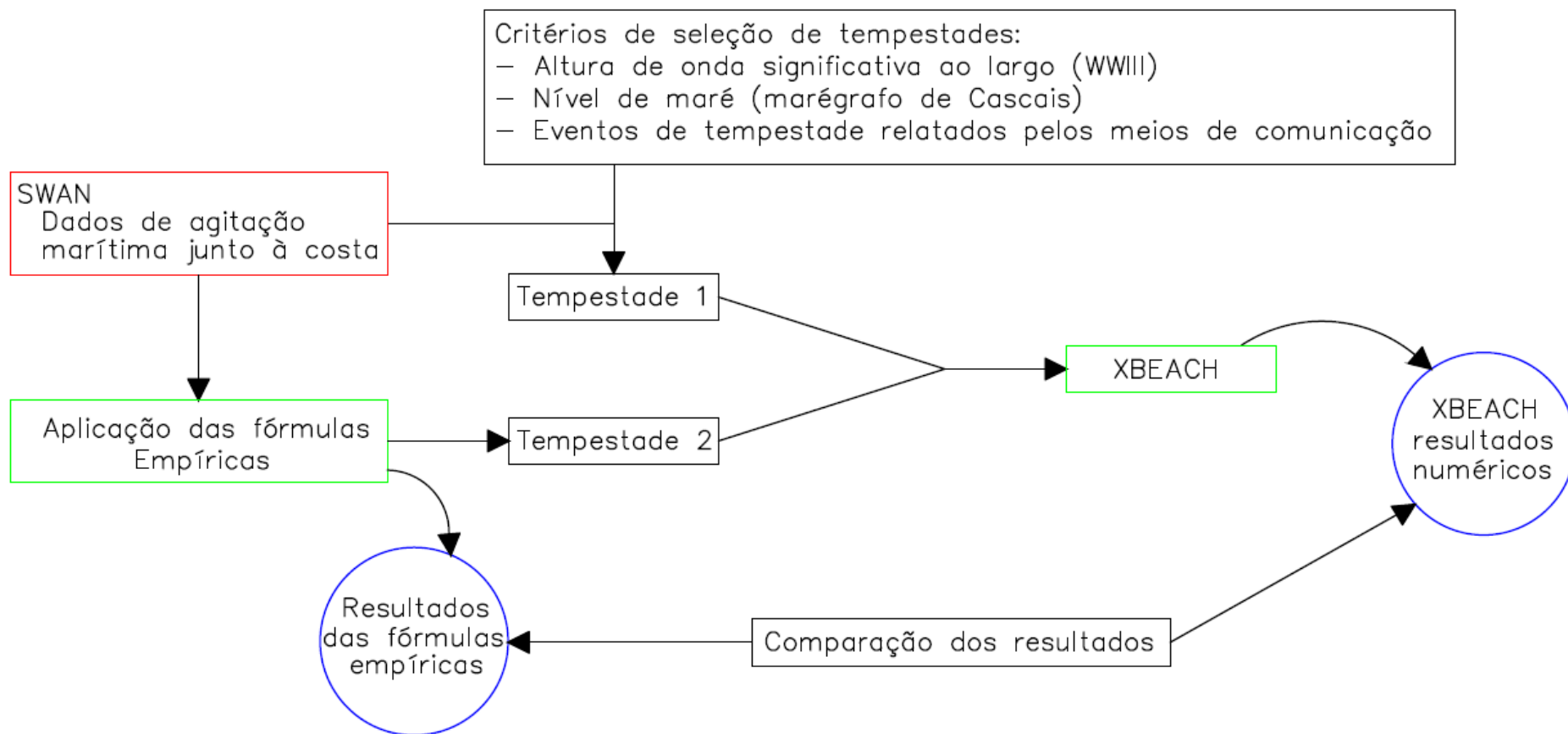


Figura 1.2. Esquema sintetizado da metodologia adotada para o trabalho

## **1.4. Estrutura da dissertação**

A dissertação está repartida em seis capítulos e cinco anexos, sendo que:

Capítulo 1 – Introdução: Exposição da importância do trabalho para o país e o objetivo do mesmo, descrição da metodologia utilizada e da sua estrutura;

Capítulo 2 – Fundamentos Teóricos: Breve introdução dos métodos de previsão da agitação marítima, bem como das características e fenômenos que ocorrem nas zonas costeiras; Descrição das abordagens e metodologias adotadas nesta dissertação, mais concretamente as formulações empíricas e o modelo numérico XBEACH, para a determinação do *runup*, NMI e caudal galgado;

Capítulo 3 – Caso de estudo: Descrição geral do local de estudo, dinâmica da costa e das praias;

Capítulo 4 – Metodologia: Caracterização das condições de agitação marítima; Descrição das condições de aplicação das fórmulas empíricas e do modelo XBEACH, bem como dos critérios considerados na seleção das tempestades utilizadas;

Capítulo 5 – Análise de resultados: Apresentação e comparação dos resultados obtidos através das metodologias descritas e aplicadas no caso de estudo apresentado, para avaliação do desempenho do modelo XBEACH.

Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros: Apresentação das conclusões obtidas neste trabalho bem como referência a desenvolvimentos futuros que poderão otimizar a metodologia aplicada.



## Capítulo 2 – Fundamentos teóricos

Neste capítulo, é feita uma breve descrição das metodologias utilizadas ao longo deste trabalho, isto é, as formulações empíricas e o modelo numérico.

No presente trabalho, quer as formulações empíricas quer o modelo XBEACH foram utilizados com o objetivo de fornecer estimativas do valor do *runup*, do NMI ou do caudal médio galgado, partindo da caracterização da agitação marítima obtida com os modelos WWIII e SWAN (Martinho, 2014).

A anteceder a descrição das metodologias utilizadas, torna-se essencial conhecer os parâmetros que caracterizam a agitação marítima, bem como os conceitos básicos da caracterização do *runup* e galgamento em praias, que de seguida também se apresenta sucintamente.

### 2.1. Caracterização da agitação marítima

A agitação marítima num dado local e instante pode caracterizar-se por um conjunto de parâmetros, como por exemplo, a altura de onda significativa ( $H_s$ ), o período de pico ( $T_p$ ) e a direção média (*Dir*).

As características de agitação marítima podem ser obtidas por medições *in situ* (monitorização) ou estimadas recorrendo a modelos numéricos.

#### 2.1.1. Monitorização da agitação marítima

A monitorização consiste num registo *in situ* de diversas características das ondas no local de medição. Esse registo pode ser feito, por exemplo, por boias-ondógrafo (Figura 2.1) e é constituído por deslocamentos verticais (elevações) e deslocamentos horizontais nos sentidos norte-sul e este-oeste.

Em Portugal, os registos são transmitidos para uma estação recetora, que recebe e descodifica os dados, fazendo um controlo da qualidade da medição. Posteriormente, são transmitidos, por modem, para a sede do Instituto Hidrográfico, onde são sujeitos a um controlo de qualidade mais elaborado, processados e armazenados numa base de dados, para que sejam disponibilizados à comunidade e utilizados em estudos científicos.



Figura 2.1. Boia ondógrafo [1]

Por vezes, nota-se a ausência de registos, ou, até mesmo, uma má concordância com a realidade. Existem diversas razões para esses casos, como por exemplo:

- Dificuldade na comunicação telemétrica com a boia, ou com a sua componente terrestre, o que provoca um atraso na atualização superior ao esperado (cerca de uma hora).
- Inoperacionalidade da boia provocada pela recolha da mesma para reparação/manutenção ou pela agressão natural (tempestade marítima) ou humana (abalroamento da boia), não se encontrando na posição devida ou estando impossibilitada de transmitir ou de recolher dados.

Para o presente trabalho, a boia-ondógrafo relevante encontra-se a oeste do Bugio, na entrada do canal da barra, e pertence ao porto de Lisboa

### **2.1.2. Previsão da agitação marítima**

As obtenções de estimativas das características da agitação marítima podem ser efetuadas com recurso a modelos numéricos. Em comparação com a monitorização *in situ*, estes podem ser utilizados de forma contínua e são menos onerosos (Ângelo, 2012).

Estes modelos permitem a geração das ondas desde o largo até junto à costa. Existem vários tipos de modelos que diferem consoante os fenómenos que consideram, sendo alguns mais adequados a serem aplicados a zonas de maiores profundidades e outros a águas pouco profundas. É, por isso, que muitas vezes se procede ao acoplamento de modelos como o modelo WWIII (Tolman, 2002), de larga escala, e o modelo SWAN (Booji *et al.*, 1999), de média escala, que foram os modelos utilizados por Martinho (2014) e que de seguida são descritos.

### **2.1.2.1. Previsão ao largo**

O modelo WAVEWATCH III™ – WWIII (Tolman, 1997, 1999, 2009), desenvolvido no *Marine Modeling and Analysis Branch* do *Environmental Modeling Center* do *National Centers for the Environmental Prediction*, é um modelo de terceira geração e baseia-se nos modelos I e II do WAVEWATCH, desenvolvidos na *Delft University of Technology* e na *NASA Goddard Space Flight Center*, respetivamente.

Este modelo distingue-se dos modelos de segunda geração, pois possibilita a propagação das componentes do estado de agitação, em várias direções, aumentado ou decaindo consoante o comportamento do vento e o decorrer do tempo, à medida que ocorrem interações onda-onda (Stewart, 1980). Permite prever a agitação marítima em todo o mundo, na costa ou ao largo, reproduzindo melhor fenômenos de maiores profundidades. Este modelo fundamenta-se na parametrização dos termos de fonte e dissipação de energia, direções de onda e campo de ventos (Faria, 2009).

Para caracterizar a agitação marítima ao largo, na zona da Costa da Caparica, Martinho (2014) utilizou os resultados num ponto da grelha do WWIII próximo daquela zona. Posteriormente, utilizou aqueles resultados como condição de fronteira do modelo (SWAN) para caracterizar a agitação marítima junto à costa. Estes últimos resultados foram utilizados no presente trabalho.

### **2.1.2.2. Previsão junto à costa**

O modelo SWAN – *Simulating Waves Nearshore*, desenvolvido na *Delft University of Technology*, é um modelo numérico de terceira geração, que se baseia na equação de balanço da ação de onda para modelar a geração, propagação e dissipação da energia da agitação marítima (Booji *et al.*, 1999).

Este tipo de modelo surgiu da necessidade de complementar os modelos de águas profundas, como o modelo WWIII (Tolman, 2002), pois estes não contemplam os fenômenos físicos presentes em águas de profundidade finita, tais como o atrito do fundo, o empolamento, a rebentação induzida pelo fundo ou a reflexão.

No trabalho científico realizado por Neves (2013), em que foi aplicada a metodologia de avaliação do risco de inundação/galgamento na Praia de S. João da Caparica foi feita a validação dos modelos mencionados anteriormente. A autora utilizou o modelo SWAN e

os resultados do modelo WWIII, para determinar a agitação marítima no local da boia-ondógrafo, a oeste do Bugio, de modo a efetuar uma comparação entre os resultados da previsão realizada e os dados medidos na boia (monitorização). Após a análise da informação, a autora concluiu que não existiam diferenças significativas nos dois conjuntos de resultados, havendo até uma boa concordância em relação ao andamento e à magnitude entre os conjuntos de resultados, que incluíam os valores para a altura significativa espectral, período de pico e a direção de onda para a frequência de pico, com uma periodicidade de 6 horas, entre outubro de 2007 e dezembro de 2012.

## **2.2. Caracterização do *runup* e galgamento em praias**

A presença de uma condição da agitação marítima severa, junto à costa, pode gerar consequências em termos de *runup*, galgamento e inundação que, por sua vez, podem ter impactos gravosos, como a perda de vidas e/ou a destruição de bens e infraestruturas.

No presente trabalho são aplicadas as formulações empíricas e o modelo numérico, com diferentes abordagens de cálculo, de modo a caracterizar o *runup* e o galgamento na costa.

O modelo XBEACH é do tipo determinístico, também designado por modelo baseado em processos, e integra-se na categoria de modelos em que os processos físicos são modelados individualmente. Existem ainda mais dois tipos de modelos, os empíricos e os semi-empíricos. Os modelos empíricos, como são as formulações empíricas utilizadas, são modelos que têm em consideração as consequências, pois os parâmetros são determinados tendo em conta os resultados obtidos em experiências laboratoriais e os processos não são individualizados. Nos modelos semi-empíricos, os principais processos físicos são individualizados através de formulações baseadas em resultados laboratoriais (Oliveira, 2011).

### **2.2.1. Conceitos básicos**

O *runup* e o galgamento são fenómenos influenciados pela morfologia da praia e, segundo Komar (1976), a composição e a dimensão dos sedimentos são um dos fatores que definem a mesma, não esquecendo a importância dos processos físicos associados à presença das ondas, marés e correntes, e do transporte de sedimentos.

Ao encontro das afirmações de Komar (1976), a variação, no tempo e no espaço de, essencialmente, dois parâmetros (a agitação marítima e a granulometria dos sedimentos), leva a morfologia da praia a modificar-se, podendo tornar as alterações irregulares e tão efémeras quanto a duração de uma maré (Martinho, 2014).

A praia pode ser dividida em três zonas distintas, como é visível na Figura 2.2: ante-praia, face da praia e pós-praia (Silva, 2012).

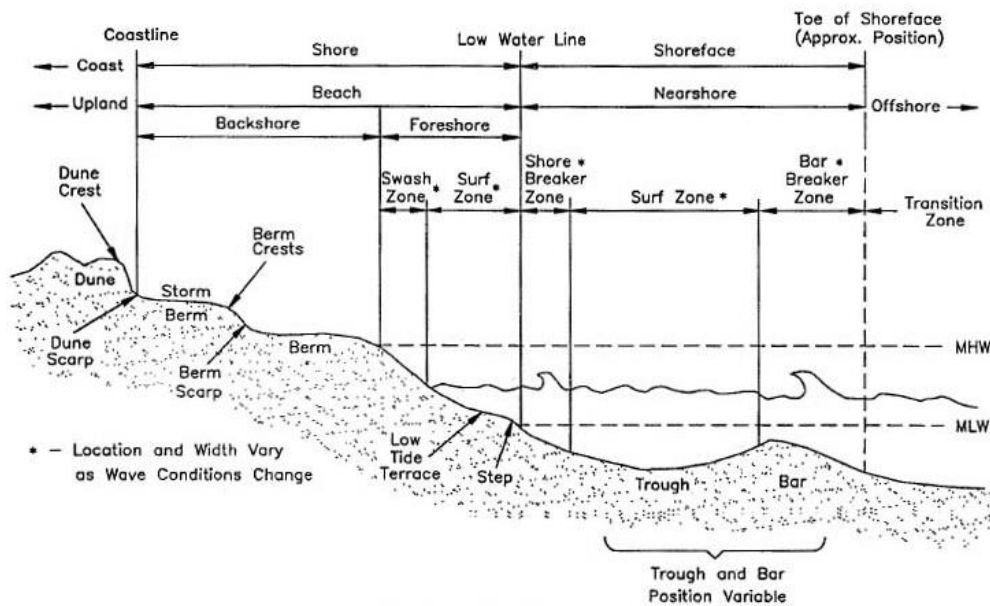


Figura 2.2. Perfil de praia comum (USACE, 2002)

A ante-praia (*backshore*) é definida pela parte da praia situada entre o *foreshore* e a linha de costa (LMPMAVE). Em condições normais, esta zona está seca, e é caracterizada, geralmente, por bermas e por ter vegetação. Só se encontra exposta a ondas em situações extremas, com o nível do mar alto e/ou em tempestades [2]. Exemplos de ante-praia são as dunas, as arribas, as escarpas ou estruturas de proteção aderente.

A face da praia (*foreshore* ou *beach face*) é definida pelo nível de baixa-mar (limite inferior) e, por razões práticas, pela intersecção entre o nível de preia-mar e o perfil costeiro (limite superior). É uma parte da praia que pode ser considerada, maioritariamente, submersa, devido à variação do nível de água e ao espraiamento das ondas (*runup*), dentro dos seus limites. [3].

A pós-praia (*nearshore*) é definida pela zona que se estende entre o nível de baixa-mar e a zona de rebentação das ondas, ou seja, entre o limite inferior do *foreshore* e o limite superior do *offshore* [4]. É uma zona onde se inicia o processo de formação da praia.

Na Tabela 2.1 são apresentados conceitos que caracterizam os elementos e as diferentes fases de formação do sistema praia.

Tabela 2.1. Principais conceitos do sistema praia (Silva, 2012)

<b>Conceito</b>	<b>Descrição</b>
<b><i>Foreshore</i></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><i>Offshore</i></b>	Zona posterior à formação das ondas, a partir da qual a profundidade deixa de sofrer modificações significativas.
<b><i>Runup</i></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><i>Backwash (Refluxo)</i></b>	Movimentação da água, após o espraio, na direção do oceano pela ação da gravidade.
<b><i>Swash ou Uprush (afluxo, enchente ou espraio)</i></b>	Movimentação ascendente da massa de água da onda incidente, após a rebentação, através da face da praia.
<b><i>Swash zone (Zona de espraio ou Ressaca)</i></b>	Zona da face de praia onde ocorre o espraio da onda.
<b><i>Surf zone</i></b>	Zona onde as ondas rebentam, ou onde ocorre a rebentação, se estendendo-se ao longo da face da praia.
<b><i>Breaker zone</i></b>	Zona em que as ondas se aproximam da costa e começam a rebentar.

A Figura 2.3 complementa a definição de *runup* (R) apresentada na Tabela 2.1. Trata-se da diferença entre dois níveis de água, em que um é originado pela movimentação ascendente da massa água (espraio), após a rebentação da onda incidente, e o outro, pela superfície de equilíbrio (nível médio do mar). O *runup* é influenciado pela inclinação da face da praia, para uma mesma altura de onda a elevação máxima alcançada no espraio é diretamente proporcional à inclinação da face da praia.

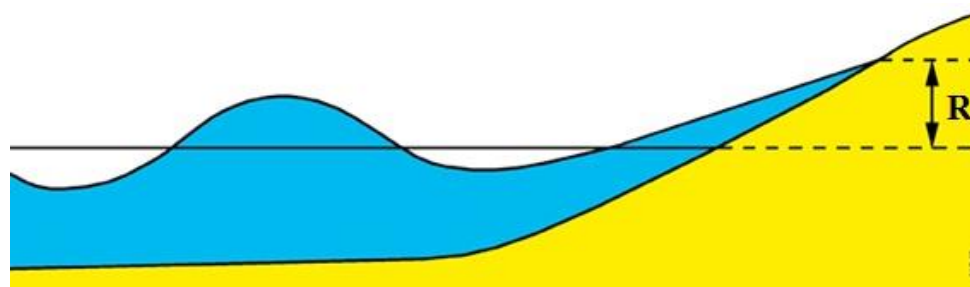


Figura 2.3. Representação do *runup* (R) [5]

Contudo há praias nas quais o que importa estudar é o caudal médio galgado, por serem compostas por estruturas de proteção aderente, devido à fraca proteção dada pelas dunas ou à inexistência das mesmas. Nesses casos, a energia da onda incidente é dissipada por rebentação, por atrito, por percolação, refletida para o largo, e a restante energia cinética transforma-se em energia potencial, no escoamento que ocorre sobre a estrutura. Quando o talude não é muito extenso ou a cota de coroamento não é suficientemente elevada, esta transformação não é total e, conseqüentemente, o nível máximo de espraiamento, associado ao escoamento acima referido, é excedido, provocando transporte de massa de água sobre o coroamento da estrutura. Do galgamento dessas estruturas pode resultar risco para pessoas e infraestruturas (Brito, 2007).

É, geralmente, expresso em unidades de caudal médio por metro linear da estrutura, ou seja, em  $m^3s^{-1}/m$ , ou em  $ls^{-1}/m$ , mas na realidade o galgamento é um processo aleatório no tempo e no espaço, não existindo a passagem constante de um caudal sobre a estrutura, durante um período de tempo considerado. Sendo que os galgamentos estão associados às maiores ondas, já as ondas mais pequenas não causam qualquer fenómeno de galgamento. O galgamento é, geralmente, expresso em termos médios, por metro linear da estrutura, devido à facilidade de medição e à simplicidade de classificação da grandeza, em relação aos caudais críticos no ponto de vista estrutural e de utilização da zona protegida pela estrutura galgada (Silva, 2014).

O galgamento depende (Figura 2.4), entre outros fatores, da altura de onda significativa ( $H_s$ ), do comprimento de onda ( $L$ ), do desnível entre a cota de coroamento da estrutura ( $R_c$ ) e o nível médio da água (NMA), da profundidade da água no pé da estrutura ( $d_s$ ), do período da onda ( $T$ ), da inclinação da estrutura de defesa ( $\alpha$ ), da aceleração gravítica ( $g$ ) e do ângulo de incidência da onda ( $\beta$ ) (Afonso, 2011).

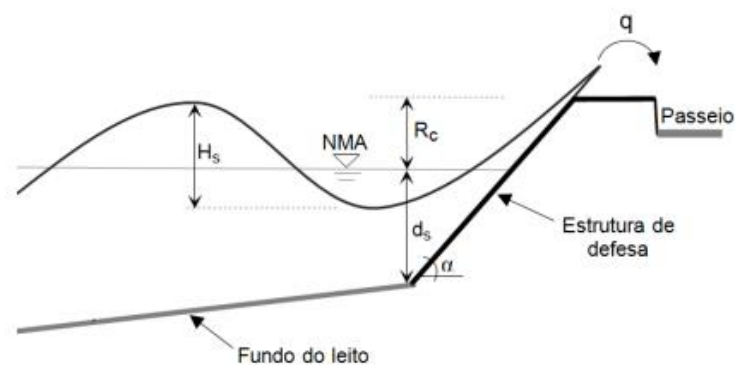


Figura 2.4. Fenómeno de galgamento numa estrutura de proteção aderente (Afonso, 2011)

O galgamento pode ocorrer de três formas distintas (Afonso, 2011): *Green water*, *Splash* e *Spray*. A primeira, consiste na transposição de uma lâmina contínua de água sobre a estrutura, quando a cota máxima de espraçamento excede a cota de coroamento da estrutura. A segunda, tal como o nome indica, o caudal galgado é composto por um grande volume de salpicos (*splash*) que transpõe a estrutura, originados pela rebentação de uma onda sobre a parede exterior da estrutura. Por último, o caudal galgado é caracterizado pelos borrifos (*spray*) que ultrapassam a estrutura, devido à ação do vento.

Há que ter em consideração a influência do nível do mar pois, mesmo quando a altura de onda é pequena, podem ocorrer galgamentos devido ao nível do mar se encontrar acima do nível médio, principalmente na preia-mar. Este fenómeno, leva a que haja menor dissipação de energia, por parte da estrutura, pois a área emersa da mesma é reduzida devido ao decréscimo do desnível entre a cota de coroamento da estrutura e o nível de água, e, por conseguinte, aumenta a probabilidade de galgamentos (Martinho, 2014).

### **2.2.2. Fórmulas empíricas**

Ao longo do tempo tem vindo a ser proposto, por diversos autores, a aplicação de várias fórmulas empíricas, desenvolvidas e testadas pelos mesmos, quer para o *runup* quer para o galgamento em praias. Consoante as praias tenham ou não estruturas de proteção, existem fórmulas específicas para cada caso. Estas estruturas influenciam a dinâmica e a morfologia da praia, interferindo em diversos fenómenos físicos.

As formulações foram utilizadas para determinar o *runup*, o NMI ou o caudal galgado, que posteriormente foram comparados com os valores resultantes do modelo XBEACH.

#### **2.2.2.1. Metodologia de estimação do *runup***

Existem diversas fórmulas empíricas para calcular o *runup*, baseadas em ensaios laboratoriais e/ou em medições *in situ*. Na maioria destas fórmulas leva-se em conta o declive da face da praia e as condições de agitação marítima em águas profundas.

As principais fórmulas utilizadas para o cálculo do *runup* (Tabela 2.2) em praias sem estrutura de proteção são as propostas por Hunt *et al.* (1959), Holman (1986), Nielsen e Hanslow (1991), Ruggiero *et al.* (2001), Stockdon *et al.* (2006), Guza e Thornton (1982) e Teixeira (2009). Martinho (2014) apresenta uma revisão bibliográfica destes métodos.

Para conceber as fórmulas os autores tiveram em conta diversas variáveis. As fórmulas escolhidas para serem utilizadas neste trabalho foram desenvolvidas com dados de praias semelhantes às deste trabalho e já foram utilizados em trabalhos anteriores com resultados representativos.

Hunt *et al.* (1959) através da análise de resultados de testes em modelo físico laboratorial, com estruturas, por exemplo paredões e quebra-mares, abordando o ponto de vista da sua forma e eficácia na reflexão e dissipação de energia das ondas incidentes, apresentam fórmulas para o *runup* em praias com proteção costeira. Embora a geração das ondas seja regular, o modelo físico considera intrinsecamente os fenómenos físicos de dissipação de energia, reflexão e *runup*. As fórmulas evidenciam a influência no *runup* do declive, da rugosidade e da forma da berma das estruturas. Os resultados obtidos nos modelos físicos têm as suas limitações inerentes, uma vez que podem ocorrer efeitos de escala e que as ondas geradas podem não corresponder às ondas geradas pelos ventos, registadas nos oceanos (Martinho, 2014).

Holman (1986) teve como objetivo avaliar, em praias naturais, a existência de valores extremos de *runup*. Assim determinou o valor máximo de *runup* para 149 séries de dados de 35 minutos, com um período de retorno de 2 a 5 anos, utilizando os dados de agitação marítima oriundos de uma boia ao largo da praia, sensivelmente, a 20 m de profundidade. O autor conclui que a determinação do *runup* deve ser feita através do número de Iribarren e dos coeficientes de regressão obtidos através de resultados experimentais. Para Neves (2013), a utilização desta formulação tem que ser bem justificada, pois apesar dos resultados obtidos por Holman (1986) serem de elevada qualidade, eles são provenientes de um único local de estudo. Por isso, é aconselhável que a formulação só seja aplicada para condições semelhantes às do local de estudo, em Duck, North Carolina, nos Estados Unidos da América.

Nielsen e Hanslow (1991) avaliaram a distribuição do *runup* das ondas nas praias naturais, na costa de New South Wales, na Austrália, variando a morfologia das mesmas do tipo refletivo (praias íngremes) ao dissipativo (praias planas). As fórmulas foram concebidas tendo em consideração o estudo feito a várias praias, de diferentes características, o trabalho feito por Hunt *et al.* (1959) e afirmando que o número de Iribarren é importante na determinação do *runup*. Para determinar o *runup*, os autores estabeleceram, para as praias refletivas, uma relação de proporcionalidade entre o parâmetro por eles utilizado para o cálculo do *runup* e o declive. Já para as praias

dissipativas, onde o declive não tem tanta influência, estabeleceram uma relação de proporcionalidade entre a altura de onda média quadrática ao largo e o comprimento de onda ao largo.

Ruggiero *et al.* (2001) através da análise da probabilidade de ocorrência de valores extremos do nível do mar, afetados por fenómenos oceanográficos, atmosféricos e de *runup*, provocados pelas tempestades, avalia a sensibilidade das zonas costeiras à erosão provocada pela agitação marítima. Segundo os autores, apesar do método ter sido aplicado ao longo da costa Oregon, o mesmo pode ser aplicado noutros litorais analisando episódios de marés extremas e fenómenos de *runup* de ondas de tempestades. Para o efeito também foram feitos registos com muitos instrumentos colocados num alinhamento transversal junto à costa, no *Field Research Facility*, de modo a relacionar o *runup* com a morfologia da praia e as condições das ondas.

Stockdon *et al.* (2006), com base no trabalho de Holman (1986), concebeu uma parametrização simples que avalia o *runup* máximo em praias naturais. Considerando uma ampla gama de condições, o autor baseou-se em dados recolhidos em modelos físicos de 10 praias para analisar o *runup* através de dois processos: “*setup*” e “*swash*”, sendo cada um parametrizado separadamente. O “*setup*” é parametrizado recorrendo ao número de Iribaren e o “*swash*” é parametrizado recorrendo a bandas de frequências infragravíticas. Concluíram que, para qualquer condição, os valores de “*setup*” são menores numa praia dissipativa do que numa praia refletiva ou intermédia e que, através da comparação entre a medição e a estimação, há uma tendência da parametrização para subestimar os picos de *runup*.

Guza e Thornton (1982) desenvolveram uma relação linear entre o valor significativo do *runup* e a altura de onda significativa, a partir de valores obtidos por medições realizadas em praias dissipativas na Califórnia. Para Matias *et al.* (2012) os resultados obtidos com a formulação de Guza e Thornton (1982) são superiores aos obtidos com outras formulações, por exemplo a de Stockdon *et al.* (2006), para as mesmas condições, o que reflete as limitações desta formulação.

Teixeira (2009) desenvolveu uma formulação para calcular o *runup* que fez parte da estratégia para demarcar o leito e a margem das águas do mar no litoral sul do Algarve, definindo a linha máxima preia-mar de águas vivas equinociais (LMPMAVE). O autor baseou-se em 13 anos de observações e medições, no litoral Algarvio, e em informação cartográfica à escala 1/2000 ou superior, espelhando as condições morfológicas naturais.

As formulações relacionam linearmente a altura de onda e a altura do *runup*, traduzindo a correlação dos dados medidos no terreno. O *runup* máximo foi calculado, em cada observação, a partir da diferença entre a cota da linha de maré medida e o plano da preia-mar prevista nas tabelas de maré, publicadas pelo IH. De modo a melhorar a metodologia foram utilizados parâmetros escalares de ondulação, oriundos da boia-ondógrafo localizada ao largo de Faro, e o declive da estrutura natural (por exemplo praia) ou artificial (por exemplo enrocamento) onde as ondas incidem ( $R=c(H, L, \beta)$ ).

As formulações empíricas calculam o *runup* como uma variável aleatória. Para efeitos de avaliação do galgamento em cordões dunares, geralmente é utilizado a estimativa do *runup* com a probabilidade de não excedência de 2%, ou seja, é o nível que, somente, o *runup* de 2% das ondas no estado de agitação excede (Sancho *et al.*, 2011).

Na Tabela 2.2 apresentam-se as formulações utilizadas na metodologia escolhida para este trabalho, que se aplicam a praias sem estrutura de proteção.

Tabela 2.2. Fórmulas adotadas num cálculo do *runup* em praias sem estrutura de proteção aderente e respetivos autores (adaptado de Martinho, 2014)

<b>Autores</b>	<b>Fórmulas</b>	
<b>Hunt (1959)</b>	$R_{2\%} = \tan\beta(H_0 \cdot L_0)^{0.5}$	com rebentação (1)
	$R_{2\%} = 3H_s$	rebentação de fundo (2)
<b>Holmam (1986)</b>	$R_{2\%} = H_0(0.83\xi_0 + 0.20)$	agitação ao largo (3)
	$R_{2\%} = H_s(0.78\xi_s + 0.20)$	agitação junto à costa (4)
<b>Nielsen e Hanslow (1991)</b>	$R_{2\%} = L_{RU}(-\ln(0.02))^{0.5}$	(5)
	$L_{RU} = 0.6\tan\beta \cdot (H_{orms} \cdot L_0)^{0.5}$	se $\tan\beta \geq 0.1$ (6)
	$L_{RU} = 0.05(H_{orms} \cdot L_0)^{0.5}$	se $\tan\beta < 0.1$ (7)
<b>Ruggiero <i>et al.</i> (2001)</b>	$R_{2\%} = 0.27(\tan\beta \cdot H_0 \cdot L_0)^{0.5}$	praias dissipativas (8)
	$R_{2\%} = 0.5H_0 - 0.22$	praias dissipativas a refletivas (9)
<b>Stockdon <i>et al.</i> (2006)</b>	$R_{2\%} = 0.043(H_0 \cdot L_0)^{0.5}$	se $\xi < 0.3$ (10)
	$R_{2\%} = 1.1 \cdot \left( 0.35 \tan\beta \cdot (H_0 \cdot L_0)^{0.5} + \left[ (H_0 \cdot L_0 \cdot (0.563(\tan\beta)^{0.5} + 0.004))^{0.5} \right] / 2 \right)$	se $\xi \geq 0.3$ (11)
<b>Guza e Thornton (1982)</b>	$R_s = 0.71H_0 + 0.035$	praias dissipativas (12)
<b>Teixeira (2009)</b>	$R_{m\acute{a}x.} = 0.80H_s + 0.62$	(mais antiga) (13)
	$R_{m\acute{a}x.} = 1.08H_s \cdot \xi_0$	(mais recente) (14)

A maioria das formulações apresentadas depende do comprimento de onda ao largo ( $L_0$ ) ou do número de Iribarren ( $\xi$ ), que é influenciado pelo mesmo comprimento de onda ( $L_0$ )

e pela altura de onda ( $H$ ), ao largo ( $H_0$ ) ou significativa ( $H_s$ ), definida por cada autor. O número de Iribarren é determinado através da equação (15):

$$\xi = \tan \beta / (H/L_0)^{0.5} \quad (15)$$

onde a  $\tan \beta$  corresponde ao declive da face da praia e o comprimento de onda é determinado pela equação (16):

$$L_0 = g T_p^2 / (2\pi) \quad (16)$$

sendo que  $g$  representa a aceleração da gravidade e o  $T_p$  o período de pico da onda.

Após o cálculo do *runup* numa dada zona costeira, interessa calcular o NMI, referido ao ZH. A determinação de NMI, descrita na equação (17), resulta do somatório da maré astronómica (MA) referenciada ao ZH, com a sobrelevação (SL) e o *runup* máximo ( $R_{m\acute{a}x.}$ ) (Raposeiro *et al.*, 2013).

$$NMI = MA + SL + R_{m\acute{a}x.} \quad (17)$$

Uma vez que a estimaco do *runup* máximo ( $R_{m\acute{a}x.}$ )  complexa e s possível através de ensaios laboratoriais, Neves (2013) considera que o *runup* com probabilidade de no excedência de 1% ( $R_{1\%}$ )  uma boa aproximao do  $R_{m\acute{a}x.}$ .

Contudo, nem todas as formulaes têm como objetivo a determinao do *runup* com probabilidade de no excedência de 1%. Admitindo que se está face a uma distribuio de Rayleigh para os *runup*'s individuais, as seguintes equaes so válidas (18) (19) (20) (Neves, 2013).

$$R_s = R_{2\%} / 1.4 \quad (18)$$

$$R_{m\acute{e}dio} = 0.63R_s \quad (19)$$

$$R_{1\%} = 1.52R_s \quad (20)$$

em que  $R_s$  representa o *runup* significativo, ou seja, a média do tero mais alto dos *runup*'s,  $R_{m\acute{e}dio}$  o *runup* médio e  $R_{2\%}$  o *runup* com probabilidade de no excedência de 2%.

A metodologia apresentada é bastante simplificada, dado que a inundação de uma zona costeira depende de inúmeros fen menos de grande complexidade e da intera o entre eles, mas tem sido utilizada e tem correspondido às expectativas.

De modo a facilitar a determina o do *runup*, através da aplica o de fórmulas empíricas, foi utilizado um programa de cáculo, em linguagem FORTRAN (Fortes *et al.*, 2013a), esquematizado na Figura 2.5.

O programa regista num ficheiro, através da metodologia de cada um dos autores, os valores de  $R_{1\%}$ ,  $R_{2\%}$ ,  $R_S$ ,  $R_{máx}$ ,  $R_{médio}$  e NMI, necessitando de dois ficheiros de entrada.

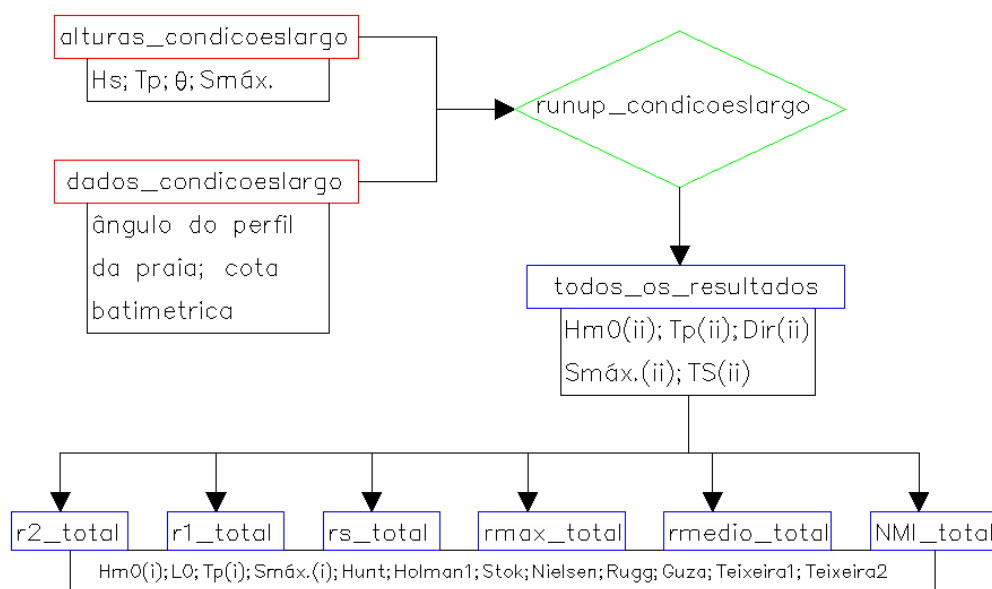


Figura 2.5. Esquema dos ficheiros de entrada e de saída do programa que determina o Nível Máximo de Inunda o através das formula es empíricas propostas pelos diversos autores

### 2.2.2.2. Metodologia de estima o do galgamento

No presente trabalho utilizou-se o conjunto de fórmulas empíricas apresentadas por Mase *et al.* (2013). Com o objetivo de colmatar a carência de uma metodologia para calcular o caudal galgado sobre estruturas de prote o costeira localizadas na costa ou em águas pouco profundas, os autores propuseram uma metodologia para esse efeito baseada no *runup*. Utilizando a altura, o período e a dire o de onda como dados iniciais e tendo em considera o alguns fen menos, como a refra o, esta   a metodologia que melhor se aplica às características da área de estudo e por isso foi a adotada.

Para conceber o conjunto de fórmulas de *runup*, Mase *et al.* (2013) utilizou dois conjuntos de dados experimentais, os dados de ensaios físicos realizados por Mase *et al.* (2004) e os dados obtidos em ensaios com três perfis de praia com declive de fundo de 1:10, 1:20 e 1:30 com estrutura com talude de declive entre 1:0.5 e 1:3. Os dados experimentais de Tamada *et al.* (2002) foram usados na validação das fórmulas de galgamento, tendo-se concluindo que existe uma boa concordância das mesmas quando confrontados os resultados obtidos com os dados medidos.

Tabela 2.3. Condições de aplicação na formulação de Mase *et al.* (2013)

<b>Condição</b>	<b>Valor</b>
<b>Escala do Modelo</b>	1:45; 1:50
<b>Espectro de onda</b>	Bretschneider-Mitsuyasu
<b>Altura de onda <math>H_0</math> (cm)</b>	3.80 – 12.82
<b>Período de onda <math>T_0</math> (s)</b>	0.8 – 2.1
<b>Declividade da onda <math>H_0/L_0</math></b>	0.009 – 0.06
<b>Altura da água <math>h</math> (cm)</b>	40.0; 42.5; 43.0; 45,0
<b>Declive do fundo (<math>\tan\theta</math>)</b>	1:10; 1:20; 1:30
<b>Declive da estrutura (<math>cot\alpha</math>)</b>	0.5 – 3.0

A metodologia, para facilitar a sua aplicação propõe a utilização das características das ondas em águas profundas como dados de entrada e adota o conceito de declive imaginário.

O declive imaginário define-se por uma linha que une dois pontos, um no pé do talude onde se dá a rebentação ( $h_b$ ) e outro no limite do *runup* (Saville, 1958). Ele é utilizado para calcular o *runup*, uma vez que, maioritariamente, o declive das estruturas de proteção não é uniforme. Mase *et al.* (2013) reformularam o conceito de declive imaginário tendo em conta a secção transversal da praia em frente à estrutura e o perfil da própria estrutura (Figura 2.6).

O declive imaginário reformulado por Mase *et al.* (2013) ( $cot\beta$ ), é determinado através da formula (21):

$$\frac{1}{\tan\beta} \approx cot\beta = \frac{2Area}{(h_b + R)^2} \quad (21)$$

onde  $h_b$  corresponde à profundidade da coluna de água no ponto de rebentação da onda, *Area* à área transversal da estrutura e da praia, entre o local de rebentação das ondas e o

nível de *runup* ( $R$ ). Por o declive imaginário depender do *runup* e vice-versa, trata-se de um processo iterativo.

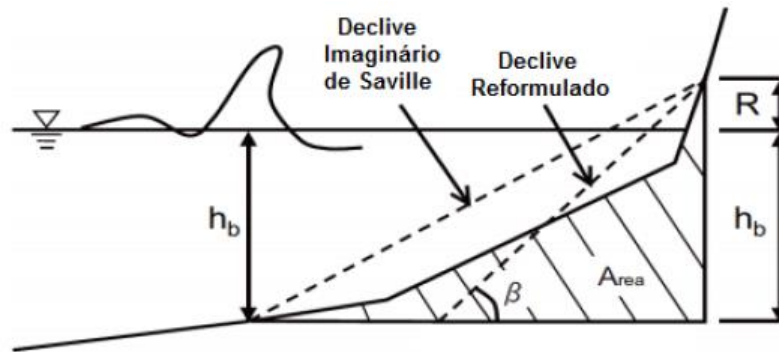


Figura 2.6. Esquema da reformulação do declive imaginário (Mase *et al.*, 2013)

A profundidade da coluna de água no ponto de rebentação da onda é determinada utilizando o modelo de Mase e Kirby (1993), um modelo simplista e preciso na determinação deste parâmetro para ondas irregulares. Ele relaciona, através de um diagrama (Figura 2.7), a declividade da onda ao largo ( $H_0/L_0$ ) e a altura de rebentação adimensional ( $h_b/H_0$ ), para valores de declive do fundo de 1:10, 1:20, 1:30 e 1:100, sendo que  $H_0$  representa a altura de onda significativa ao largo e o comprimento de onda ao largo ( $L_0$ ) é obtido pela equação (22), onde  $T_0$  representa a média do terço superior do período da onda ao largo.

$$L_0 = \frac{gT_0^2}{2\pi} \quad (22)$$

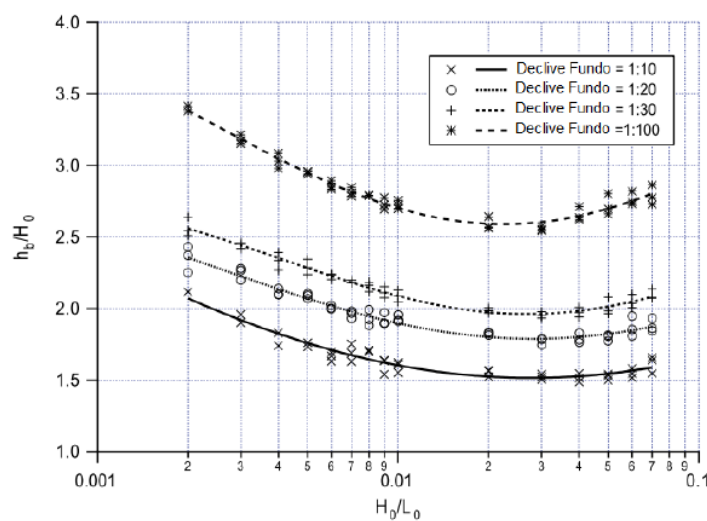


Figura 2.7. Diagrama que relaciona a altura de rebentação com a declividade da onda ao largo (Mase *et al.*, 2013)

Na Tabela 2.4 estão expostas as formulações que Mase *et al.* (2013) propuseram para calcular o *runup* e o caudal galgado para praias de estrutura de proteção aderente.

Tabela 2.4. Fórmulas adotadas para determinar o caudal galgado (Mase *et al.*, 2013) para praias com estrutura de proteção aderente

	Fórmulas	Condições de aplicação	
<b>Runup</b>	$R_{2\%} = H_0 \cdot \left( 2.99 - 2.73 \exp \left( -0.57 \tan\beta / \sqrt{H_0/L_0} \right) \right)$	$0.2 < \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_0/L_0}} < 0.4$	(23)
	$R_{1/10} = H_0 \cdot \left( 2.72 - 2.56 \exp - 0.58 \tan\beta / \sqrt{H_0/L_0} \right)$	$0.009 < \sqrt{H_0/L_0} < 0.06$	(24)
	$R_{1/3} = H_0 \cdot \left( 2.17 - 2.18 \left( \exp - 0.70 \tan\beta / \sqrt{H_0/L_0} \right) \right)$	$-0.37 < h/H_0 < 0.53$	(25)
	$R_{máx.37\%,100} \approx 1.52 \cdot R_{1/3} \approx 1.09 \cdot R_{2\%}$		(26)
	$R_{máx.99\%,100} \approx 2.15 \cdot R_{1/3} \approx 1.54 \cdot R_{2\%}$		(27)
<b>Caudal galgado</b>	$R_{máx.} = R_{máx.37\%,100}$		
	$q = 0$	$R_c \geq R_{máx.}$	(28)
	$q = \sqrt{gH_0^3} \cdot 0.018 \left( \frac{R_{máx.}}{H_0} \right)^{3/2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{R_c}{H_0} \right) / \left( \frac{R_{máx.}}{H_0} \right) \right)^{3.2}$	$0 \leq R_c < R_{máx.}$	(29)
	$R_{máx.} = R_{máx.99\%,100}$		
	$q = 0$	$R_c \geq R_{máx.}$	(30)
	$q = \sqrt{gH_0^3} \cdot 0.018 \left( \frac{R_{máx.}}{H_0} \right)^{3/2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{R_c}{H_0} \right) / \left( \frac{R_{máx.}}{H_0} \right) \right)^{6.24}$	$0 \leq R_c < R_{máx.}$	(31)

Nesta tabela  $R_{2\%}$  é o *runup* excedido por 2% de todos os *runup*'s,  $R_{1/10}$  é a média do décimo mais alto dos *runup*'s e  $R_{1/3}$  é a média do terço mais alto dos *runup*'s. As fórmulas apresentadas para calcular o caudal galgado e o  $R_{máx.}$  foram adaptadas da proposta de Hedges e Reis (1998). Esta formulação de Hedges e Reis (1998) é uma fórmula semi-empírica, equação (32), que assume que a estrutura tem um comportamento semelhante a um açude e, por isso, torna-se indispensável a determinação dos parâmetros empíricos A e B da fórmula. Foram adaptados dois métodos para definir  $R_{máx.}$ : o valor máximo de *runup* não excedido por 37% dos casos ( $R_{máx.37\%,100}$ ) e o valor máximo de *runup* não excedido por 99% dos casos ( $R_{máx.99\%,100}$ ), assumindo uma distribuição de Rayleigh e na incidência de 100 ondas.

$$\frac{Q}{\sqrt{g \times R_{máx.}^3}} = A \times \left( 1 - \frac{R_c}{R_{máx.}} \right)^B \quad \text{se } 0 < \frac{R_c}{R_{máx.}} < 1$$

$$\frac{Q}{\sqrt{g \times R_{máx.}^3}} = 0 \quad \text{se } \frac{R_c}{R_{máx.}} \geq 1 \quad (32)$$

em que  $R_c$  representa a altura entre a cota de coroamento da estrutura e o nível do mar e  $R_{m\acute{a}x}$ . o valor máximo de *runup*.

Pullen *et al.* (2007) sugerem que seja feita uma correção ao valor de caudal galgado, de forma a contemplar o nível de permeabilidade e rugosidade da berma da estrutura. Caso exista uma berma de coroamento permeável, de largura  $G_c$ , é aplicado um coeficiente de correção de redução do galgamento ( $C_r$ ).

$$C_r = 3.06 \times \exp\left(\frac{-1.5 \times G_c}{H_{m0}}\right)$$

$$C_r = 1 \quad \text{se } C_r > 1 \text{ ou } \frac{G_c}{H_{m0}} < 0.75$$
(33)

sendo o caudal final obtido através da expressão (34):

$$q_f = q \times C_r$$
(34)

Com o objetivo de determinar o galgamento em praias com estruturas de proteção costeira, aplicando a metodologia de Mase *et al.* (2013) de uma forma célere, Fortes *et al.* (2013b) concebeu um programa em linguagem FORTRAN, esquematizado na Figura 2.8.

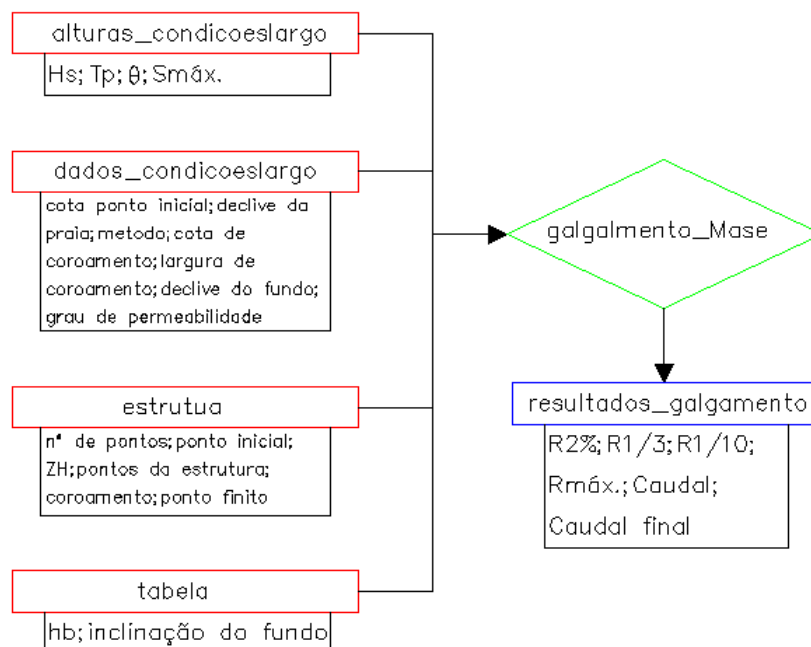


Figura 2.8. Esquema dos ficheiros de entrada e de saída do programa que determina o caudal médio galgado através das formulações empíricas propostas por Mase *et al.* (2013)

Para que o programa consiga fornecer os resultados, nomeadamente o comprimento de onda ao largo ( $L_0$ ), a declividade da onda ao largo ( $H_0/L_0$ ), a altura de rebentação adimensional ( $h_b/H_0$ ), a razão entre a profundidade do ponto inicial e o comprimento de onda, os *runup*'s ( $R_{2\%}$ ,  $R_{1/10}$ ,  $R_{1/3}$ ,  $R_{máx.}$ ), o caudal e o caudal final, afetado pelo fator de correção ( $C_r$ ), são necessários quatro ficheiros de entradas.

As metodologias apresentadas anteriormente já foram aplicadas em Portugal. Em 2010, Raposeiro *et al.* (2010) determinaram o *runup* na praia Vale do Lobo, em Loulé, através das fórmulas de Mase (1989), Nielsen e Hanslow (1991) e Teixeira (2009), onde os valores obtidos com as fórmulas de Mase (1989) mostraram-se afastados dos valores obtidos com as fórmulas dos outros autores. Mais tarde, Raposeiro *et al.* (2013), recorrendo a formulações de outros autores (como Hunt (1959), Holman (1986), Nielsen e Hanslow (1991), Raubenheimer e Guza (1996) e Stockdon *et al.* (2006)), aplicaram os princípios da metodologia anterior à Praia de S. João da Caparica, com dados relativos ao período entre 2006 e 2012. Os autores concluíram que, apesar das formulações diferentes, os valores obtidos para o *runup* foram semelhantes, sendo excluídos os extremos para o cálculo do valor médio, onde o valor mais elevado foi da formulação de Raubenheimer e Guza (1996) e o mais baixo da formulação de Nielsen e Hanslow (1991).

