

**Caracterização de tempestades marítimas e análise do seu
efeito nas praias a sul do rio Mondego**

Maria Inês Meneses Aguiar Santos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira,
Doutora Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira

Júri

Presidente: Professor Doutor Rodrigo de Almada Cardoso Proença de Oliveira

Orientador: Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira

Vogais: Professor Doutor Tiago André Martins de Azevedo Abreu

Junho de 2017

Dedicatória

Aos meus pais e à minha irmã.

Resumo

No estudo dos processos costeiros e da dinâmica litoral, a análise da incidência de temporais é um dos principais temas a debater quando o assunto é a gestão e defesa do sector costeiro. A costa Oeste portuguesa encontra-se exposta à agitação marítima energética que caracteriza o Atlântico Norte e requer cuidados permanentes para um planeamento e gestão eficientes.

Esta dissertação foca o estudo do fenómeno tempestade marítima e erosão associada a este evento de curto prazo. Os dois principais objetivos consistem em caracterizar o regime de tempestades marítimas no trecho localizado entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis, partindo de uma série cronológica de agitação marítima (1952-2010), e avaliar o impacto do parâmetro duração da tempestade em eventos erosivos, recorrendo à aplicação de um modelo numérico de morfodinâmica de curto prazo, *Litprof*, para análise do efeito das tempestades na morfologia do trecho, e comparação do efeito erosivo em eventos com a mesma potência e diferente duração.

A análise estatística da série de agitação marítima identificou um regime de tempestades de grande variabilidade inter-anual e intra-anual, em número, duração e potência, caracterizado por uma forte sazonalidade, com durações e potências médias 3 dias e 2654 m².h, respetivamente. As classes de frequência dominantes são [1-2] dias e [800-1600] m²/h (36% das ocorrências).

A evolução da morfodinâmica de curto prazo, aplicada a vários cenários, previu a preponderância do fator duração, perante eventos com potência semelhante, concluindo-se que eventos de maior duração geram sempre maiores efeitos (e maiores taxas de transporte) no perfil transversal, comparativamente a eventos de menor duração.

Palavras-chave: Tempestades marítimas, Modelação numérica, Transporte sedimentar transversal, Evolução do perfil de praia, Erosão de curto prazo.

Abstract

In the study of coastal processes and coastal dynamics, the analysis of storms impact is one of the most discussed topics in terms of management and defense of the coastal sector. The Portuguese west coast is exposed to the energetic wave climate that characterizes the North Atlantic, thus requiring permanent care as regards an efficient planning and management.

This dissertation studies the phenomenon of maritime storms and the associated erosion to this short-term event. The two main objectives are to characterize the storms regime in the coastal stretch, between the Mondego and the Lis rivers' inlets, based on a wave climate time series (1952-2010), and to evaluate the impact of storms duration on erosive events, by applying a short-term morphodynamic numerical model, *Litprof*, for the analysis of the storms effect on the morphology of the stretch and comparing the erosive effect on events with the same power and different duration.

The statistical analysis of the chronological series showed a coastal storms regime with high inter-annual and intra-annual variability, in number, duration and power, characterized by a strong seasonality, with an average duration and power of 3 days and 2654 m².h, respectively. The dominant frequency classes are [1-2[days and [800-1600[m²/h (36% of occurrences).

The numerical model, applied to several scenarios, predicted the preponderance of the duration factor, in relation to storms with similar power, leading to the conclusion that longer duration storms always generate larger effects (and higher transport rates) in the cross-shore profile, compared to shorter duration storms.

Key-words: Maritime storms, Numerical modelling, Cross-shore sediment transport, Beach profile evolution, Short-term erosion.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor Doutor António Alexandre Trigo Teixeira e Doutora Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira. A partilha incansável de conhecimento, o incentivo, dedicação e acompanhamento permanente, foram imprescindíveis para a realização desta dissertação. A forma atenciosa e compreensiva com que me orientaram ao longo deste processo, é louvável. O meu sincero agradecimento.

Ao “*Ontem à noite*”. As melhores pessoas que conheci no Técnico são também os meus melhores amigos. Foram cinco anos de partilha e mais vivências do que as que consigo contar. Não consigo desassociar esta experiência de todos vocês, obrigada por fazerem de Lisboa também um lar.

À Joana Ruas. Durante estes meses senti que esta “*batalha*” foi tanto tua como minha, e uma dor dividida é sempre uma dor menos dolorosa. Obrigada por nunca (me) faltares.

À minha irmã. Ouvinte de desabafos diários, companhia dos bons e maus momentos, um modelo de garra, persistência e dedicação, sem dúvida, umas das melhores pessoas que conheço. És insubstituível.

Termino esta secção “*com chave de ouro*”, dirigindo a minha palavra a quem sempre me encorajou a alcançar os meus objetivos e superar obstáculos, nunca duvidando das minhas capacidades. A quem me transmitiu valores e ensinamentos, moldando a pessoa que hoje sou. A quem mais se dedicou e fez do impossível possível, privilegiando sempre a minha felicidade. Agradeço às duas pessoas que mais sorte tenho em ter: aos meus Pais.

Índice

Dedicatória.....	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos.....	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xvii
Lista de Abreviaturas	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação, objetivo e metodologia	1
1.1. Organização da dissertação	2
2. Fundamentação teórica.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Hidrodinâmica costeira	6
2.2.1. Agitação marítima.....	6
2.2.2. Nível do mar.....	9
2.3. Transporte sedimentar.....	11
2.3.1. Processos de dinâmica sedimentar costeira	11
2.3.2. Perfis de praia.....	15
2.4. Modelos numéricos de dinâmica costeira	16
2.4.1. Modelo Duner	16
2.4.2. Modelo SBeach	17
2.4.3. Modelo Delft3D e Modelo XBeach	17
3. Zona de estudo.....	19
3.1. Introdução	19
3.2. Enquadramento da zona de estudo	19
4. Tempestades marítimas na zona de estudo	23
4.1. Introdução	23
4.2. Identificação dos eventos de tempestade marítima	24
4.3. Estimativa da potência de onda dos eventos de tempestade marítima.....	25
4.4. Análise da série cronológica de agitação marítima e caracterização do regime de tempestades marítimas	26

4.4.1.	Análise da série cronológica de agitação marítima	26
4.4.2.	Caracterização do regime de tempestades marítimas.....	32
4.5.	Seleção das tempestades a simular.....	36
5.	Modelação numérica da morfodinâmica durante as tempestades marítimas	39
5.1.	Introdução	39
5.2.	Breve caracterização topo-hidrográfica e sedimentológica da zona.....	39
5.3.	Propagação do clima de agitação marítimo	41
5.4.	Ficheiro de Input: Cross-shore profile – Perfil transversal	41
5.4.1.	Batimetria.....	42
5.4.2.	Rugosidade de fundo.....	43
5.4.3.	Diâmetro mediano do sedimento.....	43
5.4.4.	Velocidade de queda	43
5.4.5.	Dispersão geométrica dos sedimentos	43
5.5.	Ficheiro de Input: Hydrodynamic climate – Clima de hidrodinâmica	43
5.5.1.	Tempo.....	43
5.5.2.	Altura de onda	43
5.5.3.	Direção de onda	44
5.5.4.	Período de onda	44
5.5.5.	Fator de dispersão.....	44
5.5.6.	Nível do mar.....	44
5.5.7.	Condições hidrodinâmicas a simular.....	46
5.6.	Outros parâmetros utilizados no setup do modelo.....	49
5.7.	Resultados e Discussão	50
5.7.1.	Evolução do perfil simplificado da zona de estudo	50
5.7.2.	Evolução do perfil P7 representativo da zona de estudo	63
5.7.3.	Comparação e discussão de resultados	71
6.	Considerações finais e recomendações futuras	75
	Referências Bibliográficas	79
	ANEXO A.....	81
A.	LITPACK – Sistema de modelação integrada para processos de dinâmica litoral	83
1.1.	Introdução	83
1.2.	Considerações gerais.....	83

1.3.	Litprof	84
1.3.1.	Descrição geral	84
1.3.2.	Equação governante e condições de fronteira	86
1.3.3.	Cálculo do transporte sedimentar – STP (Sediment Transport Module)	87
ANEXO B.	91
B.	Evolução do perfil e taxa de transporte sedimentar na base da duna	93

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Terminologia da zona de estudo na interface mar-terra. Fonte: Oliveira (2012).	5
Figura 2.2 – Representação esquemática do fenómeno de refração. Fonte: Coelho (2005).	6
Figura 2.3 – Tipos de rebentação das ondas. Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers (2003).	8
Figura 2.4 – a) Espectro de frequência $E(f)$ e b) espetro direcional de ondas $E(f, \theta)$. Adaptado de Holthuijsen (2007).	9
Figura 2.5 – Representação esquemática do movimento orbital das partículas na propagação em direção à costa e da alteração da forma das ondas (assimetria vertical e horizontal). Fonte: Abreu (2006).	12
Figura 2.6 – Trajetórias orbitais de propagação das partículas segundo: a) Teorias de movimento orbital linear; b) Teorias de movimento orbital não linear. Adaptado de Davidson-Arnott (2009).	12
Figura 2.7 – Representação esquemática da distribuição da velocidade de deriva de acordo com Stokes. Adaptado de Rijn (2013).	13
Figura 2.8 – Representação esquemática do perfil de velocidade de <i>streaming</i> de acordo com Longuet-Higgins (1953). Adaptado de Rijn (2013).	13
Figura 2.9 – Perfil tridimensional da corrente litoral na presença da corrente paralela à costa e de <i>undertow</i> . Adaptado de Rijn (2013).	14
Figura 2.9 – Padrão de circulação vertical do escoamento. Fonte (LNEC, 2000).	14
Figura 2.11 – Representação esquemática do perfil de velocidades das correntes de retorno na zona de rebentação. Adaptado de Rijn (2013).	15
Figura 2.12 – Perfil de verão/pré-tempestade e perfil de inverno/tempestade e processos envolvidos. Adaptado de Rogers & Nash (2003).	16
Figura 3.1 – Localização do trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Rio Lis, principais núcleos urbanos e estruturas transversais constituintes. Adaptado de Google Maps, Abril de 2017.	19
Figura 3.2 – Porto da Figueira da Foz a) antes (Fonte: Loureiro (1905)) e b) depois da construção dos molhes na embocadura do Rio Mondego (1961-1965) (Fonte: Google Maps, Abril de 2017).	20
Figura 3.3 – Fotografias da zona de estudo, praias entre Gala-Cova e Leirosa, sujeitas a condições de temporal. Janeiro de 2017.	22
Figura 4.1 - Localização do ponto de obtenção da série de agitação marítima (AM). Fonte: Google Maps, Abril de 2017.	23
Figura 4.2 - Esquema exemplificativo do cálculo da potência de onda para as situações de atuação de ondas com $H_s = 4,5$ m durante 6h (valor de dados único) e 24 h (situação limite de ocorrência de tempestade).	26
Figura 4.3 - Distribuição do número de eventos de tempestade inter-anual, no período de 1952 a 2010 no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.	27
Figura 4.4 – Distribuição da percentagem de anos em que ocorreu um determinado número de eventos por ano, compreendidos entre [0 e 11], no período de 1952 a 2010 no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.	27
Figura 4.5 – Discretização do número de eventos pelos meses do ano, durante o período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.	28

Figura 4.6 - Distribuição mensal do número de eventos médio, máximo e mínimo, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.....	29
Figura 4.7 - Distribuição da a) Duração e b) Potência relativa das tempestades ocorridas por ano, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.	30
Figura 4.8 - Distribuição mensal dos valores médios, máximos e mínimos de a) duração e b) potência, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.	31
Figura 4.10 - Histogramas da duração do regime de tempestades marítimas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis: a) não considerando a sazonalidade e b) considerando a sazonalidade.	33
Figura 4.11 - Histogramas da potência relativa do regime de tempestades marítimas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis: a) não considerando a sazonalidade e b) considerando a sazonalidade.	34
Figura 4.12 - Histograma conjunto Duração – Potência relativa, complementado com os histogramas marginais de cada uma das grandezas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.....	35
Figura 4.13 - Esquema ilustrativo da seleção dos seis eventos de tempestade a simular com recurso ao modelo numérico <i>Litprof</i>	36
Figura 5.1 – Representação dos perfis transversais de praia, P1 a P18, e identificação dos cinco perfis transversais representativos de cada sub-trecho, no trecho litoral de estudo. Fonte: Oliveira (2016).	40
Figura 5.2 – Perfil transversal representativo da zona de estudo – Perfil P7 e perfil de equilíbrio associado para $d_{50} = 0.30$ mm. Adaptado de Oliveira & Brito (2014).....	40
Figura 5.3 – Definição da orientação do perfil. Fonte: DHI (2014b).....	41
Figura 5.4 - Perfil transversal P7 representativo da zona de estudo e perfil simplificado obtido a partir dos perfis transversais que caracterizam cada sub-trecho da zona de estudo, compreendida entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.....	42
Figura 5.5 - Representação esquemática do perfil transversal simplificado da zona de estudo, compreendida entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.....	42
Figura 5.6 – Obtenção dos valores de PMAV e BMAV para a Figueira da foz, com recurso às tabelas de previsão de marés de 2017 do IH. Fonte: <i>website</i> do Instituto Hidrográfico (consultado a 10/2/2017). ..	44
Figura 5.7 – Níveis máximos (m, ZH) obtidos para vários períodos de retorno (anos) para Aveiro. Fonte: Fortunato <i>et al.</i> (2011).	45
Figura 5.8 – Definição de sobrelevação, maré de águas vivas, nível do mar e variação da altura de onda durante uma tempestade.....	46
Figura 5.9 – Condições de hidrodinâmica a simular para a tempestade com a) menor duração e b) maior duração) e potências relativas reduzidas.	47
Figura 5.10 – Condições de hidrodinâmica a simular para a tempestade com a) menor duração e b) maior duração) e potências relativas médias.	48
Figura 5.11 – Condições de hidrodinâmica a simular para a tempestade com a) menor duração e b) maior duração) e potências relativas elevadas.	49
Figura 5.12 – Configuração do perfil simplificado e designação das principais zonas constituintes.	51

Figura 5.13 – Evolução do perfil transversal simplificado do caso de estudo para as tempestades de menor duração (42h) e maior duração (108h) de baixa potência: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.	52
Figura 5.14 – Evolução do perfil transversal simplificado do caso de estudo para as tempestades de menor duração (150h) e maior duração (258h) de potência média: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção) b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.	54
Figura 5.15 – Evolução do perfil transversal simplificado do caso de estudo para as tempestades de menor duração (228h) e maior duração (306h) de potência elevada: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.	57
Figura 5.16 – Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para a) Tempestade de menor duração (42h) e b) Tempestade de maior duração (108h).	59
Figura 5.17 – Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de baixa potência de menor (48h) e maior duração (108h).	59
Figura 5.18 – Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de potência média de a) menor duração (150h) e b) maior duração (258h).	60
Figura 5.19 – Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de potência média de menor (150h) e maior duração (258h).	61
Figura 5.20 – Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de potência elevada de a) menor duração (228h) e b) maior duração (306h).	62
Figura 5.21 – Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de potência elevada de menor (228h) e maior duração (306h).	62
Figura 5.22 – Evolução do perfil transversal P7 representativo do caso de estudo para as tempestades de menor duração (42 h) e maior duração (108 h) de baixa potência: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.	64
Figura 5.23 – Evolução do perfil transversal P7 representativo do caso de estudo para as tempestades de menor duração (150 h) e maior duração (258 h) de potência média: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.	66
Figura 5.24 – Evolução do perfil transversal simplificado do caso de estudo para as tempestades de menor duração (228h) e maior duração (306h) de potência elevada: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.	69
Figura 5.25 – Comparação dos perfis simplificado e perfil P7 representativo da zona de estudo.	71
Figura A.1 – Módulos numéricos de evolução de linha de costa, pertencentes ao sistema de modelação <i>LITPACK</i> . Adaptado de DHI (2014b).	84
Figura A.2 – Esquema simplificado do modelo <i>Litprof</i> e dos três sub-modelos de processos físicos costeiros que o constituem. Adaptado de LNEC (2000).	85
Figura A.3 – Definição do sistema de coordenadas utilizado no <i>Litprof</i> . Fonte: DHI (2016).	86
Figura B.1 – Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para a) Tempestade de menor duração (42h) e b) Tempestade de maior duração (108h).	93
Figura B.2 – Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de baixa potência de menor (48h) e maior duração (108h).	93
Figura B.3 – Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de potência média de a) menor duração (150h) e b) maior duração (258h).	94

Figura B.4 – Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de potência média de menor (150h) e maior duração (258h).	94
Figura B.5 – Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de potência elevada de a) menor duração (228h) e b) maior duração (306h).	95
Figura B.6 – Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de potência elevada de menor (228h) e maior duração (306h).	95