Neves (2013) aplicou as formulações empíricas apresentadas neste trabalho e, posteriormente, determinou o risco de inundação da Praia de S. João da Caparica. A autora concluiu que apenas Stockdon *et al.* (2006) apresentava valores afastado dos restantes, por isso foi excluído no cálculo do valor médio de *runup*. Em relação ao caudal galgado, a autora afirma que apesar dos valores serem elevados, a rondar os 200 l/s/m, não são de estranhar, pois os impactos que esses galgamentos têm na estrutura são visíveis.

Em 2014, Martinho (2014) aplicou a metodologia de Neves (2013), mas com condições diferentes no que concerne à agitação marítima e à morfologia do local de estudo, para determinar o risco de inundação de um conjunto de sete praias que limitam a zona costeira da Costa da Caparica (Praia de S. João da Caparica, Praia do Norte, Praia Santo António da Caparica, Praia do CDS, Praia do Tarquíneo/Paraíso, Praia do Dragão Vermelho e Praia Nova). A autora conclui que no período de estudo, 2007 a 2012, apesar de haver registos de fenómenos de *runup* e galgamento que provocaram destruição de bens materiais, os resultados obtidos com as formulações não evidenciam uma correspondência com as ocorrências documentadas na maioria dos casos.

### 2.2.3. Modelo XBEACH

Após os efeitos devastadores, especialmente durante as temporadas de 2004 e 2005, em costas arenosas dos Estados Unidos da América, por exemplo em junho de 2005 onde uma tempestade tropical provocou a morte de uma pessoa e prejuízos acima dos 3.5 milhões de dólares em Miami Beach, surgiu a necessidade de avaliar a vulnerabilidade das zonas costeiras e (re)projetar a proteção costeira para eventos futuros e também para avaliar o desempenho dos projetos de proteção costeira existentes.

Existem várias metodologias para avaliar a erosão de dunas perante condições severas de agitação marítima e têm sido aplicadas com sucesso (Vellinga, 1986; Steetzel, 1993; Nishi e Kraus, 1996; Larson *et al.*, 2004), mas são inadequadas para avaliar situações mais complexas em que o litoral tem variabilidade longitudinal significativa. Essa variabilidade pode resultar de causas antrópicas, como a presença de diques, ou de causas naturais, como a variação da altura da duna ao longo da costa (Thornton *et al.*, 2007). Assim nasceu o modelo XBEACH (Roelvink *et al.*, 2009), para avaliar o comportamento da praia quando sujeita a condições extremas de agitação marítima.

O XBEACH (Roelvink *et al.*, 2009) é um modelo numérico de código aberto (*open source*) que tem sido desenvolvido com grande financiamento por parte do *United States Army Corps of Engineers*, do *Rijkswaterstaat* e da União Europeia, apoiada pelo *UNESCO-IHE*, pela *Deltares*, pela *Delft University of Technology* e pela *University of Miami*. Distingue-se dos outros modelos, principalmente, pela capacidade de simular o transporte de sedimentos e alteração da forma do fundo, causada por tempestades, em áreas costeiras, praias, dunas e ilhas barreiras.

Inicialmente foi desenvolvido para simular, na escala de tempo da tempestade, processos hidrodinâmicos e morfológicos e impactos da agitação marítima em costas arenosas de grande extensão. Desde então, o modelo tem sido desenvolvido e aplicado a outros tipos de costas e propósitos, por exemplo, praias de cascalho.

O modelo inclui processos hidrodinâmicos de transformação de ondas curtas (refração, empolamento e rebentação), transformação de ondas longas (geração, propagação e dissipação), configuração do fundo induzida pelas ondas e pelas correntes variáveis, bem como o galgamento e a inundação em zonas costeiras. Os processos morfodinâmicos incluem o transporte de sedimentos por arraste e em suspensão, escorregamento do talude

da duna, alteração do fundo e erosão localizada da duna (*dune breaching*). Os efeitos da vegetação e de estruturas não erodíveis também são incluídos.

O XBEACH pode funcionar em dois modos: hidrostático e não hidrostático. No modo hidrostático, a variação de amplitude de ondas curtas é resolvida separadamente das ondas longas, das correntes e das alterações morfológicas. Isto poupa tempo considerável no processamento, uma vez que a fase das ondas curtas não é simulada. Um modelo mais completo é o modelo não hidrostático que resolve todos os processos, incluindo as ondas curtas, mas com maior exigência computacional. Este último, foi desenvolvido inicialmente como uma versão do modelo SWASH (Zijlema *et al.*, 2011).

A Figura 2.9 mostra a propagação das ondas na costa, usando o modelo XBEACH no modo hidrostático (painel superior) e no modo não hidrostático (painel inferior). No modo hidrostático, o nível médio da água está representado a azul claro, incluindo os movimentos do nível do mar e das ondas longas, já as ondas curtas são representadas como a energia de onda, na cor de azul escuro, e é resolvida na escala de grupo de onda. No modo não hidrostático do XBEACH todos as ondas e movimentos da água, isto é, nível do mar, as ondas curtas e as ondas longas, são resolvidas integralmente.

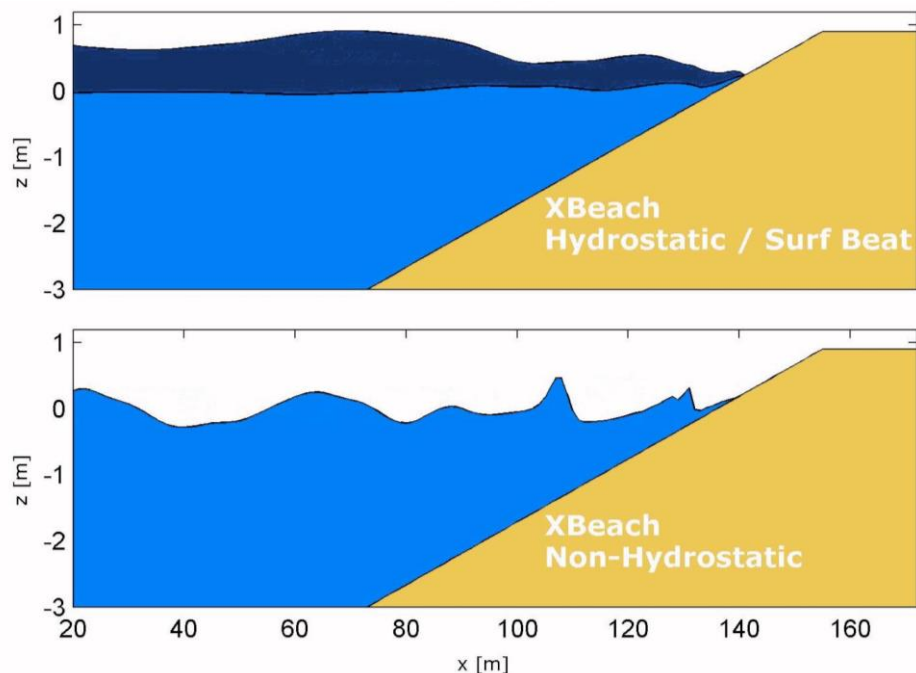


Figura 2.9. Propagação das ondas utilizando o modo hidrostático (painel superior) e o modo não hidrostático (painel inferior) no XBEACH [6]

### 2.2.3.1. Processos físicos costeiros

O XBEACH permite selecionar os processos que o utilizador deseja que o modelo inclua na simulação e assim ter, ou não, uma simulação mais aproximada da realidade. O modelo inclui uma variedade de processos físicos, entre os quais, a agitação marítima, as ondas geradas pelos movimentos de navios e as alterações morfológicas do perfil de praia.

Os processos físicos ativados por defeito:

- Ondas curtas (*swave*);
- Instabilização do talude do fundo ou avalanche (*avalanching*);
- escoamento (*flow*);
- Equações não linear de águas profundas forçadas pelas ondas curtas (*lwave*);
- Morfológico (*morphology*);
- Transporte de sedimentos (*sedtrans*);

Os processos inativados por defeito:

- Não hidrostático (*nonh*);
- Espraio de ondas curtas (*swrunup*).
- escoamento dos lençóis freáticos (*gwflow*);
- Série temporal da batimetria (*setbathy*);
- Ondas originadas de navios (*ships*);
- Refração das ondas para o modo estacionário (*single\_dir*);
- A lei do Snell para a refração das ondas (*snells*);
- Interação das ondas e do escoamento com a vegetação (*vegetation*).

A palavra-chave *swave* permite ativar a simulação da influência das ondas curtas, através da equação de balanço espectral da densidade de ação (35).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_{gx}A}{\partial x} + \frac{\partial c_{gy}A}{\partial y} + \frac{\partial c_{\theta}A}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (35)$$

onde  $A$  representa a direção espectral da ação da onda,  $\vartheta$  o ângulo de incidência, em relação ao eixo-x,  $\sigma$  a frequência intrínseca de onda,  $c_{\vartheta}$  a velocidade de propagação da onda no espectro e  $c_g$  a velocidade de propagação do grupo de onda no espaço.  $D_w$ ,  $D_f$ , e

$D_v$  são os termos que representam a dissipação de energia das ondas, proporcionado pela rebentação, pelo atrito do fundo e pela vegetação, respetivamente.

O processo instabilização do talude do fundo, ou avalanche, está integrado num conjunto de processos que definem a alteração/atualização do fundo e consiste numa metodologia para caracterizar o escorregamento do material arenoso ao longo do perfil transversal do fundo. A metodologia tem como base duas inclinações críticas, uma para o material seco e outra para o material molhado. A necessidade de duas inclinações críticas está relacionada com o facto de o material molhado ter maior facilidade em cair. Quando a inclinação crítica for excedida, o material é movido para as células adjacentes até que a inclinação volte para a crítica.

O processo físico identificado com a palavra-chave *flow* (escoamento) implementa as equações numéricas de águas pouco profundas que resolvem os movimentos de água no modelo. Este processo é especialmente relevante para águas muito pouco profundas, com o objetivo de tornar o comportamento das mesmas realista, por exemplo, impedindo a ocorrência de escoamento de retorno com elevada velocidade.

Segundo Tucker (1954), o espraiamento é maioritariamente devido às ondas longas, apesar da contribuição das ondas curtas. Portanto, é fundamental ativar processos que, partindo de ondas curtas, calculam ondas longas, através da palavra-chave *lwave*. O cálculo baseia-se nas equações numéricas não lineares de águas pouco profundas (NLSW) expostas na formulação *Generalized Lagrangian Mean* (GLM) (Andrews e McIntyre, 1978). Estas equações são forçadas através da evolução no tempo do balanço da ação de onda. O balanço é resolvido à escala temporal dos grupos de onda simulando, desta forma, o movimento oscilante devido às ondas infragravíticas.

Através da palavra-chave *morphology*, é possível ativar processos relacionados com a morfologia do fundo, por exemplo, a avalanche, que é considerado um subprocesso do processo morfológico. O modelo permite ainda controlar a velocidade de erosão, o que é adequado para situações em que o processo morfológico é muito mais lento do que o processo hidrodinâmico, bem como o período em que se dá a erosão e especificar uma zona em que o fundo não é erodível, dando a ideia que o mesmo é uma estrutura, por exemplo, feita de betão.

O fundo é alterado através do transporte de sedimentos, que pode ser ativado no modelo através da palavra-chave *sedtrans*. O processo contém variadíssimas equações e fatores

que influenciam o transporte dos sedimentos. Por isso, o modelo permite ajustar o efeito sobre o transporte de sedimentos, quer da forma de onda, quer da turbulência.

Outra forma de impor as alterações do fundo, é mencionar numa série temporal, através de um ficheiro externo, a profundidade de cada ponto. Este processo é ativado através da palavra-chave *setbathy*.

Ativando o modelo não hidrostático, pela palavra-chave *nonh*, o modelo fica responsável por todos os movimentos ondulatórios, incluindo ondas curtas, através das equações não lineares para águas pouco profundas, desativando automaticamente a equação de balanço da ação das ondas (*swave*).

O modelo calcula valores médios na coluna líquida relativos ao escoamento, devido às ondas e correntes utilizando as equações não lineares para águas pouco profundas, incluindo uma variação de pressão não hidrostática.

Já o processo definido pela palavra-chave *swrunup* permite que as ondas curtas tenham influência no espraçamento e, por isso, no Nível Máximo de Inundação.

O processo destinado às águas subterrâneas, ativado pela palavra-chave *gwwflow*, inclui a interação entre as águas superficiais e subterrâneas, utilizando os princípios da lei de Darcy para condições de escoamento laminar e para o escoamento turbulento de águas subterrâneas é utilizada uma parametrização de Forchheimer nos princípios da lei de Darcy. A interação ocorre de três formas básicas: o escoamento ganha água por influxo de água subterrânea (Figura 2.10), o escoamento perde água para a água subterrânea (Figura 2.10), ou o escoamento ganha água em alguns troços e perde noutros troços. Esta interação tem impactos no nível de água, devido ao ganho e perda de água no escoamento.

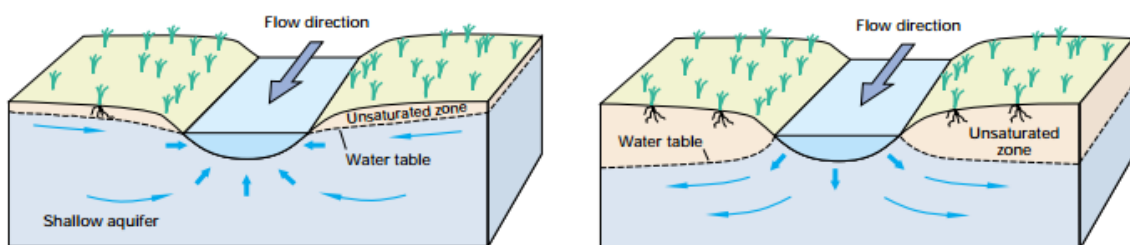


Figura 2.10. Exemplo de ganho (à esquerda) e perda (à direita) de escoamento para as águas subterrâneas (Winter, 1998)

As ondas provocadas por navios podem ser simuladas, com a palavra-chave *ships*, através da definição da geometria do casco e da trajetória dos navios. É aconselhável que a velocidade de cada navio aumente progressivamente, para que o modelo não produza impactos irrealistas. Existem dois tipos de ondas geradas pelos navios: ondas divergentes e ondas transversais. As primeiras têm origem nos costados do navio e têm cristas inclinadas em relação ao plano de simetria do navio, já as segundas formam-se nas amuras e têm cristas perpendiculares ao plano de mediania. As ondas geradas são de diferentes períodos, alterando a pressão e o nível de água, que influência alguns processos físicos, como o espraiamento (Figura 2.11).



Figura 2.11. Ondas induzidas pelo navio no laboratório do Instituto Nacional de Engenharia Hidráulica da Alemanha [7]

O processo *single\_dir* permite resolver a direção das ondas em intervalos regulares, utilizando o modo estacionário, e propagar a energia das ondas ao longo da direção média de onda.

A palavra-chave *snells* permite ativar a lei de Snell's, que determina a direção média das ondas e gera correntes longitudinais. Este processo é recomendado quando as ondas têm direção oblíqua em relação às batimétricas.

O modelo, através do processo *vegetation*, permite simular a dissipação das ondas curtas, das ondas longas e do escoamento devido à vegetação. É possível especificar um número indeterminado de espécies, indicando a altura, o coeficiente de arrastamento, o diâmetro e a densidade de cada seção da mesma. Este processo conduz a uma maior dissipação e, por isso, influi na rebentação da onda e/ou a velocidade do escoamento.

Para completar as formulações que caracterizam cada processo físico costeiro, é solicitada a definição dos parâmetros relevantes. Contudo, nos projetos de engenharia, onde é de grande utilidade a aplicação deste tipo de modelos, é muitas vezes inviável a medição de alguns parâmetros. Para ultrapassar esta dificuldade, os autores do modelo recomendam a utilização de alguns valores por omissão (conjunto de parâmetros definidos por valores padrão), que são apresentados na Tabela 2.5. Os autores mencionam ainda algumas aplicações do modelo conhecidas, onde descrevem os parâmetros mais sensíveis e por isso que têm maior influência nos resultados.

Vousdoukas *et al.* (2011) aplicou o modelo para o caso real de uma praia refletiva, mencionando que os parâmetros com maior resposta morfológica foram *facua*, *lws* e *wetslp*. Numa outra aplicação do modelo, Branderburg (2010) sem detalhar pormenores, em modelos experimentais de pequena escala, recomenda o teste aos parâmetros *hmin*, *eps*, *turb*, *morfac*, *wetslp*, *hswitch*, *dzmax* e *Tsmin*. Oliveira (2011), ao validar o modelo, para um perfil barra-fossa conclui que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica, naquele caso de estudo, são *break*, *gammax*, *facua*, *lws*.

Neste trabalho, procurou-se compreender de que modo os parâmetros podem influenciar os resultados, principalmente, os descritos anteriormente.

*Facua* é um parâmetro que engloba dois parâmetros, para que de uma única vez eles sejam modificados. Ele contém os parâmetros *facSk* ( $f_{Sk}$ ) e *facAs* ( $f_{As}$ ), sendo estes fatores de calibração que determinam o efeito da forma da onda no transporte de sedimentos, afetando a velocidade de sedimentação ( $u_a$ ), equação (36), mais propriamente, as velocidades orbitais ( $S_k$  e  $A_s$ ) na formulação proposta por Van Thiel de Vries (2009), que também inclui a velocidade média quadrática ( $u_{rms}$ ):

$$u_a = (f_{Sk}S_k - f_{As}A_s)u_{rms} \quad (36)$$

O parâmetro *lws* está relacionado com uma das velocidades que influencia a sedimentação das partículas, permitindo ativar ou desativar a agitação da água provocada por ondas longas, elegendo a formulação para determinar a mesma. Se estiver ativada, a velocidade ( $v$ ) é determinada pela velocidade Euleriana, equação (37), na direção x ( $u^E$ ) e na y ( $v^E$ ), e no caso de estar desativada, a mesma é determinada pela soma (38) de um fator de velocidade no passo (simulação) anterior ( $v^{n-1}$ ) e da corrente média, baseada num fator ( $f_{cats}$ ) do período da onda ( $T_{rep}$ ) e na velocidade Euleriana.

$$v = \sqrt{(u^E)^2 + (v^E)^2} \quad (37)$$

$$v = \left(1 - \frac{dt}{f_{cats}T_{rep}}\right)v^{n-1} + \frac{dt}{f_{cats}T_{rep}} \cdot \sqrt{(u^E)^2 + (v^E)^2} \quad (38)$$

Para simular o escorregamento do material arenoso, principalmente na face da praia, induzido pelas tempestades, o modelo está apetrechado de um processo de avalanche. Ele é introduzido através do uso de uma inclinação crítica do fundo, tanto para a área molhada (*wetslp*) como para a seca (*dryslp*), como já foi explicado neste subcapítulo. O parâmetro *dzmax* e *hswitch* também influenciam os processos morfológicos. O primeiro impede mudanças bruscas do fundo, através da limitação do nível máximo que as partículas podem ser movidas, evitando a geração de grandes ondas de choque. O segundo caracteriza a que profundidade da água é alterada a inclinação crítica.

Os parâmetros *hmin* e *eps* estão ligados ao processo *flow* que envolve os aspetos das equações numéricas de águas pouco profundas, que foram apresentadas anteriormente. Para evitar um comportamento irrealista, alguns parâmetros podem ser controlados: *hmin* impede escoamentos de retorno com elevada velocidade e o *eps* estabelece o limiar para a altura da coluna líquida acima do qual se pode considerar que um ponto de cálculo está molhado.

A rebentação das ondas pode ser determinada de cinco formas diferentes, selecionada através do parâmetro *break*. Geralmente é utilizada a formulação alargada de Roelvink (1993). É representada pela equação (39) que tem como base a formulação original de Roelvink (1993), sendo que a principal diferença é que na formulação alargada a dissipação é proporcional a  $H^3/h$  em vez de  $H^2$ , da formulação original.

$$D_w = 2 \frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \frac{H_{rms}}{h} \quad (39)$$

onde  $\alpha$  representa o coeficiente de dissipação da onda,  $T_{rep}$  o período da onda,  $Q_b$  a fração de ondas rebentadas,  $E_w$  a energia da onda,  $H_{rms}$  a altura de onda média quadrática e  $h$  a altura da água.

Outro parâmetro estudado que também influencia a rebentação das ondas é o *gammax*, representando a relação máxima entre a altura da onda e a profundidade da água e

determinante na obtenção da fração de ondas rebentadas ( $Q_b$ ) da equação (39). Por exemplo, reduzindo o  $\gamma_{max}$  irá reduzir a altura das ondas em águas muito pouco profundas, o que provocará uma rebentação prematura.

A turbulência induzida pela rebentação da onda na superfície da água é transportada para o fundo de modo a afetar a agitação dos sedimentos. Roelvink e Stive (1989) desenvolveram uma formulação, equação (40), para estimar a variação da turbulência no fundo ( $k_b$ ), através do decaimento exponencial que relaciona a altura da água ( $h$ ) com altura de onda média quadrática ( $H_{rms}$ ) junto à costa. Através do parâmetro  $turb$  é possível definir se o processo é ativado ou não.

$$k_b = \frac{k}{\exp(h/H_{rms}) - 1} \quad (40)$$

onde  $k$  corresponde à variação média da turbulência à superfície da água.

A atualização do fundo pode ser afetada por um fator morfológico de aceleração,  $morfac$ . Ele acelera a escala de tempo morfológica em relação à escala de tempo hidrodinâmica, sendo adequado para situações em que o processo morfológico é muito mais lento do que o processo hidrodinâmico. Por exemplo, para uma simulação em que valor de  $morfac$  é igual a 10, ocorrem 10 vezes mais erosão e deposição em cada passo de cálculo do que o habitual.

Tabela 2.5. Parâmetros do XBEACH importantes para o presente projeto e respectiva descrição, unidade, intervalo recomendado e valor padrão

Condição	Parâmetro	Descrição	Unidades	Intervalo recomendado	Valor padrão
Condições de onda	<i>break</i>	Opção formulação rebentação	-	1 - 5	3
	<i>wci</i>	Opção interação onda corrente	-	0 - 1	0
	<i>gamma</i>	Parâmetro de rebentação na formulação de Baldock ou Roelvink	-	0.4 - 0.9	0.55
	<i>gammamax</i>	Razão máxima altura de onda/profundidade ( <i>Hrms/hmax</i> )	-	0.4 - 5	2
	<i>alpha</i>	Coefficiente de dissipação da onda	-	0.5 - 2	1
	<i>delta</i>	Fração da altura de onda a adicionar à profundidade	-	0 - 1	0
	<i>n</i>	Potência no modelo de dissipação de Roelvink	-	5 - 20	10
	<i>lws</i>	Opção ondas infragravíticas	-	0 - 1	1
Condições de escoamento	<i>C</i>	Coefficiente de Chézy	$m^{1/2}s^{-1}$	-	55
	<i>nuh</i>	Viscosidade horizontal	$m^2s^{-1}$	0 - 1	0.1
	<i>nuhfac</i>	Coefficiente de calibração da viscosidade horizontal no modelo de Battjes	-	0 - 1	1
	<i>eps</i>	Profundidade mínima para inundação	m	0.001 - 0.1	0.005
	<i>hmin</i>	Profundidade mínima para cálculo da velocidade da corrente de retorno	m	0.001 - 1	0.2
Condições de transporte morfodinâmica	<i>hswitch</i>	Profundidade mínima (na interface de <i>wetslp</i> para <i>dryslp</i> )	m	0.01 - 1	0.1
	<i>wetslp</i>	Declive crítico de avalanche submersa	-	0.1 - 1	0.3
	<i>dryslp</i>	Declive crítico de avalanche emersa	-	0.1 - 2	1
	<i>morfac</i>	Fator morfológico	-	0 - 1000	1
	<i>facsl</i>	Fator declive na formulação do transporte de sedimentos	-	0 - 1.6	1.6
	<i>turb</i>	Opção cálculo concentração sedimentar de equilíbrio	-	1 - 3	3
	<i>facua</i>	Opção de assimetria de ondas curtas	-	0 - 1	0.1

Condição	Parâmetro	Descrição	Unidades	Intervalo recomendado	Valor padrão
Condições numéricas	<i>CFL</i>	Máximo número de Courant para estimar o passo de cálculo automaticamente	-	0.1 - 0.9	0.7
Condições de fronteira	<i>order</i>	Geração de ondas (1 = 1ª ordem; 2 = 2ª ordem)	-	1 - 2	2
	<i>front</i>	Condição fronteira lado mar	-	1 - 6	2
	<i>back</i>	Condição fronteira lado terra	-	1 - 4	3
	<i>left</i>	Condição fronteira lateral esquerda	-	1 - 4	1
	<i>right</i>	Condição fronteira lateral direita	-	1 - 4	1
Condições dos sedimentos	<i>D50</i>	Dimensão do grão	m	0.0001 - 0.0008	0.0002
	<i>ngd</i>	Número de tipos de sedimentos	-	1 - 20	1
	<i>Rhos</i>	Densidade do sedimento	kgm <sup>3</sup>	2400 - 2800	2650
	<i>por</i>	Porosidade	-	0.3 - 0.5	0.4

### 2.2.3.2. Dados de entrada (*input's*)

Os dados de entrada do modelo XBEACH podem ser consultados no manual (Roelvink *et al.*, 2015). Neste subcapítulo apenas se referem os dados que foram relevantes para o presente trabalho, nomeadamente:

- Grelha, quer a que especifica a direção de propagação das ondas que entram na região em estudo, quer a que define a zona em estudo (domínio);
- Batimetria;
- Características da agitação marítima incidente;
- Nível do mar;
- Morfologia do perfil;
- Tempo da simulação.

A grelha definidora da região em estudo é retangular e caracteriza-se pelo número de espaçamentos ( $nx$  e  $ny$ ) entre os pontos no eixo das abcissas ( $x$ ) e das ordenadas ( $y$ ), que são distribuídos, com espaçamentos variáveis, a partir de um ponto de origem ( $x_{ori}, y_{ori}$ ) e, se aplicável, podendo aqueles eixos ser rodados de um determinado ângulo ( $\alpha$ ). (Figura 2.12). A inserção destes dados pode ser simplificada se os espaçamentos entre os pontos, que compõem o domínio, forem iguais, ou se for utilizada uma grelha Delft3D, que indica, num único ficheiro, os pontos constituintes do mesmo. Quanto menor o espaçamento entre pontos, mais detalhada será a simulação.

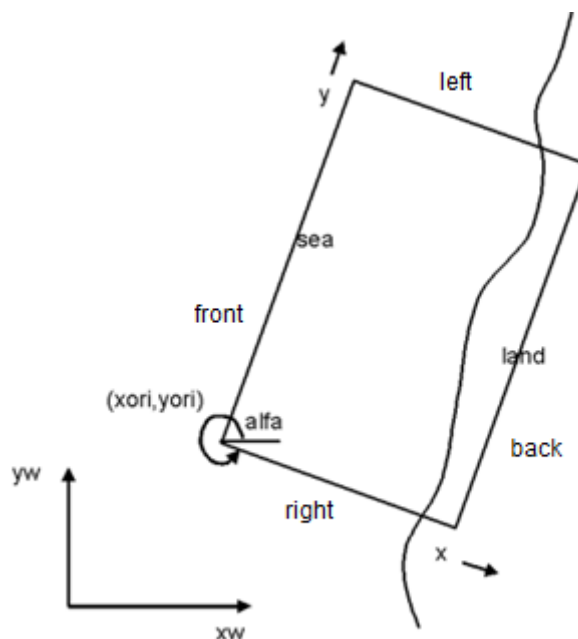


Figura 2.12. Grelha definição do domínio no XBEACH (den Bieman, 2013)

Já a grelha da direção da propagação das ondas, é definida por um intervalo de ângulos ( $\theta_{min}$  e  $\theta_{max}$ ), esses ângulos definem o intervalo que as direções das ondas podem tomar ( $d\theta$ ), como se pode observar na Figura 2.13.

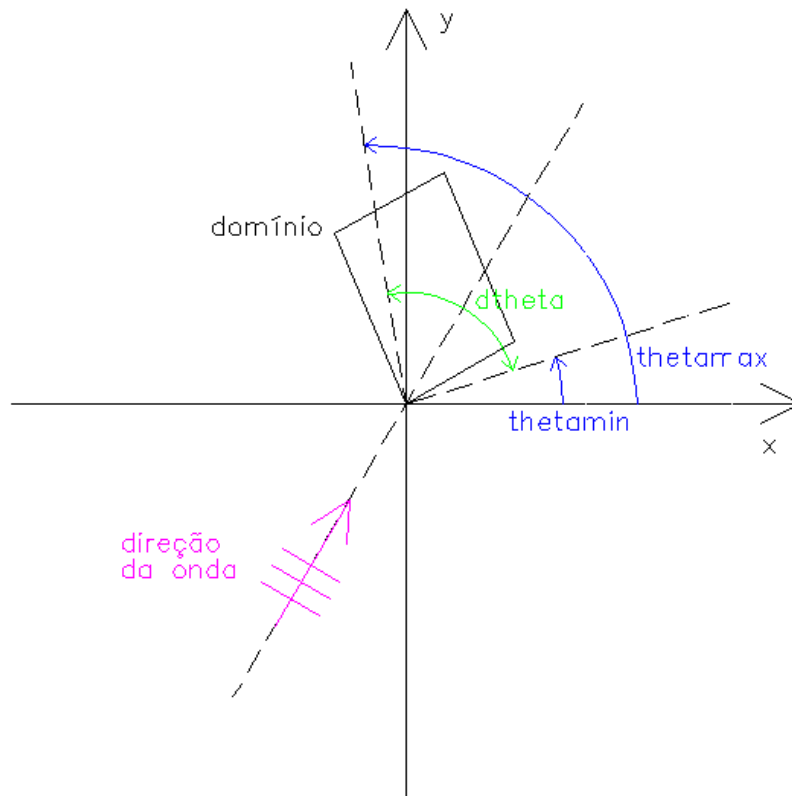


Figura 2.13. Grelha definição das direções das ondas no XBEACH (adaptado de Bieman, 2013)

A batimetria é fornecida por um ficheiro externo (bed.dep), acompanhada por outro(s) ficheiro(s) (x.grd e y.grd) que identificam as coordenadas do ponto a que a profundidade corresponde.

As condições de fronteira, para além dos parâmetros mencionados anteriormente, também são definidas pelo tipo de caracterização da agitação marítima. A caracterização pode ser espectral, não espectral e especial.

A par do tipo de caracterização da agitação marítima, a variação temporal do nível do mar também influencia a definição das condições de fronteira. A variação pode ser imposta em uma, em duas, ou, até mesmo, nas quatro fronteiras do domínio. Existe ainda a opção de definir o nível maré, nas fronteiras, constante ao longo do tempo.

Com o objetivo de melhorar a simulação, poderá ser fornecido um ficheiro que, de alguma forma, caracteriza a morfologia do domínio. O ficheiro indica a espessura da camada que

é possível de ser erodida. Assim, por exemplo, onde o domínio é definido por estruturas de proteção a espessura da camada erodível torna-se nula.

A simulação baseia-se em determinadas condições de agitação marítima, por isso o tempo da simulação é definido através da duração da tempestade selecionada.

É de referir que a influência do vento foi considerada desprezável, devido ao domínio não ser de grande extensão, não abrangendo zonas ao largo onde são originadas as ondas.

### 2.2.3.3. Resultados do modelo (*output's*)

Denominam-se de resultados do modelo (*output's*) aqueles que o utilizador pretende com a simulação. Eles podem ser globais e/ou pontuais, quer médios quer instantâneos. É necessário definir o tipo de *output's* que se pretende, e no caso de serem instantâneos, é recomendado definir o intervalo de tempo entre cada registo dos resultados, bem como o instante em que se pretende iniciar esse registo. É, ainda, essencial indicar os resultados pretendidos, indicando a palavra chave (*keyword*) que identifica cada um deles. Na Tabela 2.6 indicam-se alguns tipos de resultados do modelo XBEACH.

Tabela 2.6. Exemplos de resultados do modelo XBEACH

		<i>Output's</i>		Unidades
		<i>keyword</i>	Descrição	
Tipo	Globais instantâneos	<i>breaking</i>	Indicador se a célula tem ondas não hidrostáticas rebentadas	-
		<i>zb</i>	Nível do fundo	m
		<i>zs</i>	Nível de água	m
		<i>H</i>	Altura média quadrática ( $H_{RMS}$ ) das ondas	m
		<i>E</i>	Energia de onda	Nm/m <sup>2</sup>
		<i>runup</i>	Espraio de ondas curtas	m
		<i>xHrunup</i>	Local em que a altura de onda curta se torna espraio	m
		<i>iwl</i>	Localização da linha de água (incluindo espraio)	-
	Pontuais instantâneos	<i>zs</i>	Nível de água	m
		<i>vg</i>	Velocidade GLM (componente y)	m/s
		<i>ug</i>	Velocidade GLM (componente x)	m/s
		<i>v</i>	Velocidade Eulerian (componente y)	m/s
		<i>u</i>	Velocidade Eulerian (componente x)	m/s
		<i>urms</i>	Velocidade orbital	m/s

Embora o modelo forneça vários tipos de resultados (consultar no manual, Roelvink *et al.*, 2015) aqui apenas se mencionam 8 *output's* globais e 6 pontuais, para 2 pontos distintos (sendo um deles considerado uma sonda). A Tabela 2.6 faz uma síntese destes resultados.

O modelo produz essencialmente 4 ficheiros. Um ficheiro com os resultados da simulação (xboutput.nc), outro onde registou os dados utilizados e os processos físicos considerados (XBlog.txt), juntamente, com um ficheiro que contém os erros (XBerror.txt), se houverem, e um que possui os dados que foram admitidos fora dos intervalos recomendados e, por isso, de algum risco para uma simulação fiável (XBwarning.txt).

No diagrama da Figura 2.14 é possível observar-se, de uma forma sintetizada e esquematizada, o funcionamento do modelo XBEACH.

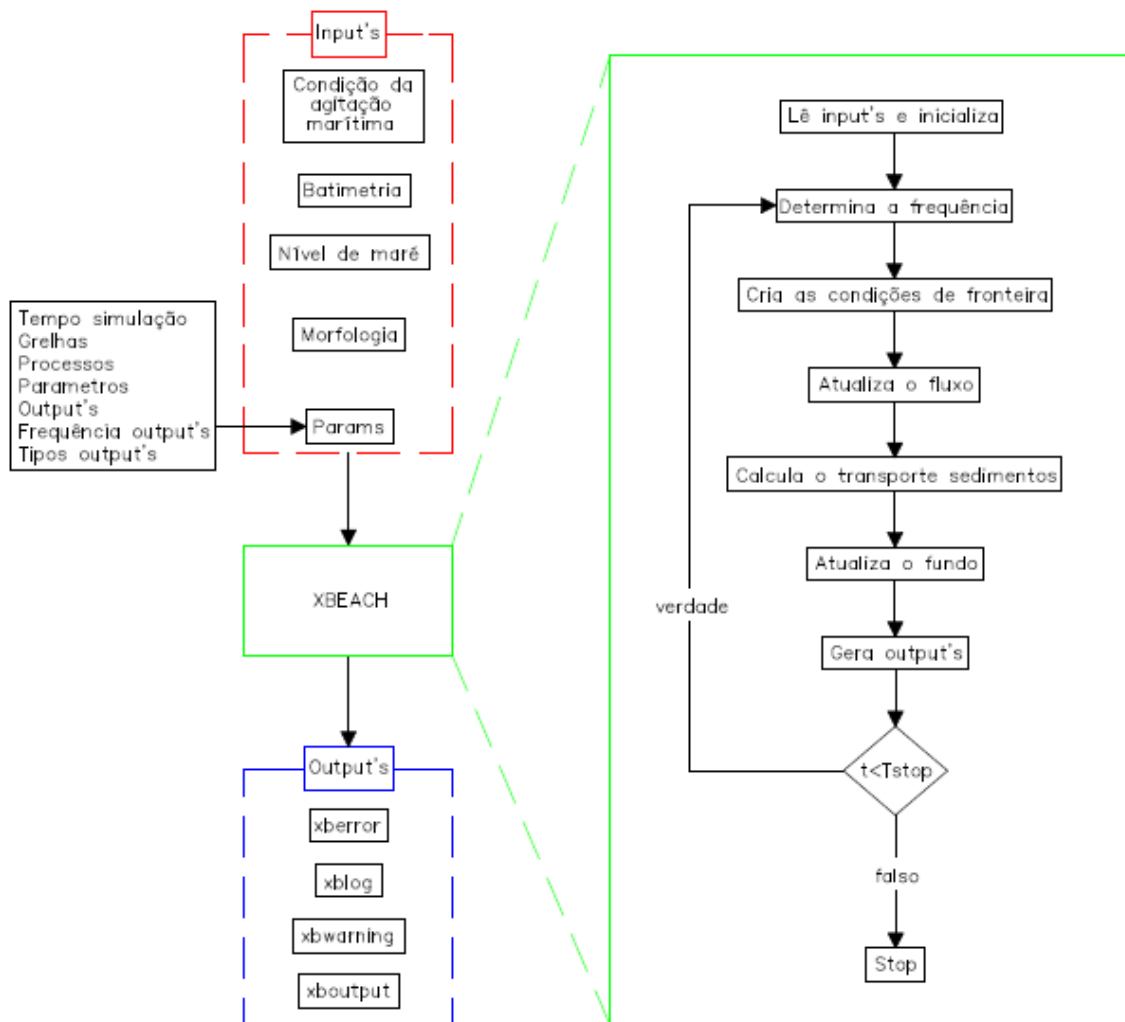


Figura 2.14. Esquematização do funcionamento do XBEACH

#### **2.2.3.4. Metodologia de estimação do Nível Máximo de Inundação (NMI)**

O modelo tem uma ferramenta que permite analisar o espraio (*runup gauge output*) e assim determinar os níveis máximos de inundação. A série temporal da variação da linha de água, que inclui o nível do mar e o espraio, é registada através da posição de um ponto, que acompanha a linha de água. O ponto é estabelecido pelo utilizador e o modelo transpõe, o mesmo, para a fiada da grelha de cálculo, na direção  $x$ , mais próxima. Posteriormente, o modelo fornece a variação do ponto nessa secção, que acompanha a linha de água e é semelhante à variação do ponto inicialmente indicado, devido à proximidade.

Esta metodologia é aplicada, principalmente, às secções constituídas por dunas e que não tenham qualquer tipo de proteção costeira.

#### **2.2.3.5. Metodologia de estimação do galgamento**

A determinação do volume de água que transpõe o coroamento das estruturas marítimas, em zonas portuárias e costeiras, é um assunto de elevada importância para a avaliação, quer do risco de falha das próprias estruturas, quer dos riscos associados à inundação destas zonas.

Existem vários métodos para determinar o caudal médio galgado, sendo que os modelos físicos são aqueles que têm melhores resultados, devido à maior facilidade em modelar fenómenos complexos como a rebentação junto à estrutura, que forma grande turbulência, quando comparados com a modelação numérica (Neves, 2013). Devido à morosidade e ao elevado custo dos ensaios em modelos físicos, e à dificuldade em compreender, reproduzir e regular todas as variáveis que interferem no galgamento dos mesmos, têm sido utilizados modelos numéricos que têm capacidade de incorporar mais informação, através da resolução computacional de equações e algoritmos matemáticos (Silva *et al.*, 2012).

O XBEACH não está apetrechado de uma ferramenta que calcula diretamente o caudal médio galgado, que podia ser solicitado nos *output's*. Assim, recorre-se à série temporal do nível de água ( $z_s$ ) e da sua velocidade, na componente horizontal, ( $u$ ), registada num ponto situado no coroamento da estrutura, para determinar o caudal galgado ( $q$ ), equação (41). Subtraindo o valor da cota do coroamento ( $Z_{máx.}$ ) obtém-se a diferença entre a cota da superfície da água e a do coroamento ( $Z_d$ ).

$$q_i = Z d_i \cdot u_i \cdot 1ml \quad (41)$$

em que  $i$  representa o instante da série temporal.

A metodologia apresentada na Figura 2.15, é aplicada às secções que contenham algum tipo de proteção costeira.

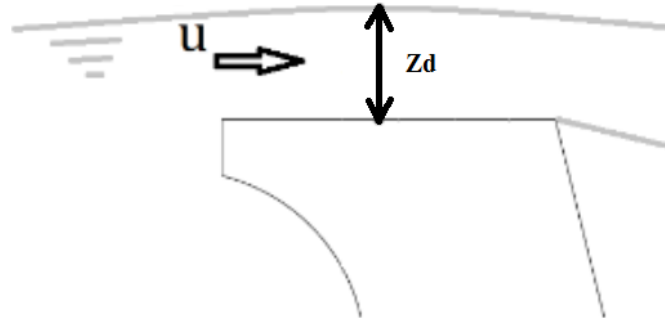


Figura 2.15. Esquema do funcionamento da metodologia aplicada no modelo XBEACH para determinar o caudal galgado

#### 2.2.3.6. Validação

O modelo tem sido validado com uma série de casos analíticos, laboratoriais e de campo, utilizando um conjunto de parâmetros padrão (*standard set of parameter settings*), com o objetivo de melhoria contínua.

Mehvar *et al.* (2015) testou a capacidade do modelo, no modo 1D com a abordagem não hidrostática, para estimar o espraiamento em diques costeiros impermeáveis. O modelo foi utilizado para simular 27 condições de agitação marítima, 21 das quais correspondentes a ensaios em modelo físico reduzido e 6 a medições de campo. O perfil utilizado foi esquematizado a partir de um perfil resultante de um levantamento realizado numa praia em Petten, na Holanda, do tipo barra-fossa, e composto por vários troços, em que o declive vai acentuando com o aproximar da costa, variando entre 1:100 e 1:3, sendo que os declives máximos formam o dique. As características da condição de agitação marítima, para obter resultados comparáveis com os medidos no campo, variam entre 3.10 m e 4.80 m, para a altura de onda significativa, e entre 8.70 s e 16.20 s, para o período de pico. Já para comparar com os resultados obtidos nos ensaios a altura de onda significativa varia entre 2.00 m e 6.20 m e o período de pico entre 6.80 s e 18.50 s. Os autores concluíram haver uma boa concordância entre os resultados do modelo numérico com o modelo físico e uma subestimativa, cerca de 2%, com os resultados medidos no

campo, na estimativa do nível de espraiamento em um perfil esquematizado. Afirmam ainda que as diferenças podem ser causadas pelo efeito na corrente provocado pela barra-fossa e pela dissipação da onda, que pode influenciar consideravelmente a variação do nível de água e o nível de espraiamento.

O projeto MICORE (Van Dongeren *et al.*, 2009) teve como um dos objetivos contribuir para o desenvolvimento de um mapeamento probabilístico do impacto morfológico, em praias europeias, causado por tempestades marítimas, aplicando o modelo XBEACH para prever a erosão litoral. A validação do modelo foi realizada comparando os resultados deste modelo com os dos modelos que são/eram utilizados [como o Litprof (Broker *et al.*, 1991; Elfrink *et al.* 2000; DHI, 2009 [8]), o SMC (U. Cantabria, 2009), o SBeach (Larson e Kraus, 1989; Larson *et al.*, 1990; Larson *et al.*, 2004), o IO-BAS (Trifonova, 2007) e o Durosta (Steetzel, 1993)] em diversas zonas costeiras europeias [Lido di Dante-Lido di Classe em Ravenna (Itália), a Praia de Faro (Portugal), as praias urbanas da Baía de Cádiz (Espanha), Lido de Sète (França), o estuário do Dee (Reino Unido), a praia de Egmond (Holanda), a praia de Mariakerke (Bélgica), a restinga de Dziwnów (Polónia) e a praia de Kamchia-Shkorpilovtsi (Bulgária)]. Os dados de campo foram recolhidos no outono de 2008 e são compostos pelo nível do mar, altura das ondas e a morfologia pré e pós-tempestade. Por não terem ocorrido grandes tempestades no norte da Europa, foram utilizados dados históricos para os locais pertencentes à Bélgica, a Holanda e ao Reino Unido.

Em Faro, o estudo foi feito nas ilhas barreiras da Ria Formosa por Vousdoukas *et al.* (2011). Numa zona em que, geralmente, o pico do nível do mar é de 3.5 m, a média anual da altura de onda significativa 1 metro e o período de pico 8.2 s (Costa *et al.*, 2001), foram impostas condições de agitação marítima registadas numa tempestade durante o inverno de 2008/2009. Durante, aproximadamente, 24 horas e em maré de águas vivas, a praia foi exposta a ondas oriundas de oés-sudoeste (WSW) com a altura de onda significativa atingir os 5 m e o período de pico os 8.5 s. O modelo foi executado para cinco perfis, espaçados de 500 m, distribuídos ao longo do local de estudo, apesar da tempestade não ser excecional, observaram-se galgamentos ao longo das várias secções, com grandes impactos ao nível dos bens materiais e das infraestruturas. Os resultados mostram, de forma consistente, que o XBEACH tem capacidade na previsão do perfil costeiro, embora, na maioria dos casos, a erosão em torno da linha de água é, significativamente, sobrestimada e a deposição, na face inferior da praia, é igualmente sobrestimada.

Após a ocorrência de galgamentos, em janeiro de 2014, na Imperial Beach, no sul da Califórnia, Gallien e Guza (2015) avaliaram as previsões do XBEACH comparando os resultados com as ocorrências registradas. Foram recuperados os dados da boia ondógrafo localizada ao largo, a cerca de 25 km a oeste do local, e, utilizando o SWAN, os dados (a altura de onda significativa, o período de pico e a direção de onda) foram transpostos para junto à costa, para as profundidades de 40 e 10 m. Analisando os resultados, os maiores resultados fizeram-se sentir para os dados referentes à profundidade de 10 m e para o modo não hidrostático. Quando a simulação começa com os valores transferidos para a profundidade de 10 m, o espraçamento obtido com o modo não hidrostático é em média entre 21 a 31 cm superior ao obtido com o modo hidrostático e o volume galgado triplica. Os autores concluíram que o modelo simulou um espraçamento máximo semelhante ao registrado, que o volume galgado é extremamente sensível ao crescimento do espraçamento, e que o espraçamento máximo e o volume galgado foram fortemente influenciados pela profundidade onde o modelo iniciou a simulação (à profundidade de 40 e 10 m).

Em Portugal, Oliveira (2011) avaliou o modelo no que concerne à erosão de praias e dunas, comparando o desempenho do modelo XBEACH com o do modelo Litprof (DHI, 2009) (um dos mais eficazes nesta área), com o objetivo de melhorar a avaliação/previsão da vulnerabilidade de praias à ação de tempestades marítimas. Tendo em consideração um espectro de Pierson Moskowitz da onda incidente com altura significativa igual a 1.5 m, período de pico a 4.9 s e duração 6 horas. Para um perfil do tipo barra-fossa, a autora conclui, com base num indicador de erro, que o XBEACH apresenta um melhor desempenho. No entanto, recomenda que se aplique o modelo Litprof num caso semelhante, pois a geometria do perfil numérico, resultante do modelo Litprof, é a que mais se aproxima do perfil observado. Foi feita ainda uma calibração, onde se verificou que os parâmetros *facua* e *lws*, descritos na Tabela 2.5, foram aqueles que permitiram uma geometria mais próxima da configuração barra-fossa observada.

Com o objetivo de avaliar a variação temporal da resposta de um perfil praia à ação erosiva de uma tempestade marítima, Oliveira (2012) aplicou três modelos matemáticos de morfodinâmica: XBEACH (Roelvink, 2009), Litprof (DHI, 2008) e Duner (Oliveira, 2012). Foram consideradas as mesmas condições de agitação marítima utilizadas por Oliveira (2011), enquanto que o perfil utilizado foi de uma praia com duna, em que foi estudada a sua erosão em canal de grande escala em modelo reduzido de laboratório. O

desempenho dos modelos foi avaliado com base na análise da evolução morfológica do perfil e em indicadores de erro (*Brier Skill Score*) e de impacto (volume de erosão e o recuo do perfil). Dos três modelos testados, o XBEACH foi aquele que apresentou o melhor desempenho, ainda que os restantes também tenham reproduzido a erosão da duna. Considerando os parâmetros calibrados, os resultados melhoraram, havendo uma maior concordância entre a configuração do perfil com a configuração experimental. A autora conclui que para além do modelo apresentar um excelente desempenho, é um modelo aberto a futuros desenvolvimentos por parte da comunidade científica, possibilitando a alteração (introdução e/ou melhoria) do tratamento matemático dos processos físicos envolvidos na morfodinâmica costeira, por isso tem um elevado potencial na avaliação e previsão da vulnerabilidade de dunas.

Para as mesmas condições, Oliveira (2013) aplicou, testou, avaliou e comparou três modelos numéricos de morfodinâmica, entre eles, o modelo XBEACH (Roelvink, 2009; Roelvink, 2010), o modelo Delft3D (Deltares, 2011) e o modelo Duner (Oliveira, 2012). O objetivo passou por melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas praia-duna à ação das ondas e da sobrelevação do nível do mar em condições de tempestade marítima, caracterizadas por vento forte e pressão atmosférica baixa, causadoras de eventos de agitação marítima de energia elevada e sobrelevação do nível do mar. Segundo a autora, o XBEACH foi o modelo que apresentou melhor similaridade, entre os resultados numéricos e experimentais, e aquele que demonstrou um melhor desempenho, avaliado por dois tipos de indicadores de avaliação do desempenho: indicadores de erros (*Brier Skill Score*) e de impacto (volume de erosão e o recuo do perfil). Os modelos foram avaliados considerando os parâmetros por defeito e calibrados, todos eles apresentaram um melhor desempenho quando considerados os parâmetros calibrados.

# Capítulo 3 – Caso de estudo: Praias da Costa da Caparica

O presente capítulo efetua uma descrição geral da zona de estudo, começando por uma caracterização do local, passando pela evolução e dinâmica da costa e terminando na descrição das praias em estudo.

## 3.1. Caracterização do local

### 3.1.1. Enquadramento geográfico

Costa da Caparica é uma cidade (desde 2005) portuguesa do distrito de Setúbal, e do concelho de Almada e sede de freguesia, que integra as localidades de São João, Santo António, Terras da Costa e Fonte da Telha.

Situada na orla costeira e, em grande parte, resultado de um recuo do Oceano Atlântico, a freguesia da Costa da Caparica detém uma área de, sensivelmente, 10 km<sup>2</sup>, entre o mar e a escarpa, resultado do abaixamento progressivo mencionado.

As suas praias estão contempladas numa extensão de, aproximadamente, 30 km, sendo a maior praia continua do país. Entre a margem esquerda do Tejo e a Lagoa de Albufeira, a sua configuração é, a “grosso modo”, alongada e estreita.

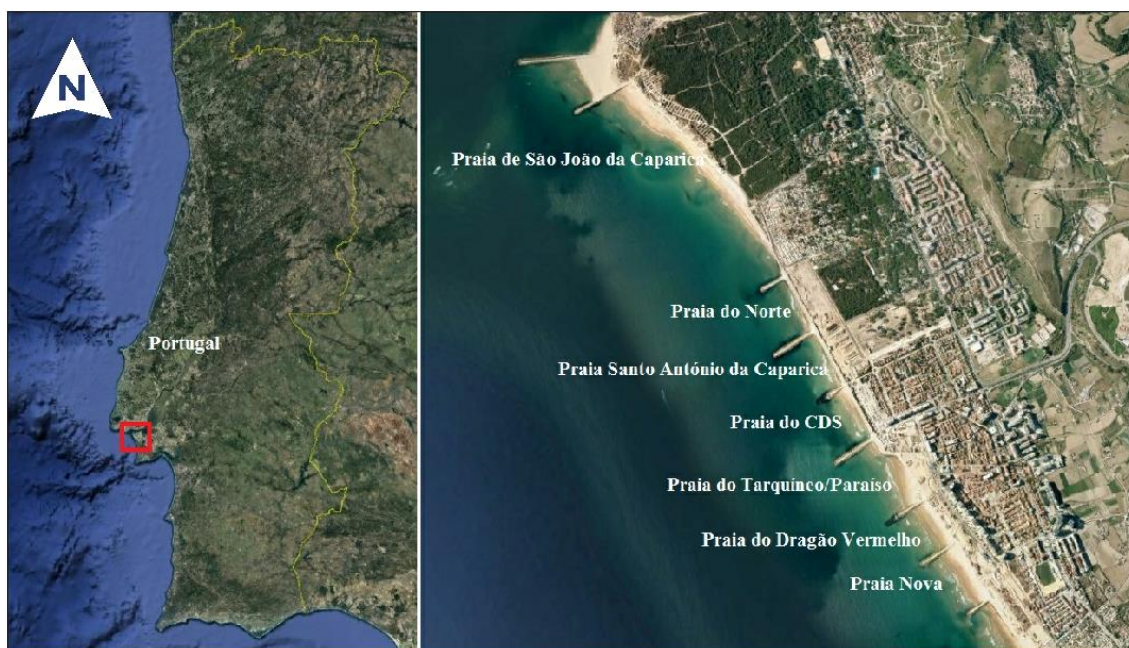


Figura 3.1. Localização da zona de estudo (adaptado do Google Earth)

### 3.1.2. Enquadramento climático

A temperatura da região é influenciada, pela geografia, pelo oceano Atlântico, pela serra da Arrábida e pelo estuário do rio Tejo. A proximidade do oceano contribui para atenuar as variações térmicas em toda a região litoral [9].

A temperatura média anual é, sensivelmente, 16°C, com valores máximos extremos no mês de agosto e mínimos em janeiro.

Existe uma estação seca e uma estação pluviosa, tendo elas sensivelmente a mesma duração (6 meses). A pluviosidade média anual é, sensivelmente, 712 mm.

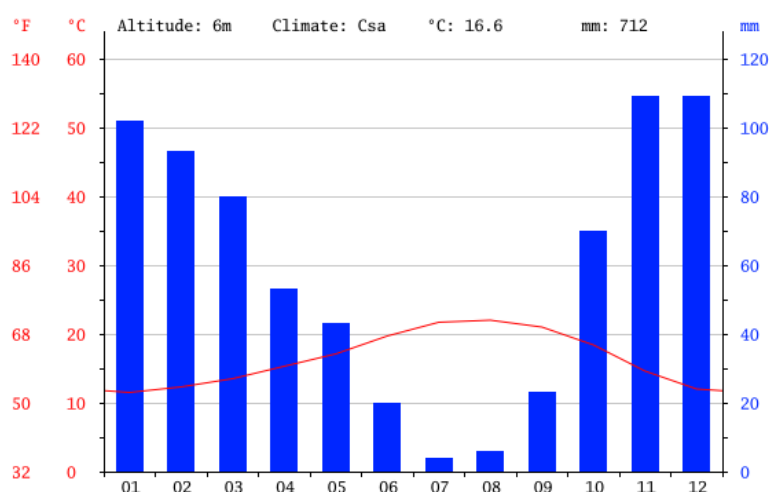


Figura 3.2. Gráfico climático da Costa da Caparica [10]

### 3.1.3. Enquadramento socioeconómico

#### 3.1.3.1. História da cidade

Costa da Caparica, no termo de Caparica, esteve durante séculos fortemente ligada às atividades marítimas, nomeadamente a pesca artesanal e uma agricultura de subsistência. No decurso do século XVIII, verificou-se que o povoamento da Costa da Caparica teve como origem duas “companhas” de pesca, que se fixaram no local em casebres construídos sobre dunas e cobertos por juncos e caniços.

Ficou-se a dever aos pescadores da “companha” oriunda de Ílhavo (Ovar) a arquitetura dos típicos barcos de pesca, denominados por “saveiros” da Costa da Caparica, e aos pescadores da “companha” algarvia as hortas e os bosques de acácias que povoam as

dunas ao longo do litoral, que eram peritos no recurso à agricultura como alternativa ou complemento da arte das pescas.

No século XX, com o crescimento do turismo, Lisboa descobre as virtudes de excelência dos areais da Costa da Caparica, o que leva a um progressivo desenvolvimento urbanístico, demográfico e comercial, justificando que a Costa da Caparica tivesse atingido a sua autonomia administrativa, com a atribuição do título de Freguesia a 12 de fevereiro de 1949.

Com a progressiva procura da famosa “Praia do Sol”, com uma luminosidade radiosa do sol, limpidez dos céus, acalmia natural proporcionada pelo clima e agradável temperatura das águas marinhas, leva a que as autoridades competentes se debrucem em várias vertentes, como as acessibilidades, o saneamento básico, a energia, a água, as infraestruturas hoteleiras, os transportes e o comércio, para responder às necessidades da população residente e da flutuante que ocorrem durante o período de verão.

### 3.1.3.2. Distribuição populacional

Costa da Caparica é sede de freguesia com 10.18 km<sup>2</sup> de área e 13 418 habitantes (INE, 2011), perfazendo uma densidade populacional de 1 318.1 hab/km<sup>2</sup>.

Através dos RGP (Recenseamentos Gerais da População), fornecidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), pode-se observar na Tabela 3.1 que a população tem vindo a crescer na freguesia da Costa da Caparica, registando o máximo em 2011, 13 418 habitantes [11].

Tabela 3.1. População geral da Costa da Caparica

População da freguesia de Costa da Caparica							
Ano	1 950	1960	1970	1981	1991	2001	2011
Habitantes	2 561	2 306	2 789	9 880	6 913	11 708	13 418

Também é possível observar na Tabela 3.2, que nos registos de 2011, houve um decréscimo, em relação a 2001, da população entre os 15 e os 24 anos, inclusive, mas um acréscimo dos restantes grupos etários, sendo que maior parte da população situa-se em os 25 e 64 anos, inclusive.

Tabela 3.2. População da Costa da Caparica distribuída por grupos etários

Distribuição da População por Grupos Etários				
Ano	0 - 14 anos	15 - 24 anos	25 - 64 anos	> 65 anos
2001	1 684	1 769	6 497	1 758
2011	1 846	1 307	7 646	2 619

Comparando a percentagem da distribuição da população por grupos etários da freguesia da Costa da Caparica com a média de Portugal (Tabela 3.3), observa-se que a população da Costa da Caparica acompanha a evolução do País. Há um envelhecimento da população, mas ainda mais acentuado, com maior decréscimo da população pertencentes aos grupos entre os 0 e 14 e os 15 e 24 anos e um acréscimo nos restantes grupos etários, entre os 25 e 64 e maiores que 65 anos.

Tabela 3.3. Comparação da população da Costa da Caparica com o País

Percentagem da Distribuição da População por Grupos Etários					
	Ano	0 - 14 anos	15 - 24 anos	25 - 64 anos	> 65 anos
País (média)	2001	16,0%	14,3%	53,4%	16,4%
	2011	14,9%	10,9%	55,2%	19,0%
Costa da Caparica	2001	14,4%	15,1%	55,5%	15,0%
	2011	13,8%	9,7%	57,0%	19,5%

### 3.1.3.3. Atividades económicas

Devido à sua localização, no litoral, é onde se localiza toda a frente de praia do Concelho e maior parte da oferta turística. A freguesia vive muito do turismo, a par da pesca e do cultivo.

É um local onde a pesca artesanal se faz durante todo o ano, com destaque para a Arte-Xávega, sendo uma Arte antiga, praticada de março a novembro, que atrai milhares de turistas na espera da afamada pescaria.

Mas a freguesia não vive somente do mar, as suas terras agrícolas são férteis e é na área da agricultura que se encontram os maiores produtores do Concelho, sendo que os produtos colhidos se destinam ao MARL (Mercado Abastecedor Região Lisboa), desempenhando um papel importante na Área Metropolitana de Lisboa.

As suas praias têm um papel importante na atração de milhares de visitantes e à afirmação dos desportos de mar, destacando o surf que tem vindo afirmar a freguesia no circuito nacional, contribuindo também, para o desenvolvimento económico da mesma.

A freguesia contém uma série de comércio e serviços para responder às necessidades, principalmente, daqueles que a visitam. Ela está apetrechada com três hotéis, três pensões, duas *surf houses*, uma pousada da juventude, oito parques de campismo e restaurantes, onde reina a gastronomia local.

### 3.1.4. Características ecológicas

A freguesia está abrangida pela Paisagem Protegida Arriba Fóssil de Costa da Caparica (PPAFCC) (Figura 3.3), confinada entre a via rápida (IC20) da Costa da Caparica, a norte, e a lagoa de Albufeira, a sul, ocupando uma superfície de 1 570 ha. É uma zona de Paisagem Protegida, isto é, uma parte natural do território nacional, com virtudes naturais e culturais, que denotam um interesse mundial, sendo, geralmente, geridas pelo estado ou pelos serviços competentes da região.

A vegetação da PPAFCC é muito diversificada, podendo ser dividida em duas partes: a parte dunar e a parte florestal.



Figura 3.3. Localização da PPAFCC (adaptado de ICNB, 2007)

As espécies com maior valor de conservação são endemismos lusitânicos (Figura 3.4), que cobrem as dunas, nomeadamente o cravo-das-areias, o zimbro-galego, o tomilho-do-mato, entre outras. Já a florestal contém a Mata dos Medos, mandada plantar pelo rei D. João V, com o objetivo de evitar o avanço das areias para os terrenos agrícolas interiores. É composta, maioritariamente, por o pinheiro-manso, pela sabina-das-praias, a aroeira, etc. no rico estrato arbustivo e pelo rosmaninho, o saganho e a roselha-pequena num estrato mais baixo.

Relativamente à fauna, foram identificadas na PPAFCC, apesar da sua área relativamente pequena, 169 espécies terrestres, divididas em: 119 aves, 23 mamíferos, 16 répteis e 11 anfíbios.

Os mamíferos encontrados são os comuns na nossa fauna, como o coelho-bravo, o ouriço-cacheiro, a raposa, entre outros. Em relação às aves, foram observadas rapinas como a águia-de-asa-redonda, rapinas noturnas como o mocho-galego, bem como uma grande variedade de aves vulgarmente conhecidas como pássaros (passeriformes). Já os anfíbios são representados por o sapo-corredor, sapo-de-unha-negra, etc e os répteis, por se adaptarem bem às condições de aridez, são comuns a lagartixa-do-mato-ibérico, o sardão, a cobra-cega, entre outros.

Existem, pelo menos, 22 comunidades organizadas em 20 habitats naturais, oito deles são prioritários. Sendo 5 deles pertencentes ao grupo de comunidades dos Bosques e Florestas Naturais e os restantes 3 aos Habitats Terrestres de Influência Marítima.



Figura 3.4. Vegetação que cobre a PPAFCC [12]

### **3.2. Evolução e dinâmica da costa**

Além da evolução urbanística, que se fez sentir na Costa da Caparica, devido às potencialidades na mesma, a frente marítima tem vindo a sofrer alterações significativas, resultando em episódios de inundação/galgamento e em destruição de apoios de praia.

A zona costeira, entre a Cova do Vapor e a Costa da Caparica, desde o final do século XIX sofreu um recuo significativo da linha de costa, principalmente na restinga que ligava Cova do Vapor à zona do farol do Bugio. Entre 1929 e 1957, essa língua de areia apresentou um recuo de cerca de 1.5 km, que foi acompanhado por um recuo da linha de costa (Veloso-Gomes *et al.*, 2006). A restinga atuava como barreira ao transporte de sedimentos que eram essencialmente de sul para norte, sendo considerada um “mega esporão natural” (Rocha, 2011; Veloso-Gomes *et al.*, 2009; Abreu, 2010). O banco de areia acabou por romper na década de 40, devido às dragagens de areia para aterros do troço de Algés-Belém, verificando-se, a partir daí, um recuo mais acentuado da linha de costa, tendo a duna recuado 100 m e a cota da crista da duna diminuído cerca de 6 m, entre 1957 e 1963 (Barceló, 1971).

Diversas intervenções foram levadas a cabo, principalmente para manter os sedimentos: foram construídos sete esporões e obras de proteção aderente na frente urbana da Costa da Caparica entre 1959 e 1971. Após a conclusão das obras até ao ano 2000 não houve grande alteração da linha de costa, apesar da perda de areia das praias ser notória, mas a entrada no século XXI trouxe Invernos críticos e episódios pontuais de grande violência, em que muita areia é removida pelo avanço do mar causando impacto evidentes em bens materiais (Rocha, 2011). Por isso, durante os Invernos de 2002/2003, 2003/2004 e 2006/2007, na tentativa de minimizar estragos em infraestruturas e equipamentos urbanos, foram feitas diversas intervenções de emergência (Veloso-Gomes *et al.*, 2006).

Para além do paredão e das dunas artificiais construídas no âmbito do Polis, a zona entre a Praia de S. João da Caparica e a Praia Nova tem sido alvo de enchimentos artificiais, nomeadamente, em 2007, 2008 e 2009 pelo Instituto Nacional da Água (INAG). Em 2010, também estava previsto mais enchimentos, mas o INAG afirmou que existia areia no sistema e que o mesmo estava a recuperar bem, considerando os enchimentos desnecessários. No entanto, em 2011, foi observável que alguns concessionários ficaram sem areal.

Em 2014 verificaram-se em Portugal, até ao mês de março, tempestades que afetaram severamente a costa portuguesa. Em consequência disso, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), fez várias intervenções nas praias da Costa da Caparica, como a aplicação de um sistema de drenagem, para drenar os avanços do mar, e a alimentação artificial em várias praias. No total foram aplicados 700 m de tubagem e depositados 1 milhão de m<sup>3</sup> de areia dragada do canal da barra, ao longo de, aproximadamente, 3.8 km de comprimento. APA (2014) afirma que parte da areia perdida é transferida para os fundos adjacentes, formando um banco submerso, que favorece a dissipação da energia da agitação marítima e concluindo que, em termos globais, a areia não é perdida, uma vez que a sua permanência no grande sistema de circulação sedimentar do estuário exterior do Tejo contribui para a estabilidade do mesmo.

A dificuldade e complexidade da gestão desta zona costeira tem vindo a aumentar, devido aos problemas de erosão e às elevadas pressões urbanísticas e turísticas, como comprova a Figura 3.5 que mostra, quer as alterações da linha de costa entre os anos de 1870 e de 1972, quer a diferença da área urbana, entre os anos de 1972 e de 1996 (Gomes *et al.*, 2006).



Figura 3.5. Evolução da linha de costa e área urbana (Gomes *et al.*, 2006)

A Figura 3.6, tendo em consideração vários acontecimentos relatados por diversos meios de comunicação, ilustra a compilação das principais ocorrências e intervenções ocorridas nas praias da Costa da Caparica, durante o período de estudo, entre 2007 e 2012. Destaca-se a erosão das praias e do cordão dunar adjacente, bem como a destruição, parcial ou total, das proteções costeiras, dos bares, dos restaurantes e dos passeios, ao nível dos danos causados.

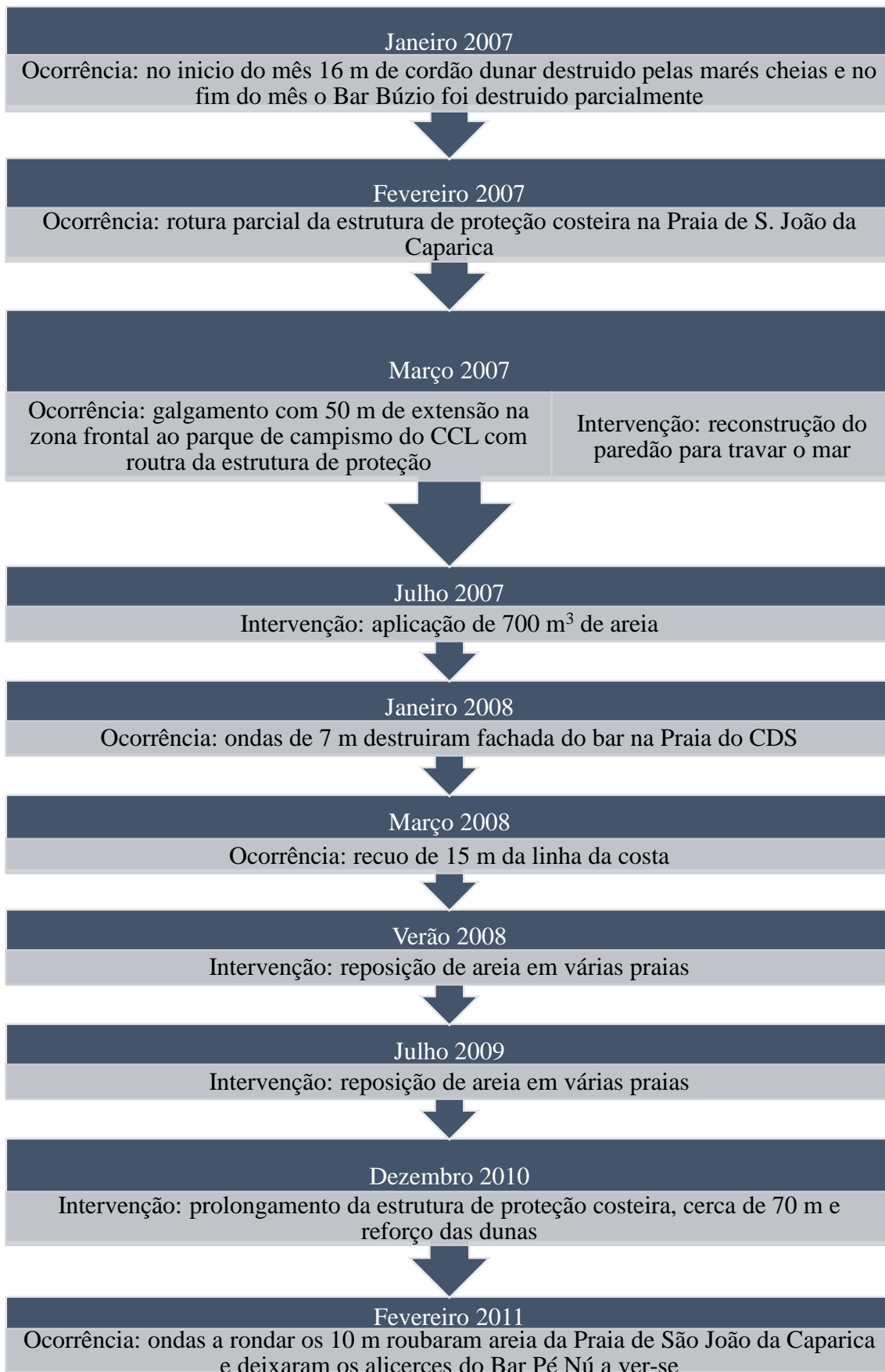


Figura 3.6. Cronograma das ocorrências e intervenções registadas na Costa da Caparica entre 2007 e 2012 (adaptado de Martinho, 2014)

### 3.3. Descrição das praias em estudo

As praias em estudo podem ser divididas em dois grupos de praias, referentes à sua localização como pode ser observado na Figura 3.1: Praia de S. João da Caparica e Praia da Vila da Costa da Caparica.

O primeiro grupo é composto por uma única praia, mas a maior das praias em estudo. A Praia de S. João da Caparica encontra-se um pouco afastada do centro da Costa da Caparica, no entanto oferece uma vista privilegiada sobre Lisboa e o estuário do Tejo. Mais a sul, a praia é procurada pelos campistas, devido à proximidade da mesma com os parques de campismo da GNR, do INATEL e do CCL.



Figura 3.7. Praia de S. João da Caparica (09/09/2016)

O segundo grupo é composto pelas restantes praias em estudo: do Norte, do Santo António da Caparica, do CDS, do Tarquíneo/Paraíso, do Dragão Vermelho e Nova. São praias de pequena dimensão, mas são as mais procuradas pelos surfistas e pela população, em geral, devido à sua proximidade com a vila e à possibilidade de ter outras opções de entretenimento.

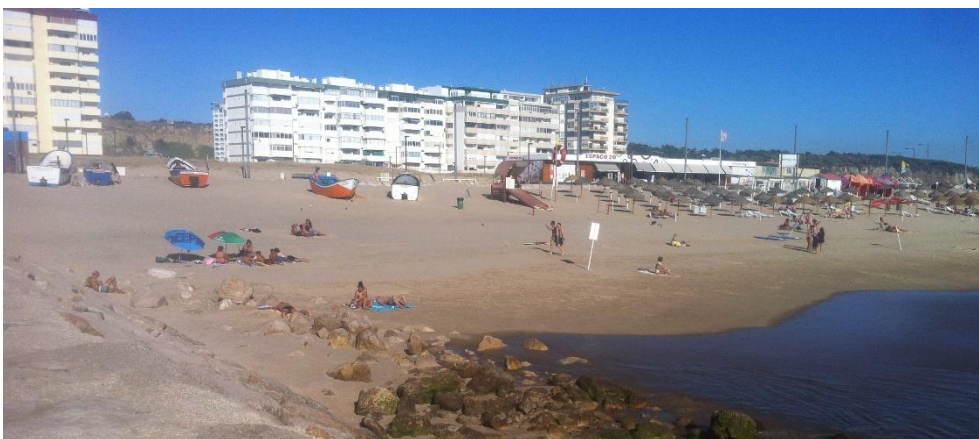


Figura 3.8. Praia Nova (09/09/2016)

As praias em estudo, desde a Praia de S. João da Caparica até à Praia Nova, compreendem uma extensão, aproximada, de 3.3 km, protegidas por oito esporões, que separam cada uma das praias, e, a maioria delas, por uma estrutura de proteção longitudinal aderente.



Figura 3.9. Zona sem e com estrutura de proteção aderente na praia de S. João da Caparica (adaptado do Google Earth)

As estruturas de proteção longitudinais aderentes são compostas pelos mesmos materiais em todas as praias. Só a parte norte da Praia de S. João da Caparica é que não contém este tipo de proteção costeira (Figura 3.9). A estrutura é composta por uma camada constituída de enrocamento de diversas dimensões, já o núcleo é constituído por areia e pedras de diferentes dimensões (Figura 3.10). A parte norte da Praia de S. João da Caparica é protegida por um sistema dunar frágil e a areia é de origem sedimentar, bem como para as restantes praias (Martinho, 2014, Neves, 2013).



Figura 3.10. Constituição das estruturas de proteção (09/09/2016)

Segundo Neves (2013), as praias encontram-se sujeitas à influência do rio Tejo, por se tratar de um subsistema hidromorfológico de transição entre o sistema estuarino e o

sistema costeiro, bem como à ação das marés astronómicas e meteorológicas, e à interação da agitação marítima.

No Anexo I podem consultar-se as fichas de cada praia, que descrevem as características básicas de cada praia (como o tipo de praia, segundo o Plano de Ordenamento da Orla Costeira (POOC)), as infraestruturas e as estruturas de proteção presentes, o perfil transversal e fotografias do local (adaptado de Martinho, 2014).

## Capítulo 4 – Metodologia

Primeiramente, neste capítulo apresenta-se a caracterização da agitação marítima de Martinho (2014), utilizada na aplicação das formulações empíricas e na aplicação das condições de fronteira do modelo XBEACH.

Seguidamente, são apresentadas todas as condições de aplicação consideradas, quer para as fórmulas empíricas, quer para o modelo numérico.

Paralelamente à descrição das condições de aplicação do modelo XBEACH, é descrito o procedimento utilizado na seleção das duas tempestades, que serviram para avaliar o desempenho do modelo de uma forma mais rigorosa.

### 4.1. Caracterização da agitação marítima

#### 4.1.1. Ao largo

Neste trabalho, utilizou-se a caracterização da agitação marítima obtida por Martinho (2014). A agitação marítima ao largo foi fornecida através do modelo WWIII no ponto de coordenadas geográficas (-9.748801 W, 38.56720 N).

Os dados correspondem às estimativas das características da agitação marítima ao largo entre outubro de 2007 e dezembro de 2012, contemplando a altura significativa espectral ( $H_{m0}$ ), o período de pico ( $T_p$ ) e a direção de onda para a frequência de pico ( $\theta$ ), com uma periodicidade de 6 horas, no entanto deparou-se com erros na previsão dos mesmos. No ano de 2011, o mês de maio e de junho não são caracterizados, apesar de pertencerem ao semestre de verão e não ser expectável a ocorrência de estragos na zona em estudo, e encontram-se registadas elevadas alturas de onda significativa ao largo, entre o dia 5 e 8 de maio de 2010, a rondar os 100 m, por isso foram desprezadas.

Com base nesses dados, determinou-se o regime médio mensal, descrito na Tabela 4.1, onde são apresentadas as médias dos valores estimados para as características da agitação marítima ao largo por mês.

Analisando essa tabela conclui-se que os maiores valores médios mensais das alturas de onda significativa ao largo se registam nos meses de inverno, entre outubro e março, inclusive, como seria de esperar. Da mesma forma, os maiores valores dos períodos de pico, também se registam nos meses de inverno, como era expectável. Já quanto à direção

das ondas, nos meses de inverno, os estados de agitação vêm, maioritariamente, de nor-noroeste (NO), enquanto que nos meses de verão vêm, maioritariamente, de oés-noroeste (ONO).

Tabela 4.1. Valores médios mensais das características da agitação marítima ao largo entre 2007 e 2012

<b>Mês</b>	<b><math>H_{s0}</math> (m)</b>	<b><math>T_p</math> (s)</b>	<b><math>Dir</math> (°)</b>
<b>Janeiro</b>	3.00	10.20	292.11
<b>Fevereiro</b>	2.76	10.31	294.65
<b>Março</b>	2.38	9.48	304.59
<b>Abril</b>	2.20	8.77	303.05
<b>Mai</b>	1.79	7.72	306.12
<b>Junho</b>	1.68	7.07	311.68
<b>Julho</b>	1.68	6.93	324.58
<b>Agosto</b>	1.67	7.06	321.98
<b>Setembro</b>	1.69	8.44	314.74
<b>Outubro</b>	2.17	9.20	303.72
<b>Novembro</b>	2.70	9.55	314.44
<b>Dezembro</b>	2.87	10.06	290.11

Os valores máximos anuais (Tabela 4.2) da agitação marítima ao largo coincidem com os meses em que ocorreram as maiores médias. A maior altura de onda registou-se no ano de 2010, enquanto que o maior período de pico registou-se no ano de 2008.

Tabela 4.2. Valores máximos anuais das características da agitação marítima ao largo entre 2007 e 2012

<b>Período de tempo</b>	<b><math>H_{s0}</math> (m)</b>	<b><math>T_p</math> (s)</b>
<b>2007 - 2008</b>	9.59	14.10
<b>2008 - 2009</b>	8.36	14.54
<b>2009 - 2010</b>	6.55	10.55
<b>2010 - 2011</b>	9.65	13.16
<b>2011 - 2012</b>	7.20	12.30

Na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3 apresentam-se os histogramas, correspondentes a  $H_{s0}$  e  $Dir$ ,  $T_p$  e  $Dir$ , e  $H_{s0}$  e  $T_p$ , respetivamente. Confirma-se, através dos histogramas, que grande parte dos estados de agitação têm alturas de onda significativa ao largo entre 1.5 m e 2.5 m, direções entre 315° e 337.5°, ou seja, entre noroeste (NO) e nor-noroeste (NNO), e períodos de pico entre 8 s e 10 s.

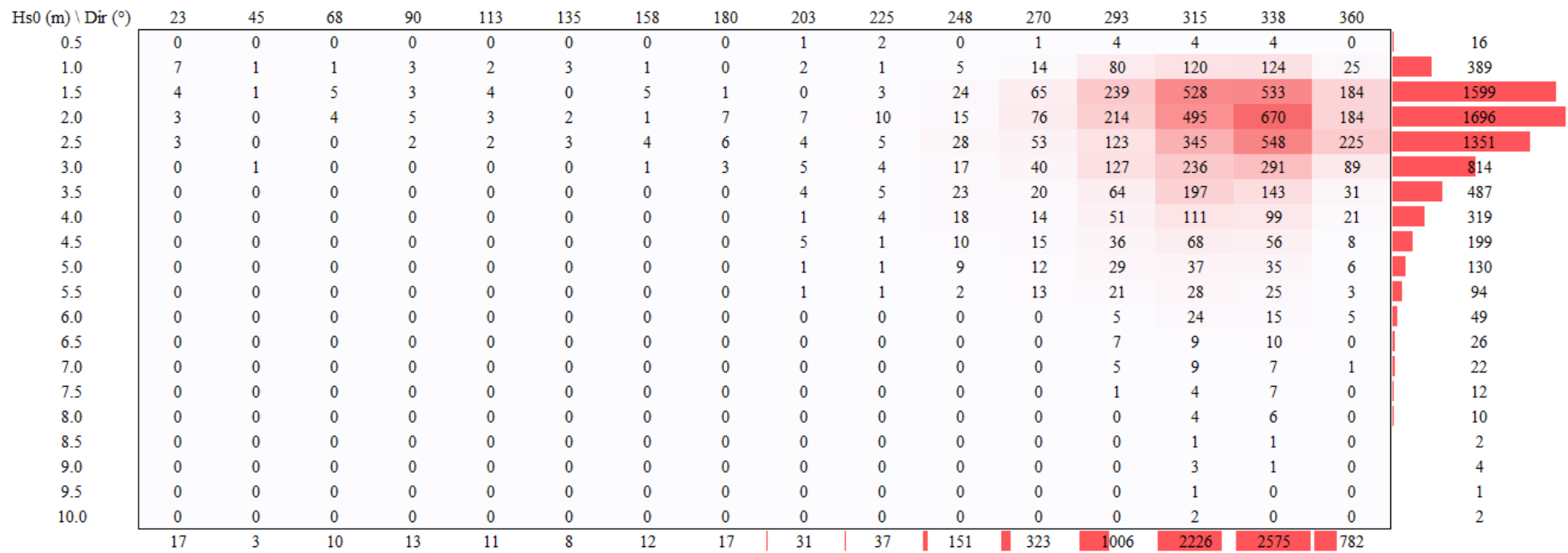


Figura 4.1. Histograma que relaciona a altura de onda significativa ao largo ( $H_{s0}$ ) e a direção de onda ao largo ( $Dir$ )

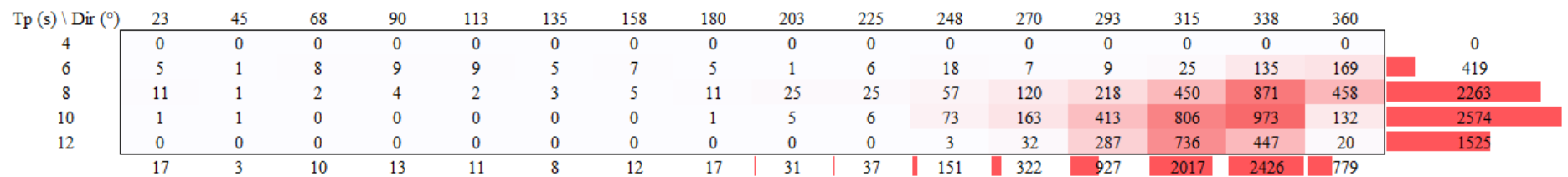


Figura 4.2. Histograma que relaciona o período de pico ( $T_p$ ) e a direção de onda ( $Dir$ )

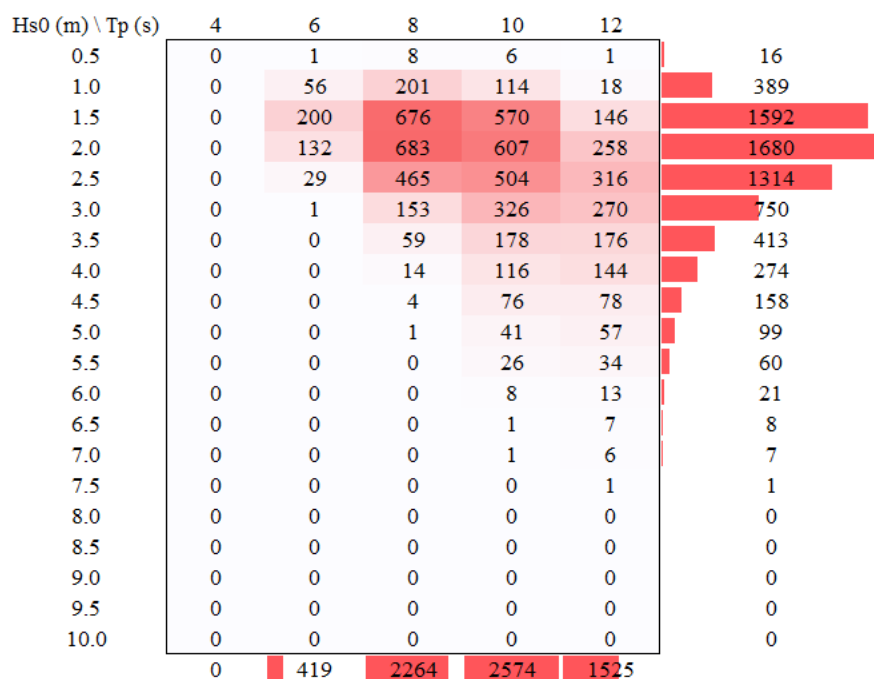


Figura 4.3. Histograma que relaciona a altura de onda significativa ao largo ( $H_{s0}$ ) e o período de pico ( $T_p$ )

#### 4.1.2. Junto à costa

Para obter as condições de agitação marítima junto à costa, Martinho (2014) executou simulações com o modelo SWAN em modo estacionário, ou seja, sem condições de fronteira variáveis no tempo, para o intervalo de tempo das previsões do WWIII, entre outubro de 2007 e dezembro de 2012. Não foi considerada a ação do vento por falta de informação.

Relativamente ao nível do mar, Martinho (2014) usou dados fornecidos pelo marégrafo de Cascais (IGEO), sendo que a sobrelevação do nível do mar já incluída descreve a subida temporária do nível do mar, influenciada pelas condições meteorológicas inconstantes, nomeadamente pelas variações do campo de pressão atmosférica e/ou da ação de ventos fortes e prolongados (Neves, 2013).

A batimetria utilizada por Martinho (2014) no SWAN foi fornecida pelas cartas batimétricas do IH. e a altimetria proveniente do LIDAR, que é bastante detalhada.

Os resultados obtidos através do modelo SWAN, permitem fazer uma análise em relação à altura de onda significativa ( $H_s$ ), ao período de pico ( $T_p$ ) e à direção média das ondas ( $\theta$ ), para os pontos P1 a P7, em frente a cada praia. No entanto, de seguida apenas são apresentados os resultados referentes ao P1 e ao P4, Praia de S. João da Caparica (S1) e

Praia do CDS (S4), respetivamente, de modo a facilitar a análise. Foram escolhidos estes dois pontos pelo fato de um fornecer as condições de agitação marítima para uma praia sem estrutura de proteção costeira e outro para uma praia com estrutura de proteção costeira e com fenómenos de galgamento documentados. Os resultados detalhados encontram-se disponíveis no Anexo II.

Comparando as duas figuras abaixo (Figura 4.4 e Figura 4.5), referentes à altura de onda significativa, embora de pontos diferentes, verifica-se que são semelhantes. Pode-se afirmar que a variação da altura das ondas varia com as estações do ano, sendo maiores para as estações de outono e inverno (entre outubro e março).

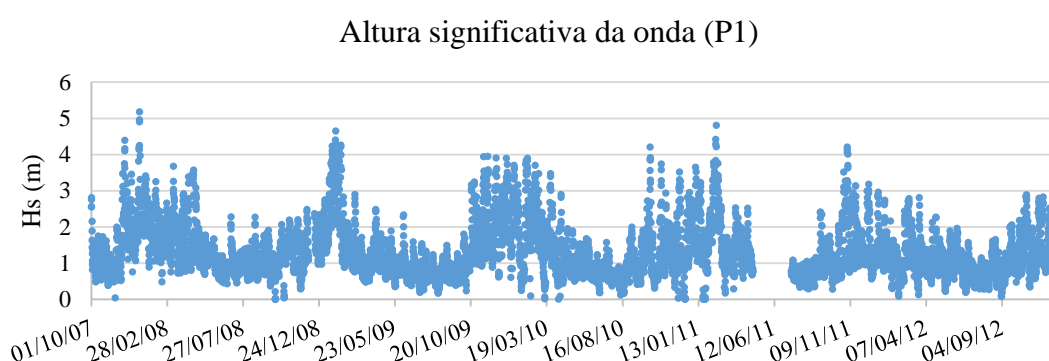


Figura 4.4. Altura de onda significativa no ponto P1

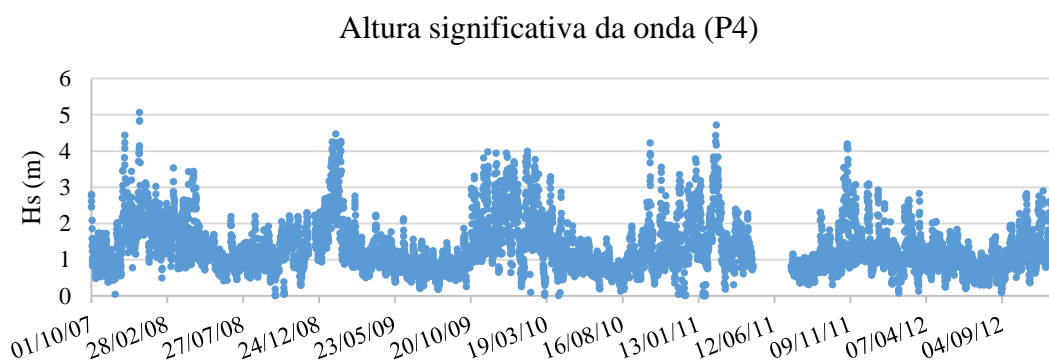


Figura 4.5. Altura significativa de onda no ponto P4

Na Tabela 4.3 é possível observar os valores máximos e médios, nos diversos pontos, da altura de onda significativa. Verifica-se que a altura de onda decresce do P1 para o P7, mas que os valores são muito semelhantes, uma vez que estes pontos têm aproximadamente a mesma cota batimétrica e que estão numa zona onde as linhas batimétricas se apresentam praticamente paralelas à costa (Martinho, 2014).

Tabela 4.3. Valores máximos e médios da altura de onda significativa nos vários pontos

Ponto	Máximo (m)	Média (m)
P1	5.19	1.34
P2	5.10	1.34
P3	5.06	1.32
P4	5.07	1.33
P5	4.96	1.33
P6	4.86	1.32
P7	4.18	1.38

Analisando a Figura 4.6 e a Figura 4.7, a par da altura de onda significativa, o valor máximo do período de pico acontece nos meses de inverno, acompanhando as ondas maiores, em geral.

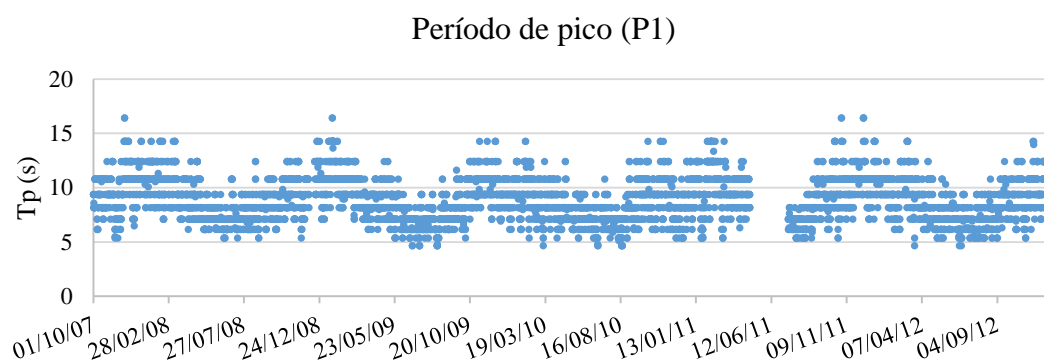


Figura 4.6. Período de pico no ponto P1

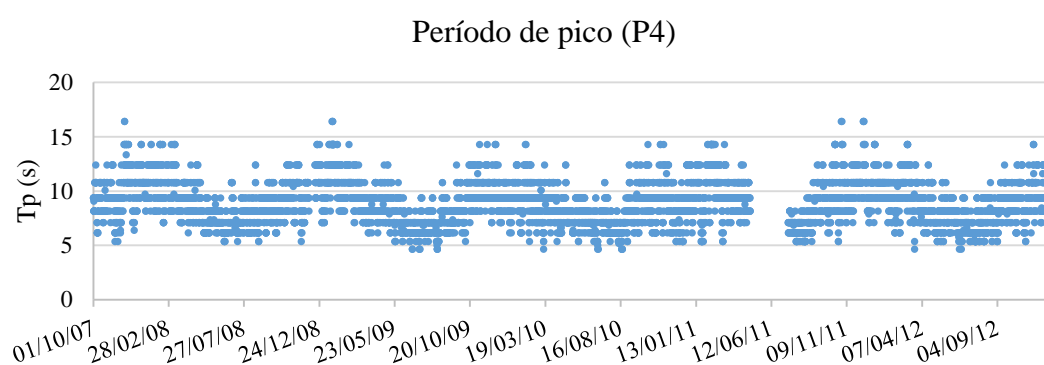


Figura 4.7. Período de pico no ponto P4

Observando a Tabela 4.4 pode concluir-se que a variação do período de pico, entre o ponto P1 e P7, é praticamente nula. Martinho (2014) justificou o acontecimento, afirmando que o modelo SWAN não apresenta sensibilidade à variação do período de pico para distâncias pequenas, como a existente entre P1 e P7.

Tabela 4.4. Valores máximos e médios do período de pico nos vários pontos

Ponto	Máximo (s)	Média (s)
<b>P1</b>	16.43	8.91
<b>P2</b>	16.43	8.91
<b>P3</b>	16.43	8.91
<b>P4</b>	16.43	8.92
<b>P5</b>	16.43	8.92
<b>P6</b>	16.43	8.93
<b>P7</b>	16.43	8.92

Relativamente à direção de onda, é possível observar, através da Figura 4.8 e da Figura 4.9, que a mesma é mais dispersa no ponto P1, variando, praticamente, de igual modo entre 240° - 250° e os 270° - 280°, enquanto que para o ponto P4 encontra-se mais concentrada entre o 270° - 280°, ou seja, de oés-noroeste (ONO).

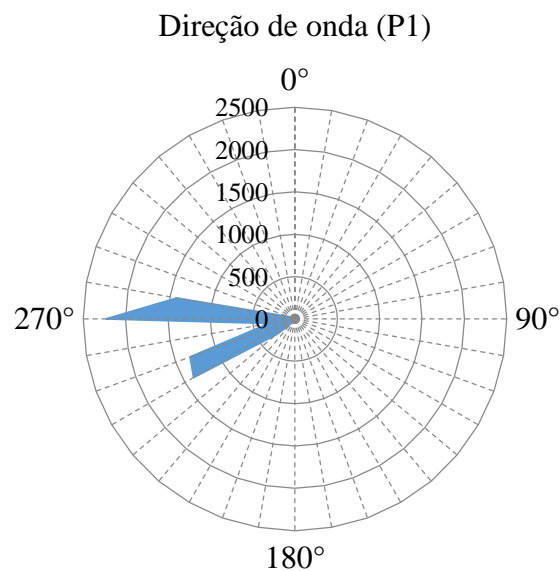


Figura 4.8. Direção de onda no ponto P1

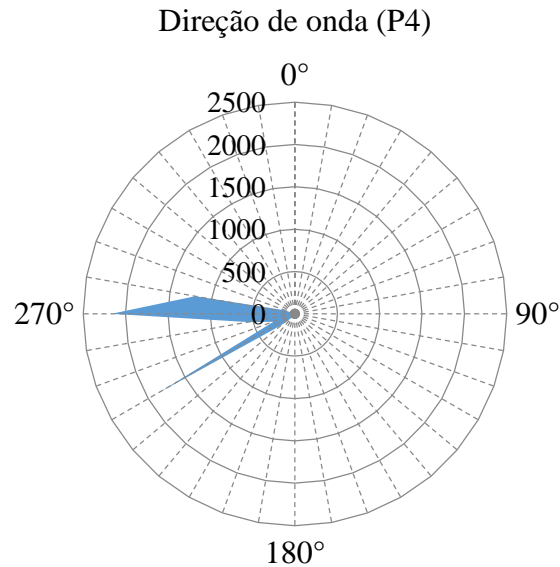


Figura 4.9. Direção de onda no ponto P4

Através da Tabela 4.5 verifica-se que a direção de onda apresenta valores médios a rondar os 260°, o que significa que a ondulação provém, principalmente, dos intervalos entre 240° - 250° e 270° - 280°, como foi comentado anteriormente.

Tabela 4.5. Valores máximos e médios da direção de onda nos vários pontos

Ponto	Máximo (°)	Média (°)
P1	356.67	259.94
P2	347.33	260.35
P3	343.00	261.06
P4	341.00	260.10
P5	327.33	259.01
P6	328.67	257.83
P7	337.00	252.56

## 4.2. Condições de aplicação das fórmulas empíricas

As formulações empíricas têm como objetivo determinar o *runup*, o NMI e/ou o galgamento. Aquelas que determinam o *runup* e o NMI apenas foram aplicadas para a secção S1, zona mais a norte da Praia de S. João da Caparica.

O galgamento é um fenómeno que ocorre tanto em praias com ou sem estrutura de proteção aderente, mas é mais relevante em praias com estrutura de proteção. No presente caso, estudou-se o galgamento nas praias do Norte (S2), de Santo António da Caparica (S3), do CDS (S4), do Tarquíneo/Paraíso (S5), do Dragão Vermelho (S6) e Nova (S7),

no entanto só será apresentada neste subcapítulo a configuração de aplicação referente à Praia do CDS (S4).

De modo a obter os valores de  $R_{1\%}$ ,  $R_{2\%}$ ,  $R_s$ ,  $R_{máx}$ ,  $R_{médio}$  e NMI, utilizou-se o programa em linguagem FORTRAN, concebido por Fortes *et al.* (2013a), que determina o *runup* e, associadamente, o NMI através das formulações apresentadas na Tabela 2.2. Para este programa considerou-se 2 ficheiros de dados (“alturas\_condicoeslargo” e “dados\_condicoeslargo”), ilustrados no Anexo III.

Um dos ficheiros (“alturas\_condicoeslargo”) destina-se à informação referente à condição de agitação marítima. Contendo os dados alusivos à altura de onda significativa ( $H_s$ ), ao período de pico ( $T_p$ ) e à direção de onda ( $\theta$ ), resultantes das simulações executadas por Martinho (2014) no modelo SWAN, para o ponto correspondente à praia (P1), e alusivo ao nível do mar ( $S_{máx}$ ), oriundo das medições do marégrafo de Cascais.

A periodicidade dos resultados é influenciada pela periodicidade dos dados de agitação marítima. Como os dados de agitação marítima fornecidos têm uma periodicidade de 6 horas, os resultados apresentam também essa periodicidade.

O outro ficheiro (“dados\_condicoeslargo”) contém informação relativa ao perfil da praia, nomeadamente à cota batimétrica a que se encontra o ponto referente aos valores determinados pelo modelo SWAN, que foi adotada de Martinho (2014), e ao ângulo do perfil da praia, determinado a partir da linha adaptada (Figura 4.10) para representar a face do perfil obtido através da técnica LIDAR.

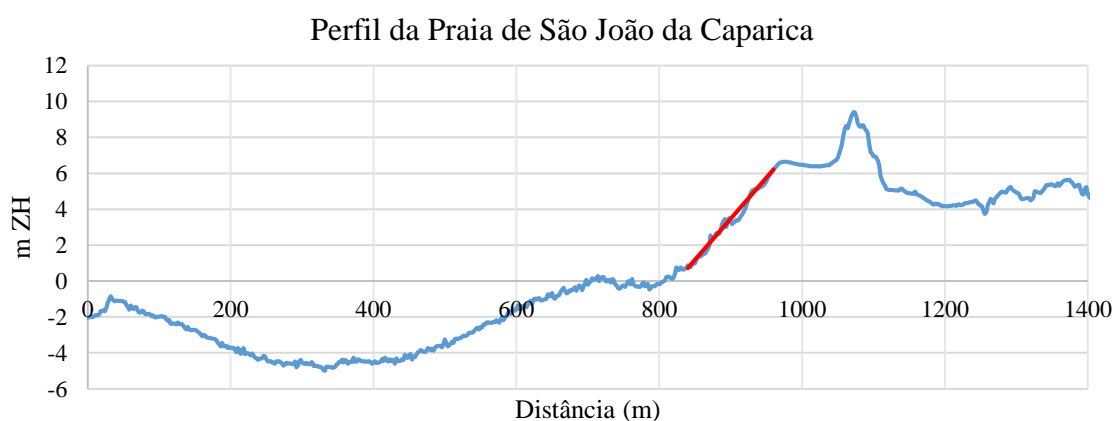


Figura 4.10. Perfil da Praia de S. João da Caparica (S1) (azul), obtido através da técnica LIDAR, e linha adaptada para representar a face do perfil da praia (vermelho)

Relativamente ao galgamento, utilizou-se o programa em linguagem FORTAN, concebido por Fortes *et al.* (2013b), que determina o *runup* e, associadamente, o caudal galgado, pela formulação empírica de Mase *et al.* (2013), apresentada na Tabela 2.4. Os resultados referem-se ao comprimento de onda ao largo ( $L_0$ ), à declividade da onda ao largo ( $H_0/L_0$ ), à altura de rebentação adimensional ( $h_b/H_0$ ), à razão entre a profundidade do ponto inicial e o comprimento de onda, aos *runup*'s ( $R_{2\%}$ ,  $R_{1/10}$ ,  $R_{1/3}$ ,  $R_{máx.}$ ), ao caudal e ao caudal final, afetado pelo fator de correção ( $C_r$ ), sendo solicitados 4 ficheiros de dados (“alturas\_condicoeslargo”, “dados\_condicoeslargo”, “estrutura” e “Tabela\_Geral”), ilustrados no Anexo III.

O ficheiro “alturas\_condicoeslargo” contém informação relativa às condições de agitação marítima, do ponto correspondente à praia em estudo, neste caso do ponto P4. Foram utilizados os resultados obtidos por Martinho (2014) na aplicação do SWAN. Apesar dos autores da metodologia aplicada indicarem que os dados devem-se referir ao largo, não definem o termo “largo”, podendo interpretar-se que a expressão indica apenas um ponto em águas mais profundas, mas não tão profundas como às ao largo (Martinho, 2014).

Outro ficheiro (“dados\_condicoeslargo”) contém informação relativas ao perfil da praia e à definição de fórmulas a considerar, nomeadamente, a cota batimétrica do ponto referente à praia, a largura e a cota do coroamento da estrutura, o declive do perfil da praia, o método a utilizar, o declive do fundo e o grau de permeabilidade do talude ( $\gamma_f$ ).

A cota batimétrica refere-se ao ponto referente aos dados determinados pelo modelo SWAN, adotada de Martinho (2014), bem como a largura do coroamento da estrutura e o declive do fundo (1:100). O declive do perfil da praia é determinado a partir da linha adaptada (Figura 4.11) para representar a face do perfil obtido através da técnica LIDAR. A cota do coroamento da estrutura de proteção é determinada também a partir do perfil da praia e negativa para valores superiores ao ZH. O método a utilizar, no caso a analisar é o método 2, em que  $R_{máx.} = R_{máx.99\%,100}$  (*runup* não excedido em 99% dos casos em ensaios de 100 ondas). O grau de permeabilidade do talude ( $\gamma_f$ ) tem o valor de 0.5, uma vez que a estrutura de proteção é composta por enrocamento.