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Identificação dos tipos de rebentação de acordo com os valores do “ <i>surf similarity parameter</i> ” ou número de Iribarren ξ , (Battles, 1974).....	8
Tabela 4.1 – Durações mínima e máxima calculadas para os eventos identificados durante o período de 1952 a 2010 no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras dos Rios Mondego e Lis, por aplicação do critério de definição de tempestades <i>POT (Peak-Over-Threshold Method)</i>	25
Tabela 4.2 – Potências mínima e máxima calculadas para os eventos de tempestade identificados durante o período de 1952 a 2010 no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras dos Rios Mondego e Lis, por aplicação do método de <i>POT (Peak-Over-Threshold Method)</i>	26
Tabela 4.3 - Parâmetros estatísticos relativos à duração no regime de tempestades marítimas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.	32
Tabela 4.4 – Parâmetros estatísticos relativos à potência relativa no regime de tempestades marítimas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.	33
Tabela 4.5 – Tempestades selecionadas, durações e potências relativas associadas, para cada gama de potências (baixa, média e elevada), no período de 1952 a 2010, para o trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.....	37
Tabela 5.1 – Obtenção do valor da sobrelevação a considerar no nível de mar e definição dos valores de PMAV, BMAV e nível máximo para auxílio dos cálculos.	45
Tabela 5.2 – Obtenção do nível de mar a considerar na modelação das tempestades marítimas.	45
Tabela 5.3 – Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (42h) e maior duração (108h) de baixa potência.	52
Tabela 5.4 – Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (150h) e maior duração (258h) de potência média.	55
Tabela 5.5 – Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (228h) e maior duração (306h) de potência elevada.	57
Tabela 5.6 – Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (42 h) e maior duração (108 h) de baixa potência.	64
Tabela 5.7 – Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (150h) e maior duração (258h) de potência média.	67
Tabela 5.8 – Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (228h) e maior duração (306h) de potência elevada.	69
Tabela 5.9 – Comparação dos resultados obtidos, para as tempestades de potência baixa, para os perfis simplificado e perfil P7.....	71

Tabela 5.10 – Comparação dos resultados obtidos, para as tempestades de potência média, para os perfis simplificado e perfil P7.....	72
Tabela 5.11 – Comparação dos resultados obtidos, para as tempestades de potência elevada, para os perfis simplificado e perfil P7.....	73

Lista de Abreviaturas

C	Concentração dos sedimentos (g/L)
D	Profundidade da água local (m)
$D(f, \theta)$	Função de espalhamento direcional (-) ou ($1/^\circ$)
E	Energia total (m^2/h)
$E(f)$	Espectro de frequência (m^2/Hz)
$E(f, \theta)$	Espectro direcional de ondas ($m^2/Hz/^\circ$)
H	Altura de onda (m)
H_b	Altura de onda na rebentação (m)
H_e	Altura significativa de onda que é excedida 12 horas por ano (m)
H_{rms}	Altura média quadrática de onda (m)
H_s	Altura significativa de onda (m)
H_0	Altura de onda ao largo (m)
K_r	Coefficiente de refração (-)
K_s	Coefficiente de empolamento (-)
L	Comprimento de onda (m)
L_0	Comprimento de onda em águas profundas (m)
T	Período da onda (s)
T_s	Temperatura da água ($^\circ C$)
T_{H_e}	Período associado à altura significativa de onda excedida 12 horas por ano (s)
T_p	Período de pico (s)
T_z	Período médio de zero ascendente (s)
U	Velocidade média do escoamento (m/s)
U_f	Velocidade de arrastamento instantânea (m/s)
U_δ	Velocidade orbital de pico no limite da camada limite (m/s)
b	Distância entre raios de onda (m)
b_0	Distância entre raios de onda ao largo (m)
c	Velocidade junto ao fundo (m/s)
d_{50}	Diâmetro nominal mediano dos sedimentos (m)
f	Frequência de onda (Hz)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
h	Nível de fundo (m)
h_c	Profundidade de fecho (m)
k	Rugosidade de fundo (-)
n	Porosidade do material de fundo (-)
q	Taxa de transporte transversal sedimentar local ($m^3/s/m$)
q_b	Caudal sólido transportado por arrastamento ($m^3/s/m$)
q_{b1}	Caudal sedimentar transportado por arrastamento, na direção do escoamento ($m^3/s/m$)

q_{b2}	Caudal sedimentar transportado por arrastamento, na direção perpendicular ao escoamento ($m^3/s/m$)
q_s	Caudal sólido transportado em suspensão ($m^3/s/m$)
q_t	Caudal sedimentar total ($m^3/s/m$)
p	Parâmetro de descrição da concentração no fundo (-)
s	Densidade relativa do material de fundo (-)
w_s	Velocidade de queda (m/s)
x	Coordenada normal à linha de costa (m)
y	Coordenada paralela à linha de costa (m)
z	Coordenada espacial vertical (m)
δ	Declividade da onda (-)
β	Declive do fundo (-)
ξ	Número de Iribarren (-)
σ	Número de Courrant (-)
$\phi(t)$	Direção instantânea do movimento fluído (-)
Φ_b	Parâmetro adimensional do transporte por arrastamento (-)
Φ_{b1}	Parâmetro adimensional de transporte por arrastamento na direção do escoamento (-)
Φ_{b2}	Parâmetro adimensional de transporte por arrastamento na direção perpendicular ao escoamento (-)
θ	Direção de propagação da onda ($^\circ$)
θ'	Parâmetro instantâneo de Shields (-)
θ_c	Parâmetro crítico de Shields (-)
\mathcal{E}_s	Coefficiente de difusão de sedimentos para escoamentos turbulentos (m^2/s)
ν	Viscosidade cinemática (m^2/s)

1. Introdução

1.1. Motivação, objetivo e metodologia

A zona costeira de Portugal Continental possui uma importância amplamente reconhecida, a nível natural, económico e cultural, aí residindo cerca de $\frac{3}{4}$ da população e produzindo 85% da riqueza do país. A aplicação de políticas públicas, fundamentadas em instrumentos de apoio à gestão costeira, procura prever cenários de evolução de linha de costa e testar medidas mitigadoras baseadas em intervenções de proteção, com o intuito de salvaguardar o território, preservar e melhorar o bem-estar das populações e assegurar o desenvolvimento económico local. No entanto, a vasta diversidade de atividades afeta à costa induz, frequentemente, conflitos de interesses conduzindo a estratégias de intervenção contraditórias. Este facto tem conduzido, desde há décadas, à degradação do sistema costeiro, em grande parte devido aos problemas relacionados com a erosão costeira, comprometendo, muitas vezes, trechos litorais extensos (Santos *et al.*, 2014).

A dinâmica que caracteriza estas zonas, aliada à permanência de fatores capazes de modificar e afetar a morfologia e o transporte sedimentar que nelas ocorre, dificulta o processo de proteção, previsão e gestão costeira. Além da complexidade e dificuldade de previsão do transporte de sedimentos, é também necessário considerar a variabilidade nas escalas temporais (diárias, mensais, anuais, seculares) dos processos envolvidos. Fatores de origem natural, relacionados com a dinâmica costeira (variações do nível relativo do mar, variabilidade sazonal e de agitação marítima) e fatores de índole antrópica (obras costeiras, portuárias, dragagens, alimentação artificial), são geralmente reconhecidos como agentes modeladores da linha de costa, responsáveis pela sua erosão a médio e longo prazo. Efeitos de curto prazo na escala temporal de erosão estão predominantemente associados a condições hidrodinâmicas extremas, como é o caso das tempestades marítimas.

No estudo dos processos costeiros e da dinâmica litoral, a análise da incidência de temporais, quer ao nível da avaliação das suas consequências (erosão costeira, variações morfológicas), quer na caracterização dos processos inerentes, tem sido um dos principais temas abordados, a nível mundial, quando o assunto é a gestão e defesa da orla costeira. Os elevados prejuízos, sociais e económicos, justificam o esforço no estudo das causas e da avaliação dos impactos destes eventos com elevado potencial destrutivo (Antunes, 2014). A costa portuguesa, exposta diretamente ao atlântico, em particular a costa Oeste, encontra-se permanentemente sujeita a tempestades severas que se formam no Atlântico Norte. Com efeito, os riscos associados à erosão, galgamento e inundação das zonas vulneráveis são uma constante preocupação, tornando-se imprescindível prever o impacto destes eventos e a resposta dos sistemas praia-duna para proceder a um planeamento, ordenamento e gestão eficientes da zona costeira.

Neste âmbito, a presente dissertação foca o estudo do fenómeno tempestade marítima e a erosão associada a este evento de curto-prazo, incidindo, fundamentalmente, em dois objetivos principais: a caracterização do regime de tempestades marítimas em frente ao trecho costeiro arenoso, com cerca de 30 km de extensão, compreendido entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis e a aplicação de

um modelo numérico de morfodinâmica de curto prazo, do tipo modelo de perfil (2DV- bidimensional no plano vertical), o modelo *Litprof* (pertencente ao *software LITPACK*) para análise do efeito destes eventos erosivos na morfologia do trecho em estudo e estudo comparativo desse mesmo efeito em eventos selecionados com mesma potência e diferente duração.

A caracterização do regime de tempestades no trecho litoral parte da análise de uma série cronológica de parâmetros de agitação marítima de *hindcast*, anteriormente validados, do período 1952-2010, obtidos para a costa ocidental portuguesa. A análise foca, essencialmente, a evolução da distribuição do número, duração e potência das tempestades ao longo dos 59 anos de estudo, numa perspetiva intra-anual, considerando a sazonalidade, e inter-anual. A caracterização do regime de tempestades marítimas é feita em função dos parâmetros duração e potência dos eventos de tempestade, e conclui com a seleção de seis eventos erosivos a simular através do modelo numérico, dois eventos por cada gama de potência a considerar (baixa, média e elevada), caracterizados por diferentes durações. Recorrendo ao modelo *Litprof*, baseado nos processos físicos costeiros responsáveis pelos principais mecanismos sedimentares que ocorrem em condições erosivas de curto prazo, associados a eventos de elevado nível energético, procede-se à simulação das tempestades selecionadas para prever o seu efeito nas praias a sul do rio Mondego, sob as condições hidrodinâmicas associadas. Pretende-se, portanto, determinar o peso do fator duração de tempestade no comportamento das praias do trecho litoral, quando expostas a dois eventos distintos (um com menor duração e outro com maior duração) com a mesma potência, e concluir, no caso de existirem diferenças, qual dos eventos provoca um maior efeito erosivo no perfil de praia.

1.1. Organização da dissertação

Para além do capítulo introdutório, respeitante à motivação, objetivos e metodologia, a presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos.

No segundo capítulo é introduzida a fundamentação teórica, nomeadamente os princípios teóricos básicos à compreensão desta dissertação. Este capítulo compreende três subcapítulos: o primeiro refere-se à hidrodinâmica costeira e aborda a agitação marítima, referindo os fenómenos de transformação de onda relevantes, e o nível de mar, expondo os conceitos de maré astronómica e sobrelevação de origem meteorológica; o segundo compreende o transporte sedimentar e inclui os processos associados ao transporte transversal ocorridos num perfil de praia e os conceitos de perfis de praia que advêm da sazonalidade, i.e., perfil de verão e perfil de inverno; no terceiro e último são apresentados e descritos, sucintamente, os modelos numéricos existentes de evolução da dinâmica costeira.

No terceiro capítulo é feita uma breve descrição e enquadramento da zona de estudo. Apresentam-se as principais intervenções antrópicas realizadas que conduziram à evolução do trecho litoral e alguma informação relativa ao clima de agitação marítimo que o caracteriza.

O quarto capítulo é referente à análise da série cronológica de parâmetros de agitação marítima de *hindcast* ao largo na costa da Figueira da Foz, obtida por Dodet *et al.* (2010), e posterior caracterização do regime de tempestades marítimas associado à zona de estudo, com incidência nas variáveis duração e potência dos eventos de tempestade. É, ainda, feita a seleção das tempestades a simular através do modelo numérico *Litprof*.

No quinto capítulo procede-se à aplicação do modelo numérico *Litprof* aos vários cenários de estudo, referentes às condições de hidrodinâmica associadas a cada tempestade selecionada. São introduzidos alguns tópicos de interesse relativos à topo-hidrografia e sedimentologia da zona de estudo, bem como o perfil representativo do trecho litoral em análise e uma breve explicação de como foi obtido. São, também, especificados os ficheiros de *input* e outros parâmetros relevantes para a proceder ao *setup* do modelo e simulação. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos para os diferentes cenários de simulação e é feita a sua análise, comparação e discussão.

Por último, no sexto capítulo, são expostas as principais conclusões do trabalho realizado e as considerações finais. Nesta fase, indicam-se, também, potenciais desenvolvimentos e recomendações para trabalhos futuros.

2. Fundamentação teórica

2.1. Introdução

Neste capítulo introduzem-se os conceitos teóricos fundamentais necessários à compreensão do trabalho desenvolvido. O capítulo encontra-se subdividido em três partes: a primeira parte refere-se à hidrodinâmica costeira e aborda a agitação marítima, referindo os fenómenos de transformação de onda relevantes, e o nível de mar, expondo os conceitos de maré astronómica e sobrelevação de origem meteorológica; a segunda parte compreende o transporte sedimentar e inclui os processos associados ao transporte transversal ocorridos num perfil de praia e os conceitos de perfis de praia que advêm da sazonalidade, i.e., perfil de verão e perfil de inverno; na terceira e última parte é feita uma breve descrição dos modelos numéricos existentes de evolução da dinâmica costeira.

Antes da introdução dos conceitos teóricos referidos, é importante esclarecer algumas designações, i.e. terminologia, da zona costeira. A zona costeira é a porção de território influenciada direta e indiretamente, em termos biofísicos, pelo mar (ondas, marés, ventos, biota ou salinidade) e que tem, para o lado de terra, a largura de 2 km medida a partir da linha da máxima preia-mar de águas vivas equinociais (LMPMAVE) e se estende, para o lado do mar, até ao limite das águas territoriais (12 milhas náuticas), incluindo o leito (Instituto da água, 2009). A linha de costa, cuja definição se apresenta variável na literatura, pode ser definida como a intersecção entre o nível de sobrelevação máximo ou o nível médio do mar (NMM) com o domínio terrestre, representando, em qualquer um dos casos, a fronteira entre a terra e o mar. A posição da base da duna corresponde ao ponto de transição entre a face da duna e a face da praia. A zona de rebentação é a faixa correspondente à diminuição de profundidade que provoca a rebentação das ondas e é a zona litoral responsável pelo movimento de avanço e recuo das águas imposto pela ondulação. A zona de espraiamento ou o espraiado compreende a face da praia e inclui o máximo 'run-up' e o 'run-down' da onda, ou seja, onde ocorre o espraio da onda. A face da praia corresponde, normalmente, à parte mais inclinada da praia e, por norma, inclui as partículas (grãos de sedimento) mais grosseiras na sua base.

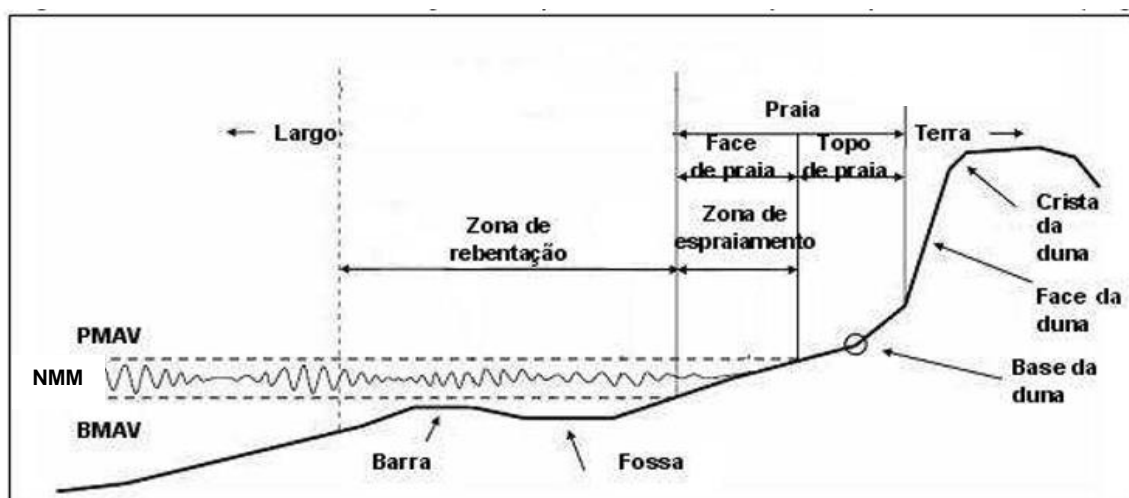


Figura 2.1 - Terminologia da zona de estudo na interface mar-terra. Fonte: Oliveira (2012). Nota: A linha de amplitude variável, compreendida entre as linhas de preia-mar e de baixa-mar representa a agitação marítima.

2.2. Hidrodinâmica costeira

A hidrodinâmica costeira considera todos os processos costeiros envolvidos na propagação, transformação e dissipação da onda, variações de níveis de água, marés e correntes.

2.2.1. Agitação marítima

Fenómenos de transformação da onda

A aproximação das ondas à costa está associada a alterações da morfologia de fundo e redução de profundidade que geram mudanças no perfil das ondas. Estas mudanças originam o aparecimento dos fenómenos físicos responsáveis pela transformação das ondas. De seguida, descrevem-se os fenómenos de interação entre as ondas e o fundo a considerar na modelação numérica das tempestades: Refração, empolamento, rebentação e dispersão direcional.

Refração

É o fenómeno associado à mudança de direção dos raios de onda que implica uma curvatura da frente de onda ou das cristas, por adaptação à morfologia do fundo. Ocorre quando as ondas se propagam obliquamente às batimétricas, de zonas de águas com profundidades elevadas para zonas de profundidades menores. Uma onda tende sempre a “orientar-se” para a região com menor velocidade de propagação (Holthuijsen, 2007). As cristas tentem à situação de paralelismo em relação às batimetrias e as ortogonais orientam-se perpendicularmente à batimetria.

O coeficiente que expressa a mudança da altura de onda devida à refração é definido pela relação:

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \quad (2.1)$$

Onde b_0 representa a distância entre dois raios de onda consecutivos ao largo (águas profundas) e b é esta mesma distância no ponto de interesse para o cálculo de K_r .

Na Figura 2.2 representa-se esquematicamente o fenómeno de refração.