De modo a avaliar a sensibilidade das formulações em relação ao declive do fundo, o modelo foi testado para os restantes casos possíveis, 1:10, 1:20, 1:30, no entanto as diferenças são insignificantes.

É solicitado um ficheiro que contempla toda a informação relativa à geometria do fundo e da estrutura (“estrutura”), através da consideração de vários pontos, introduzindo a distância ao ponto inicial e a batimetria dos mesmos. Esta informação foi determinada através da elaboração de um perfil adaptado (Figura 4.11), partindo do perfil obtido através da técnica LIDAR, sendo que as cotas dos pontos acima do ZH consideram-se negativas e abaixo positivas. É necessário indicar o número de pontos a ser considerado, o primeiro ponto refere-se ao ponto inicial onde ocorre a agitação marítima disponibilizada, o ponto seguinte refere-se à intersecção da praia ou estrutura com o ZH, seguindo-se o ponto referente à base da estrutura. Os pontos seguintes são relativos à geometria da estrutura, sendo possível a utilização de vários pontos caso existam bermas, o que não acontece neste caso, sendo o último referente ao coroamento.

Por último, é fornecido um ficheiro (“Tabela\_Geral”) em forma de tabela que relaciona a declividade da onda e a altura de rebentação para o declive do fundo de 1:10, 1:20, 1:30 e 1:100.

Dos resultados obtidos através do programa, consideraram-se para análise o  $R_{máx}$  e o caudal médio galgado final.

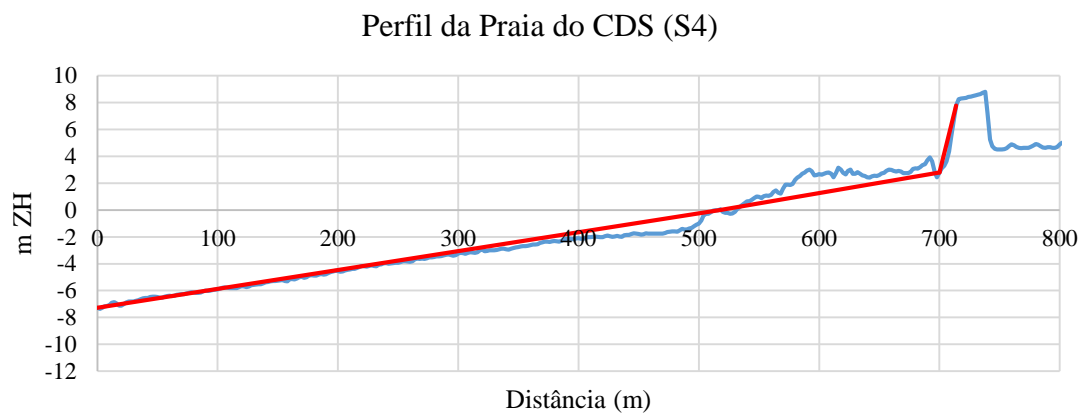


Figura 4.11. Perfil da Praia do CDS (S4) (azul), obtido através da técnica LIDAR, e perfil adaptado para representar o mesmo (vermelho)

### 4.3. Condições de aplicação do modelo XBEACH

Neste trabalho foi utilizado o XBEACH para efetuar a propagação de ondas desde o ponto onde são obtidos os resultados do modelo SWAN até à costa, determinando-se o NMI e o caudal galgado. Como o caudal galgado não é um parâmetro resultante direto do

XBEACH, o seu cálculo foi efetuado recorrendo à altura e à velocidade de água que transpõe a estrutura.

Foram fornecidos, através de ficheiros de entrada, os dados para o modelo realizar uma simulação.

O domínio é determinado por três ficheiros, “x”, “y” e “bed”, e tem dimensão de 1D, que se equipara a um perfil transversal. Os ficheiros fornecem as coordenadas de cada ponto e a respetiva batimetria, sendo que esta informação foi recolhida do perfil obtido através da técnica LIDAR. O modelo define os limites do domínio (*back*, *front*, *left* e *right*) como observado na Figura 2.12.

A fronteira *front* é responsável pela geração de ondas sem reflexões. Para que as condições impostas sejam introduzidas no modelo corretamente foi selecionado o tipo de fronteira *abs\_1D*. Este tipo de fronteira é de baixa reflexão e também foi aplicado na fronteira *back*, permitindo que as ondas saiam do domínio sem reflexões.

Para que as fronteiras laterais (*left* e *right*) não influenciem de uma forma adversa os resultados numéricos do modelo, é necessário fornecer informações sobre a área para além do domínio. O tipo de fronteira utilizado (*neumann*), recomendado pelo manual, não permite que haja uma mudança no nível da água e da velocidade da mesma, quando a fronteira é transposta.

A geração de ondas realizada na fronteira *front* necessita da condição de agitação marítima a impor. Optou-se por fornecer essa informação através do ficheiro “jonswap”, sendo considerado uma série temporal de um espectro de ondas JONSWAP, proveniente do modelo SWAN. Os dados solicitados são a altura significativa espectral da onda ( $H_{m0}$ ), período de pico da onda ( $T_p$ ), direção da onda (*mainang*), o fator de aguçamento de pico da expressão JONSWAP (*gammajsp*), coeficiente de espalhamento direcional (*s*) e, a duração e a resolução da série temporal (*duration* e *dtbc*, respetivamente), referentes aos pontos que correspondem a cada praia e nas datas desejadas (tempestade 1 e tempestade 2).

Em relação ao nível do mar, a opção recaiu por impor a variação temporal do nível do mar em duas fronteiras, que por padrão é a fronteira do lado do mar (*front*) e do lado da terra (*back*). O ficheiro “tide” contém informação oriunda do marégrafo de Cascais, que é referente ao nível do mar, para as datas desejadas (tempestade 1 e tempestade 2). O nível do mar é composto pela soma da maré astronómica com a sobrelevação e foi

adaptado os valores apresentados em Martinho (2014). Assim, o modelo utiliza, de 6 em 6 horas, o nível do mar é igual ao especificado no ficheiro. Nos intervalos, entre essas imposições, o modelo assume uma variação constante do nível do mar.

De modo a ter em consideração informações sobre a estrutura de proteção, o modelo solicita um ficheiro (“camada”) que mencione a espessura da camada que é possível ser erodida. Por isso, na parte do perfil transversal correspondente à posição da estrutura de proteção, essa espessura considera-se nula.

No ficheiro “params” é fornecida informação relativa à direção das ondas, aos processos físicos (ativação/inativação), aos parâmetros dos processos e aos *output's*.

A direção de ondas é solicitada e pode ser fornecida descrevendo dois ângulos, como observado na Figura 2.13. Após uma análise feita às direções das ondas ( $\theta$ ), foi fornecido o ângulo mínimo (thetamin) de  $-90^\circ$  e o ângulo máximo (thetamax) de  $90^\circ$  que determinam o intervalo que as direções das ondas podem tomar.

Os processos físicos permitem ajustar a simulação à realidade ativando e/ou inativando os mesmos. Neste trabalho, foram considerados os processos selecionados por padrão, exceto o processo não hidrostático (*nohn*) e o do espraiamento de ondas curtas (*swrunup*). Estes são processos que realmente acontecem e que são importantes para o presente estudo, procurando que os processos definissem uma simulação, o máximo possível, de acordo com a realidade.

Os *output's* desejados (Tabela 2.6) são do tipo globais e pontuais, incluindo a sonda. Foi solicitado que os *output's* fossem registados a partir do primeiro ao último instante da simulação e com uma frequência de 1 Hz (1 segundo). O tempo da duração também é fornecido e corresponde à duração, em segundos, da tempestade 1 ou da tempestade 2.

A par das formulações empíricas, quando se trata de determinar o *runup*, apenas foi aplicado o modelo XBEACH para a secção S1, zona mais a norte da Praia de S. João da Caparica (S1). O modelo regista no ficheiro “xboutput” os *output's* solicitados e com o auxílio da ferramenta MATLAB obteve-se a variação do nível de água incluindo o *runup*, denominado por *runup gauge output*. Neste caso da secção S1, para que o modelo simule e forneça os resultados desejados necessita de, pelo menos, 6 ficheiros de entrada (“x”, “y”, “bed”, “jonswap”, “tide” e “params”), ilustrados no Anexo III. É importante ativar o output do tipo sonda e impor que o ponto inicial do perfil, onde se pretende avaliar o espraiamento, se localize no areal da praia.

Como foi referido anteriormente, no estudo do galgamento apenas foi estudada detalhadamente a Praia do CDS (S4). É importante analisar a variação do nível de água e a velocidade da mesma num determinado ponto, registado pelo modelo no ficheiro “xoutput”. Com o auxílio da ferramenta MATLAB foi exportado desse ficheiro os *output's* que incluem as informações desejadas, denominados por  $z_s$  (altura de água) e  $u$  (velocidade euleriana da água na componente horizontal).

Posteriormente, subtraiu-se ao nível da água a cota do coroamento da estrutura de proteção, de modo a obter-se a altura de água que atravessa o ponto ( $Z_d$ ), e aplicando a equação (41) determinou-se o caudal galgado.

No caso da secção S4, para que o modelo simule e forneça os resultados desejados necessita de, pelo menos, 7 ficheiros de entrada (“x”, “y”, “bed”, “jonswap”, “tide” “params” e “camada”), ilustrados no Anexo III.

É importante ativar o processo *struct* no ficheiro “params”, para que o ficheiro “camada” seja considerado, e mencionar o ponto (coroamento da estrutura de proteção aderente) onde se façam registos do nível de água e da respetiva velocidade.

O caudal galgado é instantâneo, ou seja, é dado ao segundo, e por isso, é igual ao volume de água que transpõe a estrutura num determinado segundo.

Note-se que na aplicação do modelo XBEACH, devido ao esforço computacional exigido (incompatíveis com os limites temporais do presente trabalho), só foram analisados os resultados do mesmo provenientes de duas tempestades, compreendidas entre 2007 e 2012.

Descreve-se, de seguida, as condições para as quais foram efetuados os cálculos, referindo os critérios que conduziram à seleção das mesmas que caracterizam as duas tempestades.

#### **4.3.1. Seleção da tempestade 1**

A seleção da tempestade 1 teve em conta 3 critérios, sendo que a tempestade selecionada resulta da interação dos mesmos.

#### 4.3.1.1. Critério 1: Altura de onda significativa ao largo ( $H_{s0}$ )

Após estudar a agitação marítima ao largo ao longo de, sensivelmente, 5 anos, considerou-se que somente os estados de agitação de altura de onda significativa ao largo superior a 5 m de altura e com uma persistência, mínima, de 2 dias, poderiam, de algum modo, afetar a zona costeira.

Após essa filtragem, foram identificadas nos dados ao largo, oriundos do WWII, 9 tempestades, todas elas no período de inverno.

A tempestade identificada com a maior duração (10 dias), foi registada entre o dia 16 e o dia 27 de janeiro de 2009, já as tempestades identificadas (2 tempestades) com o número mínimo de dias (2 dias), foram registadas entre o dia 10 e o dia 13 de março de 2008, e entre o dia 4 e o dia 6 de março de 2009.

As duas tempestades (Tabela 4.6 e Tabela 4.7) em que a altura de onda significativa é acima dos 9 m foram registadas entre o dia 2 e o dia 5 de janeiro de 2008 e entre o dia 12 e o dia 18 de fevereiro de 2011.

A primeira é aquela que está associada a um período de pico maior, perto dos 14 s, enquanto que a segunda apresenta um período de pico máximo perto dos 13 s. Em ambas as tempestades, o maior período de pico fez-se sentir aquando ocorreu a maior altura de onda significativa.

Tabela 4.6. Valores das características da agitação marítima ao largo entre 02/01/2008 e 05/01/2008

<b>Ano</b>	<b>Mês</b>	<b>Dia</b>	<b>Hora</b>	<b><math>H_{s0}</math> (m)</b>	<b><math>T_p</math> (s)</b>	<b><math>Dir</math> (°)</b>
2008	1	2	12	4.02	9.40	287
2008	1	2	18	5.02	10.82	288
2008	1	3	0	5.44	10.78	285
2008	1	3	6	6.31	10.57	291
2008	1	3	12	6.61	10.97	296
2008	1	3	18	6.96	11.25	298
2008	1	4	0	8.65	13.35	301
2008	1	4	6	9.59	14.10	303
2008	1	4	12	8.55	13.35	305
2008	1	4	18	7.33	12.72	305
2008	1	5	0	6.29	12.11	305
2008	1	5	6	5.15	11.40	303
2008	1	5	12	4.21	10.79	302

Tabela 4.7. Valores das características da agitação marítima ao largo entre 12/02/2011 e 18/02/2011

<b>Ano</b>	<b>Mês</b>	<b>Dia</b>	<b>Hora</b>	<b><math>H_{s0}</math> (m)</b>	<b><math>T_p</math> (s)</b>	<b><math>Dir</math> (°)</b>
2011	2	12	0	4.30	13.89	306
2011	2	12	6	5.55	14.33	305
2011	2	12	12	5.85	14.25	303
2011	2	12	18	5.82	14.10	303
2011	2	13	0	5.47	13.74	303
2011	2	13	6	4.75	13.09	300
2011	2	13	12	4.47	12.76	297
2011	2	13	18	5.64	13.35	304
2011	2	14	0	5.74	12.63	304
2011	2	14	6	5.47	12.45	304
2011	2	14	12	5.37	12.72	305
2011	2	14	18	5.28	12.64	303
2011	2	15	0	5.35	11.85	299
2011	2	15	6	5.36	12.03	302
2011	2	15	12	5.34	12.36	307
2011	2	15	18	6.03	13.26	308
2011	2	16	0	7.26	14.49	306
2011	2	16	6	6.60	13.44	299
2011	2	16	12	6.83	12.11	294
2011	2	16	18	8.54	12.55	294
2011	2	17	0	9.65	13.16	297
2011	2	17	6	9.00	12.97	302
2011	2	17	12	7.65	12.48	303
2011	2	17	18	6.38	11.82	304
2011	2	18	0	5.35	11.17	305
2011	2	18	6	4.48	10.65	304

#### 4.3.1.2. Critério 2: Nível do mar ( $S_{m\acute{a}x.}$ )

O segundo critério passou por identificar inundações/galgamento devidos ao nível do mar. Este fenómeno muitas vezes, é provocado pela elevada velocidade média do vento perpendicular à costa, podendo levar à subida do nível de água e provocar inundações/galgamentos sem que a altura de onda significativa seja considerável. Assim, a análise efetuada consistiu em verificar, entre 2007 e 2012, se o nível do mar ( $S_{m\acute{a}x.}$ ) foi superior ou semelhante às cotas máximas ( $Z_{m\acute{a}x.}$ ) das dunas ou dos paredões das praias em estudo.

Foi analisado o registo da superfície do nível do mar, proveniente do marégrafo de Cascais, que consiste no somatório da maré astronómica (MA) referida ao Zero Hidrográfico (ZH) e a sobrelevação (*surge level* – SL) (Neves, 2013).

Identificou-se que o máximo nível do mar chegou, sensivelmente, aos 4 m de altura, o que significa que não é suficiente para transpor as barreiras impostas, quer por dunas quer por estruturas de proteções, pois a menor cota, de todas as praias em estudo, é, sensivelmente, 7.78 m, correspondente ao paredão localizado na Praia do CDS (S4) (Tabela 4.8).

Tabela 4.8. Cotas máximas das praias ( $Z_{máx.}$ ) e valor máximo do nível do mar ( $S_{máx.}$ )

$S_{máx.}$ (m)	$Z_{máx.}$ S1 (m)	$Z_{máx.}$ S2 (m)	$Z_{máx.}$ S3 (m)	$Z_{máx.}$ S4 (m)	$Z_{máx.}$ S5 (m)	$Z_{máx.}$ S6 (m)	$Z_{máx.}$ S7 (m)
4.01	9.41	8.29	8.37	7.78	8.08	8.07	7.92

Portanto, conclui-se que este critério não influencia a seleção da tempestade.

#### 4.3.1.3. Critério 3: Relatos dos meios de comunicação

O último critério tem como base a pesquisa nos meios de comunicação, de relatos sobre ocorrências de inundação/galgamentos na zona. Apesar de haver mais informação nuns meios de comunicação do que noutros, todos eles relatam as ocorrências sucedidas, havendo uma conformidade entre eles.

Os meios de comunicação consultados foram o Correio da Manhã (CM), Jornal de Notícias (JN), Diário de Notícias (DN), Televisão Independente (TVI), Rádio e Televisão de Portugal (RTP), quer a nível regional (na região do caso de estudo), como o Jornal da Região (JR), Diário da Região (DR).

A Figura 4.12 mostra excertos dos relatos sobre ocorrências, quer de inundação quer de destruição parcial, nas praias em estudo.

## Ocorrências

"O mar voltou a entrar no parque do Clube de Campismo de Lisboa durante a preia-mar da madrugada de hoje, mas com menos intensidade que terça-feira, revelou o presidente da Junta de Freguesia da Costa de Caparica, António Neves." (CM) [13]

- Março de 2007

"Vagas de sete metros provocaram ontem a destruição da fachada de um restaurante-bar na Costa de Caparica, concelho de Almada. A força do mar galgou o paredão e embateu violentamente sobre o bar Marcelino (antigo Tsunami)." (CM) [14]

- Janeiro de 2008

"Na madrugada de ontem, porém, o vento e a força do mar fustigaram o Litoral. Na Caparica, em Almada, o recuo da linha da costa foi de cerca de 15 metros, prevendo-se que não fique por aqui. Os maiores prejuízos verificaram-se nas praias de São João, onde o avanço do mar colocou em risco um dos apoios de praia, o bar Pé Nú." (CM) (Figura 4.13) [15]

- Março de 2008

"Na Costa da Caparica o avanço do mar continua. A forte agitação marítima provocou ondas entre os sete e os 10 metros." (CM) [16]

- Fevereiro de 2011

Figura 4.12. Excertos de relatos de ocorrências nas praias da Costa da Caparica

Com base nestes relatos, conclui-se que a notícia publicada em março de 2008 esteve relacionada, indiretamente, com a notícia publicada em janeiro de 2008. Com efeito, os danos causados em janeiro, desse mesmo ano, ainda não estavam totalmente retificados em março. Em fevereiro de 2011, apesar do grande avanço do mar, não foram registados grandes danos.



Figura 4.13. Danos dos processos erosivos devido à tempestade sentida em janeiro de 2008 [17]

Cruzando a seleção de cada critério, conclui-se que existem duas tempestades que podem ser utilizadas, uma em janeiro de 2008 e outra em fevereiro de 2011. Como a tempestade de 2008 foi de menor duração (3 dias ao invés de 6 dias) e como não há relatos de grandes estragos da tempestade de 2011, optou-se por selecionar a tempestade registada entre os dias 2 e 5 de janeiro de 2008.

#### **4.3.2. Seleção da tempestade 2**

Com o objetivo de fazer uma segunda avaliação ao modelo XBEACH, são analisados os resultados obtidos através do mesmo considerando uma nova condição de agitação, tempestade 2.

A tempestade 2 foi selecionada com base nos resultados das formulações empíricas, analisando aqueles que conduziram a valores máximos de NMI e caudal médio galgado, resultantes das formulações empíricas. A tempestade selecionada estende-se entre o dia 12 e 18 de fevereiro de 2011 e já tinha sido identificada quando foram aplicados os critérios de seleção de tempestade.



## Capítulo 5 – Análise de resultados

Neste capítulo, primeiramente, são apresentados e analisados os valores obtidos através das metodologias anteriormente apresentadas (fórmulas empíricas e modelo numérico XBEACH), considerando as condições de agitação marítima que caracterizam a tempestade 1, compreendida entre os dias 2 e 5 de janeiro de 2008, e a tempestade 2, compreendida entre os dias 12 e 18 de fevereiro de 2011.

Posteriormente, é feita uma comparação dos resultados numéricos obtidos, de modo a avaliar o desempenho do modelo XBEACH na estimação dos valores de NMI e de galgamento.

### 5.1. Fórmulas empíricas

Como já foi mencionado, as fórmulas empíricas têm diferentes objetivos, umas determinam o *runup* e o NMI e outras o *runup* e o caudal galgado, consoante sejam aplicadas em praias sem ou com estrutura de proteção, respetivamente. Seguidamente são apresentados e analisados os valores estimados pelas fórmulas empíricas para as tempestades 1 e 2.

#### 5.1.1. Análise dos valores estimados de NMI

Os resultados expostos neste subcapítulo referem-se somente à zona mais a norte da Praia de S. João da Caparica (S1), sem estrutura de proteção.

##### 5.1.1.1. Tempestade 1

Na Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam-se os valores de NMI obtidos com as diferentes formulações para a tempestade 1.

Analisando essas figuras observa-se uma semelhança na variação dos valores de NMI, sendo que os valores máximos ocorrem nas horas de preia mar e os menores valores nas horas de baixa mar, o que é compreensível devido à variação do nível do mar.

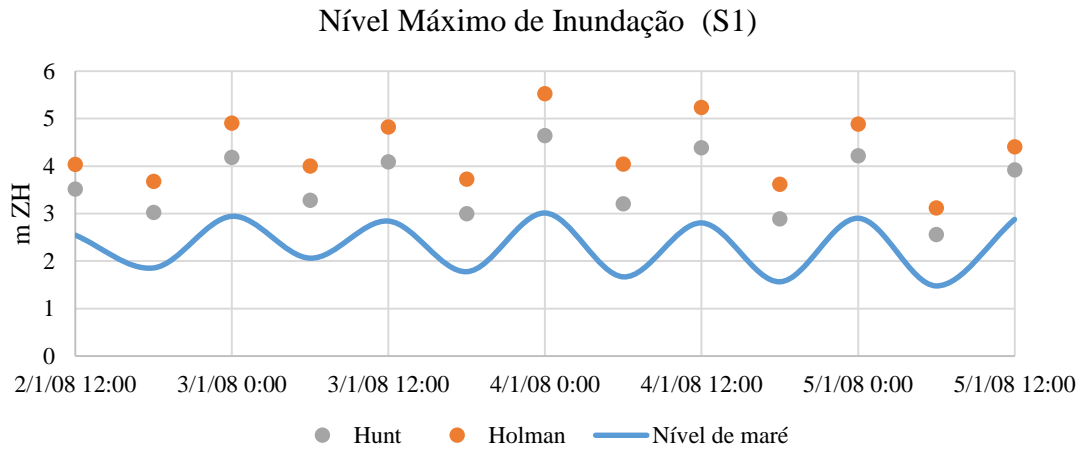


Figura 5.1. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Hunt (1959) e Holman (1986) para a tempestade 1

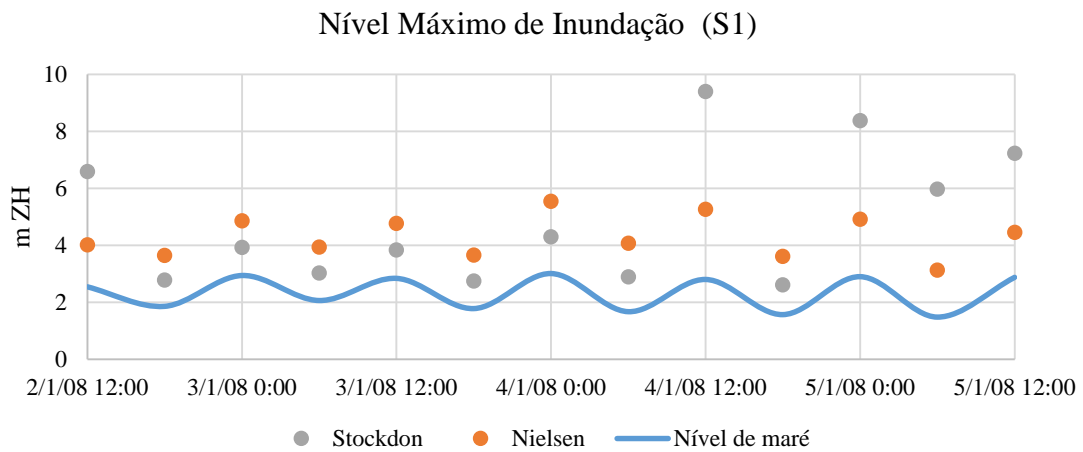


Figura 5.2. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Stockdon *et al.* (2006) e Nielsen e Hanslow (1991) para a tempestade 1

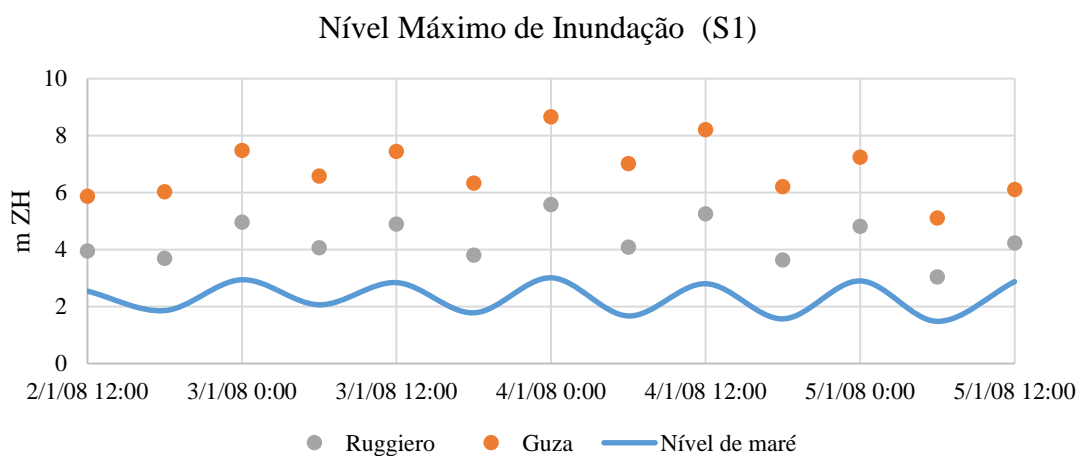


Figura 5.3. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Ruggiero *et al.* (2001) e Guza e Thornton (1982) para a tempestade 1

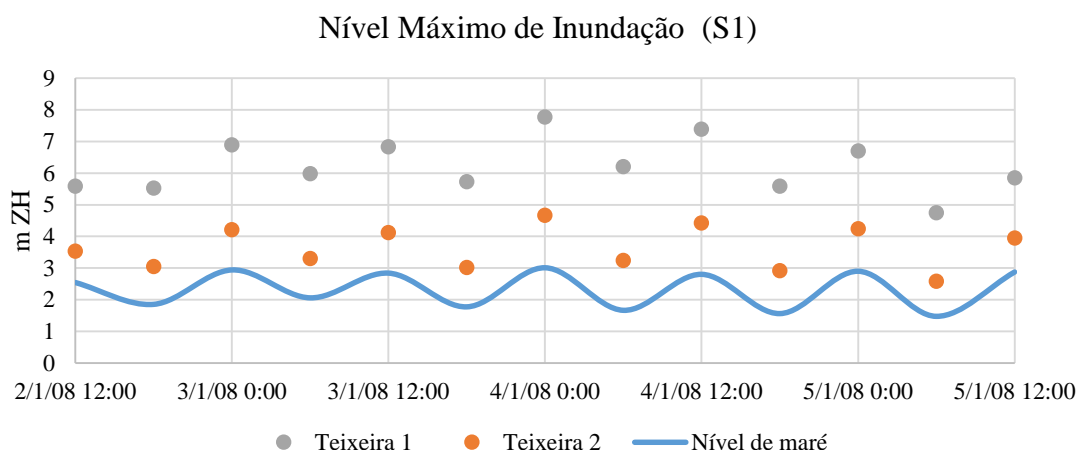


Figura 5.4. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir das duas metodologias de Teixeira (2009) para a tempestade 1

A Tabela 5.1 apresenta a compilação dos valores mais importantes para a análise, possibilitando a comparação dos resultados obtidos.

Tabela 5.1. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através das metodologias das diferentes formulações empíricas para a tempestade 1

<b>Autores</b>	<b>Mínimo (m ZH)</b>	<b>Máximo (m ZH)</b>	<b>Média (m ZH)</b>
<b>Hunt (1959)</b>	2.56	4.64	3.61
<b>Holman (1986)</b>	3.12	5.53	4.31
<b>Stockdon <i>et al.</i> (2006)</b>	2.62	9.41	4.91
<b>Nielsen e Hanslow (1991)</b>	3.13	5.55	4.31
<b>Ruggiero <i>et al.</i> (2001)</b>	3.04	5.59	4.31
<b>Guza e Thornton (1982)</b>	5.11	8.66	6.80
<b>Teixeira 1 (2009)</b>	4.75	7.78	6.22
<b>Teixeira 2 (2009)</b>	2.58	4.68	3.64

Observa-se que o intervalo dos resultados obtidos para o NMI, durante a tempestade 1, varia entre 4.6 m ZH e 9.4 m ZH, sendo o valor mais elevado o de Stockdon *et al.* (2006). Em relação aos valores médios, a variação é menor entre as diferentes formulações, apresentando resultados entre 3.6 m ZH e 6.7 m ZH, este último associado à formulação de Guza e Thornton (1982).

O valor máximo obtido, para a tempestade 1, é semelhante à cota máxima registada nas dunas, cerca de 9.41 m.

### 5.1.1.2. Tempestade 2

Na Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8 apresenta-se os valores de NMI obtidos com as diferentes formulações para a tempestade 2.

É possível verificar, analisando essas figuras, que existe uma semelhança na variação dos valores de NMI, como já tinha acontecido para a tempestade 1. Os valores mais elevados ocorrem nas horas de preia mar e os menores valores nas horas de baixa mar, devido à variação do nível do mar.

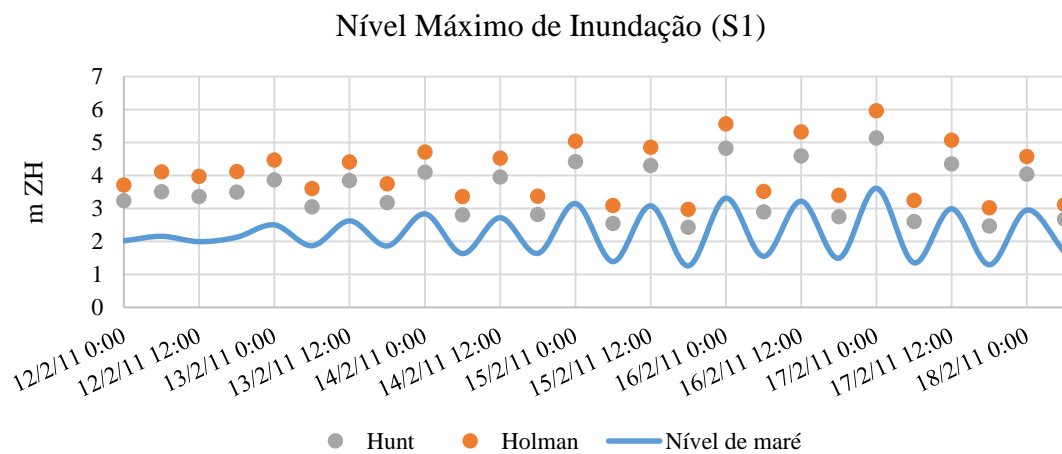


Figura 5.5. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Hunt (1959) e Holman (1986) para a tempestade 2

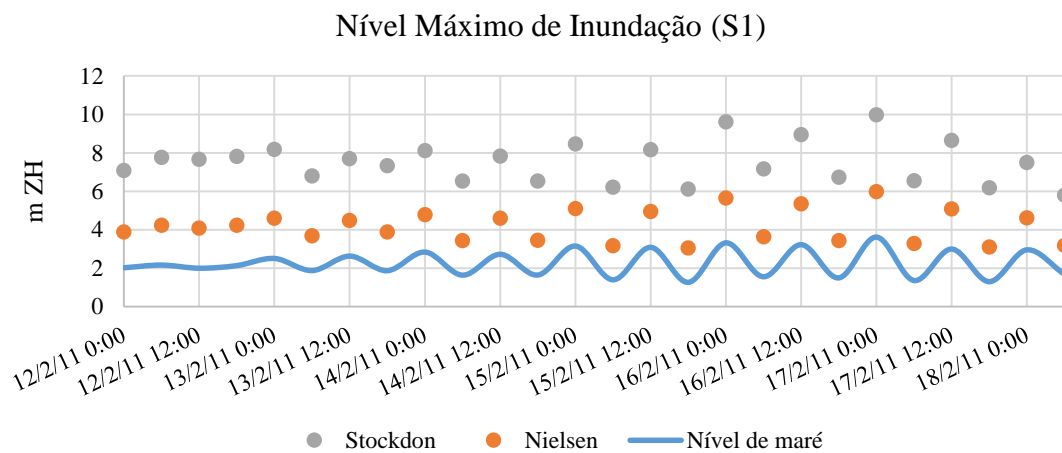


Figura 5.6. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Stockdon *et al.* (2006) e Nielsen e Hanslow (1991) para a tempestade 2

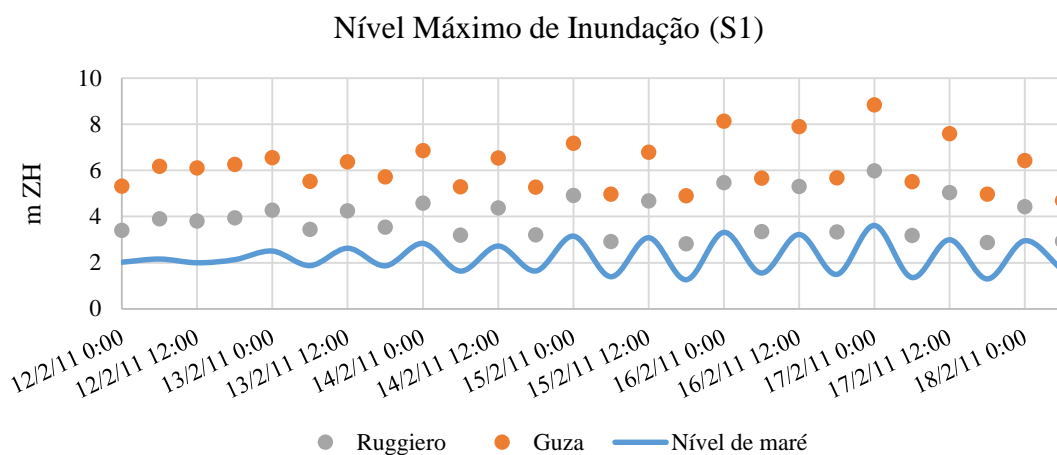


Figura 5.7. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir da metodologia de Ruggiero *et al.* (2001) e Guza e Thornton (1982) para a tempestade 2

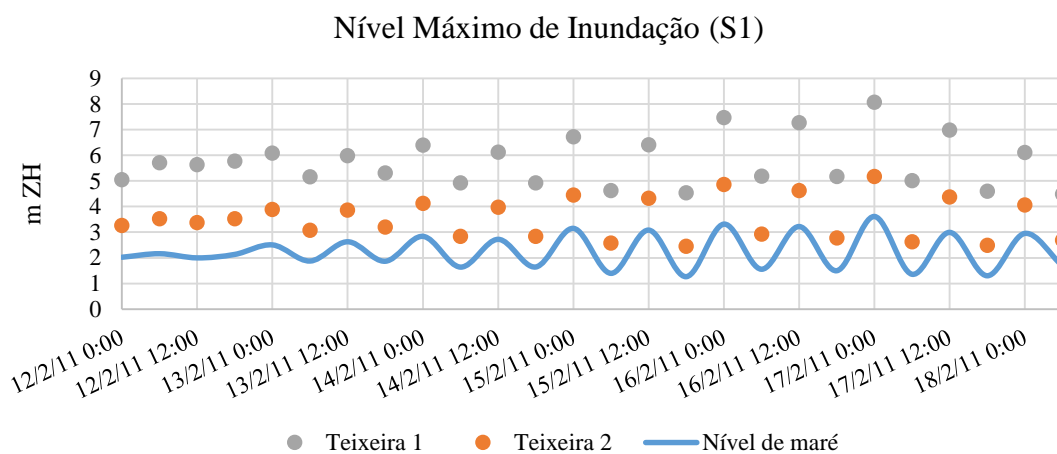


Figura 5.8. Comparação do Nível Máximo de Inundação obtido a partir das duas metodologias de Teixeira (2009) para a tempestade 2

A compilação dos valores mais importantes para a análise, possibilitando a comparação dos resultados obtidos, é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através das metodologias das diferentes formulações empíricas para a tempestade 2

<b>Autores</b>	<b>Mínimo (m ZH)</b>	<b>Máximo (m ZH)</b>	<b>Média (m ZH)</b>
<b>Hunt (1959)</b>	2.43	5.14	3.51
<b>Holman (1986)</b>	2.98	5.96	4.11
<b>Stockdon <i>et al.</i> (2006)</b>	5.79	9.97	7.51
<b>Nielsen e Hanslow (1991)</b>	3.05	5.98	4.19
<b>Ruggiero <i>et al.</i> (2001)</b>	2.83	5.99	3.97
<b>Guza e Thornton (1982)</b>	4.70	8.86	6.21
<b>Teixeira 1 (2009)</b>	4.50	8.08	5.76
<b>Teixeira 2 (2009)</b>	2.45	5.18	3.54

Nota-se que os valores estimados de NMI para a tempestade 2 variam entre 5.1 m ZH e 9.9 m ZH, sendo que o valor mais elevado foi estimado pela fórmula de Stockdon *et al.* (2006). A variação dos valores médios é menor entre as diferentes formulações, apresentando resultados entre 3.5 m ZH e 7.5 m ZH, sendo o valor mais elevado obtido por Stockdon *et al.* (2006).

O valor máximo obtido, para a tempestade 2, ultrapassa a cota máxima registada nas dunas, cerca de 9.41 m.

### **5.1.2. Análise dos valores estimados de galgamento**

Os resultados apresentados neste subcapítulo referem-se somente à Praia do CDS (S4). Na metodologia de Mase *et al.* (2013) o caudal médio galgado é calculado através do *runup*. O *runup* pode corresponder ao valor não excedido em 37% dos casos em ensaios com 100 ondas ( $R_{máx.37\%,100}$ ), assumindo a distribuição de Rayleigh, ou ao valor não excedido em 99% dos casos ( $R_{máx.99\%,100}$ ). Os resultados expostos referem-se ao caso mais gravosos, ao  $R_{máx.99\%,100}$ , ou seja, aquele que provocará um caudal médio galgado maior, remetendo-se para o Anexo IV os restantes resultados juntamente com as restantes praias.

#### **5.1.2.1. Tempestade 1**

Na Figura 5.9 apresenta-se o *runup* e na Figura 5.10 o caudal médio galgado para a tempestade 1.

É observado que o *runup* é elevado no período da tempestade, variando em concordância com o nível do mar, sendo o maior valor 8 m ocorrido às 0 horas do dia 4 de janeiro de 2008, e o menor 5 m, ocorrido às 12 horas do dia 2 de janeiro de 2008, aproximadamente.

Em relação ao caudal médio galgado, existe uma variação entre 0 l/s/m e 3.2 l/s/m, em que o maior valor corresponde ao *runup* mais elevado e que ocorreu às 0 horas do dia 4 de janeiro de 2008. Como os valores são a média de intervalos de 6 horas, não é possível avaliar se os mesmos são suficientemente elevados para causar os estragos registados no temporal.

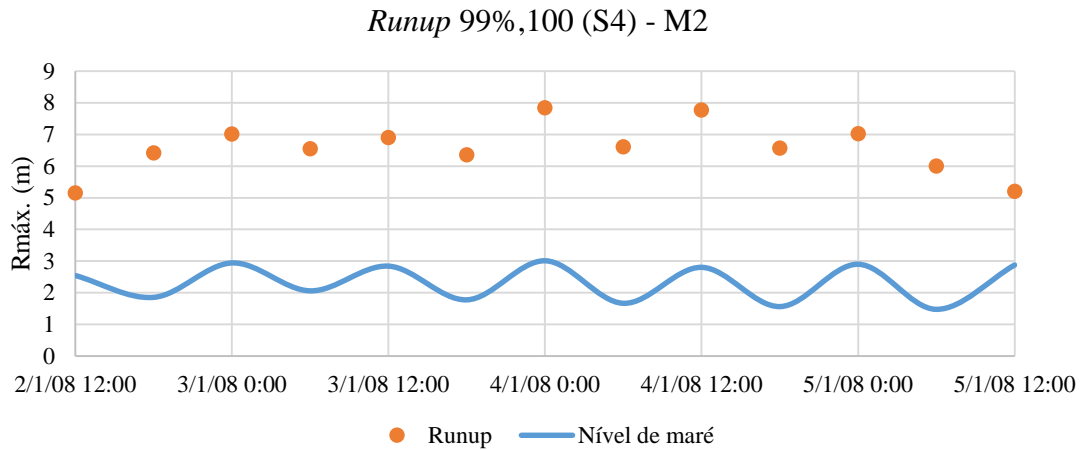


Figura 5.9. *Runup* na secção S4, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

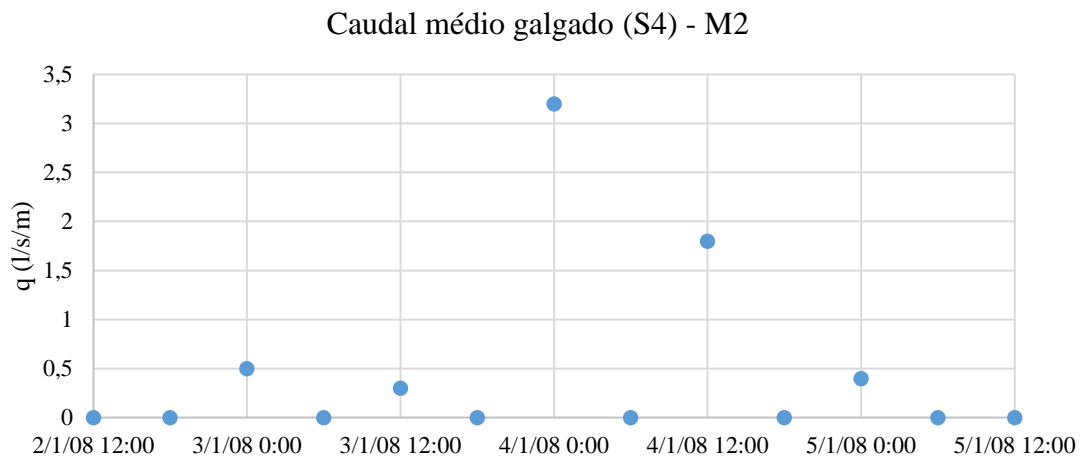


Figura 5.10. Caudal médio galgado na secção S4, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

### 5.1.2.2. Tempestade 2

Na Figura 5.11 apresenta-se o *runup* e na Figura 5.12 o caudal médio galgado para a tempestade 2.

Observa-se que o *runup* é elevado no período da tempestade e varia em concordância com o nível do mar. O maior valor (8.5 m) ocorreu às 0 horas do dia 17 de fevereiro de 2011 e o menor (4.8 m) ocorreu às 6 horas do dia 18 de fevereiro de 2011, aproximadamente.

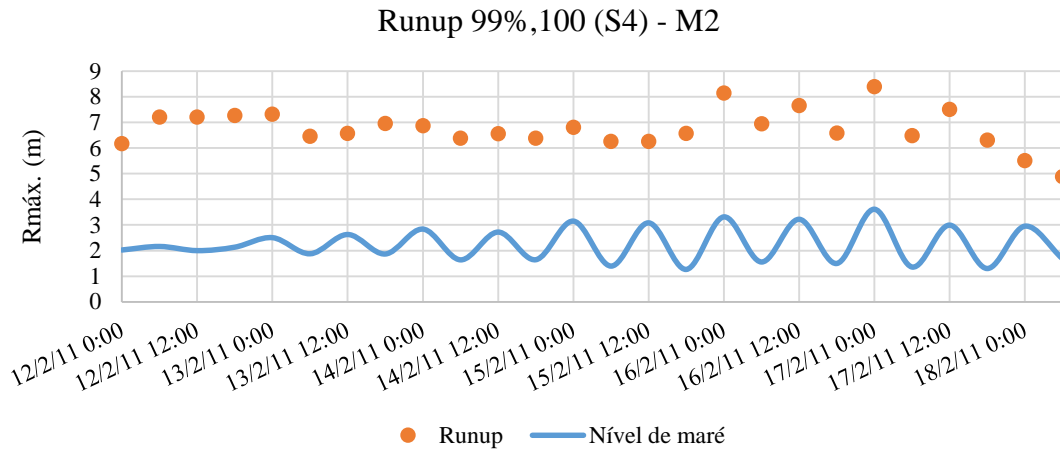


Figura 5.11. *Runup* na secção S4, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

O caudal médio galgado registou uma variação entre 0 l/s/m e 16 l/s/m, onde o maior valor ocorreu às 0 horas do dia 17 de fevereiro de 2011, correspondendo ao *runup* mais elevado.

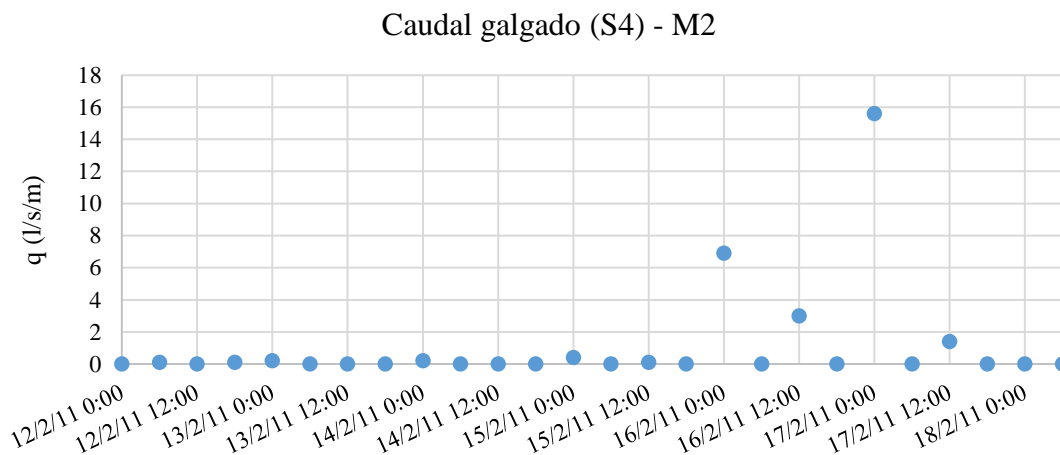


Figura 5.12. Caudal médio galgado na secção S4, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

## 5.2. Modelo XBEACH

Neste subcapítulo são apresentados e analisados os resultados numéricos obtidos através do modelo XBEACH. Os resultados correspondem ao valor de NMI e do caudal galgado considerando as tempestades 1 e 2.

### 5.2.1. Análise dos valores estimados de NMI

Os resultados apresentados de seguida referem-se somente à Praia de S. João da Caparica (S1).

#### 5.2.1.1. Tempestade 1

Na Figura 5.13 apresenta-se os valores de NMI obtidos através do modelo numérico XBEACH, para as condições da tempestade 1.

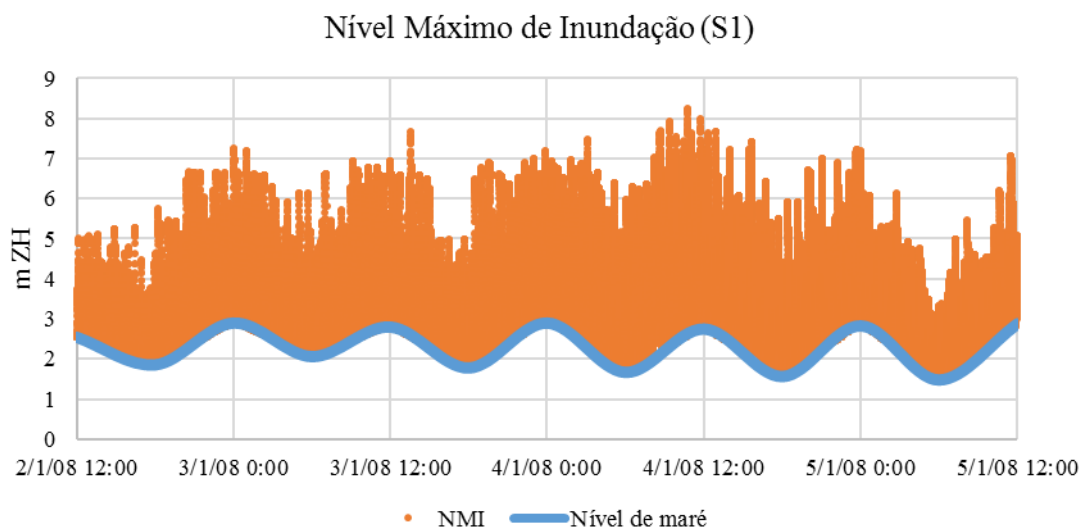


Figura 5.13. Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

Observando a Figura 5.13 pode-se afirmar que os valores estimados para o NMI acompanharam a variação dos períodos de baixa mar e preia mar, ao longo dos dias da tempestade, onde o menor valor de NMI fez-se sentir nas horas de baixa mar e o valor máximo de NMI foi registado nas horas de preia mar.

Na Tabela 5.3 pode-se observar os valores extremos de NMI, bem como a média dos valores calculados durante a mesma tempestade.

Tabela 5.3. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

Mínimo (m ZH)	Máximo (m ZH)	Média (m ZH)
1.51	8.25	3.57

Note-se que o valor máximo obtido, para a tempestade 1, não ultrapassa a cota máxima registada nas dunas, cerca de 9.41 m.

### 5.2.1.2. Tempestade 2

Na Figura 5.14 apresenta-se os valores de NMI obtidos através do modelo numérico XBEACH, para as condições da tempestade 2.

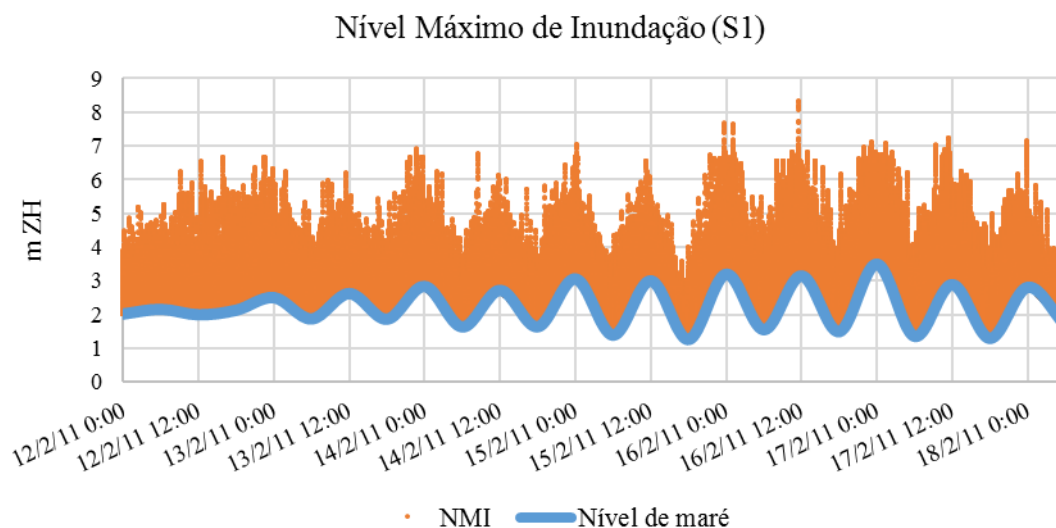


Figura 5.14. Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2

Através da análise da Figura 5.14 é possível dizer-se que o NMI variou, significativamente, ao longo dos dias da tempestade, como era esperado. O valor mínimo de NMI fez-se sentir nas horas de baixa mar e o valor máximo foi registado nas horas de preia mar.

Na Tabela 5.4 pode-se observar os valores extremos de NMI, bem como a média.