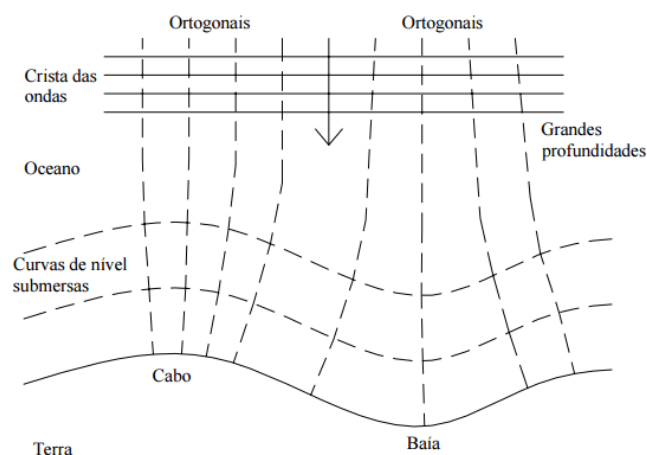


Figura 2.2 – Representação esquemática do fenómeno de refração. Fonte: Coelho (2005).

Empolamento

O empolamento é o aumento da altura de onda em resposta à redução da profundidade e à interação da onda com o fundo, quando uma onda se aproxima de uma praia com incidência perpendicular, atingindo a altura máxima no momento precedente à rebentação (Coelho, 2005). Dá-se, portanto, o aumento da altura de onda, a diminuição da celeridade com a profundidade e assume-se que o período da onda se mantém constante, traduzindo-se numa diminuição do comprimento de onda e, consecutivamente, num aumento progressivo da declividade que culmina na rebentação.

O coeficiente de empolamento, que traduz a alteração da altura de onda quando sujeita às condições referidas acima, expressa-se por:

$$K_s = \frac{H}{H_0} \quad (2.2)$$

Onde H representa a altura de onda e H_0 a altura de onda em águas profundas.

Rebentação

O fenómeno de rebentação é o processo hidrodinâmico dominante na zona de rebentação. De acordo com U.S. Army Corps of Engineers (2003), quando as ondas se aproximam da costa, a diminuição de profundidades provoca uma diminuição do seu comprimento de onda, L , e um aumento da altura de onda, H . A combinação destes dois efeitos gera um aumento da declividade da onda, $\delta = \frac{H}{L}$, que cresce progressivamente à medida que a profundidade diminui e, quando se atinge um certo valor de declividade limite, ocorre a rebentação. É um fenómeno caracterizado por elevada turbulência, dissipação de energia intensa e emulsão de ar.

O processo de rebentação pode ser classificado em quatro tipos de rebentação distintos, consoante o modo de rebentação das ondas no momento em que atingem o limite de declividade: Rebentação progressiva (*spilling breaker*), rebentação mergulhante (*plunging breaker*), rebentação colapsante (*collapsing breaker*) e rebentação de fundo (*surging breaker*). Em conformidade com o descrito por Hoefel (1998), os tipos de rebentação podem ser definidos da seguinte forma:

- Rebentação progressiva (*spilling breaker*) – A onda rebenta gradualmente e forma uma esteira de espuma que ocupa progressivamente a zona frontal, dissipando a sua energia através de uma faixa larga. Ocorre para fundos suaves e declividades elevadas.
- Rebentação mergulhante (*plunging breaker*) – A onda assume uma forma arqueada, com projecção de jacto que atinge a base da onda, dissipando a sua energia numa pequena porção de perfil através de um vórtice de elevada turbulência. Ocorre em praias com declive moderado a alto.
- Rebentação colapsante (*collapsing breaker*) – É o tipo de mais difícil identificação. Manifesta-se pelo prolongamento da rebentação, ao nível da superfície da onda, ao longo de uma elevada extensão. Ocorre em praias de pendente abrupta e é considerado um tipo intermédio entre o mergulhante e o de fundo.

- Rebentação de fundo (*surging breaker*) – Representa um espriamento sobre taludes muito ásperos. A crista da onda não chega verdadeiramente a rebentar, verificando-se apenas deformação da onda e interação com o refluxo das ondas anteriores, pelo que o que acontece na praia é uma variação do nível da água.

Segundo Battles (1974), o número de Iribaren ou “*surf similarity parameter*”, ξ , surge como um critério que permite identificar os tipos de rebentação enunciados. Representa-se por uma das seguintes expressões:

$$\xi_0 = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (2.3)$$

$$\xi_b = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad (2.4)$$

Onde, ξ representa o número de Iribarren, H_0 é a altura de onda ao largo e H_b é a altura de onda no ponto de rebentação, L_0 é o comprimento de onda ao largo dado por $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$, g é a aceleração da gravidade, T é o período de onda e β é o declive da praia.

Deste modo, dependendo do valor de ξ e, portanto, do declive da praia, da altura e do comprimento de onda, apresenta-se na tabela os valores sugeridos por Battles (1974) associados a cada tipo de rebentação.

Tabela 2.1 – Identificação dos tipos de rebentação de acordo com os valores do “*surf similarity parameter*” ou número de Iribarren ξ , (Battles, 1974).

Tipo de rebentação	Gama de ocorrências	
	ξ_0	ξ_b
De fundo ou colapsante	$\xi_0 > 3,3$	$\xi_0 > 2$
Mergulhante	$3,3 > \xi_0 > 0,5$	$2 > \xi_0 > 0,4$
Progressiva	$\xi_0 < 0,5$	$\xi_0 < 0,4$



a) Rebentação progressiva



b) Rebentação mergulhante



c) Rebentação de fundo



d) Rebentação colapsante

Figura 2.3 – Tipos de rebentação das ondas. Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers (2003).

Dispersão direcional

A dispersão direcional das ondas é um parâmetro de elevada importância na descrição de um estado de mar, e é frequentemente definida com recurso a um espectro direcional. O espectro direcional de ondas, denominado por $E(f, \theta)$, é uma função da frequência de onda, f , e direção de propagação, θ , e expressa-se por:

$$E(f, \theta) = E(f) D(f, \theta) \quad (2.2)$$

onde $E(f)$ é o espectro de frequência e $D(f, \theta) \geq 0$ no intervalo $[0; 2\pi]$ é a função de espalhamento direcional (Directional Spreading Function – DSF). Esta função descreve a distribuição direcional de energia de onda em estados de mar multidirecionais.

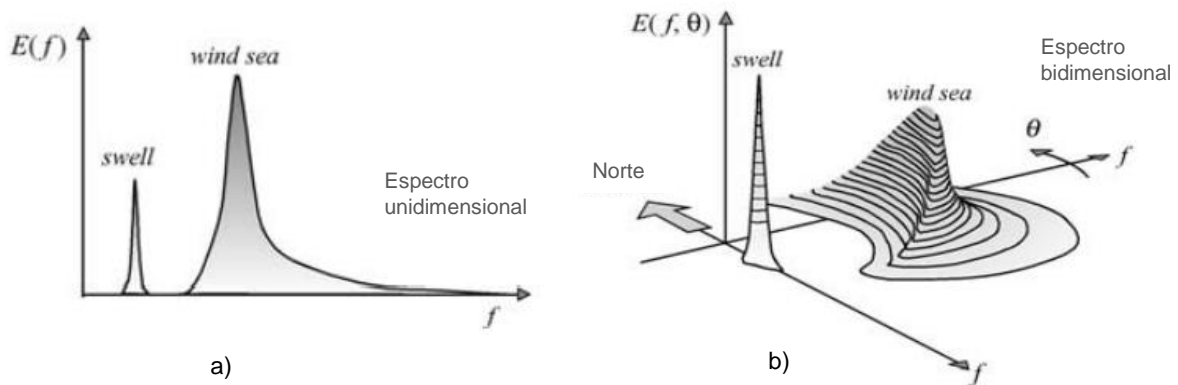


Figura 2.4 – a) Espectro de frequência $E(f)$ e b) espectro direcional de ondas $E(f, \theta)$. Adaptado de Holthuijsen (2007).

2.2.2. Nível do mar

Uma outra componente da hidrodinâmica costeira a ser descrita, a par da agitação marítima, é o nível de mar. O nível do mar define-se como a elevação da superfície da água do mar em relação a uma marca de referência. Com base nesta marca de referência, determina-se o Nível Médio do Mar (NMM), que é geralmente criado através de leituras de marégrafos em períodos suficientemente longos (igual ou superior a 19 anos – período da nutação, ciclo completo de revolução da linha dos nodos da órbita lunar, igual a 18,6 anos). O NMM é obtido após serem eliminadas as flutuações devidas às ondas e fatores meteorológicos (ex. sobrelevação de origem meteorológica). O nível médio de mar varia de local para local, bem como, ao longo do tempo (períodos, sazonais, inter-anuais, decadais, seculares). Em Portugal o NMM do marégrafo de Cascais, i.e., zero altimétrico de Portugal continental (NMM1938) corresponde à média das médias anuais do período compreendido entre 1882 e 1938, materializando o Datum Altimétrico Nacional de 1938.