Tabela 5.4. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2

Mínimo (m ZH)	Máximo (m ZH)	Média (m ZH)
1.28	8.33	3.19

Note-se que o valor máximo obtido, para a tempestade 2, não ultrapassa a cota máxima registada nas dunas, cerca de 9.41 m.

### 5.2.2. Análise dos valores estimados de galgamento

Este subcapítulo refere-se os resultados relativos às praias do Norte (S2), de Santo António da Caparica (S3), do CDS (S4), do Tarquíneo/Paraíso (S5), do Dragão Vermelho (S6) e Nova (S7). Apenas serão apresentados os resultados referentes à praia do CDS, enquanto que os restantes encontram-se no Anexo V.

#### 5.2.2.1. Tempestade 1

Na Figura 5.15 apresenta-se os valores de caudal galgado obtidos através do modelo numérico XBEACH, para as condições da tempestade 1.

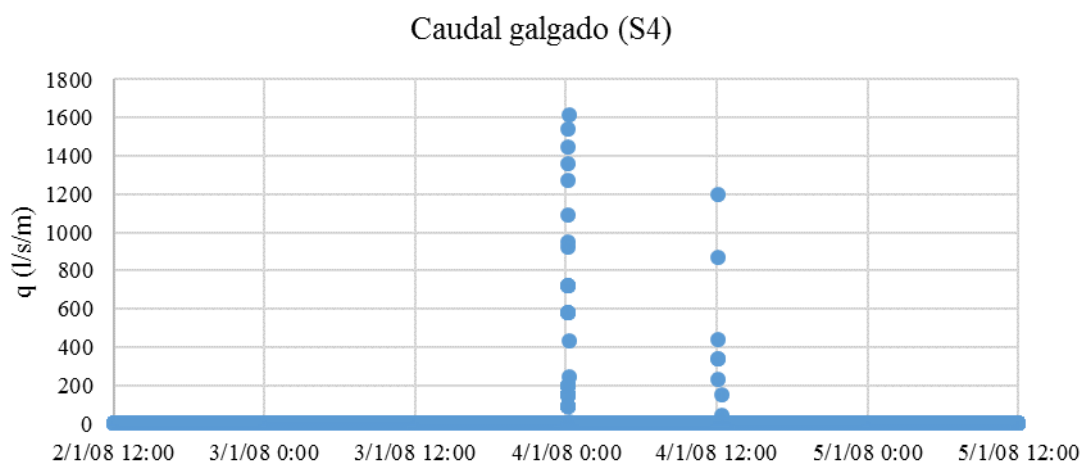


Figura 5.15. Caudal instantâneo galgado na secção S4, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

A Figura 5.15 permite analisar o caudal galgado instantâneo. Verifica-se que o valor máximo excedeu os 1600 l/s/m, valor compatível com os estragos registados durante este temporal, perto das 00:17 horas do dia 4 de janeiro de 2008.

Na Tabela 5.5 apresenta-se os valores mínimo, máximo e médio do caudal galgado obtido através do modelo numérico.

Tabela 5.5. Valores extremos e média do caudal instantâneo galgado na secção S4, determinados através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

<b>Mínimo (l/s/m)</b>	<b>Máximo (l/s/m)</b>	<b>Média (l/s/m)</b>
0	1615.40	0.91

### 5.2.2.2. Tempestade 2

Na Figura 5.16 apresenta-se os valores de caudal galgado obtidos através do modelo numérico XBEACH, para as condições da tempestade 2.

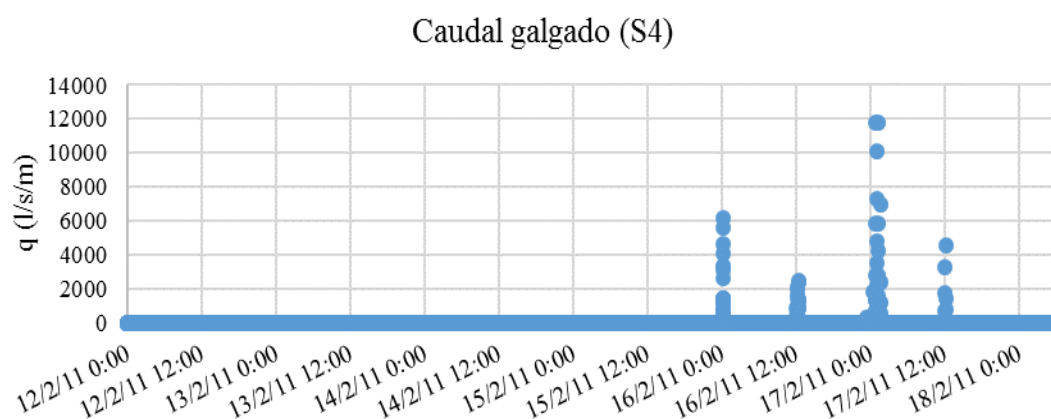


Figura 5.16. Caudal instantâneo galgado na secção S4, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2

Analisando a Figura 5.16 é possível afirmar que o caudal instantâneo máximo acontece perto das 0 horas do dia 17 de fevereiro de 2011, tendo excedido os 11800 l/s/m durante o período de preia mar. O maior caudal foi precedido por caudais menores, que tornam os resultados credíveis.

Na Tabela 5.6 apresentam-se os valores referentes ao caudal mínimo, máximo e médio.

Tabela 5.6. Valores extremos e média do caudal instantâneo galgado na secção S4, determinados através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2

<b>Mínimo (l/s/m)</b>	<b>Máximo (l/s/m)</b>	<b>Média (l/s/m)</b>
0	11808.60	0.41

## 5.3. Comparações

### 5.3.1. Comparação dos valores estimados de NMI

Na Tabela 5.7 apresentam-se os valores mínimos, máximos e médios de NMI obtido através das metodologias descritas, para a tempestade 1 e 2.

Tabela 5.7. Valores extremos e média do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através das metodologias das diferentes formulações empíricas e do modelo numérico, para a tempestade 1 e 2

Tempestade	Metodologia	Mínimo (m ZH)	Máximo (m ZH)	Média (m ZH)
1 2-5 de janeiro de 2008	<i>XBEACH</i>	1.51	8.25	3.57
	<i>Hunt (1959)</i>	2.56	4.64	3.61
	<i>Holman (1986)</i>	3.12	5.53	4.31
	<i>Stockdon et al. (2006)</i>	2.62	9.41	4.91
	<i>Nielsen e Hanslow (1991)</i>	3.13	5.55	4.31
	<i>Ruggiero et al. (2001)</i>	3.04	5.59	4.31
	<i>Guza e Thornton (1982)</i>	5.11	8.66	6.80
	<i>Teixeira 1 (2009)</i>	4.75	7.78	6.22
	<i>Teixeira 2 (2009)</i>	2.58	4.68	3.64
2 12-18 de fevereiro de 2011	<i>XBEACH</i>	1.28	8.33	3.19
	<i>Hunt (1959)</i>	2.43	5.14	3.51
	<i>Holman (1986)</i>	2.98	5.96	4.11
	<i>Stockdon et al. (2006)</i>	5.79	9.97	7.51
	<i>Nielsen e Hanslow (1991)</i>	3.05	5.98	4.19
	<i>Ruggiero et al. (2001)</i>	2.83	5.99	3.97
	<i>Guza e Thornton (1982)</i>	4.70	8.86	6.21
	<i>Teixeira 1 (2009)</i>	4.50	8.08	5.76
	<i>Teixeira 2 (2009)</i>	2.45	5.18	3.54

Analisando os resultados obtidos através das diferentes fórmulas empíricas e do modelo XBEACH (Tabela 5.7), regista-se uma razoável concordância entre os mesmos, para as duas tempestades. Os maiores valores de NMI oriundo do XBEACH encontram-se na gama dos valores obtidos com as formulações empíricas. Já o mesmo não acontece com a média e o mínimo, onde os mesmos provenientes do XBEACH são menores que a maior parte dos valores provenientes das formulações empíricas. Tal pode ser justificado pela diferente abordagem entre as metodologias.

Enquanto que o modelo XBEACH faz registos, a cada segundo, da variação do espraiamento, medido através de uma sonda colocada no perfil da praia, as formulações empíricas fazem, a cada 6 horas, estimativas do valor de NMI. As estimativas referem-se

ao valor de NMI, ou seja, à cota máxima possível de ser alcançada para uma determinada condição de agitação marítima. Assim, era esperado que o valor mínimo e médio de NMI fosse menor para os resultados obtidos através do modelo, pois o XBEACH regista valores que podem ser menores do que os estimados pelas fórmulas.

Em termos de valores máximos, as formulações concebidas por Guza e Thornton (1982) e Teixeira 1 (2009) são aquelas que mais se aproximam dos valores obtidos através do XBEACH, enquanto que para os valores médios são as formulações de Hunt (1959) e de Teixeira 2 (2009).

Analisando os resultados obtidos para as diferentes tempestades em estudo (Tabela 5.7), regista-se um pequeno acréscimo do valor máximo de NMI, ampliado pela tempestade 2, enquanto que no valor mínimo e médio é visível um decréscimo.

O acréscimo do valor de NMI, deve-se ao maior valor do nível do mar ( $S_{m\acute{a}x.}$ ). Como se pode observar na Tabela 5.8 o mesmo é maior, a rondar os 60 cm, na tempestade 2 (entre os dias 12 e 18 de fevereiro de 2011) e, simultaneamente, coincide com o maior valor da altura de onda significativa ( $H_s$ ), na mesma tempestade. Uma vez que as duas variáveis, nível do mar e altura de onda significativa, são máximas no mesmo instante, era esperado que os valores de *runup* fossem máximos perto desse instante.

Já o decréscimo, dos valores mínimos e médios de NMI, é justificado pelo valor médio e máximo da altura de onda significativa, para a tempestade 2, entre o dia 12 e o dia 18 de fevereiro de 2011, ser inferior, em relação à tempestade 1.

Tabela 5.8. Valores máximos e médios da altura de onda significativa no ponto P1, referentes à tempestade 1, entre o dia 2 e 5 de janeiro de 2008, e à tempestade 2, entre o dia 12 e 18 de fevereiro de 2011

Ponto	Ano	Mês	Dias	$H_s$ (m)		$S_{m\acute{a}x.}$ (m)	
				Máximo	Média	Máximo	Média
P1	2008	1	2-5	5.19	4.08	3.01	2.33
	2011	2	12-18	5.07	3.91	3.62	2.24

Observa-se na Tabela 5.9 que, para a maioria das formulações empíricas, o maior valor de NMI aconteceu às 0 horas do dia 17 de fevereiro de 2011. Nesta data aconteceu uma sucessão de ondas, entre os 7 e 10 m, que removeu areia da Praia de S. João da Caparica e expuseram os alicerces do Bar Pé Nú. Somente a metodologia proposta por Hunt (1959) apontou para a ocorrência do valor maior de NMI numa data diferente, às 6 horas do dia

5 de janeiro de 2010. No entanto, nesse período tempo, não foi registada qualquer ocorrência na praia em questão.

Apesar de não ser, exatamente, no mesmo dia, em relação aos resultados obtidos através das formulações empíricas, o maior valor de NMI obtido pelo modelo XBEACH (8.33 m ZH) acontece perto das 12 horas do dia 16 de fevereiro de 2011. Por isso, pode-se afirmar que, em relação ao NMI, o modelo XBEACH tem um comportamento aceitável.

Tabela 5.9. Valores máximos do Nível Máximo de Inundação na secção S1, determinados através das formulações empíricas e do modelo numérico, e as respetivas datas e horas em que ocorreram

<b>Autores</b>	<b>NMI (m ZH)</b>	<b>Data</b>	<b>Hora</b>
<b>XBEACH</b>	8.33	16/02/2011	12
<b>Hunt (1959)</b>	5.15	05/01/2010	6
<b>Holman (1986)</b>	5.96	17/02/2011	0
<b>Stockdon <i>et al.</i> (2006)</b>	9.97	17/02/2011	0
<b>Nielsen e Hanslow (1991)</b>	5.98	17/02/2011	0
<b>Ruggiero <i>et al.</i> (2001)</b>	5.99	17/02/2011	0
<b>Guza e Thornton (1982)</b>	8.86	17/02/2011	0
<b>Teixeira 1 (2009)</b>	8.08	17/02/2011	0
<b>Teixeira 2 (2009)</b>	5.18	17/02/2011	0

### 5.3.2. Comparação dos valores estimados de galgamento

Na Tabela 5.10 e na Tabela 5.11 apresenta-se o valor do caudal médio galgado obtido através das metodologias descritas, para a tempestade 1 e 2, respetivamente. De modo a fazer-se uma comparação entre as metodologias, para os valores obtidos através do XBEACH calculou-se a média de 6 em 6 horas.

Analisando os resultados obtidos para o caudal galgado (Tabela 5.10 e Tabela 5.11), regista-se uma boa concordância em termos temporais, uma vez que o maior valor estimado a partir dos resultados do XBEACH acontece, aproximadamente, na mesma data e hora que o maior valor estimado a partir das formulações.

As abordagens das metodologias das formulações empíricas e do modelo XBEACH são baseadas na quantidade de água, volume, que transpõe o coroamento num determinado intervalo de tempo, neste caso 6 horas. O volume é influenciado por a altura de água que transpõe o coroamento. Essa altura de água, nas formulações propostas por Mase *et al.* (2013), é estimada a partir do espriamento, enquanto que no modelo é estimada a partir da altura da superfície livre da água.

Porém, é interessante avaliar o caudal galgado através do modelo XBEACH, pois os valores médios, provenientes das formulações empíricas, não fornecem informação pormenorizada. O caudal médio galgado não traduz o número de ondas que galgam nem o volume correspondente a cada galgamento. A média pode resultar de realidades diversas, uma vez que uma pequena quantidade de ondas pode introduzir grandes volumes e as restantes serem responsáveis por galgamentos pouco significativos.

Como referido, o valor máximo do caudal galgado estimado pelo modelo numérico regista-se exatamente no mesmo dia e praticamente à mesma hora, quando comparado com os resultados obtidos através das formulações empíricas, às 0 horas do dia 17 de fevereiro de 2011. Por isso a maior média, com intervalos de 6 horas, também corresponde à essa data, como se pode ver na Tabela 5.10 e na Tabela 5.11.

Verificou-se que o caudal médio galgado obtido através das formulações empíricas propostas por Mase *et al.* (2013) é maior, em relação ao médio obtido através do modelo XBEACH, justificado pelas diferenças entre as abordagens das metodologias.

Tabela 5.10. Comparação dos valores médios, a cada 6 horas, na secção S4, determinados através das formulações empíricas e do modelo numérico, com as respetivas datas e horas em que ocorreram, para a tempestade 1

Tempestade	Ano	Mês	Dia	Hora	Mase <i>et al.</i> (2013) (l/s/m)		XBEACH (l/s/m)
					Método 1	Método 2	
1  2-5 de janeiro de 2008	2008	1	2	12	0.00	0.00	0.00
	2008	1	2	18	0.00	0.00	0.00
	2008	1	3	0	0.00	0.50	0.00
	2008	1	3	6	0.00	0.00	0.00
	2008	1	3	12	0.00	0.30	0.00
	2008	1	3	18	0.00	0.00	0.00
	2008	1	4	0	1.30	3.20	0.91
	2008	1	4	6	0.00	0.00	0.00
	2008	1	4	12	0.30	1.80	0.17
	2008	1	4	18	0.00	0.00	0.00
	2008	1	5	0	0.00	0.40	0.00
	2008	1	5	6	0.00	0.00	0.00
	2008	1	5	12	0.00	0.00	0.00

Tabela 5.11. Comparação dos valores médios, a cada 6 horas, na secção S4, determinados através das formulações empíricas e do modelo numérico, com as respetivas datas e horas em que ocorreram, para a tempestade 2

Tempestade	Ano	Mês	Dia	Hora	Mase et al (2013) (l/s/m)		XBEACH (l/s/m)
					Método 1	Método 2	
2 12-18 de fevereiro de 2011	2011	2	12	0	0.00	0.00	0.00
	2011	2	12	6	0.00	0.10	0.00
	2011	2	12	12	0.00	0.00	0.00
	2011	2	12	18	0.00	0.10	0.00
	2011	2	13	0	0.00	0.20	0.00
	2011	2	13	6	0.00	0.00	0.00
	2011	2	13	12	0.00	0.00	0.00
	2011	2	13	18	0.00	0.00	0.00
	2011	2	14	0	0.00	0.20	0.00
	2011	2	14	6	0.00	0.00	0.00
	2011	2	14	12	0.00	0.00	0.00
	2011	2	14	18	0.00	0.00	0.00
	2011	2	15	0	0.00	0.40	0.00
	2011	2	15	6	0.00	0.00	0.00
	2011	2	15	12	0.00	0.10	0.00
	2011	2	15	18	0.00	0.00	0.00
	2011	2	16	0	5.00	6.90	2.75
	2011	2	16	6	0.00	0.00	0.00
	2011	2	16	12	1.40	3.00	1.12
	2011	2	16	18	0.00	0.00	0.02
2011	2	17	0	14.10	15.60	5.67	
2011	2	17	6	0.00	0.00	0.00	
2011	2	17	12	0.30	1.40	0.59	
2011	2	17	18	0.00	0.00	0.00	
2011	2	18	0	0.00	0.00	0.00	
2011	2	18	6	0.00	0.00	0.00	

É observado um aumento do valor máximo do caudal galgado, para a tempestade 2, que gerou um acréscimo da média produzida em intervalos de 6 horas.

O acréscimo do valor do caudal galgado, deve-se ao maior valor do nível do mar ( $S_{máx.}$ ), como se pode observar na Tabela 5.8. Como referido anteriormente, uma vez que as duas variáveis, nível do mar e altura de onda significativa, são máximas no mesmo instante, era esperado que os valores de caudal galgado fossem máximos perto desse instante.

Tabela 5.12. Valores máximos e médios da altura de onda significativa no ponto P4, referentes à tempestade 1, entre o dia 2 e 5 de janeiro de 2008, e à tempestade 2, entre o dia 12 e 18 de fevereiro de 2011

Ponto	Ano	Mês	Dias	$H_s$ (m)		$S_{máx.}$ (m)	
				Máximo	Média	Máximo	Média
P4	2008	1	2-5	4.81	3.62	3.01	2.33
	2011	2	12-18	4.72	3.66	3.62	2.24

No que toca às restantes praias, quando aplicado o modelo XBEACH, observa-se através da Tabela 5.13 que o maior valor de caudal instantâneo galgado registado ocorreu quando foi utilizada a tempestade 2, na Praia Santo António da Caparica (S3), cerca de 13000 l/s/m, e para a tempestade 1 foi estimado para a mesma praia, a rondar os 4900 l/s/m. O maior valor de caudal médio galgado estimado pelas fórmulas empíricas, também foi para a Praia Santo António da Caparica (S3), cerca de 20 l/s/m, na aplicação do método 2 e considerando as condições de agitação marítima que caracterizam a tempestade 2. Já para a tempestade 1, o maior valor estimado foi para a mesma praia, a rondar os 3.5 l/s/m, utilizando o método 2. No entanto na praia mencionada não se registou qualquer ocorrência de galgamento no período em estudo.

Tabela 5.13. Valores máximos do caudal galgado nas secções S2, S3, S4, S5, S6 e S7, determinados através das metodologias das diferentes formulações empíricas e do modelo numérico, para as tempestades 1 e 2

Tempestade	Secção	Mase <i>et al.</i> (2013) (l/s/m)		XBEACH (l/s/m)
		Método 1	Método 2	
1 2-5 de janeiro de 2008	S2	0.70	2.70	2331.54
	S3	1.20	3.60	4879.86
	S4	1.30	3.20	1615.40
	S5	0.00	0.00	0.00
	S6	0.00	0.00	0.00
	S7	0.00	0.00	0.00
	2 12-18 de fevereiro de 2011	S2	9.00	11.10
S3		17.30	19.80	13232.71
S4		14.10	15.60	11808.60
S5		0.00	0.00	0.00
S6		0.00	0.00	0.00
S7		0.00	0.00	0.00

Num aspeto geral, quando considerada a tempestade 2, houve um acréscimo dos caudais para todas as praias, mas esse acréscimo foi notório nas praias do Norte, Santo António da Caparica e do CDS, onde houve valores a quintuplicarem. Pelos registos

documentados, as praias a norte, incluído a parte com estrutura aderente da praia de S. João da Caparica, são aquelas que mais sofrem o fenómeno de galgamento. Esse fato deve-se à escassa área de areal, por isso aceita-se que o acréscimo dos caudais seja notório nas praias mencionadas.

Uma vez que os resultados médios do caudal galgado obtidos através do XBEACH são, sensivelmente, um terço menor que os resultados obtidos pela formulação de Mase *et al.* (2013), sendo essa disparidade justificada pelas diferentes abordagens entre as metodologias, pode-se afirmar que o modelo subestima os resultados correspondentes ao caudal galgado.



## Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

O principal objetivo do presente trabalho foi aplicar e avaliar o desempenho do modelo numérico XBEACH (Roelvink *et al.*, 2009), enquadrado no projeto HIDRALERTA (Fortes *et al.*, 2013), na determinação dos valores de *runup*, NMI e caudal galgado. O modelo foi aplicado em sete praias que constituem a zona costeira da Costa da Caparica, no concelho de Almada e os resultados comparados com as formulações empíricas.

O XBEACH (Roelvink *et al.*, 2009) é um modelo numérico de previsão do efeito de tempestades marítimas na erosão e inundação de zonas costeiras, e foi avaliado através da comparação do desempenho do mesmo relativamente às fórmulas empíricas.

Foi adotado um conjunto de dados de agitação marítima determinados por Martinho (2014), no período entre os anos de 2007 e de 2012, em que a autora caracterizou os regimes de agitação marítima partindo de previsões de agitação marítima, fornecidas pelo modelo WAVEWATCH III (Tolman, 1991), e transferindo as mesmas para junto à costa, recorrendo ao modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999). O nível do mar utilizado, composto pela soma da maré astronómica com a sobrelevação, foi medido pelo marégrafo de Cascais para o mesmo período de tempo. Já os perfis transversais de cada praia foram determinados pela técnica LIDAR. Os campos de ventos foram desprezados, por não influenciarem as condições de agitação marítima, perto da costa, como influenciam ao largo.

Apesar dos valores dos regimes de agitação marítima terem uma boa concordância em termos de andamento com o nível do mar, registando-se as maiores alturas de onda significativa quando o nível é maior, ou seja, no período de preia mar, destaca-se a semelhança de altura de onda e período de pico em todas as praias. Essa semelhança é justificada por os pontos, que caracterizam cada praia, terem aproximadamente a mesma cota batimétrica e que estão numa zona onde as linhas batimétricas se apresentam praticamente paralelas à costa.

As metodologias, quer das fórmulas empíricas quer do modelo numérico, são diferentes para as praias com e sem estrutura de proteção costeira aderente, sendo determinado o *runup*, e o respetivo nível máximo de inundação, para as primeiras e o *runup*, e/ou o respetivo caudal galgado, para as segundas.

De modo a obter uma avaliação do desempenho do XBEACH mais rigorosa, foram feitas duas simulações. Numa simulação foram considerados os dados de agitação marítima que caracterizam a tempestade 1, selecionada recorrendo a três critérios de seleção ligados à altura de onda significativa ao largo, ao nível do mar e aos relatos de acontecimentos efetuados nos meios de comunicação. Enquanto que na outra simulação, foram considerados os dados de agitação marítima que caracterizam a tempestade 2, selecionada por provocar valores máximos de inundação e galgamento, na aplicação das fórmulas empíricas.

Na comparação dos resultados numéricos obtidos observou-se uma boa concordância em termos temporais na variação dos valores, quer do *runup* quer do caudal galgado, determinados pelas diferentes metodologias, registando valores máximos nos mesmos dias. Uma vez que os mesmos variam com o nível do mar, os valores máximos correspondem aos períodos de preia mar e os mínimos aos períodos de baixa mar.

Em relação à magnitude, observou-se que o nível máximo de inundação determinado pelo modelo numérico, encontra-se na gama dos valores oriundos das formulações empíricas. Já o mesmo não aconteceu para os valores de caudal galgado, observou-se que os valores médios, com intervalos de 6 horas, determinados pelas fórmulas empíricas, são superiores aos valores determinados pelo modelo numérico. Esta disparidade é justificada pela diferente abordagem entre as metodologias.

Em termos de valores máximos de nível máximo de inundação, as formulações concebidas por Guza e Thornton (1982) e Teixeira 1 (2009) são aquelas que mais se aproximam dos valores obtidos através do XBEACH, enquanto que para os valores médios são as formulações de Hunt (1959) e de Teixeira 2 (2009).

No período em estudo, 2007 a 2012, houve alguns fenómenos de *runup* e de galgamento que provocaram destruição, no entanto os valores máximos estimados de *runup* e caudal galgado, não correspondem às ocorrências documentadas, apesar de corresponderem às praias mais prejudicadas, praias mais a norte.

Um dos problemas detetados foi a inexistência de dados de agitação marítima quando ocorreram os fenómenos mais graves de agitação e, por conseguinte, maiores estragos, de modo a analisar o *runup* e os caudais galgados para essas situações.

Perante os resultados obtidos, pode-se afirmar que o modelo XBEACH tem um bom comportamento na estimação de valores de nível máximo de inundação, já o mesmo não

se pode afirmar na estimação dos valores de caudal galgado, em que o modelo subestima, em relação às formulações empíricas, os valores correspondentes ao mesmo.

As conclusões apresentadas devem ser analisadas com cuidado, uma vez que elas têm limitações inerentes, quer ao nível dos dados (agitação marítima e perfis de praia) e das formulações empíricas consideradas, que não foram concebidas para as praias estudadas.

Os levantamentos dos perfis de praia (maio de 2011) não coincidem com datas dos dados de agitação marítima, para as tempestades estudadas (janeiro de 2008 e fevereiro de 2011), que foram determinados por modelos numéricos, por isso foi desprezado as alterações naturais provocadas pela mesma, e as alterações antropogénicas, provocadas pelos enchimentos de areia que se fizeram por via artificial. Estas alterações irão refletir-se no declive do fundo do mar e no declive da praia, que se mostraram parâmetros relevantes no cálculo da previsão de *runup* e galgamento.

Portanto, a monitorização e recolha de dados, principalmente os perfis de praia, deveria ser contínua, ou com uma frequência adaptada às ocorrências e/ou às estações do ano, de modo a documentar a evolução do local. Com dados mais precisos, a probabilidade das estimativas estarem de acordo com a realidade era mais elevada.

De modo a eliminar as limitações inerentes das fórmulas empíricas, principalmente, no que toca ao transporte de sedimentos, que provocam modificações permanentes do fundo junto à costa, e, ainda, aos regimes das ondas, onde estas são consideradas monocromáticas, o modelo XBEACH pode assumir um papel preponderante. O modelo numérico faz a modelação dos fenómenos mencionados, de uma forma minuciosa mas demorada. No entanto, é necessário fazer uma validação comparando os resultados do mesmo, com os resultados de metodologias já validadas, para que se possa aplicar com confiança. Por isso, o presente trabalho, representou mais um passo para a obtenção de um modelo numérico capaz de ser a base de um sistema de previsão e alerta de inundação na zona costeira.

O XBEACH permite avaliar o caudal galgado de uma forma diferente mas não menos interessante, pois os valores médios, provenientes das formulações empíricas, não fornecem informação pormenorizada. O caudal médio galgado não traduz o número de ondas que galgam nem o volume correspondente a cada galgamento. A média pode resultar de realidades diversas, uma vez que uma pequena quantidade de ondas pode introduzir grandes volumes e as restantes serem responsáveis por galgamentos pouco

significativos. Assim, é possível fazer-se uma avaliação de risco de galgamento através do volume galgado por onda.

Na realização deste trabalho notou-se que o nível do mar é um parâmetro importante na previsão dos valores do nível máximo de inundação e do caudal galgado. Ele influencia diretamente os valores, determinando a distância entre a cota do coroamento da estrutura e o nível da água. Ou seja, para um determinado valor de *runup*, quanto maior o nível do mar maior será o nível máximo de inundação, semelhante ao que acontece na determinação do caudal galgado.

De modo a avaliar melhor o modelo numérico, pode optar-se por uma simulação de mais dias, que englobe dias de verão e de inverno. Assim, avaliava-se, comparando com levantamentos, o andamento das variações morfológicas das praias e, comparando com medições, o andamento e a magnitude do *runup* e/ou galgamento.

O modelo numérico está apetrechado de um processo que permite incluir navios. Seria interessante avaliar a influência das ondas provocadas pelos navios no *runup* e/ou galgamento, fazendo uma comparação entre valores estimados, para as mesmas condições, em que uns eram influenciados pelos navios e outros não.

O mesmo acontece para os processos de dissipação provocados pela vegetação. De modo a avaliar a influência da vegetação na rebentação de ondas e/ou na redução da velocidade de escoamento, permitindo determinar se será conveniente implementar uma variedade de espécie no perfil de praia. Assim, a proteção seria executada de uma forma mais natural.

## Referências bibliográficas

- Abreu, F. V. (2010). *O Porto de Lisboa e a Golada, uma visão hidro-oceanográfica. Ciclo de conferências «O Porto de Lisboa e a Golada do Tejo»*. Academia de Marinha, Lisboa.
- 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, setembro.
- Agência Portuguesa do Ambiente (2012). *Plano de Ação de Protecção e Valorização do Litoral 2012-2015*. Lisboa.
- Andrews, D. G., e McIntyre, M. E. (1978). *An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow*. *Journal of Fluid Mechanics*, 89(04), 609-646.
- Ângelo, J. (2012). *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona adjacente ao estuário de Diogo Lopes, Brasil*. Dissertação de Mestrado, IST, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, novembro.
- Barceló, J. P. (1971). *Experimental Study of the Hydraulic Behaviour of Inclined Groyne Systems*. LNEC, Ministério das Obras Públicas, Lisboa.
- Booji, N., Ris, R. C., e 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.
- Brandenburg, P. G. (2010). *Scale dependency of dune erosion models: performance assessment of the DUROS and XBeach model for various experiment scales*. M.Sc. Thesis in Water Engineering and Management, University of Twente. The Netherlands.
- Brito, S. F. (2007). *Estudo do galgamento em estruturas marítimas*. Dissertação de Mestrado, IST, Universidade de Lisboa. Lisboa, outubro.
- Broker Hedegaard, I., Deigaard, R. e Fredsee, J. (1991). *Onshore/Offshore sediment transport and morphological modeling of coastal profiles*. In *Coastal Sediments '91*, ASCE, Seattle, WA, Vol. 1, pp. 643-657.
- Coeveld, E. M., Van Gent, M. R., e Pozueta, B. (2005). *Neural Network, Manual NN\_OVERTOPPING2*. 38. Delft, Netherlands.
- Costa, M., Silva, R., e Vitorino, J. (2001). *Contribuição para o estudo do clima de agitação marítima na costa portuguesa*. 2ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Sines, 17-19 de outubro.
- de Vries, J. V. T., Van Gent, M. R. A., Walstra, D. J. R. e Reniers, A. J. H. M. (2008). *Analysis of dune erosion processes in large-scale flume experiments*. *Coastal Engineering*, 55(12), 1028-1040.
- Deltares. (2011). *User Manual: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*. Delft3D-Flow. Hydro-Morphodynamics.
- den Bieman, J. (2013). *XBeach grid tutorial*. Delft: Deltares.

- DHI (2008). *Profile development: LITPROF user guide*. Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Elfrink, B., Brøker, I. e Deigaard, R. (2000) *Beach profile evolution due to oblique wave attack*. Proc. 27th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, Sydney.
- Faria, C. (2009). *Previsão da Agitação na Costa Noroeste Portuguesa - Implementação do SWAN*. Dissertação de Mestrado, FEUP. Porto, fevereiro.
- Fortes, C., Reis, M., Poseiro, P., Santos, J., Garcia, T., Capitão, R., Pinehiro, L., Reis, R., Craveiro, J., Lourenço, I., Lopes, P., Rodrigues, A., Sabino, A., Araújo, J., Ferreira, J., Silva, S., Raposeiro, P., Simões, A., Azevedo, E., Reis, F., Rodrigues, M. e Pereira da Silva, C. (2015). *Ferramenta de apoio à gestão costeira e portuária: o sistema Hidralerta*. VIII Congresso Sobre Planeamento e Gestão Das Zonas Costeiras Dos Países de Expressão Portuguesa. Universidade de Aveiro. Aveiro.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T. e Neves, P. (2013a). *Calcula\_Runup\_NovasEquacoes\_condicoeslargo\_1.f*. Programa de cálculo do runup e do nível máximo de inundação utilizando várias formulações empíricas, utilizando a linguagem FORTRAN. Relatório LNEC, Lisboa.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T. e Neves, P. (2013b). *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, Lisboa.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Capitão, R., Santos, J.A., Pinheiro, L.P., Rodrigues, A., Sabino, A., Rodrigues, M.C., Raposeiro, P., Ferreira, J.C., Silva, C., Simões, A. e Azevedo, E.B. (2013c). *O Projeto HIDRALERTA. Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias*. In Atas das 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Fortes, C.J.E.M. (2002). *Transformações Não Lineares de Ondas em Zonas Portuárias. Análise pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de Doutoramento, Eng. Mecânica, IST. Lisboa, janeiro.
- Gallien, T. W., e Guza, R. T. (2015). *Modeling and observations of wave overtopping flooding on a Southern California beach*. E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress.
- Guza, R. T. e Thornton, E. B. (1982). *Swash oscillations on a natural beach*. Journal of Geophysical Research, 87 (C1), 483-491.
- Hedges, T. S. e Reis, M. T. (1998). *Random wave overtopping of simple sea walls: a new regression model*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Water, maritime and energy, 130(1), 0001-0010.
- Holman, R. A. (1986). *Extreme Value Statistics for wave Runup on a natural beach*. Coastal Engineering, 527-544.
- Hunt, I. A. (1959). *Design of seawalls and breakwaters*. Journal of Waterways and Harbours Division, 85, 123-152.
- ICNB. (2007). *Plano de Ordenamento e Gestão da Paisagem Protegida da Arriba Fóssil da Costa da Caparica, Lagoa de Albufeira e áreas adjacentes*.

- INE. (2011). *Censos*.
- Komar, P. D. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice-Hall.
- Larson, M., e Kraus, N. C. (1989). *SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change*. Report 1. Empirical foundation and model development (No. CERC-TR-89-9). Coastal Engineering Research Center. Vicksburg, Mississippi.
- Larson, M., Erikson, L., e Hanson, H. (2004). *An analytical model to predict dune erosion due to wave impact*. *Coastal Engineering*, 51(8-9):675-696.
- Larson, M., Kraus, N. C. e Byrnes, M. R. (1990). *SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change*. Report 2. Numerical Formulation and Model Tests (No. CERC/TR-89-9). US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Larson, M., Wisén, R. e Kraus, N. C. (2004). *Modeling dune response by overwash transport*. In *29th International Conference on Coastal Engineering* (Vol. 1, pp. 2133-2145). World Scientific Publishing Company.
- Magalhães, R. V. (2015). *Caracterização morfodinâmica e sedimentar da praia de Carcavelos*. Dissertação de Mestrado, FC, Universidade de Lisboa. Lisboa, dezembro.
- Martinho, M. (2014). *Avaliação e Gestão de Riscos em Áreas Litorais*. Dissertação de Mestrado, ISEL, Instituto Politécnico de Lisboa. Lisboa, dezembro.
- Mase, H. (1989). *Random wave runup height on gentle slope*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115, 5, 649-661.
- Mase, H. e Kirby, J. T. (1993). *Hybrid frequency-domain KdV equation for random wave transformation*. *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Engineering*, ASCE, NY, 474-487.
- Mase, H., Miyahira, A. e Hedges, T. S. (2004). *Random wave runup on seawalls near shorelines with and without artificial reefs*. *Coastal Engineering in Japan*, 46(03), 247-268.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S. e Reis, M. T. (2013). *Wave Runup and overtopping at seawalls built on land an in very shallow water*. *Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Engineering*, 139, 346-357.
- Matias, A., Williams, J., Masselink, G., e Ferreira, O. (2012). *Overwash threshold for gravel barriers*. *Coastal Engineering*, 63, 43-48.
- Mehvar, S., Dastgheib, A. e Roelvink, J. (2015). *Validation of XBeach model for wave run-up*. *E-Proceedings of the 36th IAHR World Congress*, theme 5 in 745(7), pages 4743-4750, The Hague, the Netherlands.
- Neves, P. (2013). *Avaliação do risco de inundação da zona da Costa da Caparica*. Dissertação de Mestrado, FCTUC, Universidade de Coimbra. Coimbra, julho.
- Neves, P., Poseiro, P., Fortes, C. J. E. M., Reis, T., Capitão, R., Antunes do Carmo, J., Raposeiro, P. e Ferreira, J. C. (2013). *Aplicação da Metodologia de Avaliação do Risco de Inundação/Galgamento na Praia de São João da Caparica*, *Proc. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, AIPCN/ PIANC, Lisboa.

- Nielsen, P. e Hanslow, D. J. (1991). *Wave Runup Distributions on Natural Beaches. Journal of Coastal Research*, 7, 1139-1152.
- Nishi, R. e Kraus, N. C. (1996). *Mechanism and calculation of sand dune erosion of storms. In 25th International Conference on Coastal Engineering*, pages 3034-3047, Orlando, Florida, USA. ASCE.
- Oliveira, F. S. B. F. (2011). *Avaliação do Modelo de Erosão de Praias e Dunas—Xbeach: Resultados Preliminares. In 11º Congresso da Água*, Porto, Portugal.
- Oliveira, F. S. B. F. (2012). *Modelação numérica da erosão de dunas durante tempestades. IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia*, Lisboa, Portugal.
- Oliveira, F. S. B. F. (2013). *Erosão de dunas durante tempestades: aplicação de diferentes modelos numéricos. Congresso de Métodos Numéricos em Ingeniería*, Bilbao, Espanha.
- Poseiro, P., Sabino, A., Fortes, C. J., Reis, M. T. e Rodrigues, A. (2014). *Aplicação do sistema HIDRALERTA de previsão e alerta de inundações: Caso de estudo da Praia da Vitória. 12º Congresso da Água (No. 1)*. Lisboa.
- Pullen, T., Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Sch, H. e Van der Meer, J. W. (2007). *EurOtop. Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual*.
- Raposeiro, P. D., Fortes, C. J., Reis, M. T. e Ferreira, J. C. (2010). *Análise de Cotas de Inundação na Praia de Vale do Lobo. 10º Congresso da Água*, APRH. Alvor.
- Raposeiro, P. D. e Ferreira, J. C. (2011). *Evaluation of Coastal Flood Risk Areas and Adaption Strategies for a Sustainable Planning, Journal of Coastal Research*, 64, 1896-1900
- Raposeiro, P. D., Fortes, C. J., Capitão, R., Reis, M. T., Ferreira, J. C., Pereira, M. T. e Guerreiro, J. (2013). *Preliminary phases of the Hidralerta System: Assessment of the flood levels at S. João da Caparica beach, Portugal. Journal of Coastal Research*, 65, 808-813.
- Raubenheimer, B. e Guza, R. T. (1996). *Observations and predictions of run-up. Journal of Geophysical Research*, 101, C10, 25575-25587.
- Reis, R., Gabriel, S., Fortes, C. J. e Moura, D. (2013). *Aplicação do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima: Praia da Galé. Relatório LNEC*, Lisboa.
- Rocha, M. (2011). *Estruturação de áreas com valor ambiental e paisagístico na AML. Caso de Estudo POLIS Costa da Caparica. Dissertação de Mestrado. Arquitetura – Gestão Urbanística, Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa*. 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*. Porto, julho.
- Roelvink, J. A. e Stive, M. J. F. (1989). *Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach. Journal of Geophysical Research*, 94, 4785-4800.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., de Vries, J. V. T., McCall, R. e Lescinski, J. (2009). *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal engineering*, 56(11), 1133-1152.

- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., de Vries, J. V. T., Lescinski, J. e McCall, R. (2010). *XBeach model description and manual*. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Roelvink, D., Van Dongeren, A. P., McCall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van Geer, P., de Vet, L., Nederhoff, K. e Quataert, E. (2015). *XBEACH Technical Reference: Kingsday Release*. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Roelvink, J. A. (1993). *Dissipation in random wave group incidente on a beach*. *Coastal Engineering*, 19, 127-150.
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J. e Beach, R. A. (2001). *Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of properties backing beaches*. *Journal of Coastal Research*, 17, 407-419.
- Sallenger, A. H. (2000). *Storm impact scale for barrier islands*. *Journal of Coastal Research*, 16(3):860-895.
- Sancho, F., Oliveira, F. E. e Freire, P. (2011). *Níveis Máximos do espraiamento no Litoral da Ria Formosa. 7º Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*.
- Saville, J. T. (1958). *Run-up on composite slopes*. *Proc. 6th Int. Conf. Coastal Eng.* (pp. 691-699). Gainesville, Florida: Asce.
- Silva, D., Fortes, C. J., Reis, M. T., Carmo, J. S., Simões, A. e Rodrigues, C. (2012). *Avaliação do Galgamento de Estruturas Portuárias: Porto de Ponta Delgada*. *Recursos Hídricos*, 33(2), 37-51.
- Silva, M. (2014). *Análise do Galgamento Onda a Onda em Estruturas Marítimas*. Dissertação de Mestrado. Eng. Civil, IST. Lisboa.
- 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. FCT, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Steetzel, H. J. (1993). *Cross-shore transport during storm surges*. PhD thesis, Delft University of Technology.
- Stewart, R. H. (1980). *Ocean wave measurement techniques*. *Air Sea Interaction, Instruments and Methods* (eds. Davis, R., Dobson, L. H. F.), 447-470, Plenum Press, New York.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A. e Sallenger Jr., A. H. (2006). *Empirical parameterization of setup, swash, and runup*. *Coastal Engineering*, 53, 573-588.
- Tamada, T., Inoue, M. e Tezuka, T. (2002). *Diagrams for the estimation of wave overtopping rate on gentle slope-type seawalls*. *In Proc., Coastal Eng. JSCE* (Vol. 49, pp. 641-645).
- 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.
- Thornton, E. B., MacMahan, J. e Sallenger, A. H. (2007). *Rip currents, mega-cusps, and eroding dunes*. *Marine Geology*, 240(1-4):151-167.
- Tolman, H. L. (1991) *A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents*. *Journal of Phys. Oceanogr.*, 21, 782-797.

- Tolman, H. L. (1997). *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note.
- Tolman, H. L. (1999). *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note.
- Tolman, H. L. (2002). *User Manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22*. 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.
- Trifonova, E. (2007). *Modeling of Cross Shore Profile Changes under Combination of Extreme Storm Events*. *Proceedings of the 4th International Conference Port Development and Coastal Environment PDCE 2007*. Varna, Bulgaria. 301-311.
- Tucker, M. J. (1954). *Surfbeats: sea waves of 1 to 5 minutes' period*. In *Proceedings of Royal Society*, number A in 202, pages 565-576, London.
- U. Cantabria. (2009). *Sistema de Modelado Costero*.
- USACE. (2002). *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Van Dongeren, A., Bolle, A., Voudoukas, M. I., Plomaritis, T., Eftimova, P., Williams, J., Armaroli, C., Idier, D., Van Geer, P., de Vries, J., Haerens, P., Taborada, R., Benavente, J., Trifonova, E., Ciavola, P., Balouin, Y., Haerens, P. e Roelvink, D. (2009, December). *MICORE: dune erosion and overwash model validation with data from nine European field sites*. In *Proceedings of coastal dynamics* (Vol. 9, pp. 1-15).
- Vellinga, P. (1986). *Beach and Dune Erosion during Storm Surges*. PhD thesis, Delft University of Technology.
- Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F., Pais-Barbosa, J., Costa, J. e Rodrigues, A. (2006). *Estudo das intervenções na Costa da Caparica*. *Costa da Caparica Coastal Protection Works*. *Ias Jornadas de Hidráulica Recursos Hídricos E Ambiente*, (1), 27–35.
- Veloso-Gomes, F., Rodrigues, J. A., Taveira-Pinto, F., PaisBarbosa, J. e Neves, L. D. (2009). *Costa da Caparica Artificial Sand Nourishment and Coastal Dynamics*. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 678-682.
- Voudoukas, M. I., Almeida, L. P. e Ferreira, Ó. (2011). *Modelling storm-induced beach morphological change in a meso-tidal reflective beach using XBeach*. *Journal of Coastal Research* 64: 1916-1920.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L. e Alley, W.M. (1998). *Ground water and surface water: A single resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139, 9.
- Zijlema, M., Stelling, G. e Smit, P. (2011). *SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*. *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012.

## Webgrafia

- [1] <http://www.jornaldaeconomiadomar.com/temporal-origina-ondas-de-12-metros/>,  
acedido em março de 2016
- [2] <http://www.coastalwiki.org/wiki/Backshore>, acedido em julho de 2016
- [3] <http://www.coastalwiki.org/wiki/Foreshore>, acedido em julho de 2016
- [4] [http://www.coastalwiki.org/wiki/Nearshore\\_zone](http://www.coastalwiki.org/wiki/Nearshore_zone), acedido em julho de 2016
- [5] <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/runup.html>, acedido em julho de 2016
- [6] <https://i.ytimg.com/vi/UgK2OfaNqfM/maxresdefault.jpg>, acedido em junho de 2016
- [7] [https://www.baw.de/EN/wasserbau/methoden/wasserbaul\\_versuchswesen/schiffserzeugte\\_belastungen/schiffserzeugte\\_belastungen.html](https://www.baw.de/EN/wasserbau/methoden/wasserbaul_versuchswesen/schiffserzeugte_belastungen/schiffserzeugte_belastungen.html), acedido em julho de 2016
- [8] <http://www.dhigroup.com/Software/Marine/LITPACK/Details/LITPROFModule.aspx>
- [9] <http://www.icnf.pt/portal/ap/p-prot/ppafcc/geo>, acedido em agosto de 2016
- [10] <http://pt.climate-data.org/location/56776/>, acedido em agosto de 2016
- [11] [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_publicacoes](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes), acedido em agosto de 2016
- [12] <https://www.guiadacidade.pt/es/destino/poigf/16301>, acedido em agosto de 2016
- [13] <http://www.tvi24.iol.pt/costa-da-caparica/mare-cheia/caparica-mar-invade-mais-parques-de-campismo>, acedido em abril de 2017
- [14] <http://www.cmjornal.pt/portugal/detalhe/estragos-na-caparica?>, acedido em abril de 2017
- [15] <http://www.cmjornal.pt/portugal/detalhe/mar-engole-15-metros-de-costa?>, acedido em abril de 2018
- [16] <http://www.cmjornal.pt/portugal/detalhe/temporal-no-mar-destroi-costa?>, acedido em abril de 2018
- [17] <http://www.maisfutebol.iol.pt/sociedade/costa-da-caparica/caparica-proprietarios-de-bares-foram-avisados>, acedido em abril de 2016



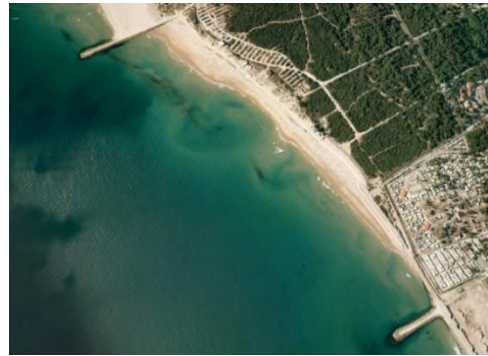
## **Anexo I – Fichas de Praia**

**Nome:** Praia de S. João da Caparica

**Secção:** S1

**Extensão (adaptado do Google Earth):** 1400 m

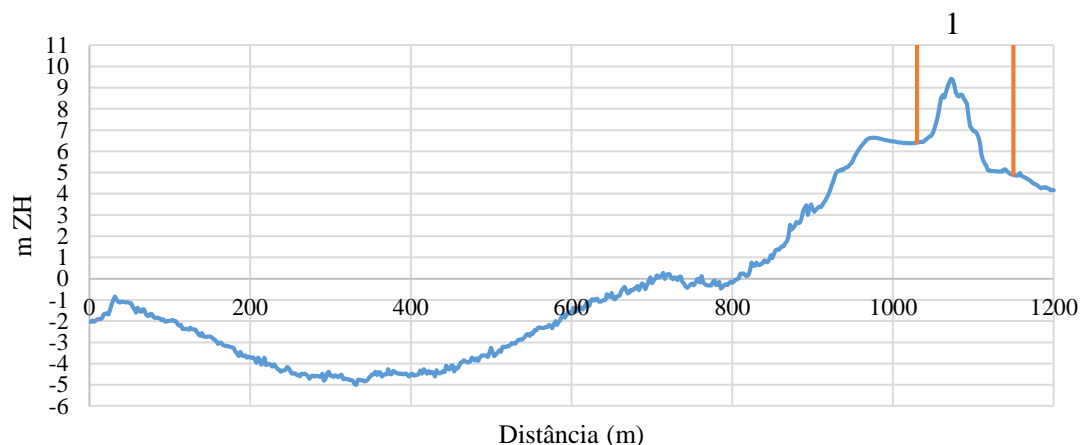
**Tipo de praia:** Tipo II – Praia não urbana com uso intensivo (praia peri-urbana), afastada de núcleos urbanos, mas sujeita a forte procura.



**Infraestruturas:** A praia é composta por algumas instalações do tipo de construção ligeira, como bares e estruturas de apoio à praia, mas também por construção do tipo pesada, como parques de campismo e o centro de férias do INATEL.

**Estrutura de proteção:** Está delimitada entre dois esporões, o mais a norte com 350 m e o mais a sul com 150 m, aproximadamente, e protegida numa zona por dunas e noutra por uma estrutura de proteção aderente.

**Perfil de praia (adaptado de Silva et al. (2011)):**

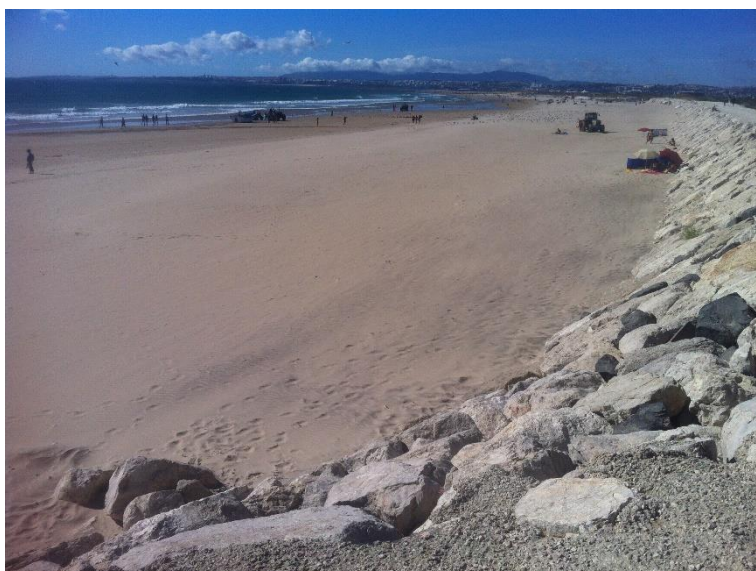


Legenda: 1- Sistema dunar.

**Observações:**

- O estacionamento encontra-se num patamar mais baixo que a praia e as dunas;
- Foram efetuados vários enchimentos de areia para evitar a destruição total dos bares e a penetração da água no parque de campismo;
- Na zona do parque de campismo foi construída uma vala de escoamento, de modo a proteger o mesmo;
- No período de inverno é comum surgir um recuo do sistema dunar, devido ao espraiamento, e a ocorrência de galgamento da estrutura de proteção, sem a necessidade de tempestades.

**Fotografias da praia:**

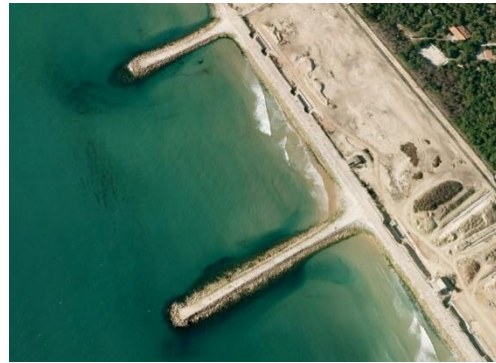


**Nome:** Praia do Norte

**Secção:** S2

**Extensão (adaptado do Google Earth):** 315 m

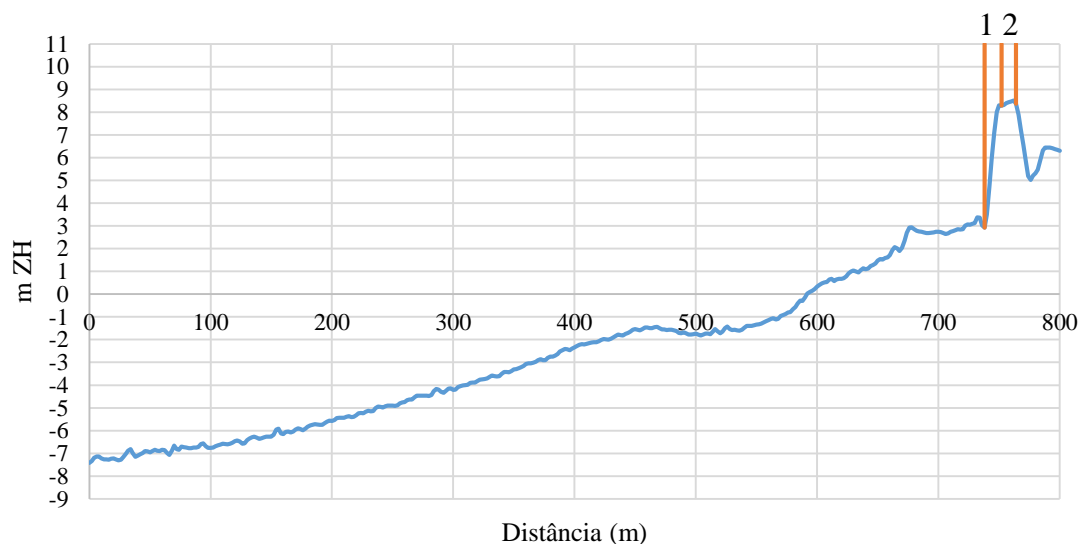
**Tipo de praia:** Tipo II – Praia não urbana com uso intensivo (praia peri-urbana), afastada de núcleos urbanos, mas sujeita a forte procura.



**Infraestruturas:** A praia é composta, somente, por construções do tipo pesada, como restaurantes.

**Estrutura de proteção:** Está delimitada entre dois esporões, o mais a norte com 150 m e o mais a sul com 260 m, aproximadamente, e protegida por uma estrutura de proteção aderente.

**Perfil de praia (adaptado de Silva et al. (2011)):**

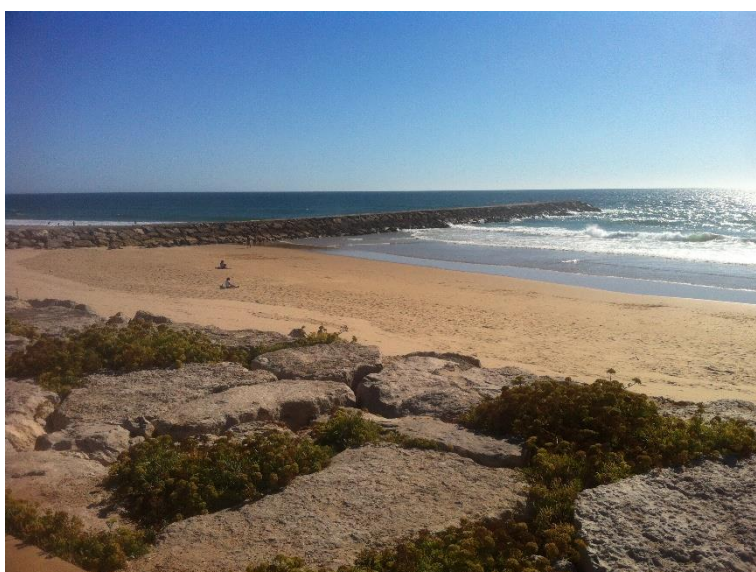
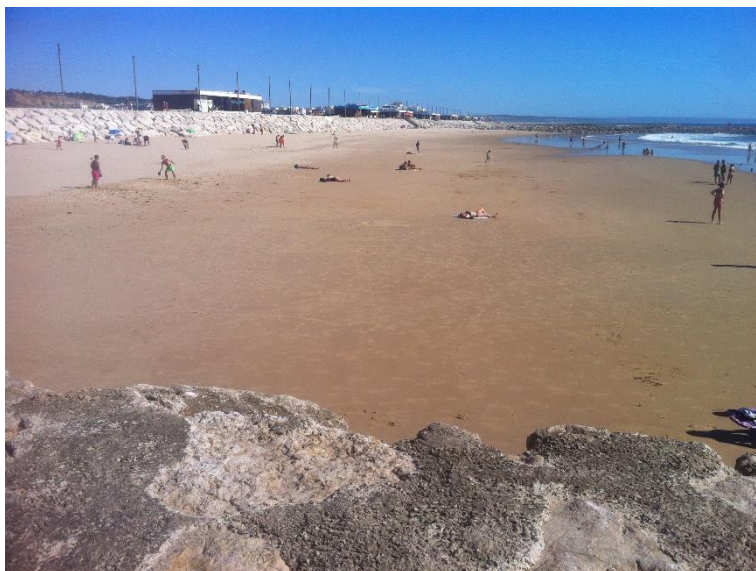


Legenda: 1- Estrutura de proteção; 2- Paredão.

**Observações:**

- Contém uma vala de escoamento que liga à praia anterior.

**Fotografias da praia:**

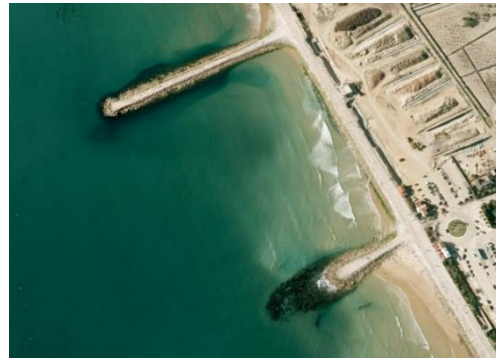


**Nome:** Praia de Santo António da Caparica

**Secção:** S3

**Extensão (adaptado do Google Earth):** 320 m

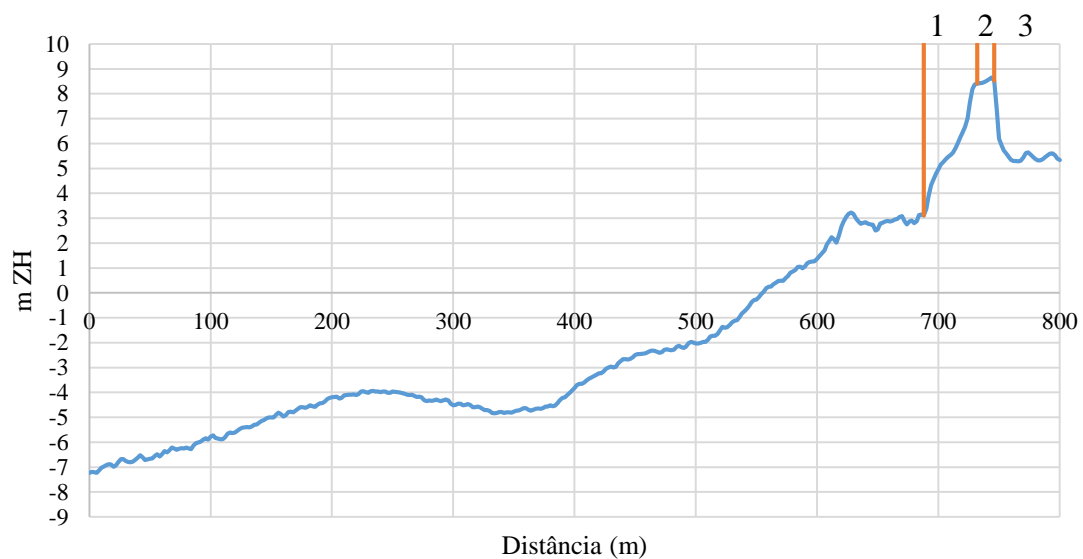
**Tipo de praia:** Tipo I – Praia urbana com uso intensivo (praia urbana), adjacente a um núcleo urbano consolidado, sujeita a forte procura.



**Infraestruturas:** A praia é composta, somente, por construção do tipo pesada, como os restaurantes ou escolas de surf.

**Estrutura de proteção:** Está delimitada entre dois esporões, o mais a norte com 260 m e o mais a sul com 180 m, aproximadamente, e protegida por uma estrutura de proteção aderente.

**Perfil de praia (adaptado de Silva et al. (2011)):**

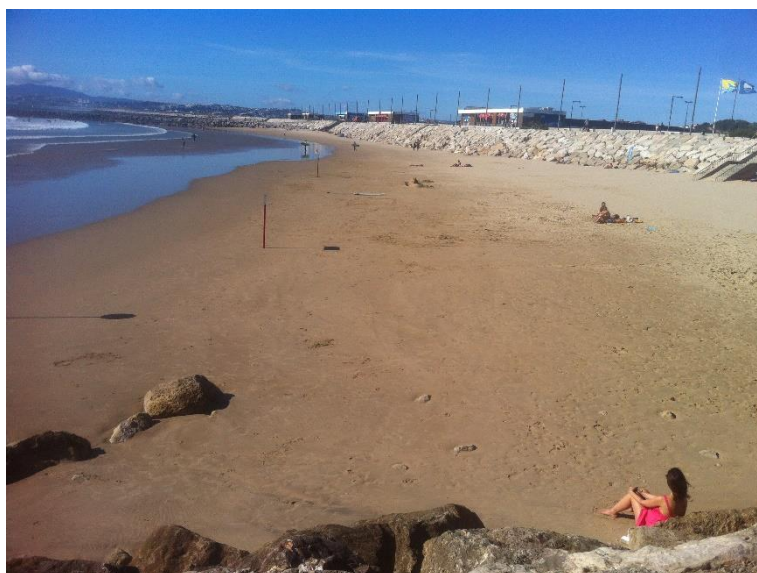
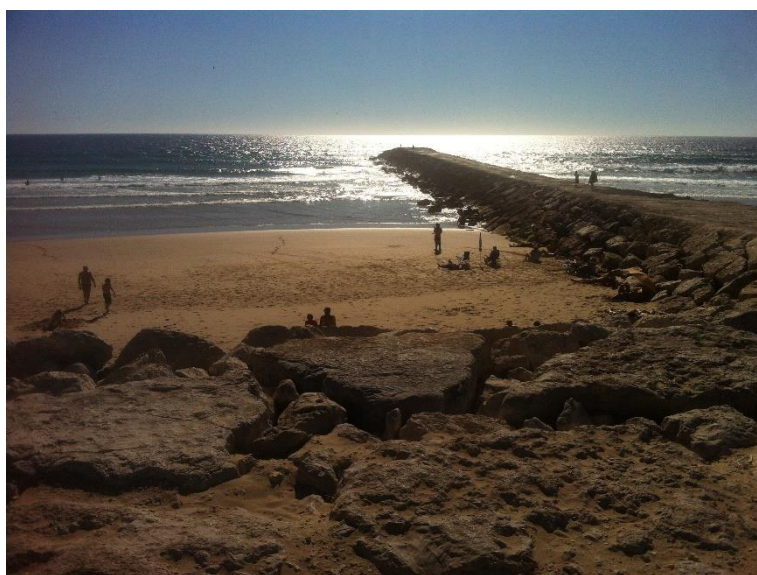


Legenda: 1- Estrutura de proteção; 2- Paredão; 3- Parque de estacionamento.

**Observações:**

- A estrutura de proteção aderente protege uma área sem edificação, onde se localiza um parque de estacionamento e o Parque de Escotismo da Caparica;
- Apresenta uma vala de escoamento.

**Fotografias da praia:**



**Nome:** Praia do CDS

**Secção:** S4

**Extensão (adaptado do Google Earth):** 300 m

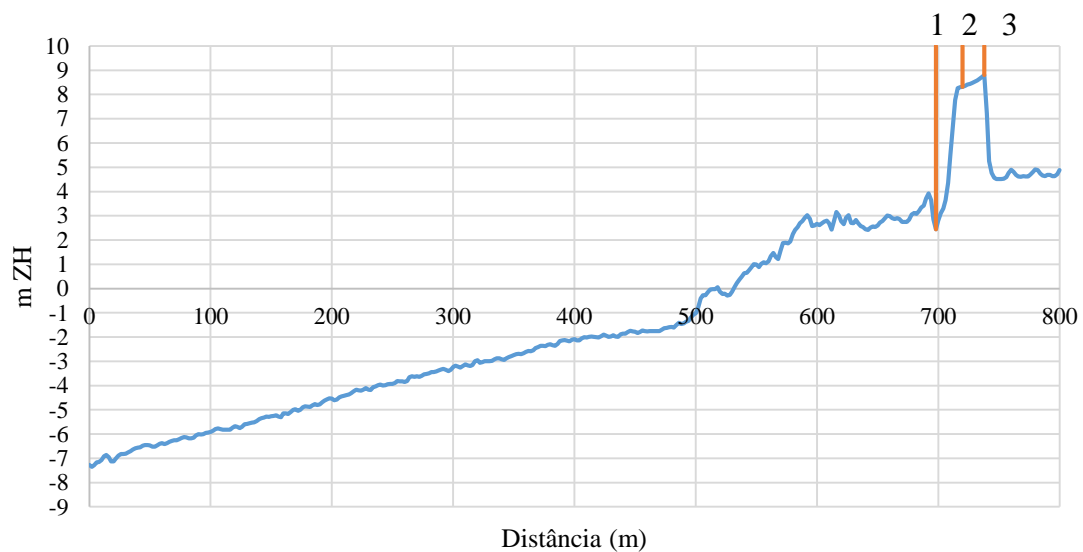
**Tipo de praia:** Tipo I – Praia urbana com uso intensivo (praia urbana), adjacente a um núcleo urbano consolidado, sujeita a forte procura.



**Infraestruturas:** A praia é composta, somente, por construção do tipo pesada, como os restaurantes.

**Estrutura de proteção:** Está delimitada entre dois esporões, o mais a norte com 180 m e o mais a sul com 240 m, aproximadamente, e protegida por uma estrutura de proteção aderente.

**Perfil de praia (adaptado de Silva et al. (2011)):**



Legenda: 1- Estrutura de proteção; 2- Paredão; 3- Parque de estacionamento.

**Observações:**

- Início da zona urbana da Costa da Caparica, com um parque de estacionamento contíguo.
- É a zona mais afetada pelos galgamentos sobre a estrutura de proteção aderente, onde as instalações sofrem frequentemente estragos significativos.

**Fotografias da praia:**



**Nome:** Praia do Tarquíneo/Paraíso

**Secção:** S5

**Extensão (adaptado do Google Earth):** 395 m

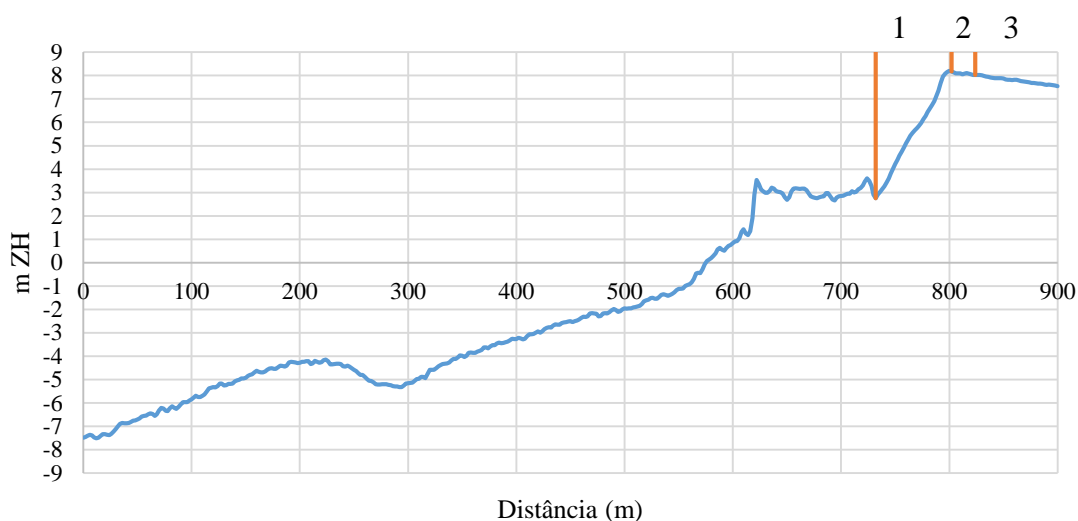
**Tipo de praia:** Tipo I – Praia urbana com uso intensivo (praia urbana), adjacente a um núcleo urbano consolidado, sujeita a forte procura.



**Infraestruturas:** A praia é composta por algumas instalações do tipo de construção ligeira, como quiosques e estruturas de apoio à praia, mas também por construção do tipo pesada, como restaurantes.

**Estrutura de proteção:** Está delimitada entre dois esporões, o mais a norte com 240 m e o mais a sul com 250 m, aproximadamente, e protegida por uma estrutura de proteção aderente.

**Perfil de praia (adaptado de Silva et al. (2011)):**

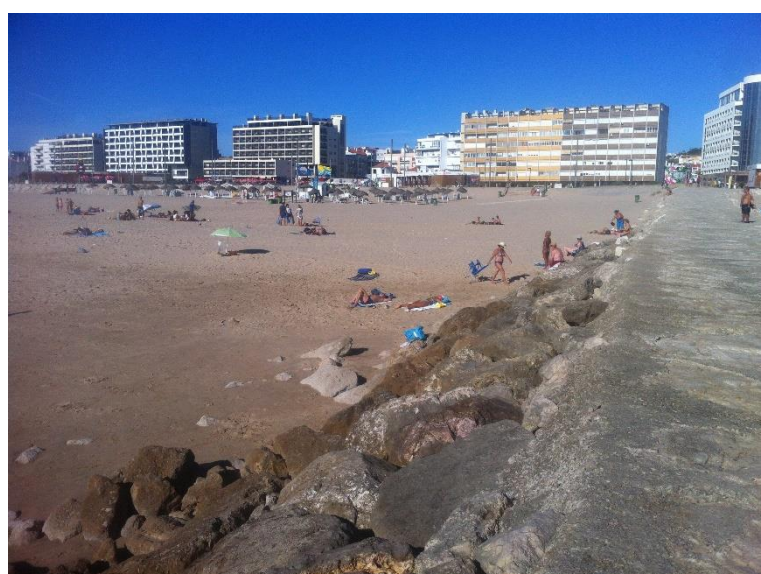
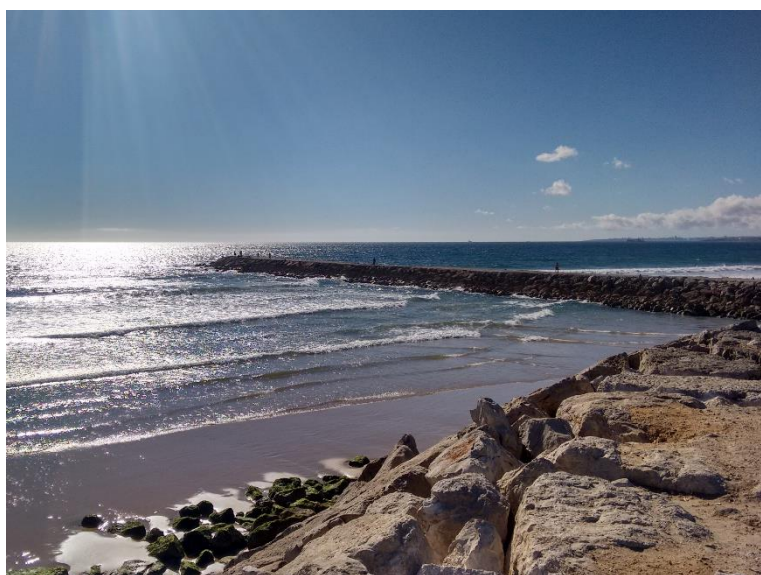


Legenda: 1- Estrutura de proteção; 2- Paredão; 3- Areia.

**Observações:**

- A zona urbana e a zona que separa a zona urbana da estrutura de proteção é praticamente plana, o que pode provocar alguns danos, como aconteceu em 2014;

**Fotografias da praia:**



**Nome:** Praia do Dragão Vermelho

**Secção:** S6

**Extensão (adaptado do Google Earth):** 265 m

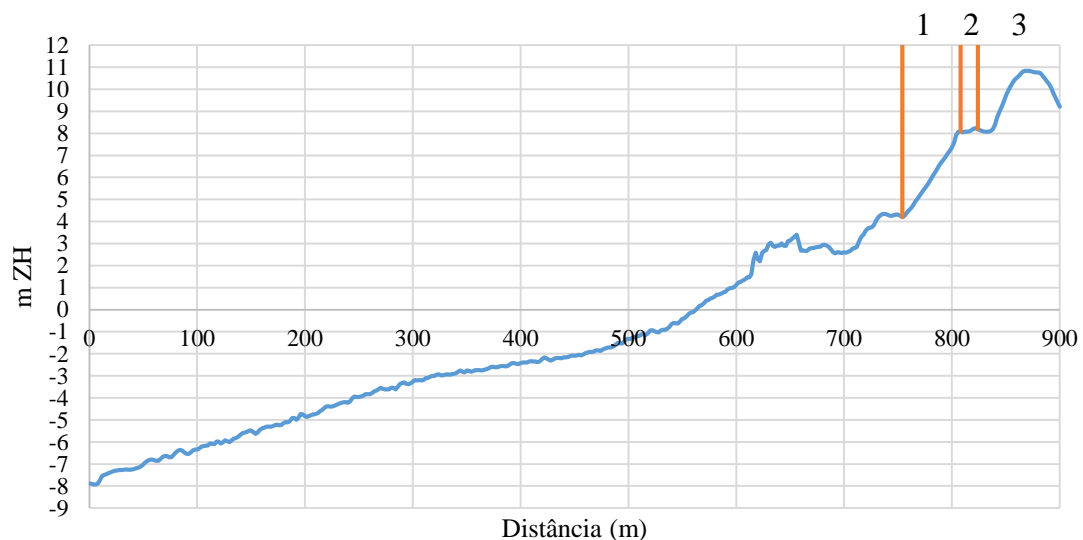
**Tipo de praia:** Tipo I – Praia urbana com uso intensivo (praia urbana), adjacente a um núcleo urbano consolidado, sujeita a forte procura.



**Infraestruturas:** A praia é composta por algumas instalações do tipo de construção ligeira, como quiosques e estruturas de apoio à praia, mas também por construção do tipo pesada, como restaurantes.

**Estrutura de proteção:** Está delimitada entre dois esporões, o mais a norte com 250 m e o mais a sul com 205 m, aproximadamente, e protegida por uma estrutura de proteção aderente.

**Perfil de praia (adaptado de Silva et al. (2011)):**

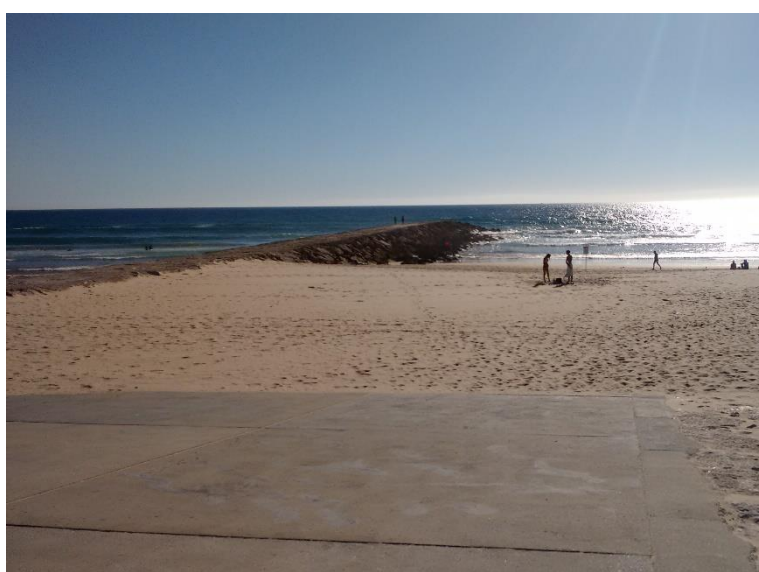


Legenda: 1- Estrutura de proteção; 2- Paredão; 3- Duna.

**Observações:**

- Contém uma rampa para dar acesso aos pescadores à praia, mas a mesma facilita a transposição de água para a zona urbana;
- A estrutura de proteção aderente protege uma zona dunar, antes da zona urbana.

**Fotografias da praia:**

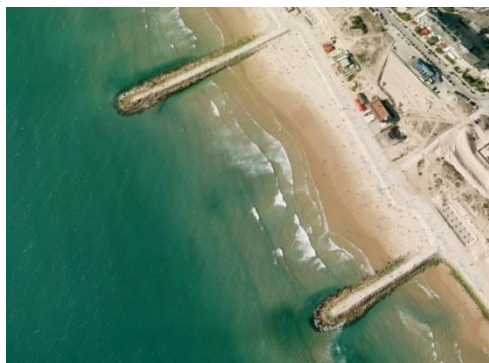


**Nome:** Praia Nova

**Secção:** S7

**Extensão (adaptado do Google Earth):** 320 m

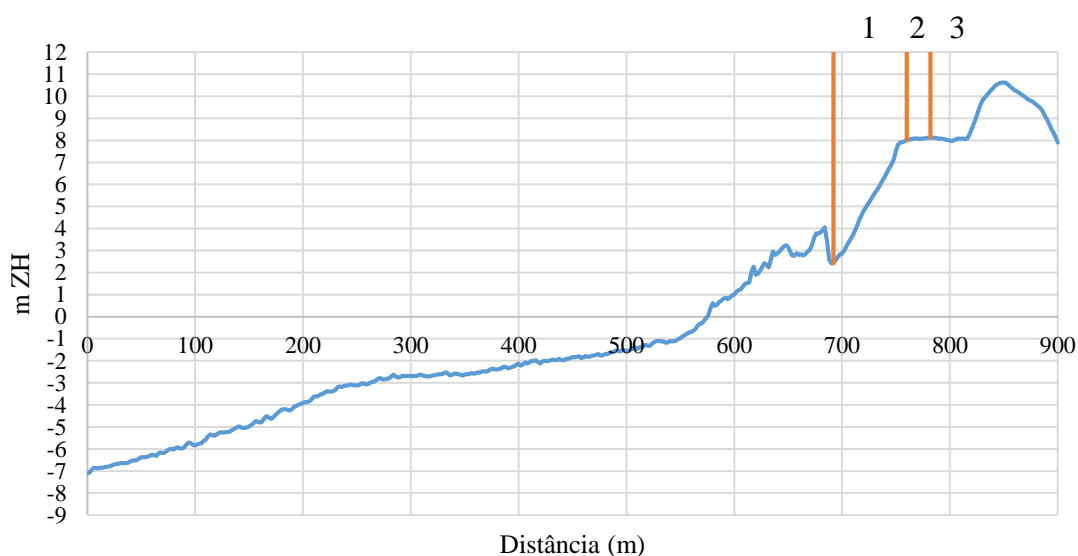
**Tipo de praia:** Tipo II – Praia não urbana com uso intensivo (praia peri-urbana), afastada de núcleos urbanos, mas sujeita a forte procura.



**Infraestruturas:** A praia é composta por algumas instalações do tipo de construção ligeira, como quiosques e estruturas de apoio à praia, mas também por construção do tipo pesada, como restaurantes.

**Estrutura de proteção:** Está delimitada entre dois esporões, o mais a norte com 205 m e o mais a sul com 145 m, aproximadamente, e protegida por uma estrutura de proteção aderente.

**Perfil de praia (adaptado de Silva et al. (2011)):**



Legenda: 1- Estrutura de proteção; 2- Paredão; 3- Duna.

**Observações:**

- A estrutura de proteção aderente protege uma zona dunar, antes da zona urbana, onde se localizam os armazéns dos pescadores;
- Encontram-se barcos de pesca atracados na praia.

**Fotografias da praia:**





## **Anexo II – Caracterização da agitação marítima**

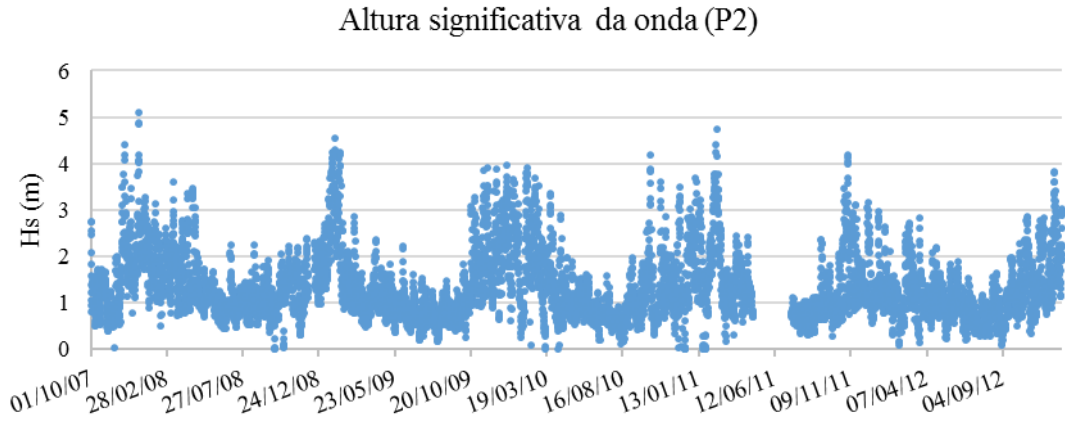


Figura B.1. Altura de onda significativa no ponto P2

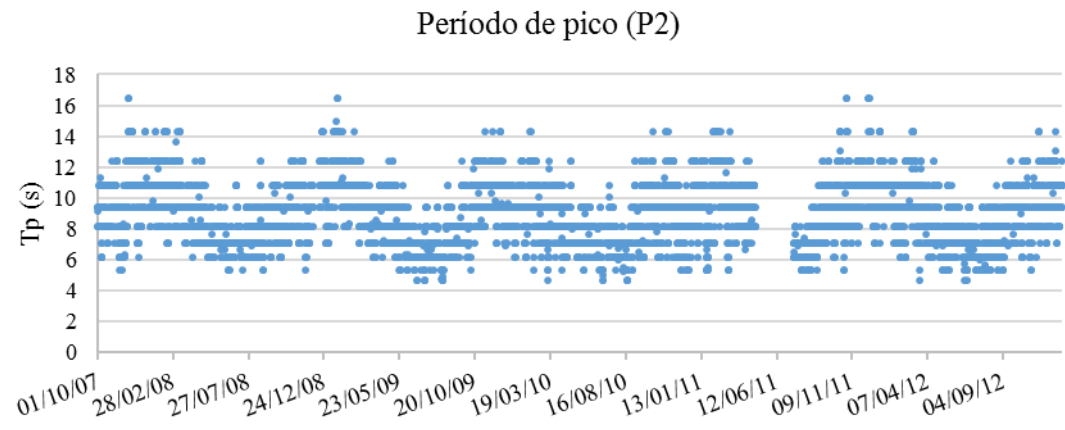


Figura B.2. Período de pico no ponto P2

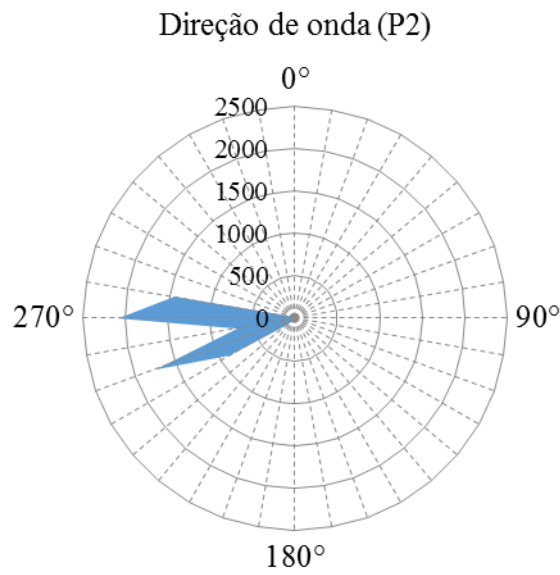


Figura B.3. Direção de onda no ponto P2

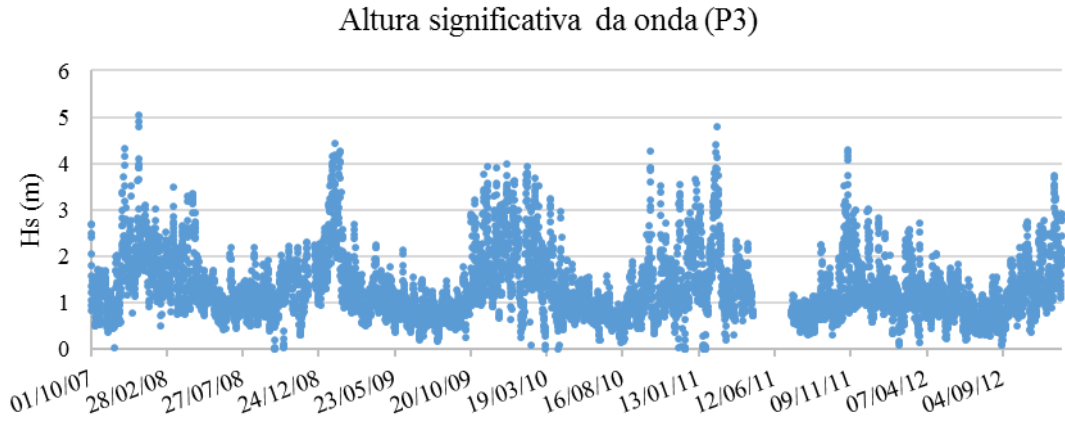


Figura B. 4. Altura de onda significativa no ponto P3

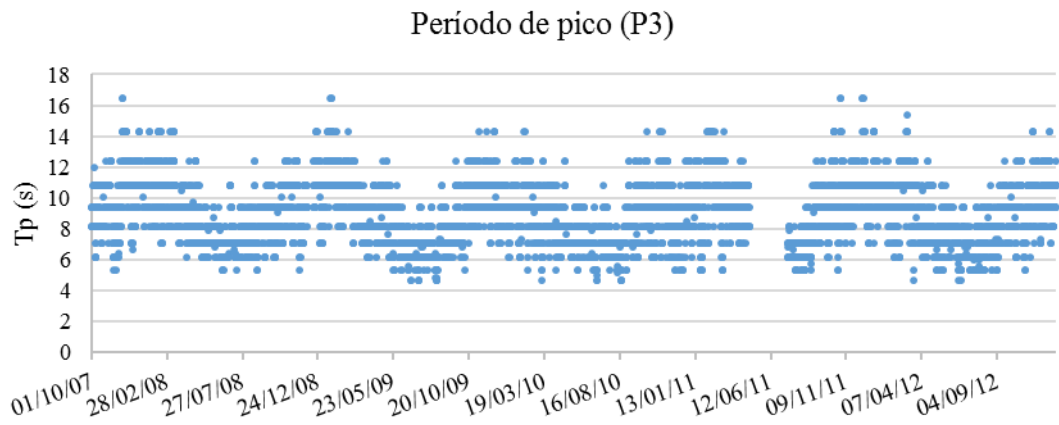


Figura B.5. Período de pico no ponto P3

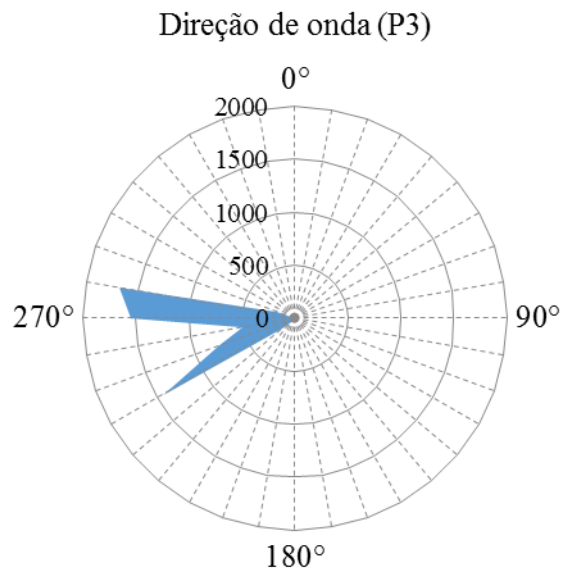


Figura B.6. Direção de onda no ponto P3

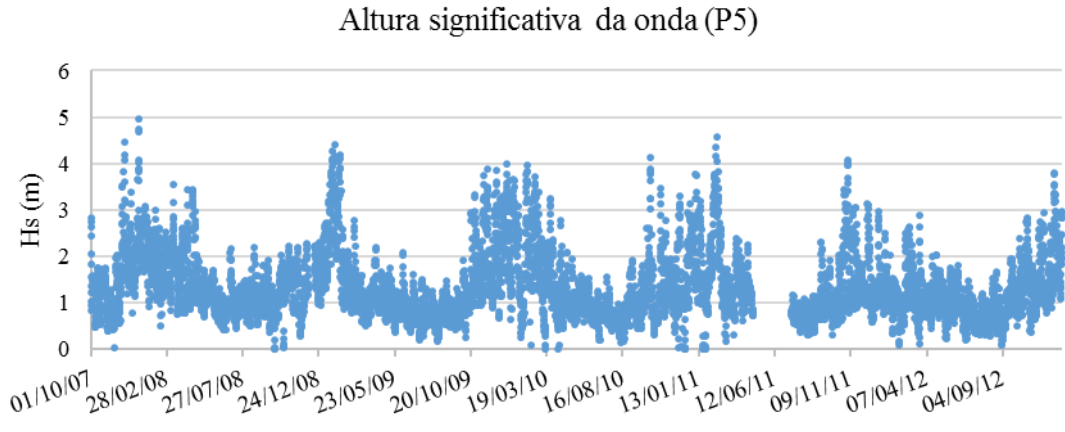


Figura B.7. Altura de onda significativa no ponto P5

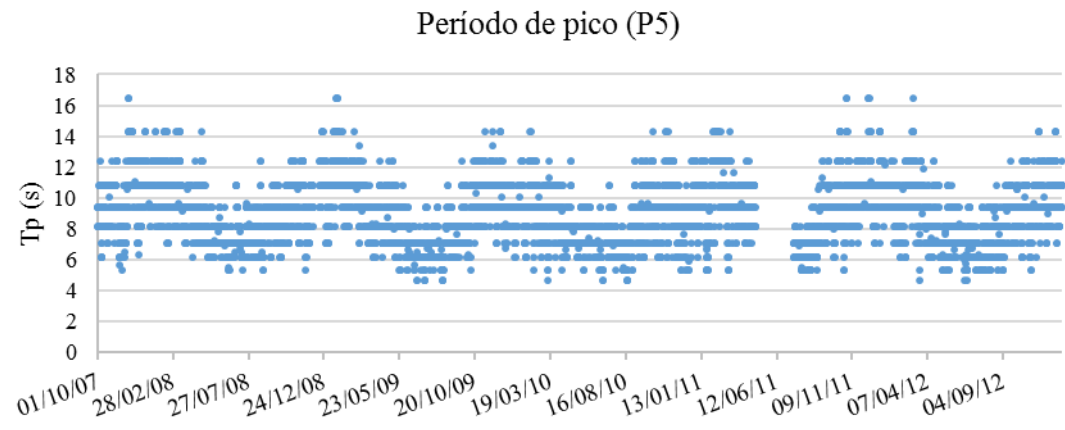


Figura B.8. Período de pico no ponto P5

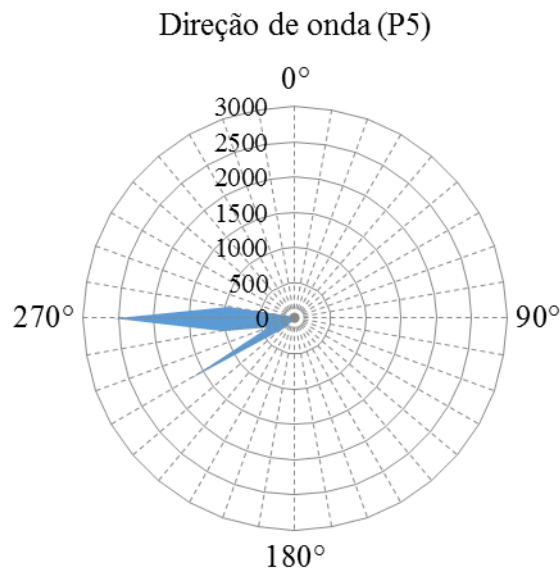


Figura B.9. Direção de onda no ponto P5

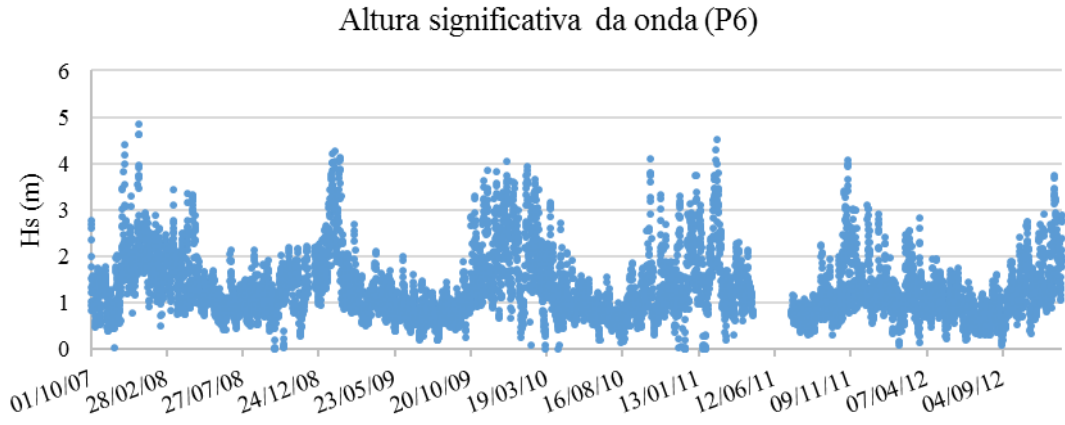


Figura B.10. Altura de onda significativa no ponto P6

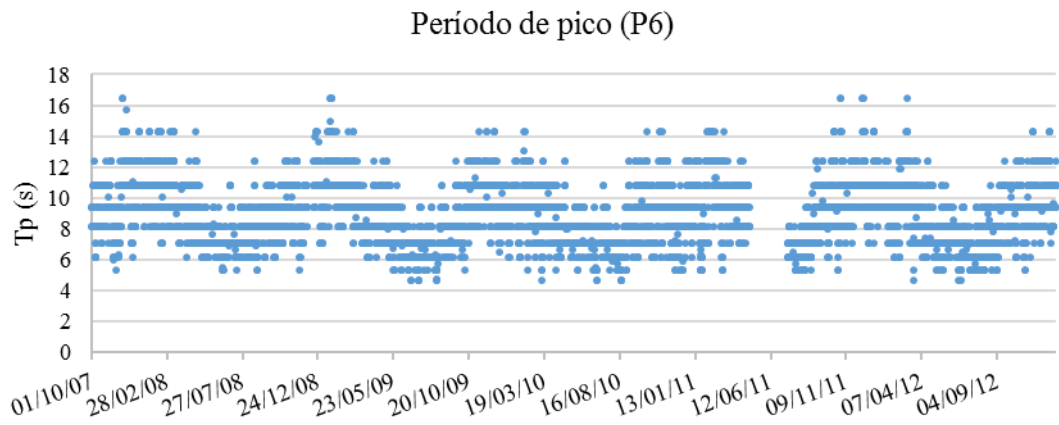


Figura B.11. Período de pico no ponto P6

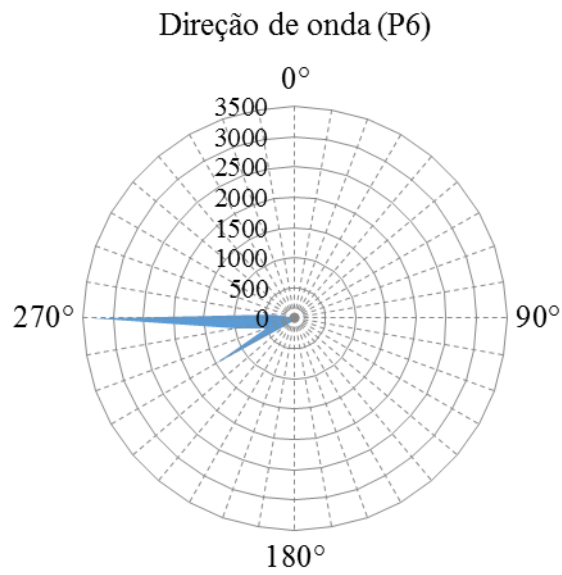


Figura B.12. Direção de onda no ponto P6

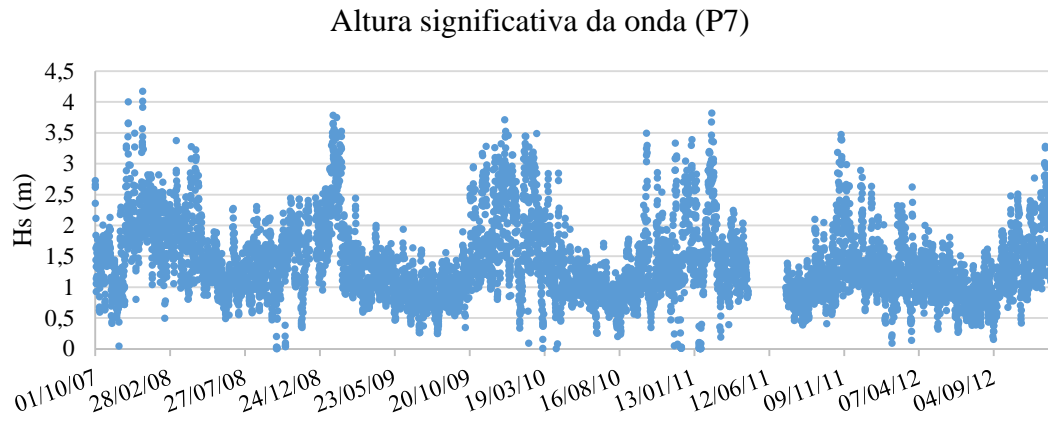


Figura B.13. Altura de onda significativa no ponto P7

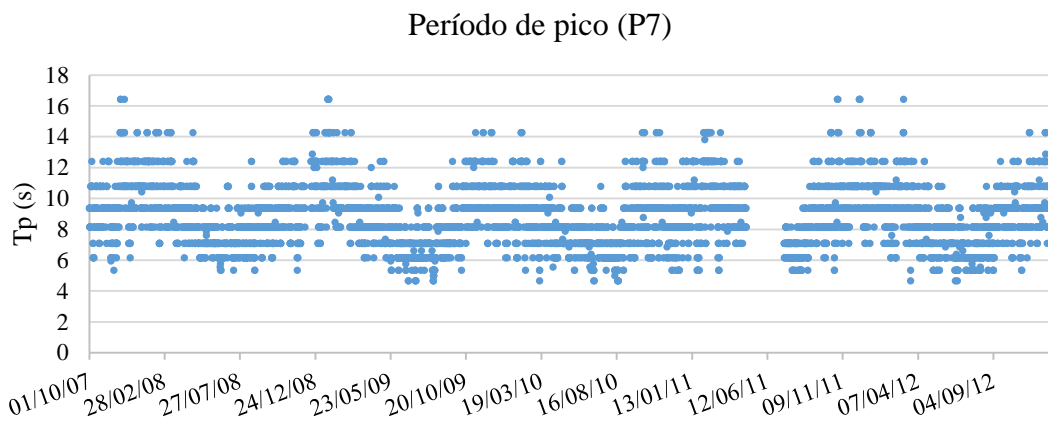


Figura B.14. Período de pico no ponto P7

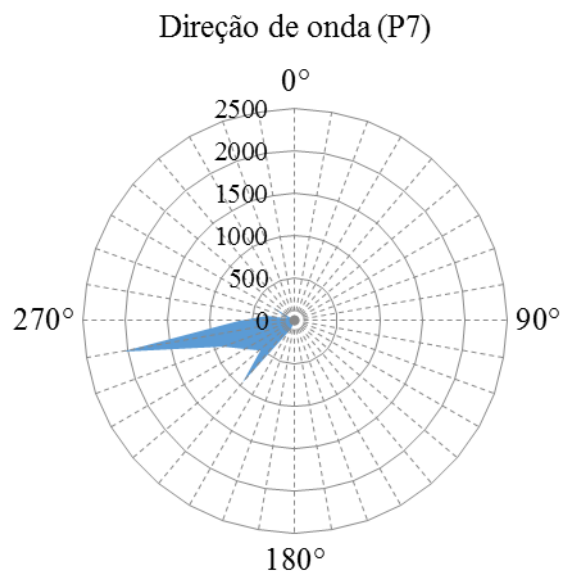


Figura B.15. Direção de onda no ponto P7

**Anexo III – Ficheiros de *input* e *output* dos programas FORTRAN e do modelo XBEACH**

Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda
2.565	9.386	246.000	2.391	
2.762	9.386	245.333	2.034	
2.811	9.386	250.000	2.555	
2.553	9.386	250.667	2.102	
2.159	8.569	253.333	2.875	
1.893	8.160	252.000	1.626	
1.633	8.160	256.667	2.872	
1.431	8.160	254.667	1.736	
1.267	8.160	262.000	3.186	
1.071	8.160	258.000	1.393	
0.975	8.160	278.000	3.086	
0.822	8.160	278.667	1.467	
0.952	8.160	286.667	3.335	
0.973	9.386	277.333	1.291	
1.316	10.796	279.333	2.391	
1.462	10.796	276.000	2.034	
1.548	10.796	280.000	2.555	
1.447	10.796	277.333	2.102	

Ln 14, Col 2

Figura C.1. Ficheiro de *input* do FORTRAN para o cálculo do *runup* em praia sem estrutura de proteção e *runup*/galgamento em praias com estrutura de proteção: “alturas\_condicoeslargo.dad”

Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda
2.6242				
8.9435				

Ln 3, Col 1

Figura C.2. Ficheiro de *input* do FORTRAN para o cálculo do *runup* em praias sem estrutura de proteção: “dados\_condicoeslargo.dad”

Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda					
	HMO(i)	L0	TP(i)	smax(i)	Hunt	Holman1	Stock	Nielsen	
2.565	90.432	9.386	2.391	3.282	3.710	6.106			
2.762	89.274	9.386	2.034	2.953	3.419	5.864			
2.811	90.871	9.386	2.555	3.490	3.965	6.454			
2.553	89.497	9.386	2.102	2.986	3.412	5.789			
2.159	82.295	8.569	2.875	3.654	4.010	6.126			
1.893	74.237	8.160	1.626	2.319	2.630	4.518			
1.633	77.391	8.160	2.872	3.528	3.789	5.614			
1.431	74.527	8.160	1.736	2.339	2.563	4.255			
1.267	78.126	8.160	3.186	3.767	3.959	5.613			
1.071	73.557	8.160	1.393	1.912	2.069	3.558			
0.975	77.894	8.160	3.086	3.595	3.734	5.212			
0.822	73.813	8.160	1.467	1.922	2.035	3.367			
0.952	78.468	8.160	3.335	3.840	3.974	5.443			
0.973	86.729	9.386	1.291	1.829	1.962	3.532			
1.316	106.446	10.796	2.391	3.084	3.269	5.278			
1.462	104.867	10.796	2.034	2.760	2.971	5.054			