Para além do NMM, mais utilizado na Cartografia Terrestre, existe outro sistema de referência vertical, designado Zero Hidrográfico (ZH) muito utilizado na Hidrografia. O ZH é a superfície em relação à qual se referem as sondas e linhas isobatimétricas das cartas náuticas, bem como as previsões de altura de maré. Em Portugal, o ZH situa-se abaixo do nível de maré astronómica mais baixa, pelo que as previsões de altura de maré são sempre positivas.

Na presente dissertação, o nível de mar deve considerar as condições extremas associadas a períodos de tempestades marítimas e, portanto, além da maré astronómica, deve ser tida em conta a sobrelevação de origem meteorológica.

Maré astronómica

A maré astronómica é a variação periódica do nível das águas, induzida pela atração de corpos celestes, concretamente, pela Lua e o Sol sobre a Terra. A influência da Lua na geração de marés é bastante superior à do sol, pois embora possua uma massa muito inferior, apresenta uma distância menor à Terra. As periodicidades da maré astronómica são rigorosamente conhecidas, pelo que esta é a única componente da maré possível de prever com exatidão. Matematicamente, a maré astronómica pode ser definida como o somatório de constituintes harmónicas sinusoidais.

Sobrelevação de origem meteorológica

A variação do nível do mar, em particular a sua subida, está dependente de vários processos. Entre eles estão incluídos, tipicamente: o efeito da queda da pressão atmosférica, o efeito do vento que “empurra” as águas para sotavento, o efeito de Coriolis que afeta as correntes marítimas criadas pelo vento, o efeito das ondas do mar (*wave-setup*) que pode aumentar significativamente o transporte de água em direção à praia e, por fim, o efeito da precipitação que aumenta os caudais efluentes dos grandes rios (Pinotes, 2014).

A sobrelevação de origem meteorológica (*storm surge*) é a elevação do nível do mar acima do que é imposto pela maré, causado por baixas pressões atmosféricas e ventos fortes prolongados, predominantemente associados a eventos extremos, i.e, tempestades marítimas. *Surge* sugere um movimento de água súbito que apenas dura num curto período temporal. Acontece que, sendo o nível de mar uma superfície livre de equilíbrio, responde às variações de pressão atmosférica, descendo o nível quando está sob pressões altas e subindo quando está sob pressões baixas. Quando sujeito a ventos prolongados, ocorre o transporte de massa em direção à costa, resultando frequentemente subida do nível do mar e empolamento, devidos à sobrelevação.

A quantificação da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica é feita com recurso à análise de registos de marégrafos, estabelecendo-se a diferença entre o nível da maré prevista (componente astronómica) e o nível efetivamente atingido ou observado.

Os danos causados numa faixa litoral, nestas condições, dependem fortemente da fase de maré em que o fenómeno ocorre, i.e., situação de maré viva ou maré morta em preia-mar ou baixa-mar. Em situações de maré morta coincidentes com baixa-mar, o impacto causado será bastante menor comparativamente a uma situação em que a maré viva de preia-mar em zonas de baixas profundidades coincida com uma sobrelevação meteorológica elevada, associada por exemplo a um grande temporal, podendo ser bastante destrutiva na zona costeira.

2.3. Transporte sedimentar

O transporte sedimentar na zona costeira é potenciado, essencialmente, pelas ondas e correntes, frequentemente associadas ao processo de rebentação da onda, que provocam fenómenos de erosão, acreção e fluxos de sedimentos ao longo da costa, consoante a componente de transporte, longitudinal ou transversal. O transporte perpendicular à praia (transporte transversal) está fundamentalmente associado à ação das ondas e correntes de retorno por elas geradas, e a variação do perfil de praia provocada é da escala de tempo de curto prazo, ou seja, de ordem de grandeza sazonal ou até de dias ou horas (como é o caso da duração de tempestades). O transporte paralelo à costa (transporte longitudinal) encontra-se associado às correntes longitudinais induzidas pela ação de ondas incidentes com determinada obliquidade relativamente à linha de costa e pelas correntes longitudinais geradas pela existência de um gradiente da altura de onda ao longo da costa. Este transporte traduz-se numa escala de tempo de médio e longo prazo, ou seja, de ordem de grandeza de anos, décadas ou séculos, associada a ações hidrodinâmicas (variações do nível médio de água do mar, agitação marítima) e intervenções antrópicas com efeitos na variação da linha de costa (LNEC, 2000).

Na presente dissertação, o objeto de estudo é o efeito erosivo provocado num perfil de praia quando sujeito a condições de temporal. A permanente exposição a agentes atuantes de elevada energia e a fraca coesão dos materiais que constituem as zonas costeiras, nomeadamente os perfis de praia, gera uma instabilidade morfológica. Ora, é legítimo afirmar que num perfil transversal de praia, localizado longe de estruturas ou embocaduras, esta instabilidade/variação morfológica, seja exclusivamente devida a uma variação do transporte transversal, verificada a curto prazo como referido, podendo ser desprezado, assim, o contributo do transporte sedimentar longitudinal.

O transporte sedimentar é, então, constituído por duas componentes: transporte por arrastamento e transporte em suspensão. Em conformidade com o descrito por Oliveira *et al.* (2004), os processos que contribuem para o transporte sedimentar transversal fora da zona de rebentação são: a assimetria vertical das ondas, o fluxo Lagrangiano (devido à assimetria horizontal das ondas) e a corrente de circulação junto à camada limite, devida à não uniformidade do escoamento (*streaming*). Além dos processos mencionados, na zona de rebentação surgem ainda os seguintes processos: a corrente de retorno junto ao fundo (*undertow*) e a deslocação da massa de água gerada pela rebentação junto à superfície (*surface roller*).

2.3.1. Processos de dinâmica sedimentar costeira

Assimetria da onda (vertical e horizontal)

Quando as ondas se propagam de águas profundas para águas de menores profundidades, o perfil das ondas é sujeito a alterações, ficando primeiramente distorcido e depois assimétrico, caracterizando-se por cristas mais curtas e pontiagudas e cavas mais longas (assimetria horizontal - *skewness*), e com frentes de onda inclinadas e íngremes à medida que se atinge a costa, relativamente à zona precedente que é suavemente inclinada (assimetria vertical - *asymmetry*). Este facto deve-se essencialmente à não linearidade dos processos de propagação em águas deste tipo (Dronkers, 2016).

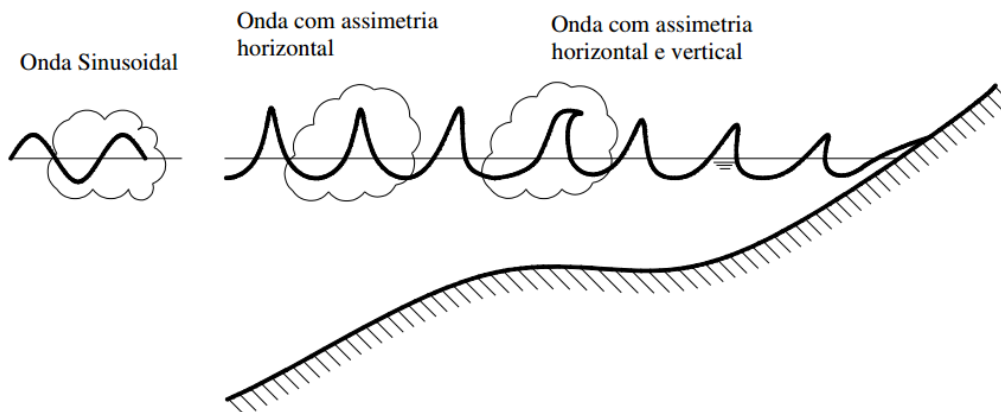


Figura 2.5 - Representação esquemática do movimento orbital das partículas na propagação em direção à costa e da alteração da forma das ondas (assimetria vertical e horizontal). Fonte: Abreu (2006).

Em ondas sinusoidais, onde a velocidade orbital assimétrica é igual a zero, não há transporte sedimentar induzido, já que o transporte negativo (na zona da cava) é igual ao transporte positivo (na zona da crista). No entanto, as ondas reais são não sinusoidais e, ao propagarem-se do largo para a costa, podem transportar os sedimentos numa direção preferencial, quer na de propagação, quer na oposta (Abreu, 2006). Acontece que também a velocidade e aceleração orbitais, em profundidade, são afetadas pelas modificações progressivamente não lineares, representando assimetrias que desempenham um papel preponderante no transporte sedimentar transversal, fora e dentro da zona de rebentação (Fortes *et al.*, 2011). A assimetria do movimento orbital das partículas de água está relacionada com velocidades e acelerações orbitais maiores na direção da costa, sob a frente da onda íngreme, em oposição à direção contrária, favorecendo o deslocamento do material do fundo marinho no sentido de propagação da onda, i.e., do largo para a costa e também a formação/migração de barras litorais.

Fluxo Lagrangiano (Lagrangian drift)

Em conformidade com o descrito por Rijn (2013), no caso de ondas de pequena amplitude, as partículas de um fluido em condições de perfeita irrotacionalidade (inviscosos) não devem ser descritas por trajetórias orbitais exatamente fechadas como estipulado nas teorias do movimento orbital linear, mas sim por trajetórias semi-abertas, em que no final de cada trajetória há uma ligeira movimentação das partículas no sentido de propagação da onda (Figura 2.6).

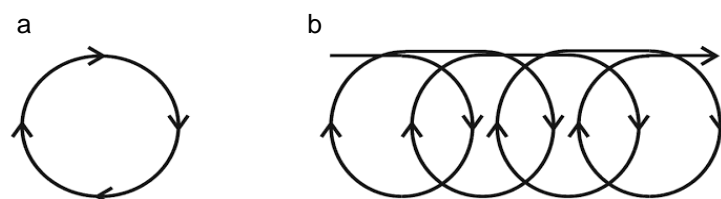


Figura 2.6– Trajetórias orbitais de propagação das partículas segundo: a) Teorias de movimento orbital linear; b) Teorias de movimento orbital não linear. Adaptado de Davidson-Arnott (2009).

Assim, as partículas estão sujeitas a uma velocidade lagrangiana de segunda ordem, designada de deriva de Stokes, na direção da propagação da onda, devido ao facto da velocidade orbital horizontal aumentar progressivamente com a distância ao fundo. Consequentemente, tem-se que uma partícula na crista da onda tem uma velocidade maior e de menor duração que a velocidade associada a uma partícula da cava (Rijn, 2013), favorecendo novamente o transporte do largo para a costa.

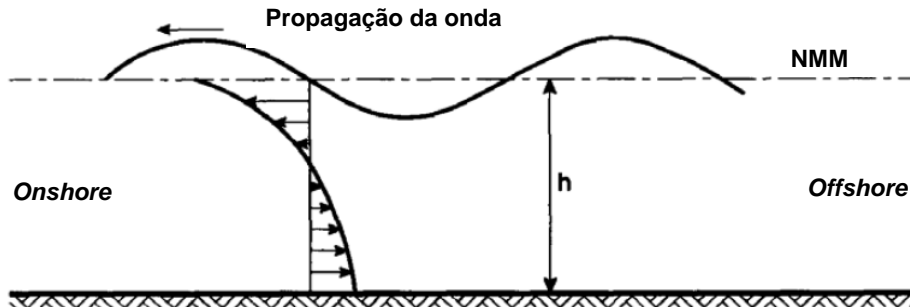


Figura 2.7 – Representação esquemática da distribuição da velocidade de deriva de acordo com Stokes. Adaptado de Rijn (2013).

Corrente de circulação junto à camada limite (*streaming*)

Streaming é a corrente gerada devido à não uniformidade do escoamento. De acordo com Rijn (2013), Longuet-Higgins (1953) demonstrou que, para fluidos reais com uma determinada viscosidade, ocorre uma transferência de movimento para a camada limite da onda, por meio de uma difusão viscosa, produzindo uma corrente Euleriana, para além da deriva de Stokes. Assumindo um fluxo de massa nulo, Longuet-Higgins determinou uma distribuição vertical da velocidade, representada na Figura 2.8. A corrente induzida na camada limite (*streaming*) é direcionada *onshore* e da ordem de $U_\delta^2/c10$, onde U_δ é a velocidade orbital de pico no limite da camada limite e c é a velocidade de propagação da onda.

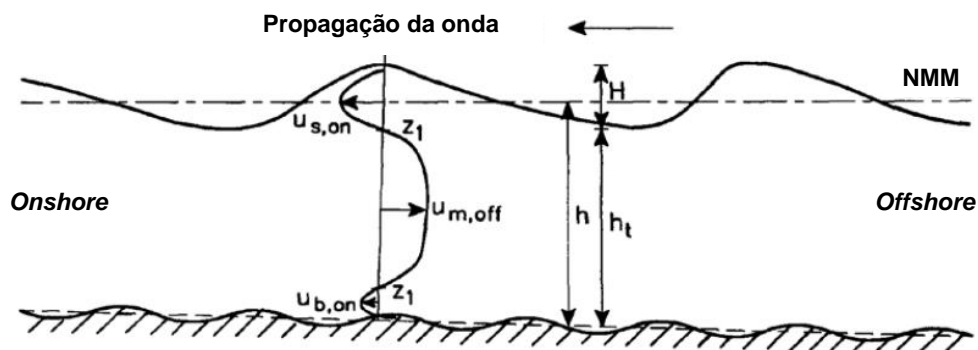


Figura 2.8 – Representação esquemática do perfil de velocidade de *streaming* de acordo com Longuet-Higgins (1953). Adaptado de Rijn (2013).

Corrente de retorno (*undertow*)

Na zona de rebentação o fluxo de energia das ondas e as tensões de radiação diminuem no sentido da costa, anulando-se junto à linha de costa. A variação do fluxo do momento é compensada por um gradiente de pressão e pelas tensões de atrito junto ao fundo associadas a uma corrente média. Nesta

zona, as ondas de superfície têm a capacidade de induzir correntes de elevada intensidade com um papel fundamental no transporte de sedimentos e na evolução morfológica de praias. O padrão complexo de correntes gerado na zona de rebentação é caracterizado por correntes longitudinais, correntes de retorno (*rip currents*) e correntes junto ao fundo dirigidas ao largo (*undertow*) (Rijn, 2013).

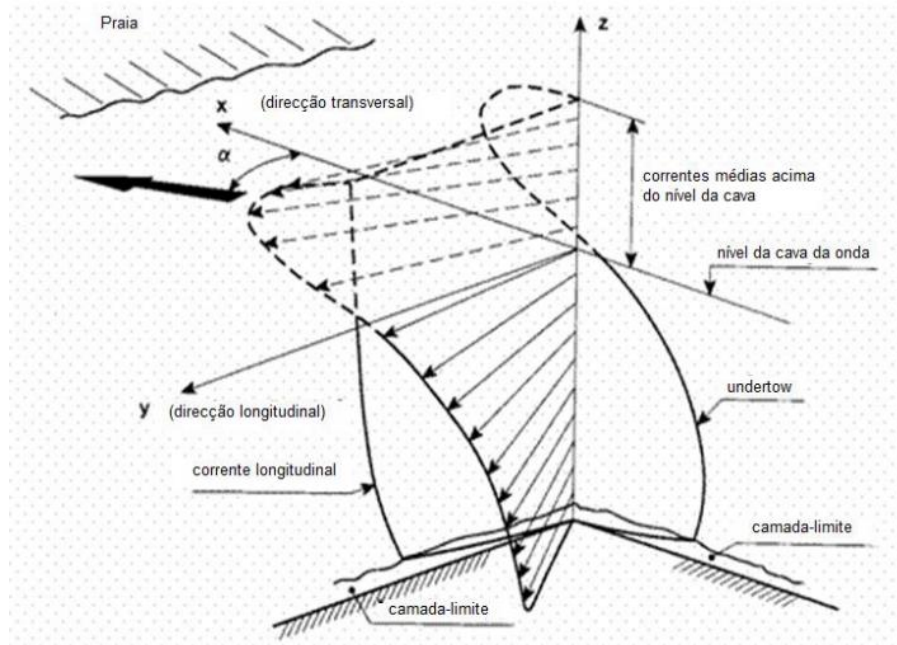


Figura 2.9 –Perfil tridimensional da corrente litoral na presença da corrente paralela à costa e de *undertow*. Adaptado de Rijn (2013).

O padrão de circulação no plano vertical na zona de rebentação resulta, então, de um balanço entre o transporte de massa acima do nível da cava da onda na direção do mar para a costa e o escoamento que se dá junto ao fundo, no sentido da costa para o mar (*undertow*) (LNEC, 2000).

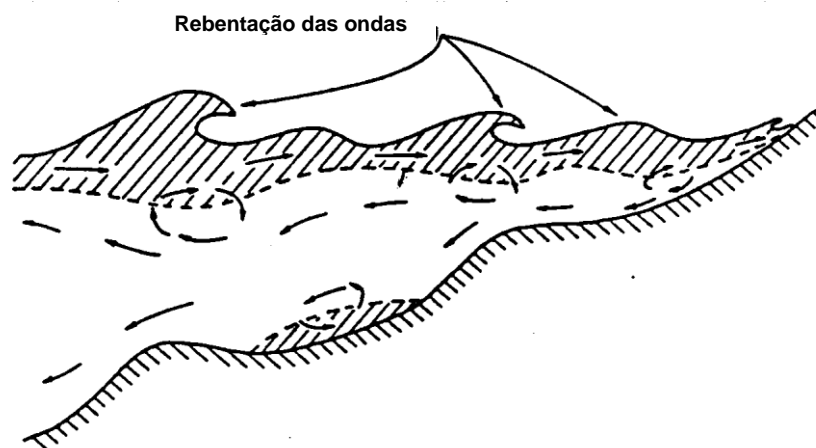


Figura 2.10 - Padrão de circulação vertical do escoamento. Fonte (LNEC, 2000).