Ln 1, Col 1

Figura C.3. Ficheiro de *output* do FORTRAN para cálculo do *runup* em praias sem estrutura de proteção: “Nmax\_inundacao\_2007\_2012\_S1.dat”

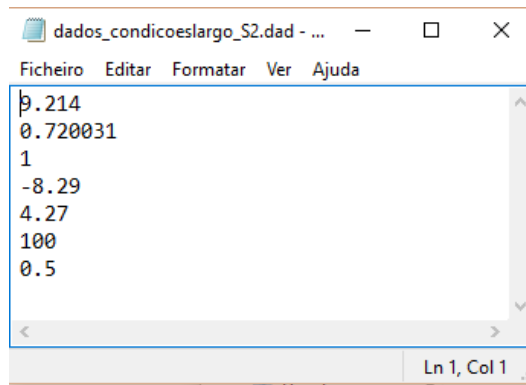


Figura C.4. Ficheiro de *input* do FORTRAN para cálculo do *runup*/galgamento em prais com estrutura de proteção: “dados\_condicoeslargo\_Sx.dad”

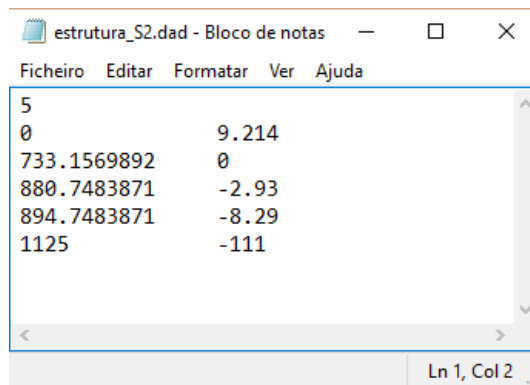


Figura C.5. Ficheiro de *input* do FORTRAN para cálculo do *runup*/galgamento em prais com estrutura de proteção: “Estrutura\_Sx.dad”

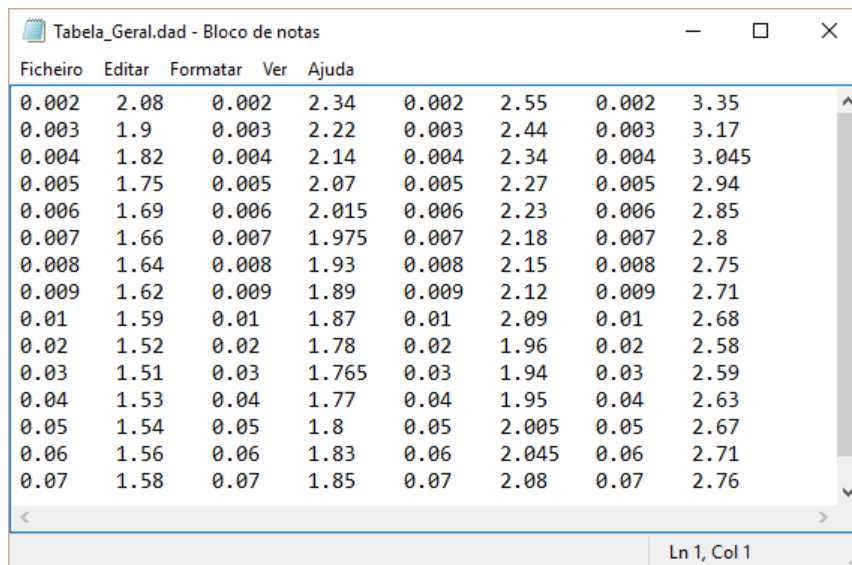


Figura C.6. Ficheiro de *input* do FORTRAN para cálculo do *runup*/galgamento em prais com estrutura de proteção: “Tabela\_Geral.dad”

i	HM0(i)	TP(i)	Dir (i)	L0	H0/L0	HB/H0
1	2.5546	9.3860	248.6667	124.7589	0.0205	2.5805
2	2.7456	9.3860	248.6667	124.7589	0.0220	2.5820
3	2.7503	9.3860	252.0000	124.7589	0.0220	2.5820
4	2.4745	9.3860	252.6667	124.7589	0.0198	2.5817
5	2.0891	9.1817	256.0000	119.3869	0.0175	2.6050
6	1.8414	8.1602	253.3333	94.3001	0.0195	2.5847
7	1.5800	8.1602	259.3333	94.3001	0.0168	2.6124
8	1.3827	8.1602	258.0000	94.3001	0.0147	2.6334
9	1.2352	8.1602	264.0000	94.3001	0.0131	2.6490
10	1.0460	8.1602	260.6667	94.3001	0.0111	2.6691
11	0.9577	8.1602	280.6667	94.3001	0.0102	2.6784
12	0.8174	8.1602	283.3333	94.3001	0.0087	2.7233
13	0.9482	8.1602	286.0000	94.3001	0.0101	2.6794
14	0.9901	9.3860	276.6667	124.7589	0.0079	2.7532

Figura C.7. Ficheiro de *output* do FORTRAN para cálculo do *runup*/galgamento em prais com estrutura de proteção: “galgamento\_R\_Totais\_Sx.dat”

1630	1632	1634	1636	1638	1640	1642	1644	1646	1648	1650
1654	1656	1658	1660	1662	1664	1666	1668	1670	1672	
1676	1678	1680	1682	1684	1686	1688	1690	1692	1694	
1698	1700	1702	1704	1706	1708	1710	1712	1714	1716	
1720	1722	1724	1726	1728	1730	1732	1734	1736	1738	
1742	1744	1746	1748	1750	1752	1754	1756	1758	1760	
1764	1766	1768	1770	1772	1774	1776	1778	1780	1782	
1786	1788	1790	1792	1794	1796	1798	1800	1802	1804	
1808	1810	1812	1814	1816	1818	1820	1822	1824	1826	
1830	1832	1834	1836	1838	1840	1842	1844	1846	1848	
1852	1854	1856	1858	1860	1862	1864	1866	1868	1870	
1874	1876	1878	1880	1882	1884	1886	1888	1890	1892	

Figura C.8. Ficheiro de *input* do modelo XBEACH para cálculo do *runup* em prais sem estrutura de proteção e do *zs* e *u* em praias com estrutura de proteção: “x.grd”

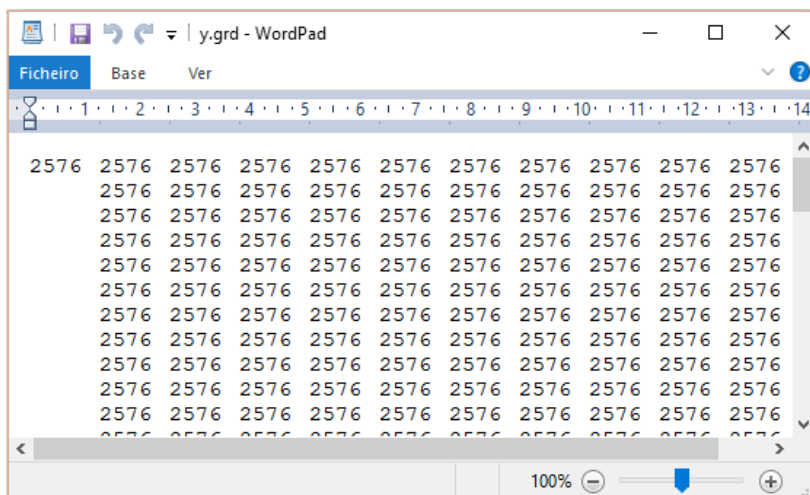


Figura C.9. Ficheiro de *input* do modelo XBEACH para cálculo do *runup* em prais sem estrutura de proteção e do *zs* e *u* em praias com estrutura de proteção: “y.grd”

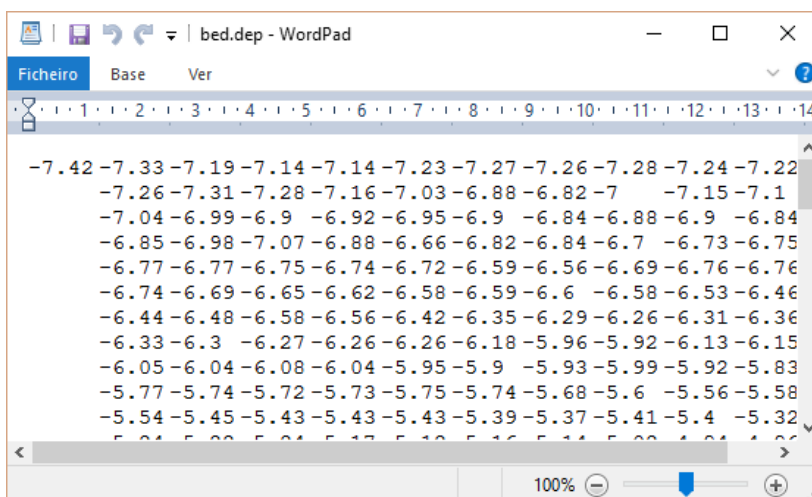


Figura C.10. Ficheiro de *input* do modelo XBEACH para cálculo do *runup* em prais sem estrutura de proteção e do *zs* e *u* em praias com estrutura de proteção: “bed.dep”

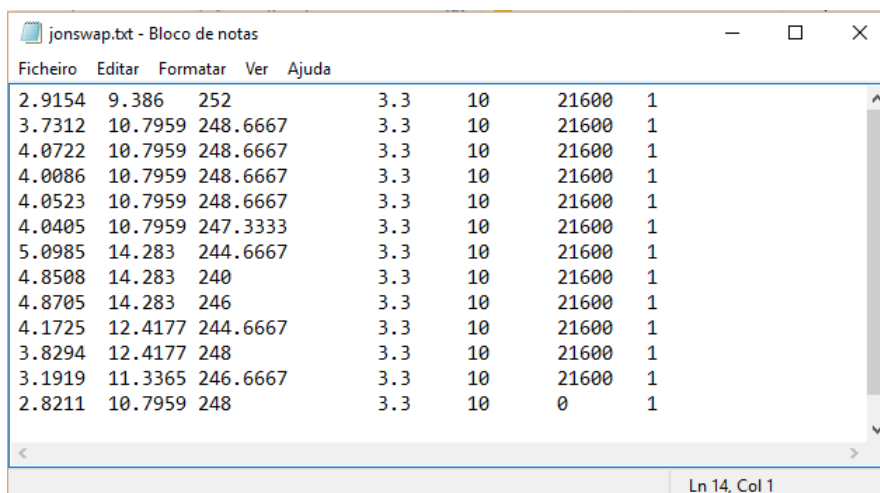


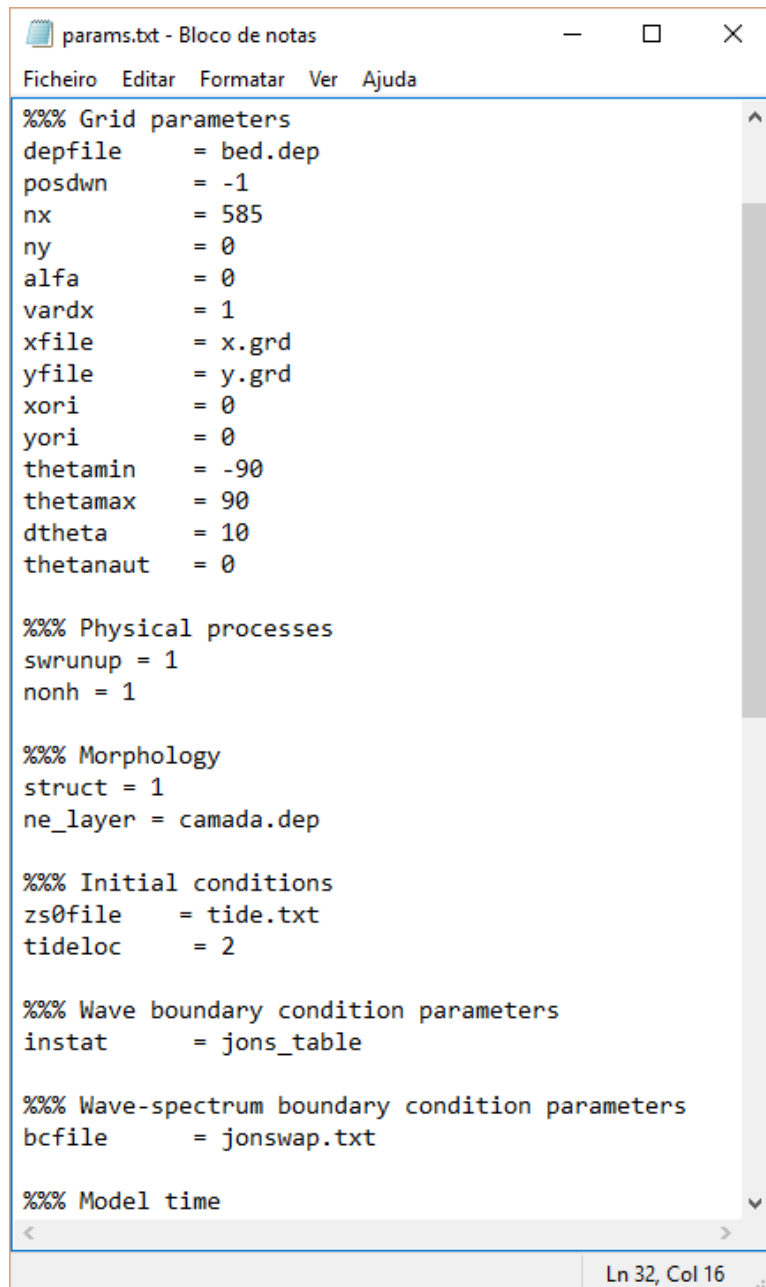
Figura C.11. Ficheiro de *input* do modelo XBEACH para cálculo do *runup* em prais sem estrutura de proteção e do *zs* e *u* em praias com estrutura de proteção: “jonswap.txt”

0	2.546
21600	1.857
43200	2.944
64800	2.062
86400	2.843
108000	1.778
129600	3.013
151200	1.669
172800	2.805
194400	1.565
216000	2.903
237600	1.478
259200	2.879

Figura C.12. Ficheiro de *input* do modelo XBEACH para cálculo do *runup* em prais sem estrutura de proteção e do *zs* e *u* em praias com estrutura de proteção: “tide.txt”

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Figura C.13. Ficheiro de *input* do modelo XBEACH para cálculo do *runup* em prais sem estrutura de proteção e do *zs* e *u* em praias com estrutura de proteção: “camada.dep”



```
params.txt - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Formatar  Ver  Ajuda

%%% Grid parameters
depfile      = bed.dep
posdwn       = -1
nx           = 585
ny           = 0
alfa         = 0
vardx        = 1
xfile        = x.grd
yfile        = y.grd
xori         = 0
yori         = 0
thetamin     = -90
thetamax     = 90
dtheta       = 10
thetanaut    = 0

%%% Physical processes
swrunup = 1
nonh = 1

%%% Morphology
struct = 1
ne_layer = camada.dep

%%% Initial conditions
zs0file      = tide.txt
tideloc      = 2

%%% Wave boundary condition parameters
instat       = jons_table

%%% Wave-spectrum boundary condition parameters
bcfile       = jonswap.txt

%%% Model time
< >
```

Ln 32, Col 16

Figura C.14. Ficheiro de *input* do modelo XBEACH para cálculo do *runup* em prais sem estrutura de proteção e do *zs* e *u* em praias com estrutura de proteção: “params.txt”



## **Anexo IV – Caudal galgado obtido pelas fórmulas empíricas**

1) *Runup* e caudal médio galgado determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), considerando o método 1 e a tempestade 1, para as praias da Costa da Caparica

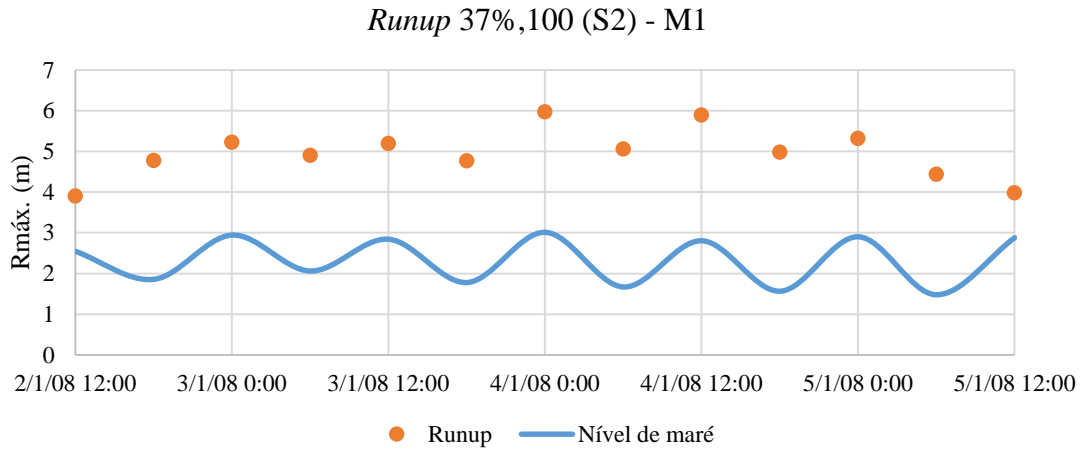


Figura D.1. *Runup* na secção S2, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

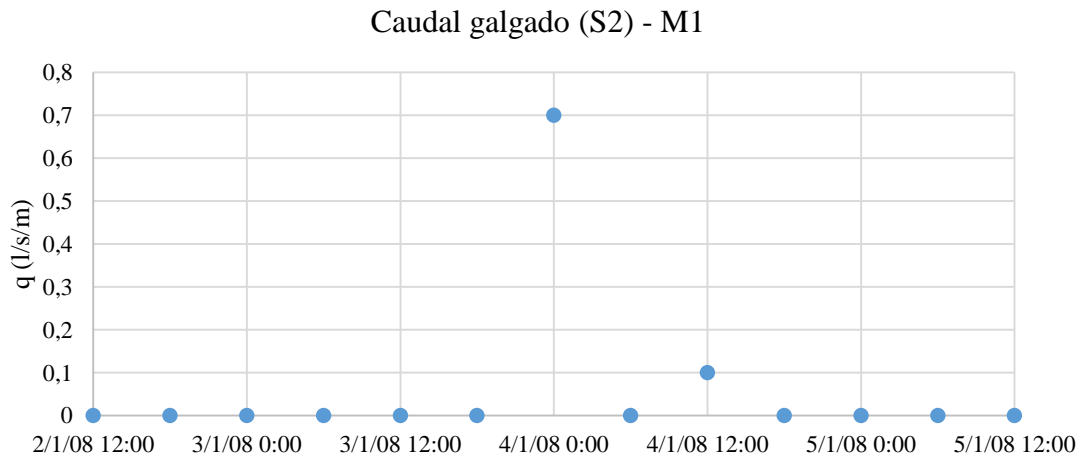


Figura D.2. Caudal médio galgado na secção S2, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

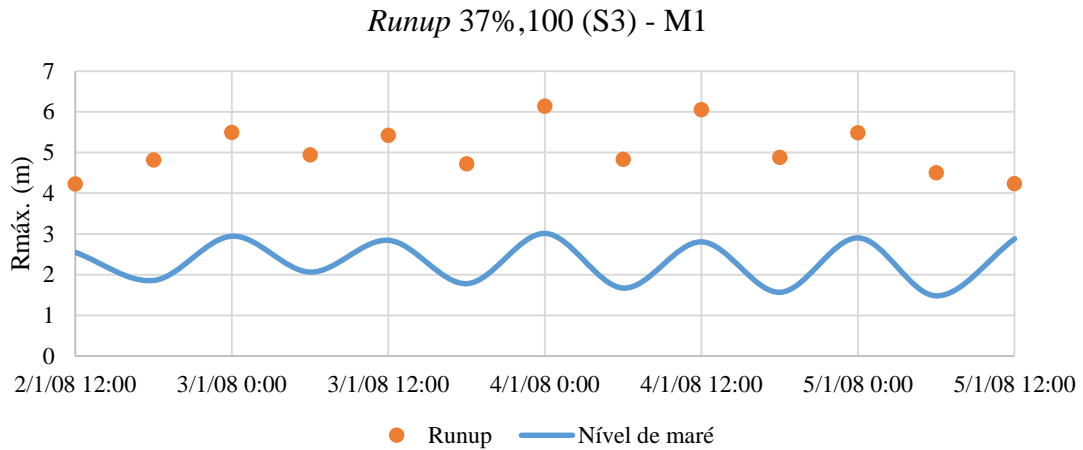


Figura D.3. Runup na secção S3, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

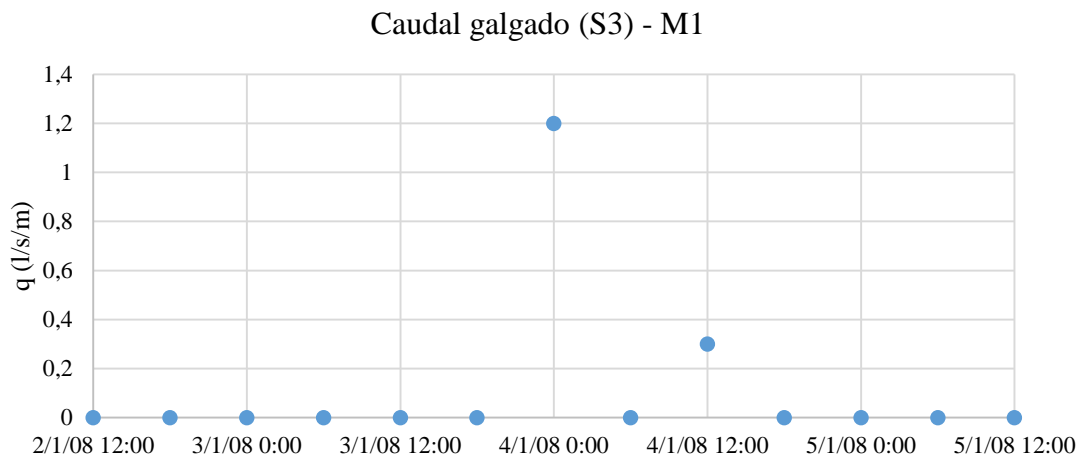


Figura D.4. Caudal médio galgado na secção S3, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

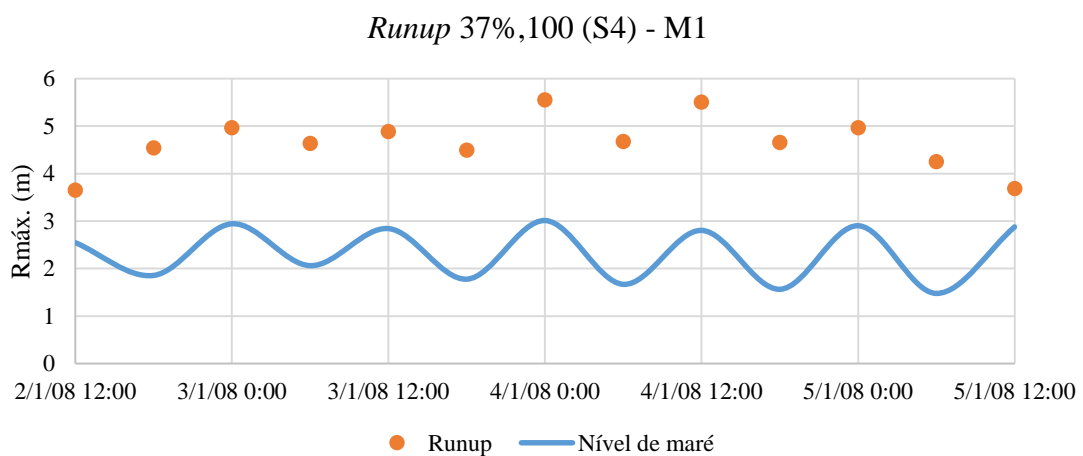


Figura D.5. Runup na secção S4, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

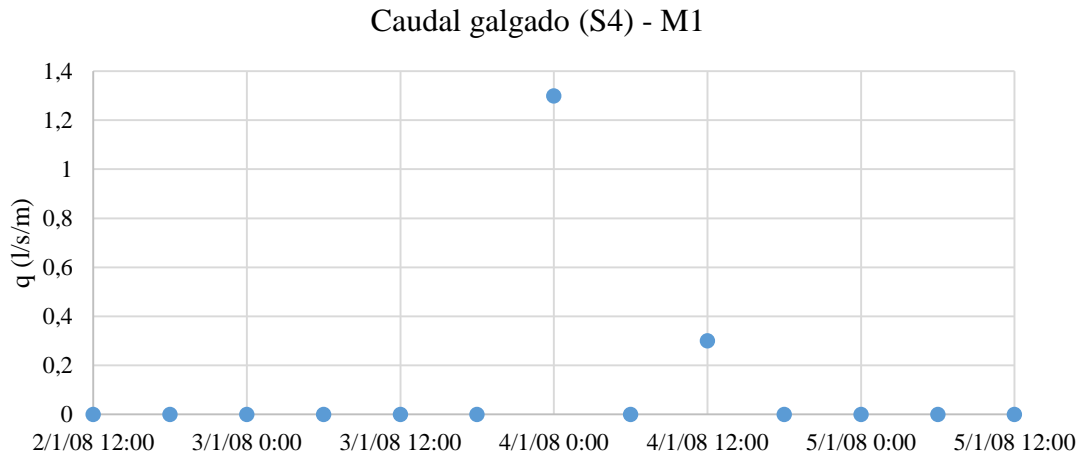


Figura D.6. Caudal médio galgado na secção S4, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

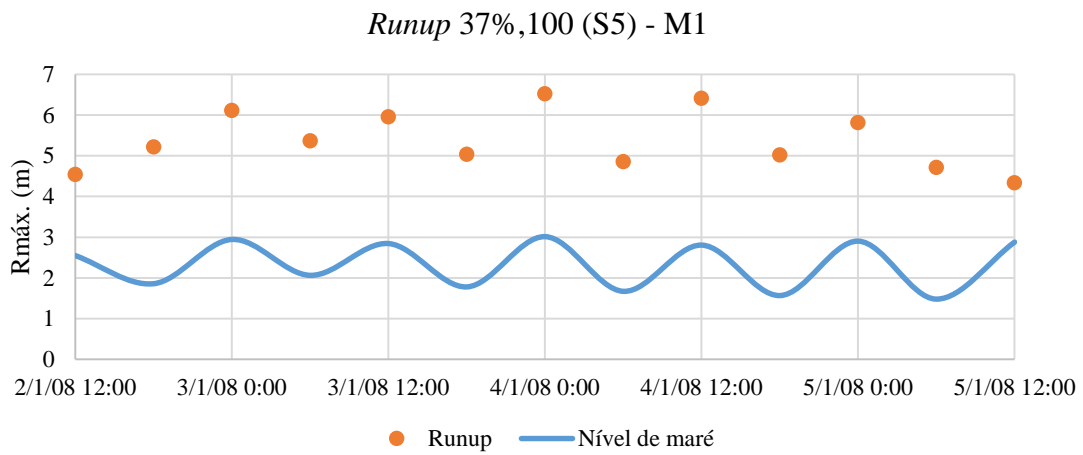


Figura D.7. Runup na secção S5, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

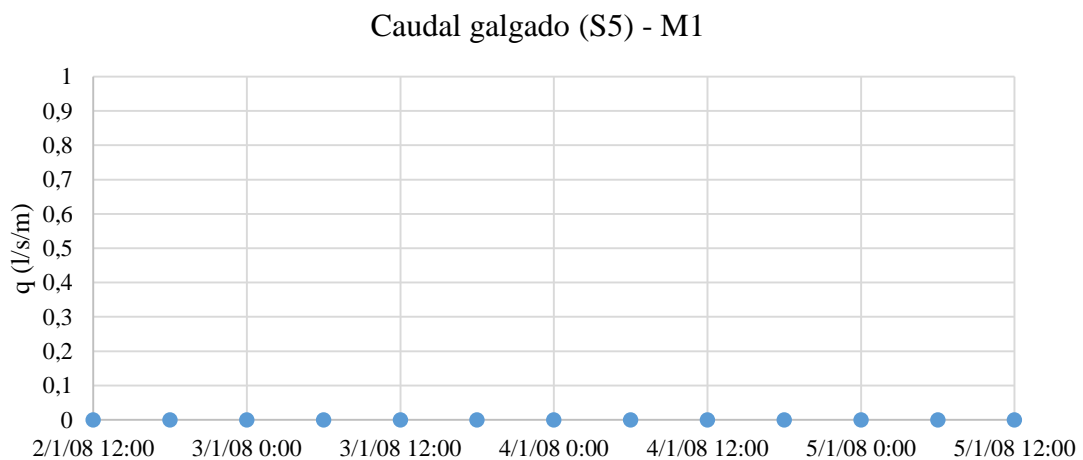


Figura D.8. Caudal médio galgado na secção S5, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

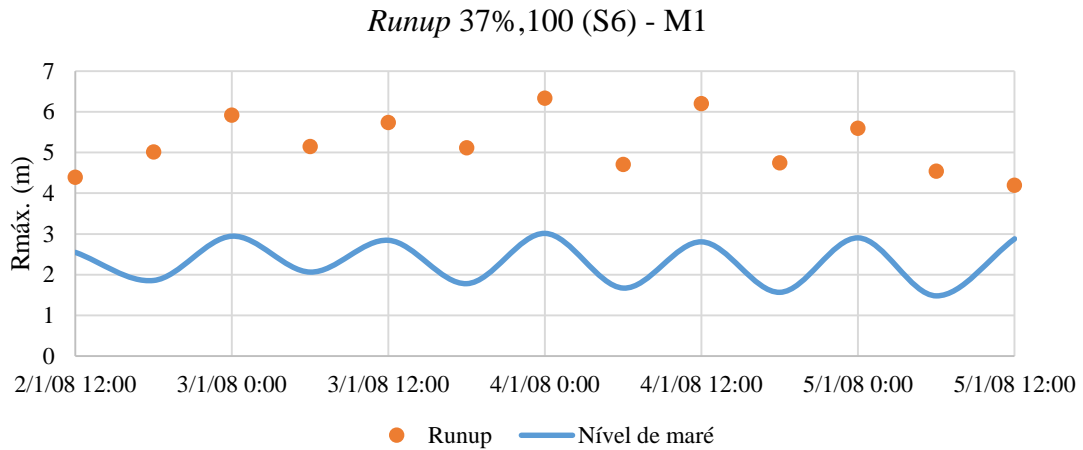


Figura D.9. Runup na secção S6, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

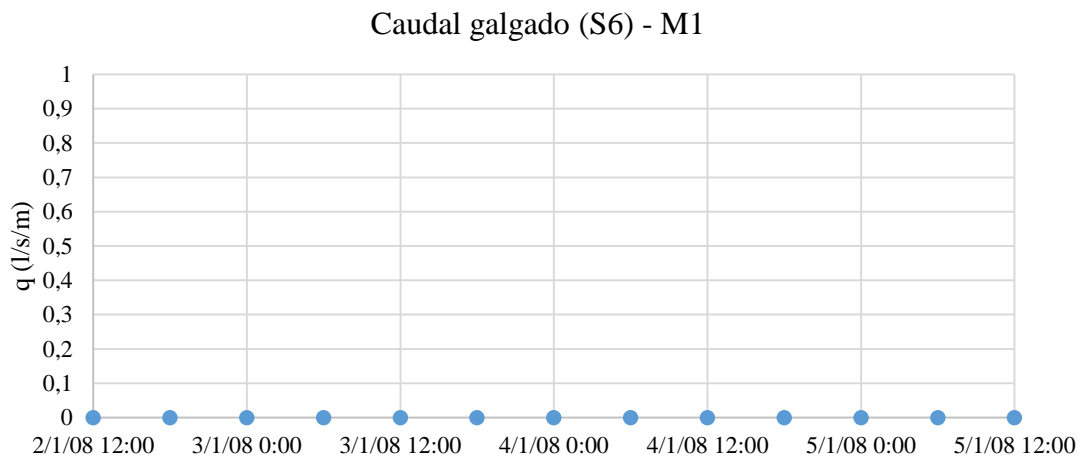


Figura D.10. Caudal médio galgado na secção S6, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

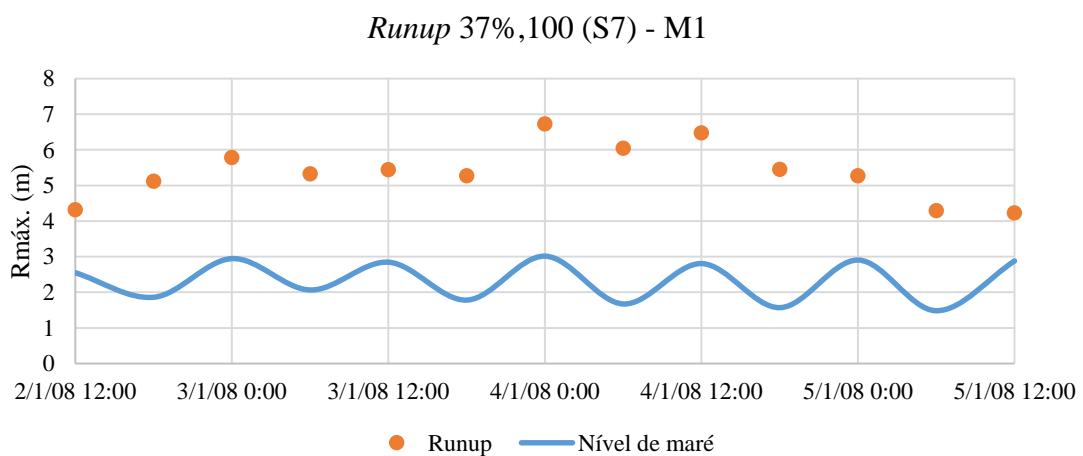


Figura D.11. Runup na secção S7, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

### Caudal galgado (S7) - M1

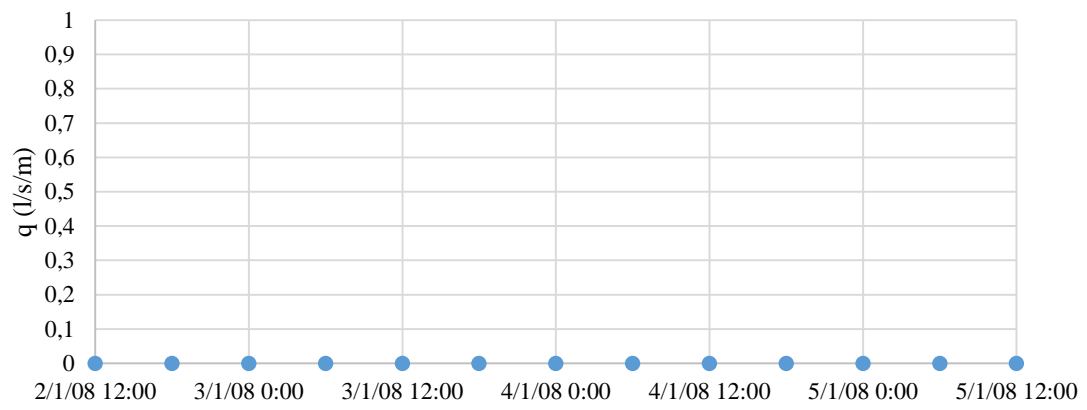


Figura D.12. Caudal médio galgado na seção S7, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 1

2) *Runup* e caudal médio galgado determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), considerando o método 2 e a tempestade 1, para as praias da Costa da Caparica

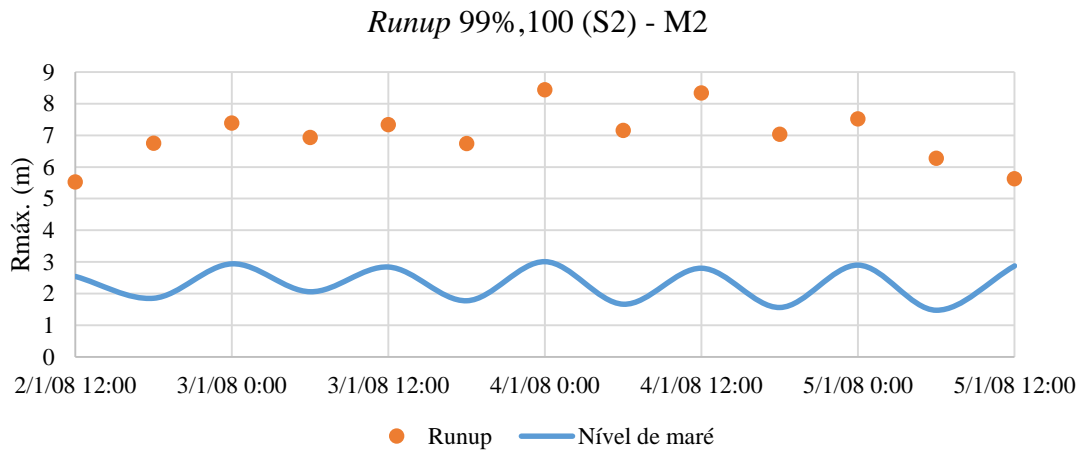


Figura D.13. *Runup* na secção S2, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

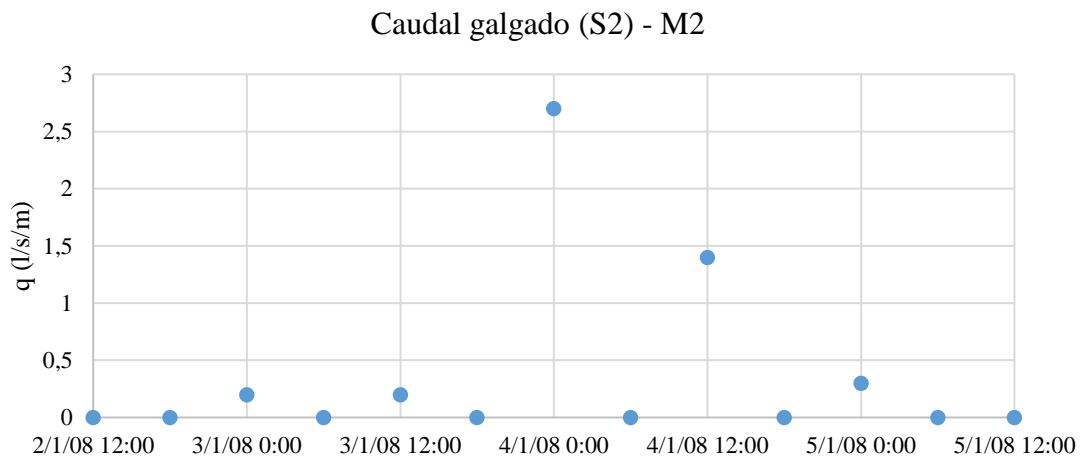


Figura D.14. Caudal médio galgado na secção S2, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

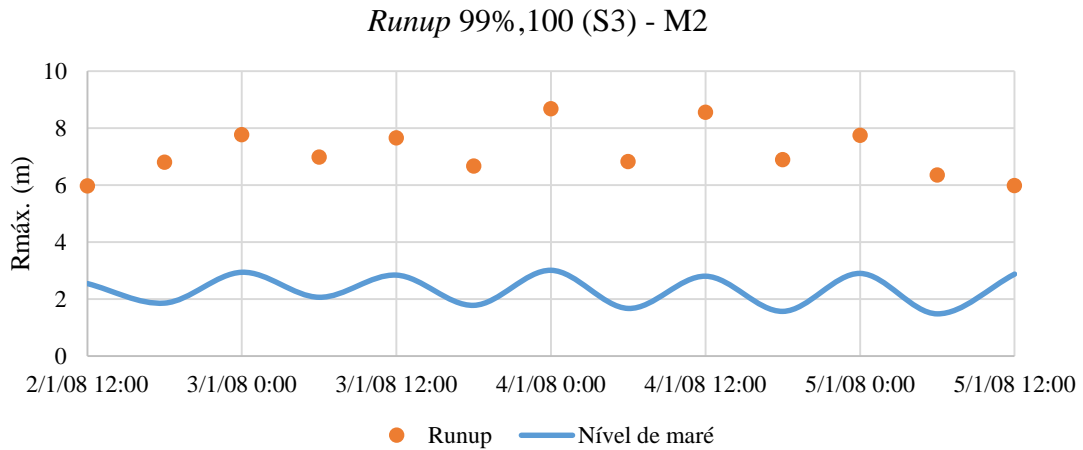


Figura D.15. *Runup* na secção S3, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

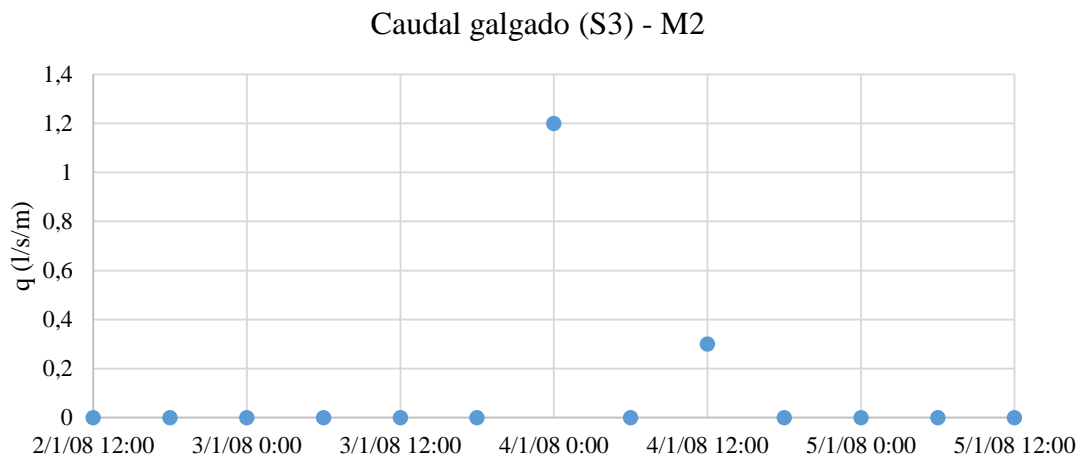


Figura D.16. Caudal médio galgado na secção S3, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

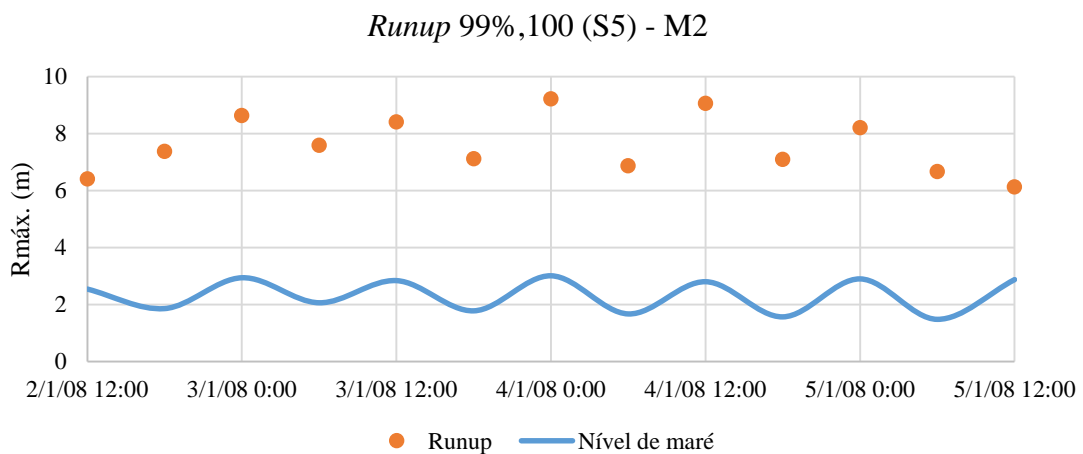


Figura D.17. *Runup* na secção S5, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

Caudal galgado (S5) - M2

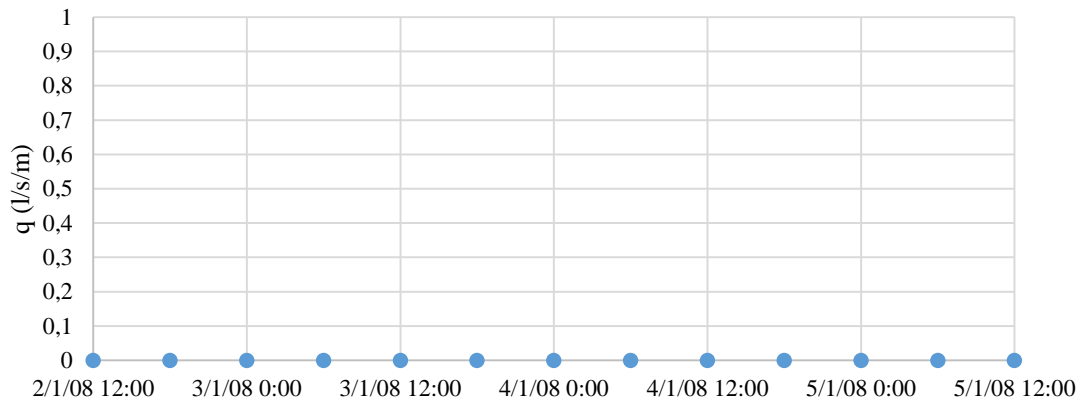


Figura D.18. Caudal médio galgado na secção S5, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

Runup 99%,100 (S6) - M2

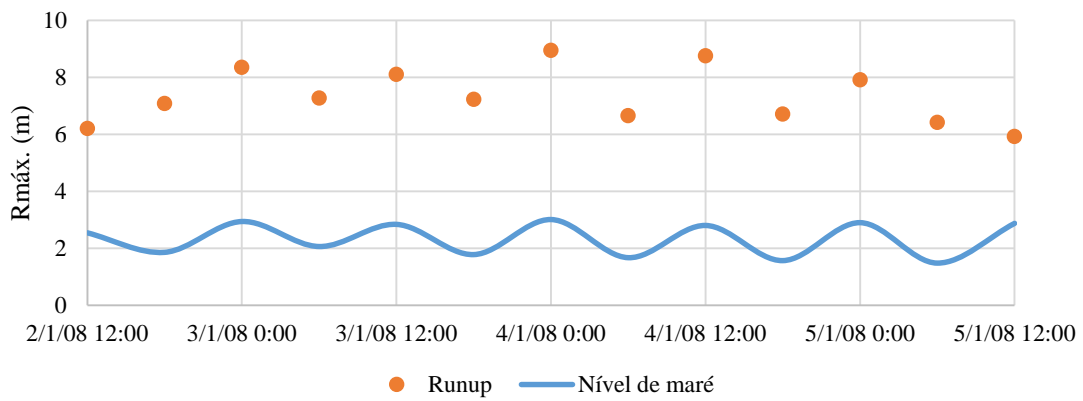


Figura D.19. Runup na secção S6, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

Caudal galgado (S6) - M2

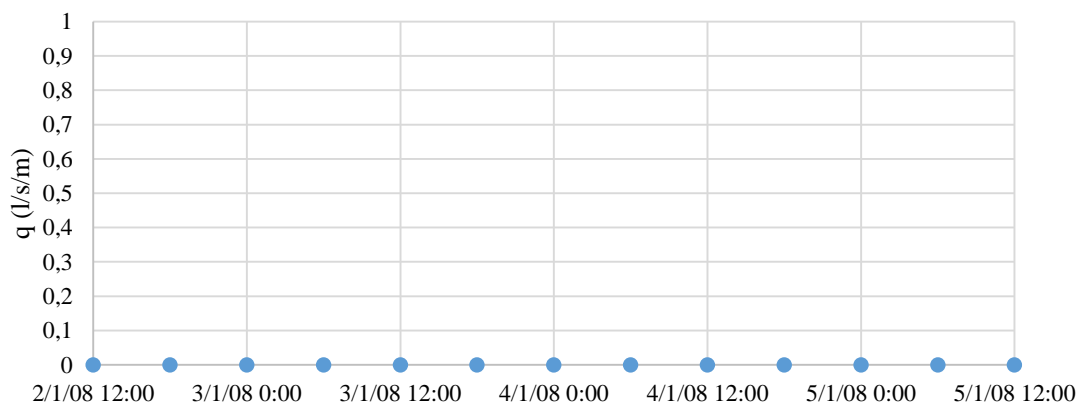


Figura D.20. Caudal médio galgado na secção S6, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

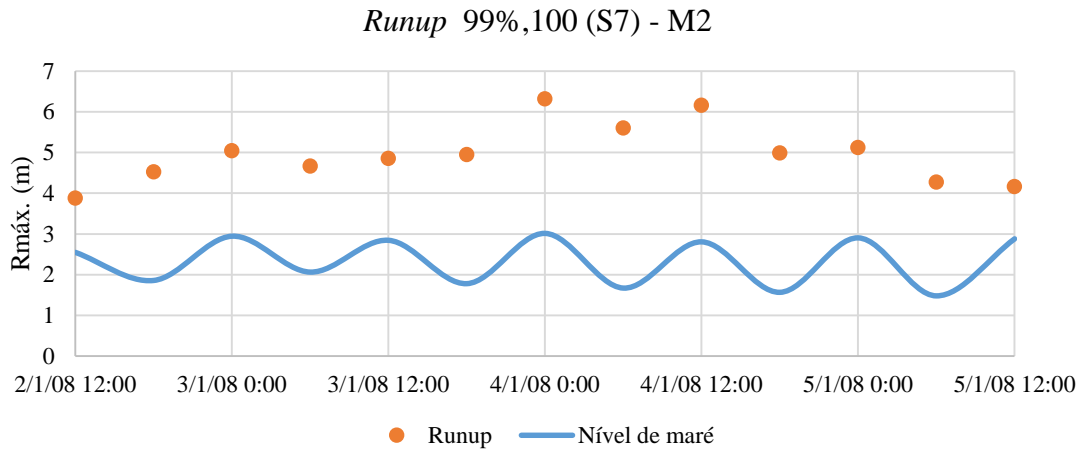


Figura D.21. Runup na secção S7, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

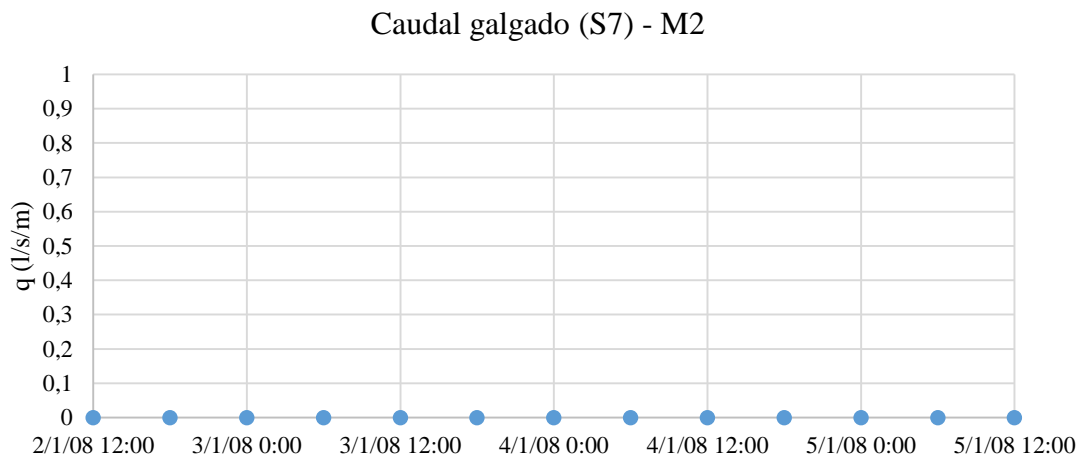


Figura D.22. Caudal médio galgado na secção S7, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 1

3) *Runup* e caudal médio galgado determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), considerando o método 1 e a tempestade 2, para as praias da Costa da Caparica

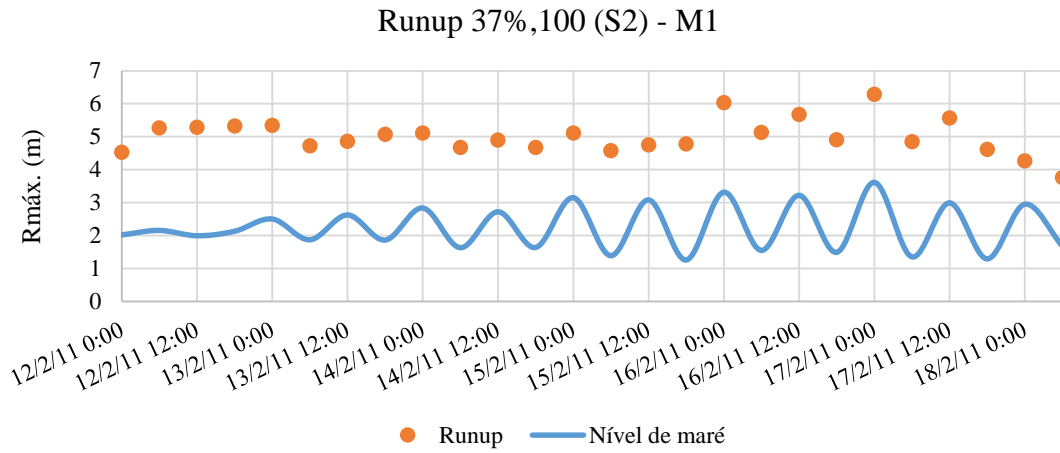


Figura D.23. *Runup* na secção S2, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

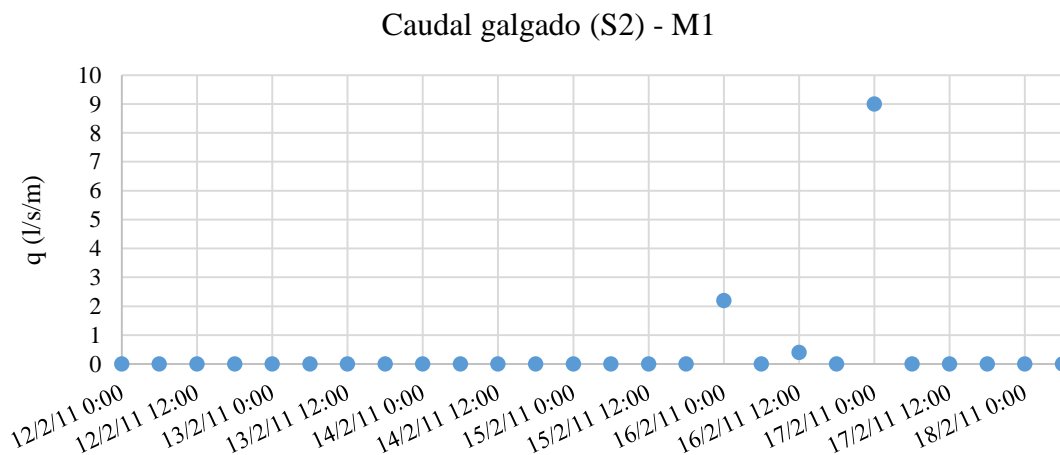


Figura D.24. Caudal médio galgado na secção S2, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

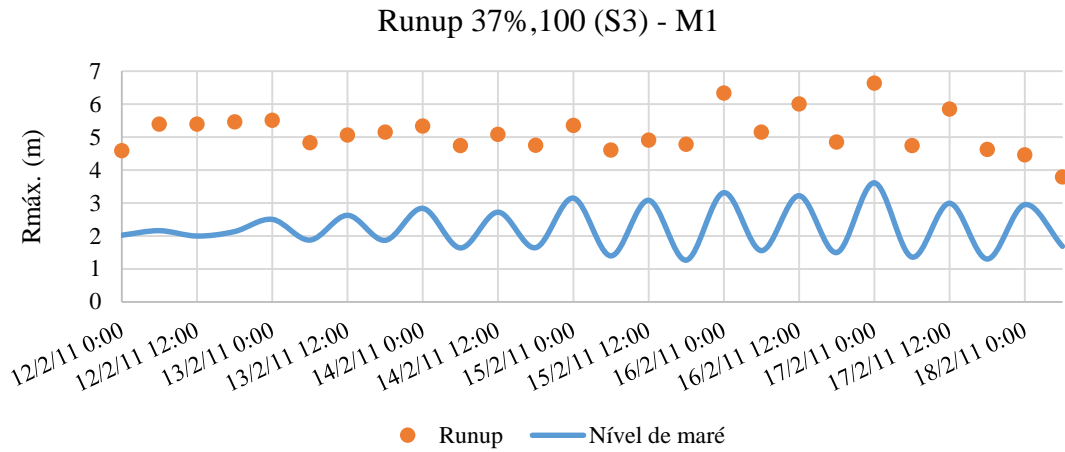


Figura D.25. Runup na secção S3, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

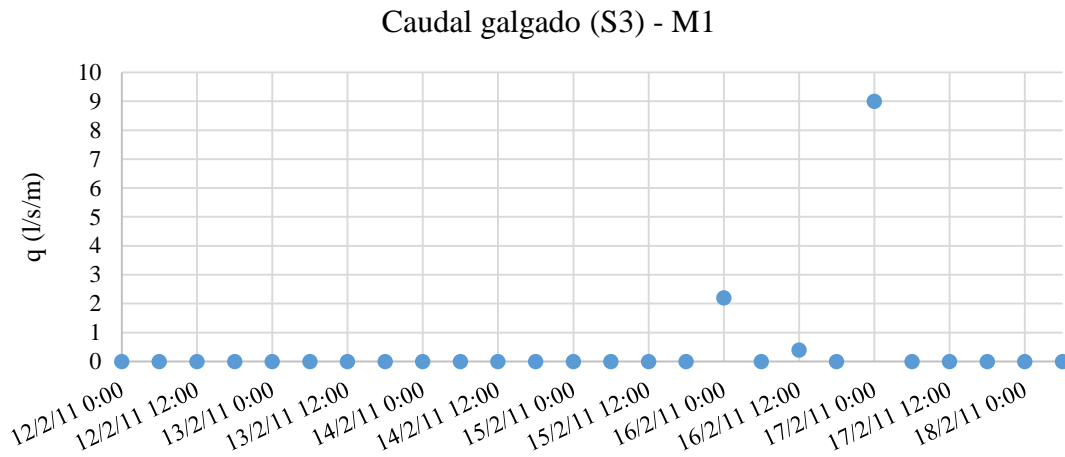


Figura D.26. Caudal médio galgado na secção S3, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

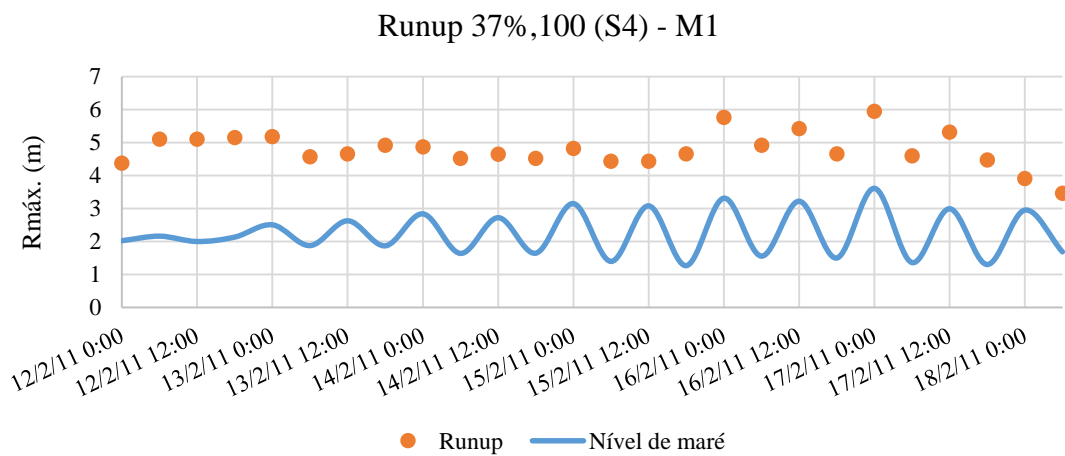


Figura D.27. Runup na secção S4, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

Caudal galgado (S4) - M1

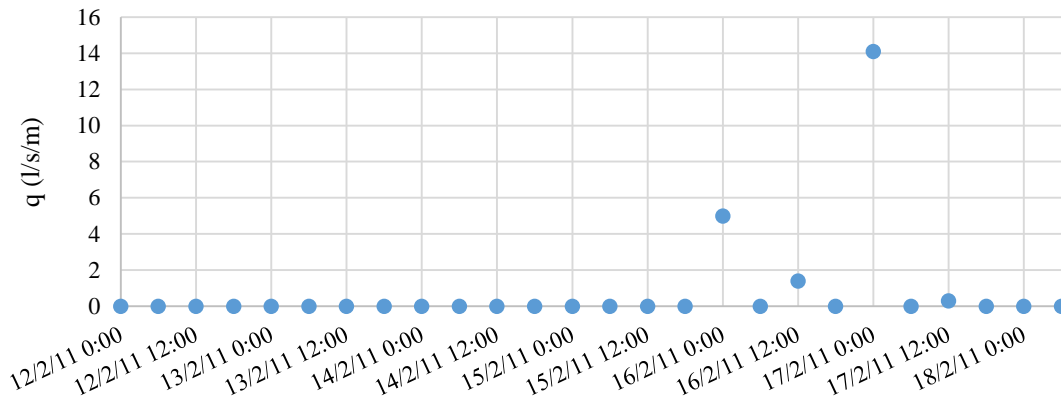


Figura D.28. Caudal médio galgado na secção S4, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

Runup 37%,100 (S5) - M1

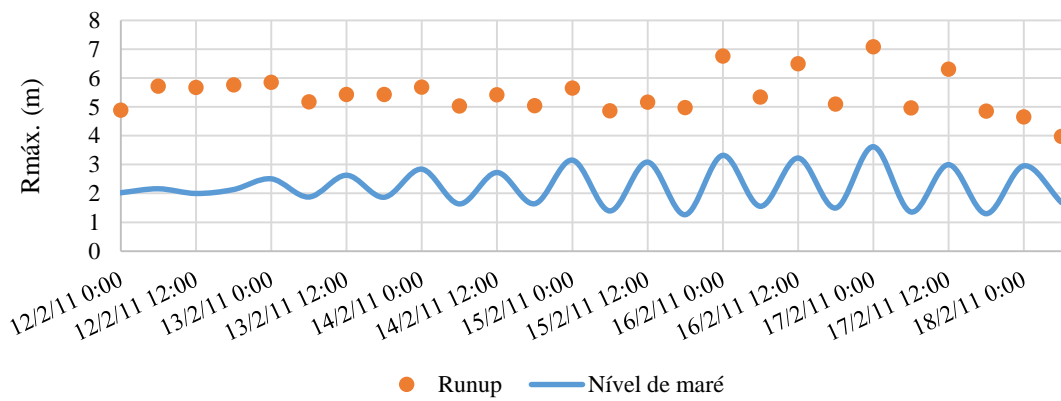


Figura D.29. Runup na secção S5, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

Caudal galgado (S5) - M1

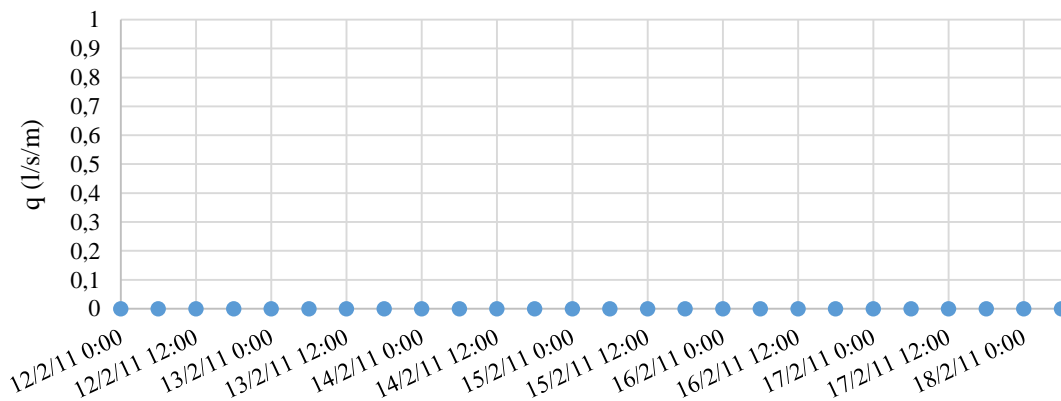


Figura D.30. Caudal médio galgado na secção S5, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

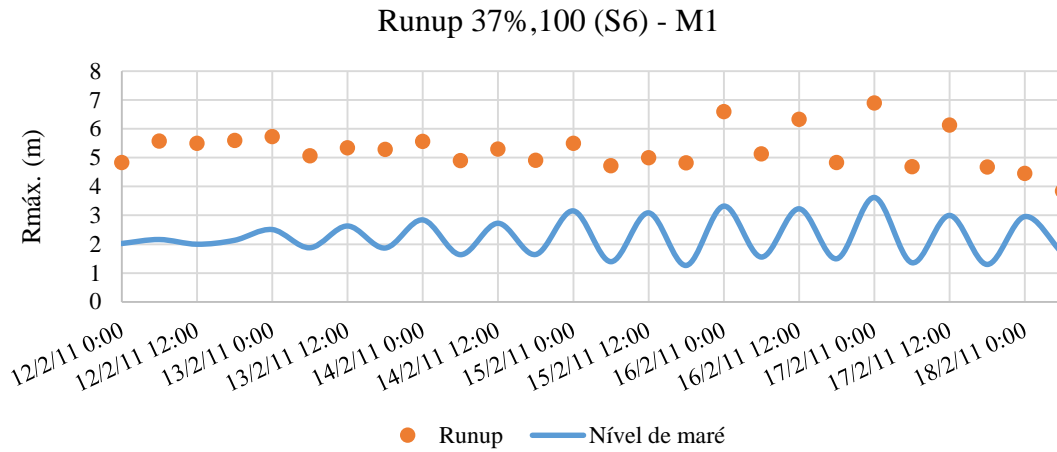


Figura D.31. Runup na secção S6, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

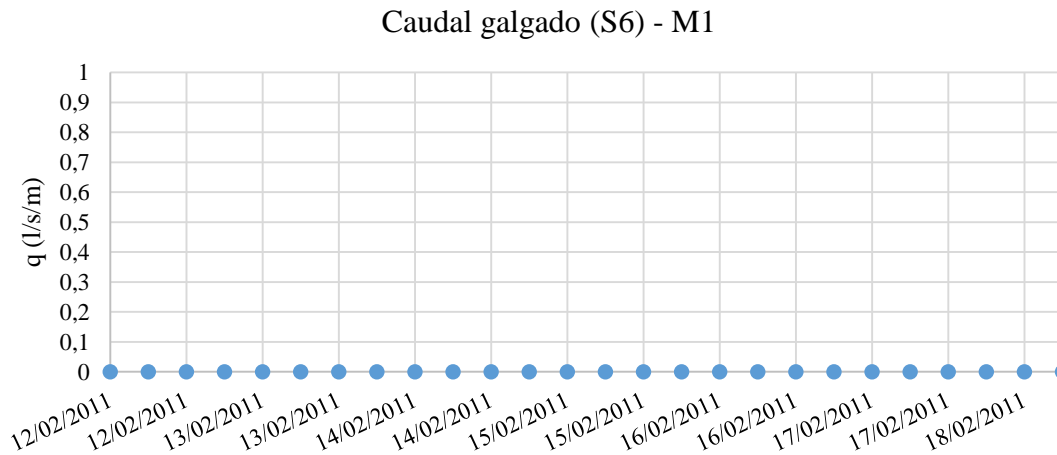


Figura D.32. Caudal médio galgado na secção S6, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

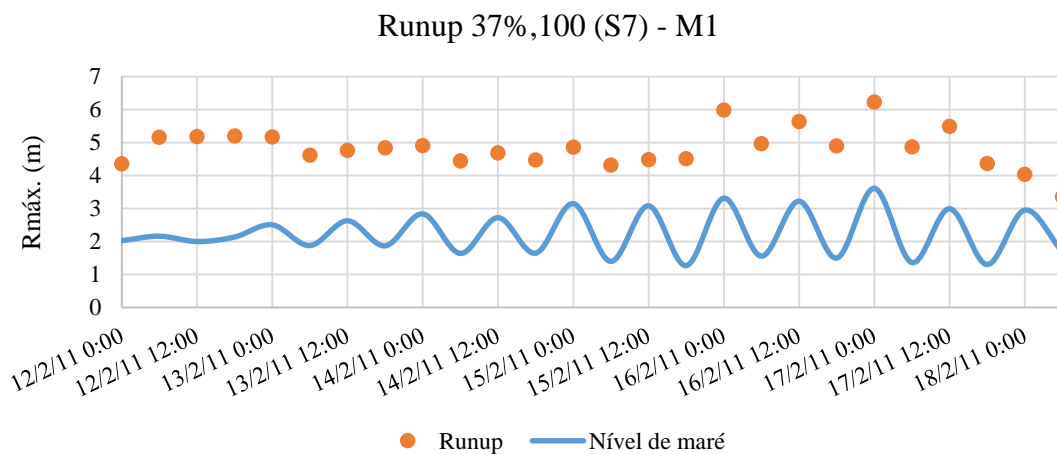


Figura D.33. Runup na secção S7, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

### Caudal galgado (S7) - M1

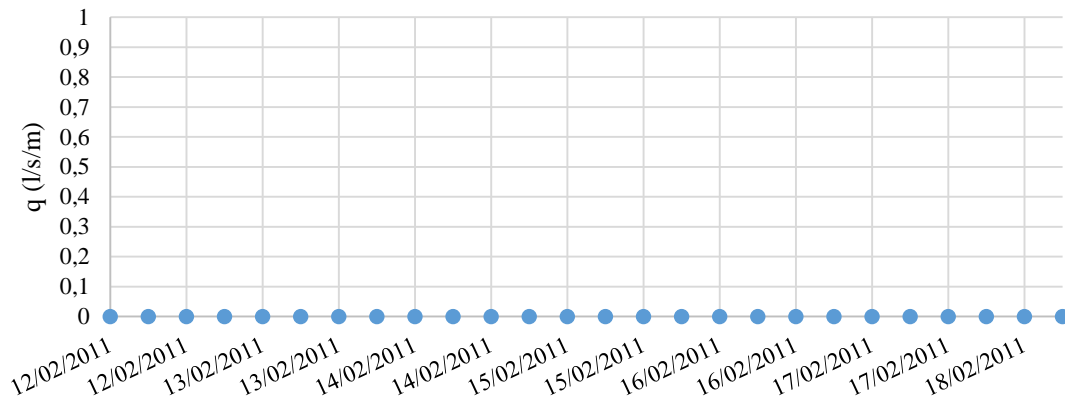


Figura D.34. Caudal médio galgado na secção S7, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 1, para a tempestade 2

**4) *Runup* e caudal médio galgado determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), considerando o método 1 e a tempestade 2, para as praias da Costa da Caparica**

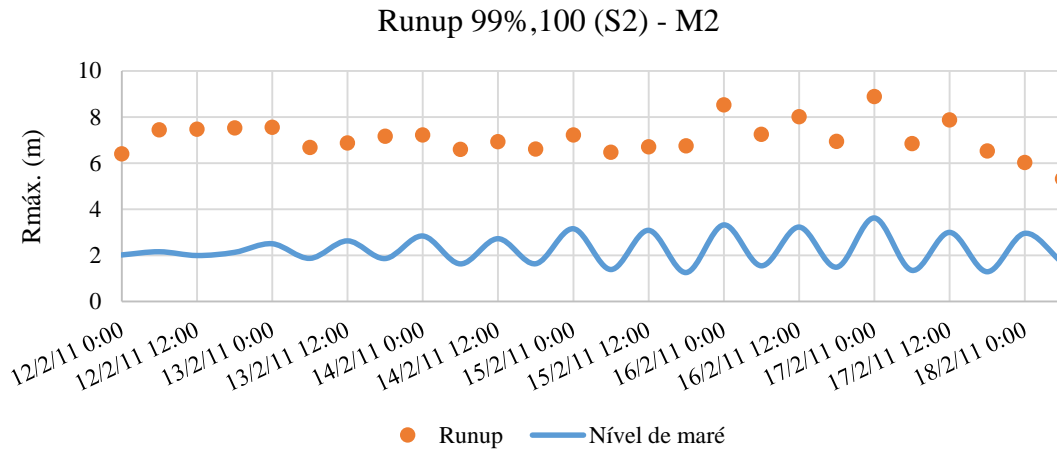


Figura D.35. *Runup* na secção S2, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

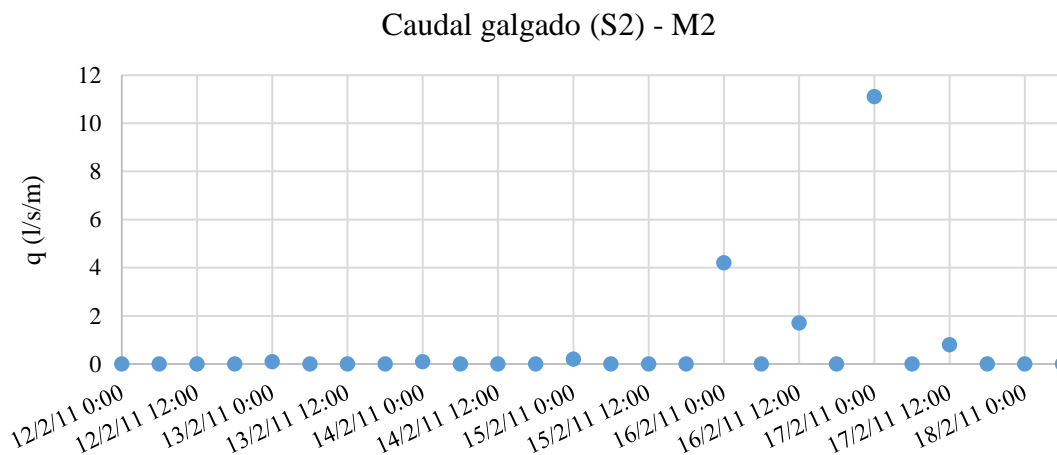


Figura D.36. Caudal médio galgado na secção S2, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método, para a tempestade 2

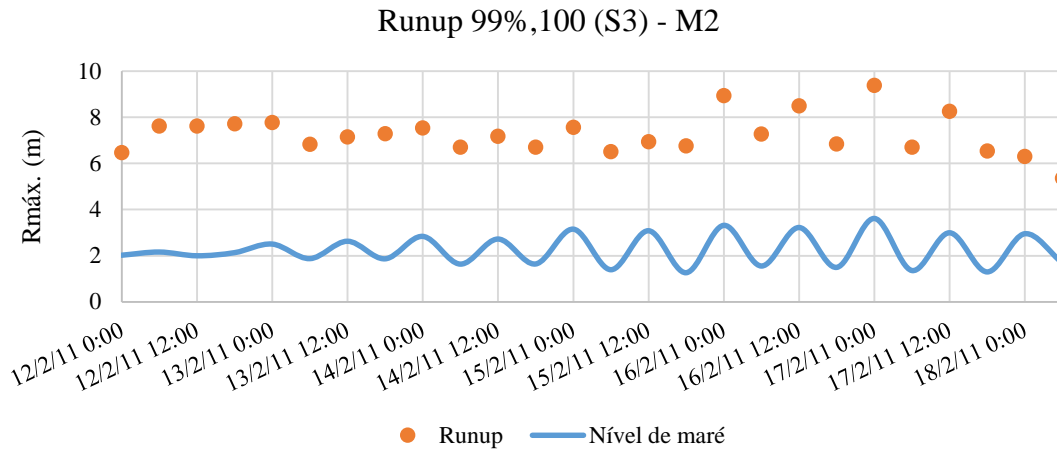


Figura D.37. Runup na secção S3, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

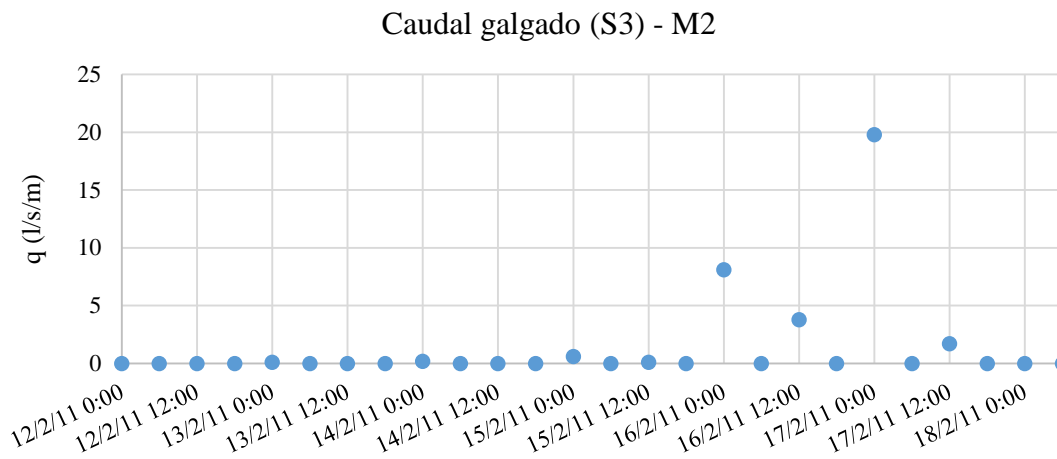


Figura D.38. Caudal médio galgado na secção S3, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

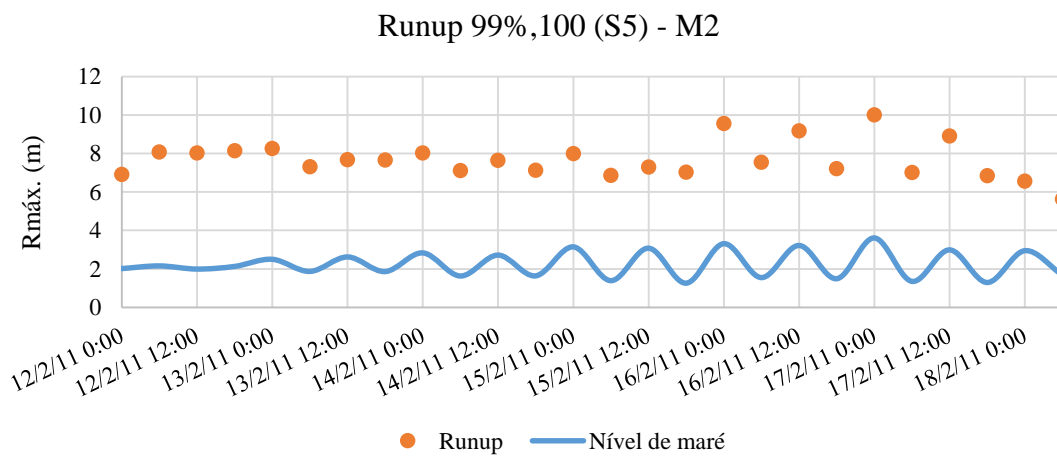


Figura D.39. Runup na secção S5, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

Caudal galgado (S5) - M2

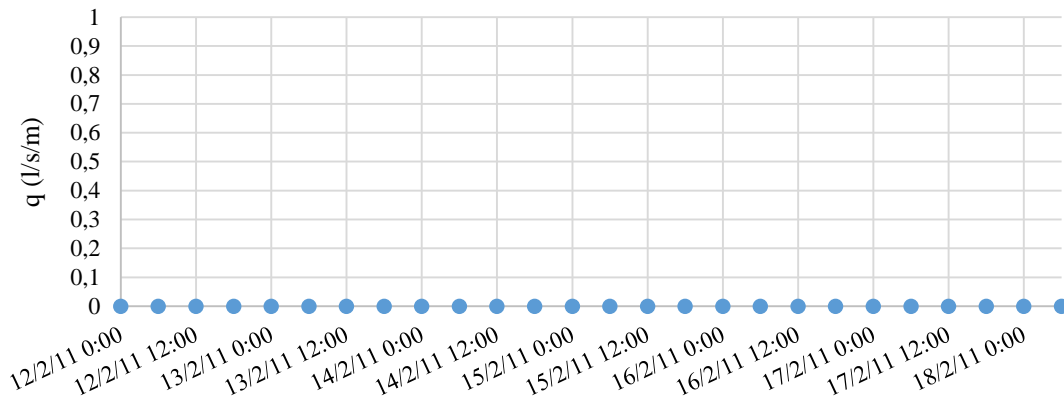


Figura D.40. Caudal médio galgado na secção S5, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

Runup 99%,100 (S6) - M2

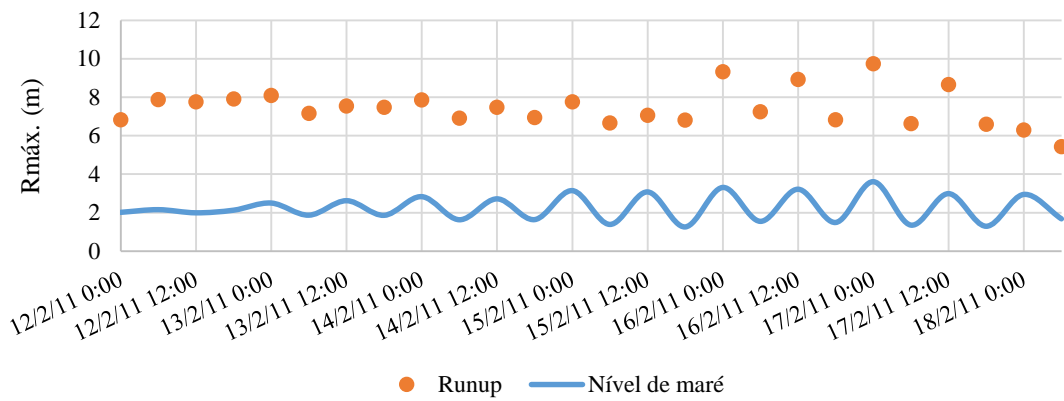


Figura D.41. Runup na secção S6, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

Caudal galgado (S6) - M2

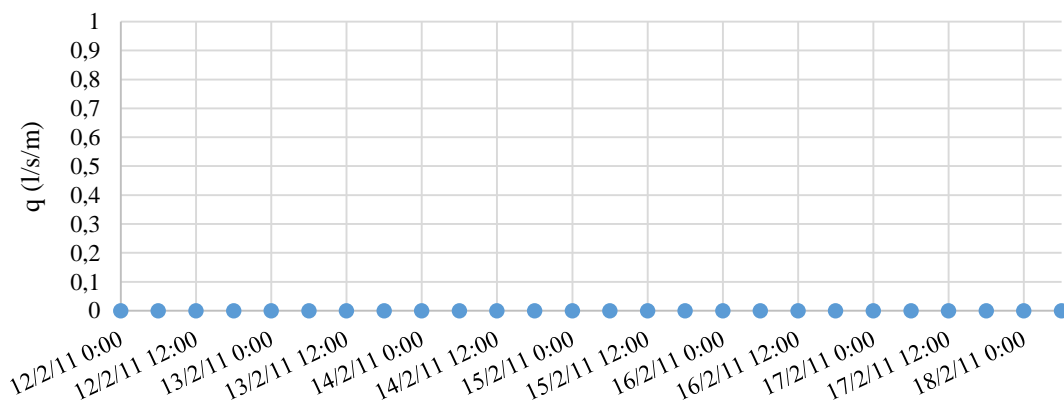


Figura D.42. Caudal médio galgado na secção S6, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

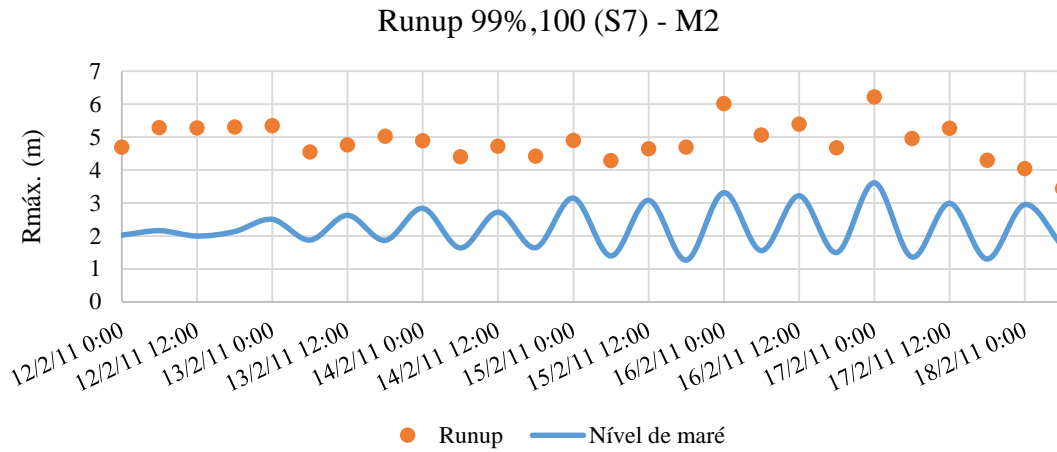


Figura D.43. Runup na secção S7, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2

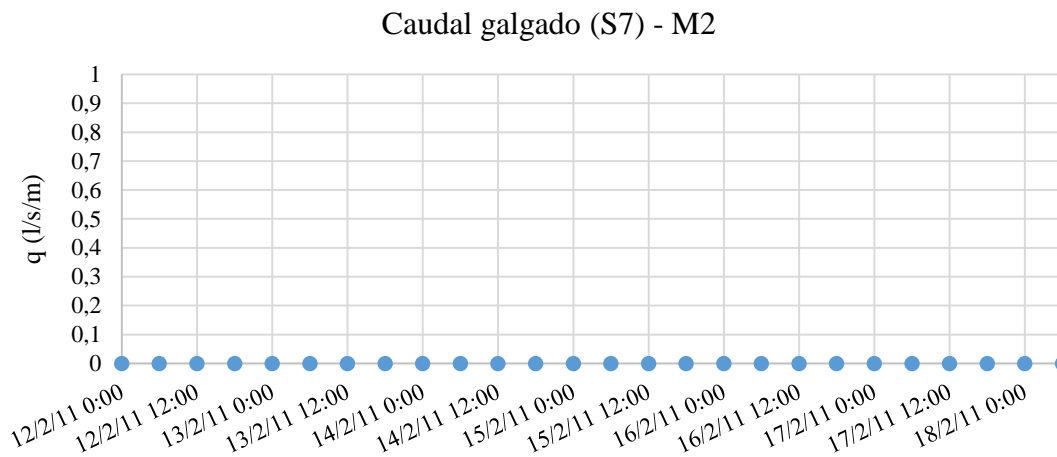


Figura D.44. Caudal médio galgado na secção S7, determinado através da metodologia de Mase *et al.* (2013), método 2, para a tempestade 2



**Anexo V – Caudal galgado obtido pelo modelo  
XBEACH**

**1) Caudal instantâneo galgado determinado através da metodologia do XBEACH considerando a tempestade 1, para as praias da Costa da Caparica**

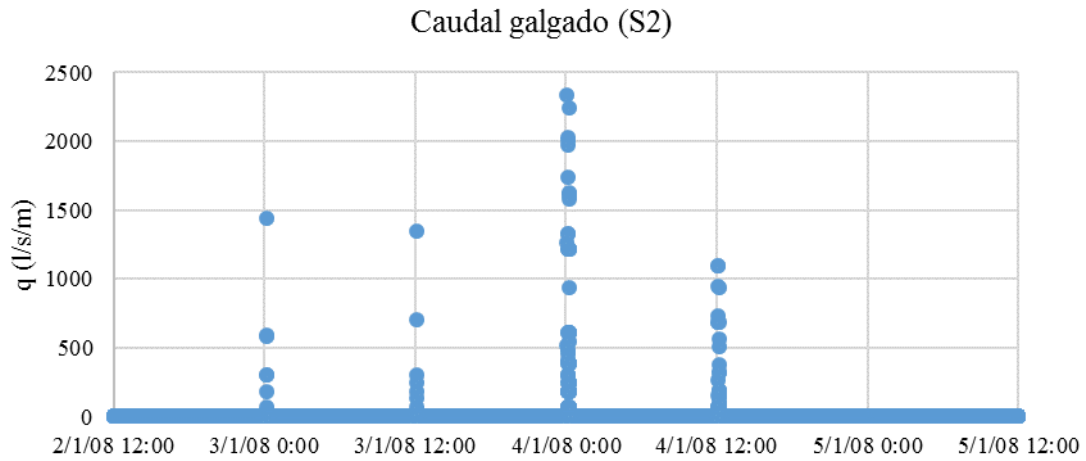


Figura E.1. Caudal instantâneo galgado na secção S2, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

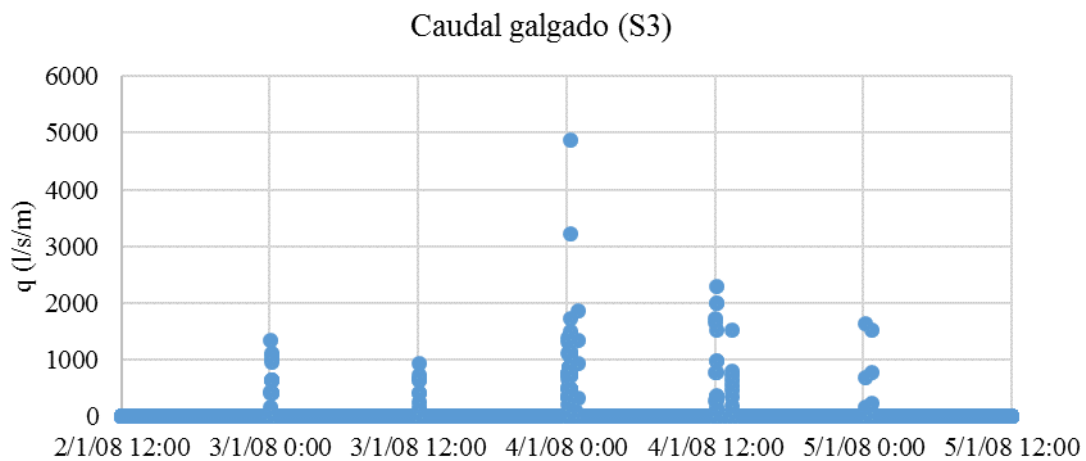


Figura E.2. Caudal instantâneo galgado na secção S3, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

Caudal galgado (S5)

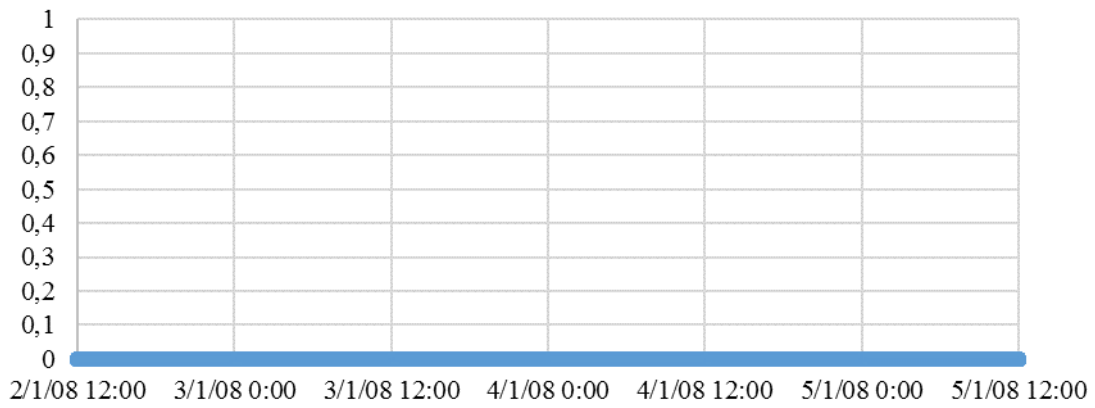


Figura E.3. Caudal instantâneo galgado na secção S5, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

Caudal galgado (S6)

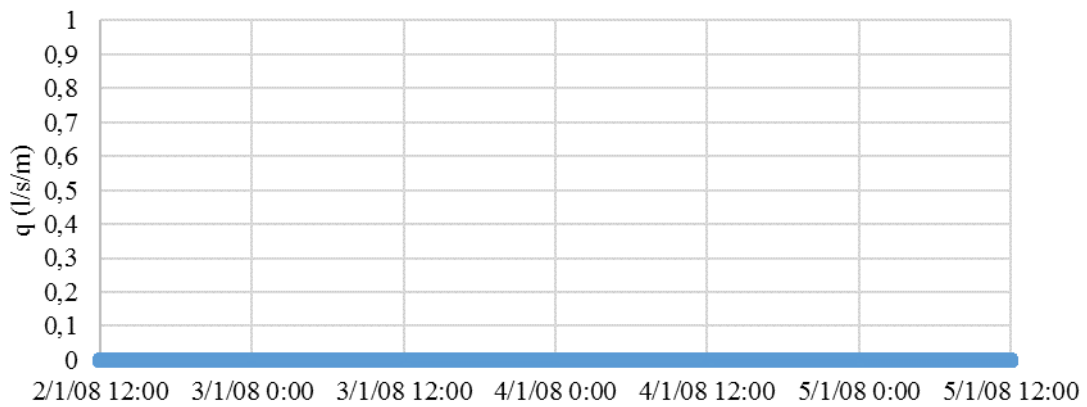


Figura E.4. Caudal instantâneo galgado na secção S6, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

Caudal galgado (S7)

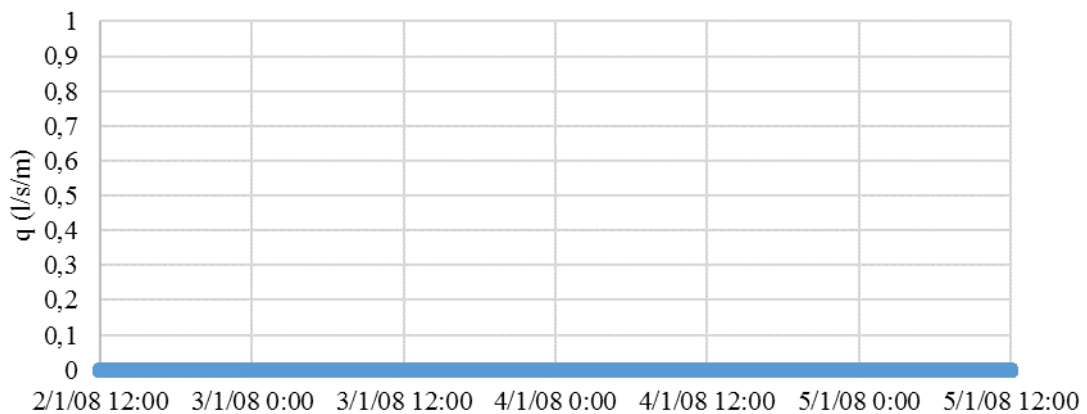


Figura E.5. Caudal instantâneo galgado na secção S7, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 1

**2) Caudal instantâneo galgado determinado através da metodologia do XBEACH considerando a tempestade 2, para as praias da Costa da Caparica**

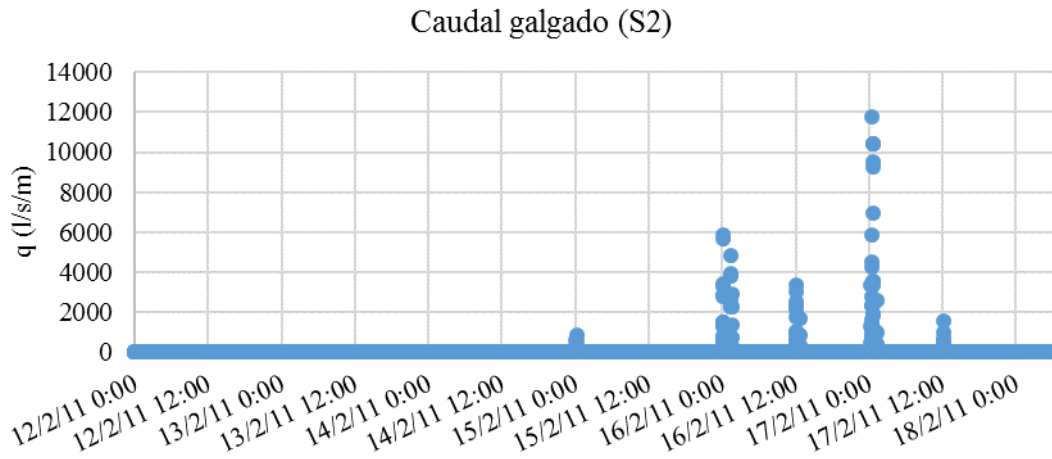


Figura E.6. Caudal instantâneo galgado na secção S2, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2

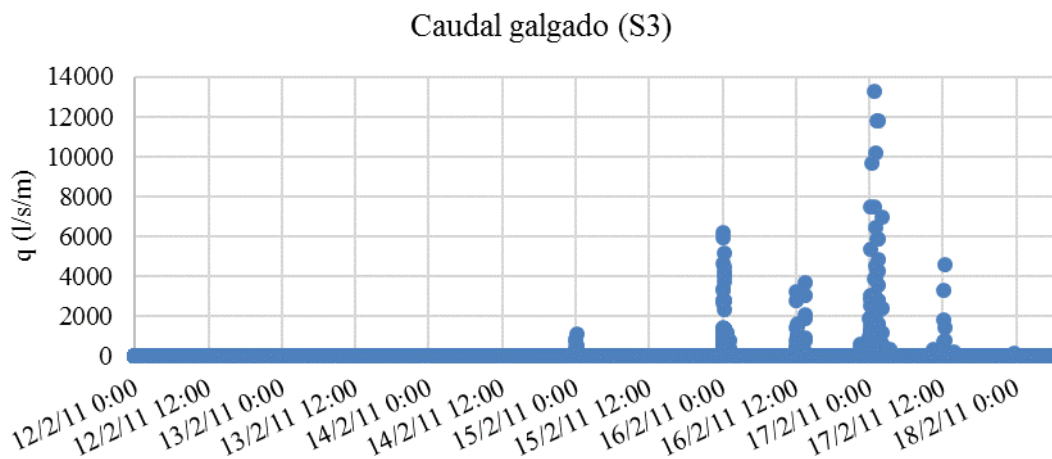


Figura E.7. Caudal instantâneo galgado na secção S3, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2

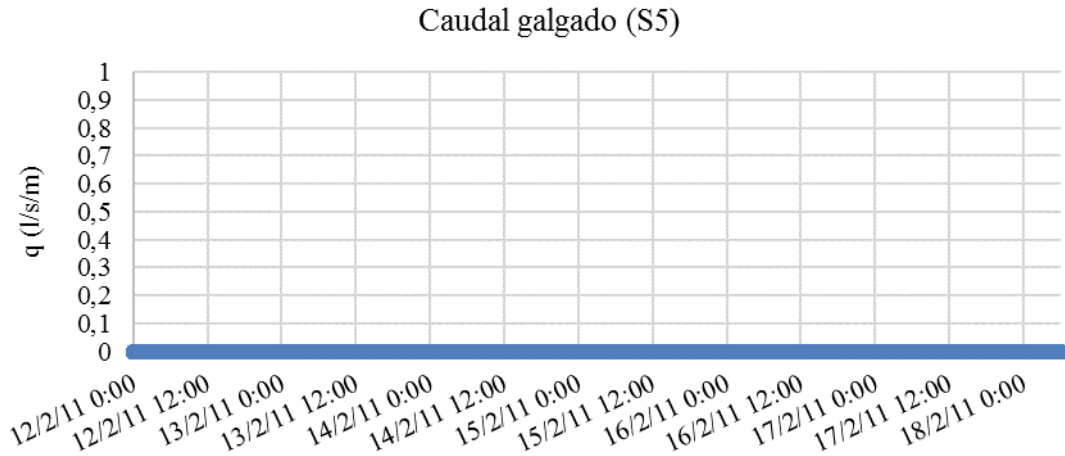


Figura E.8. Caudal instantâneo galgado na secção S5, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2

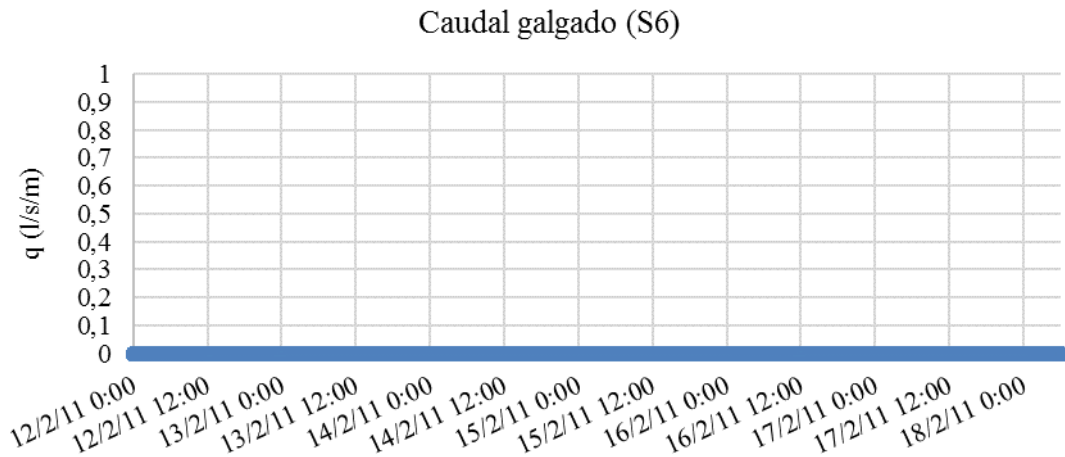


Figura E.9. Caudal instantâneo galgado na secção S6, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2

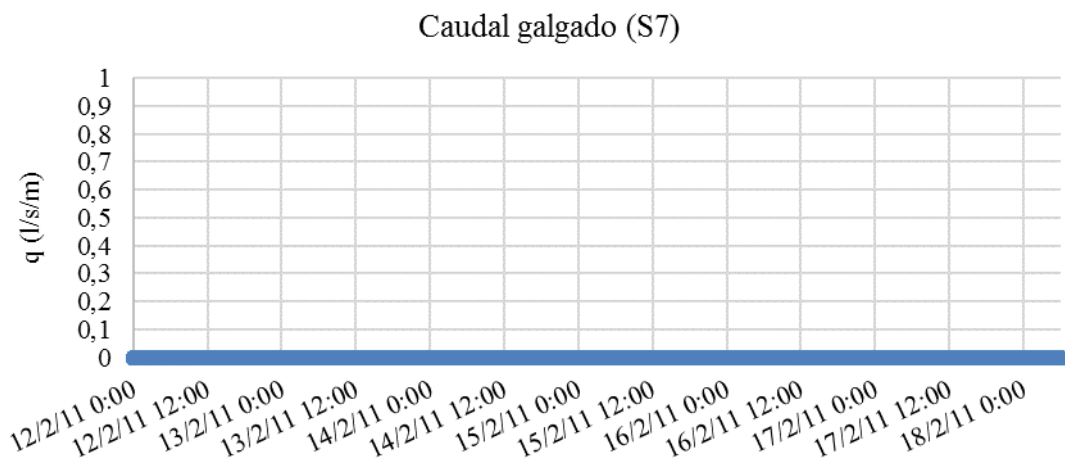


Figura E.10. Caudal instantâneo galgado na secção S7, determinado através da metodologia do XBEACH para a tempestade 2