As referidas correntes de fundo surgem, portanto, em resposta ao transporte sedimentar direcionado para a costa associado à rebentação das ondas, que ocorre na região próxima da superfície média da

água devido à assimetria orbital do movimento das ondas, no sentido de compensar e equilibrar o dito transporte.

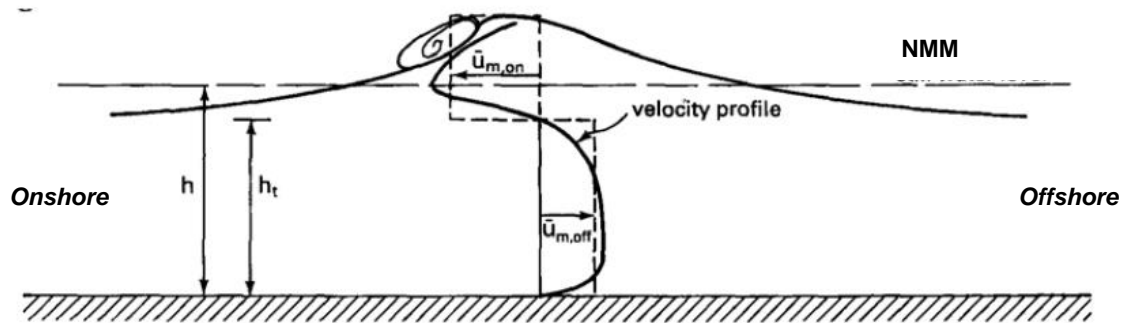


Figura 2.11 – Representação esquemática do perfil de velocidades das correntes de retorno na zona de rebentação. Adaptado de Rijn (2013).

Deslocação de massa à superfície gerada pela rebentação (surface roller)

Na zona de rebentação, as ondas sofrem uma transição rápida na sua forma, dando origem à formação de “rolos de superfície” (*surface rollers*), caracterizados por emulsões de ar e de espuma, importantes na morfodinâmica do perfil transversal da costa. A energia potencial perdida na rebentação é convertida em energia cinética e ocorre deslocação de massa à superfície, sendo que as partículas do fluido na parte superior da coluna de água se deslocam a uma velocidade muito próxima da velocidade de propagação da onda, bastante superior à velocidade na parte inferior da coluna de água, que corresponde à velocidade orbital do escoamento.

2.3.2. Perfil de praia

Como já foi referido, tanto a sazonalidade como as condições extremas associadas a tempestades originam, ainda que a curto prazo, variações contínuas no perfil de praia. Associados às condições sazonais surgem os conceitos de perfil de verão e perfil de inverno, classificados de acordo com as características topográficas do perfil. Por comparação à geometria adotada pelos perfis referidos, é possível também estabelecer uma geometria semelhante para os perfis de pré-tempestade e perfil de tempestade, sendo o perfil de pré-tempestade idêntico ao perfil de verão e o perfil de tempestade idêntico ao perfil de inverno.

O perfil de verão está associado a um tipo de agitação de reduzido nível energético, capaz de provocar a formação da berma e um declive mais acentuado do perfil junto à linha de costa, uma vez que o material é deslocado em direção à praia. O perfil é caracterizado por ter uma berma relativamente larga e ausência de barras litorais na zona submersa. Já o perfil de inverno apresenta uma berma mais estreita ou mesmo inexistente, presença de barras litorais na zona submersa e um declive mais atenuado, justificado pela deslocação e deposição da areia erodida em direção ao largo. Neste caso, o perfil está sujeito a uma maior agitação, maior nível energético, associado a elevada erosão na praia e maiores quantidades de material transportado.

Na Figura 2.12 apresentam-se esquematizados os perfis de verão/perfil pré-tempestade e perfil de inverno/perfil de tempestade.

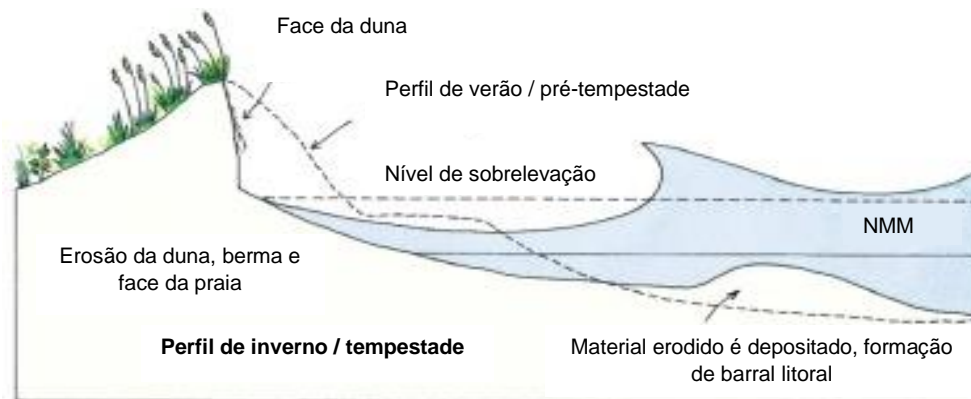


Figura 2.12 – Perfil de verão/pré-tempestade e perfil de inverno/tempestade e processos envolvidos.
Adaptado de Rogers e Nash (2003).

2.4. Modelos numéricos de dinâmica costeira

A modelação numérica da erosão praia-duna pode ser caracterizada em três tipos de modelos conceptuais: empíricos, semi-empíricos e determinísticos ou baseados em processos. De acordo com o descrito no estudo de Oliveira (2013), do primeiro tipo, modelos empíricos, são os modelos onde existe uma relação explícita entre a erosão da praia-duna e importantes parâmetros físicos, que não são quantificados de forma individual, mas sim através das consequências, ou seja, volume erodido e recuo da duna. Um exemplo deste tipo é o modelo *Duner*. Do segundo tipo, modelos semi-empíricos, são os modelos em que os principais processos físicos são individualmente descritos através de formulações matemáticas. O modelo *SBeach* é um exemplo deste tipo. Finalmente, do terceiro tipo são os modelos determinísticos, também vulgarmente designados por modelos baseados em processos, são os modelos em que os processos físicos são modelados individualmente. Os modelos *XBeach*, *Litprof* e *Delft3D* são deste tipo.

Na presente secção é feita uma breve descrição dos modelos *Duner*, *SBeach*, *Delft3d* e *Xbeach*. O modelo *Litprof*, modelo a utilizar no presente estudo, encontra-se descrito em pormenor no ANEXO A.

2.4.1. Modelo Duner

O modelo *Duner* é um modelo empírico baseado no método de convolução, ou método do integral de convolução, aplicado para estimar a resposta a uma excitação arbitrária no estudo de sistemas dinâmicos lineares. É um modelo unidimensional, na direção do perfil de praia perpendicular à linha de costa, em que se admite que a resposta do perfil quando submetido à variação das condições de hidrodinâmica (ondas e sobrelevação), é exponencial. O método permite obter o recuo da face, berma e duna da praia e o volume de erosão associado. Em Kriebel e Dean (1993) encontra-se descrita uma proposta de utilização do modelo para estimar a erosão de praias em condições de tempestade (Oliveira, 2013).

2.4.2. Modelo SBeach

O modelo *SBeach* (*Storm- induced- Beach- CHange*) é um modelo numérico semi-empírico bidimensional proposto por Larson e Kraus (1989), utilizado para calcular e prever a erosão de praias, bermas e dunas provocada pela ação das ondas e variação do nível de mar em situações de tempestade, podendo também simular a formação de barras e o movimento produzido pela rebentação de ondas (Larson e Kraus, 1989). Não foi desenvolvido para prever detalhes do movimento de sedimentos ou movimento de sedimentos sob ondas antes da rebentação (Larson *et al.*, 1990). O modelo foi originalmente desenvolvido através de uma larga série de dados de taxas de transporte sedimentar transversal e de alterações do perfil de praia observados em tanques largos.

2.4.3. Modelo Delft3D e Modelo XBeach

O modelo *XBeach* (*eXtreme BEACH behaviour*), segundo descreve Oliveira (2013), é um dos modelos mais promissores nesta área, e trata-se de um modelo bidimensional no plano horizontal (2DH) constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros de propagação de ondas infragravíticas e grupos de ondas gravíticas, hidrodinâmica, espraiamento, transporte sedimentar, evolução do fundo, e erosão, avalanche, galgamento, rotura e inundação de dunas. O objetivo do *XBeach* é modelar estes processos nos quatro regimes de impacto de tempestade marítima definidos por Sallanger (2000): regime de espraiamento, regime de colisão, regime de galgamento e regime de inundação.

O modelo *Delft3D*, desenvolvido pelos laboratórios *DELFT Hydraulics*, da *TU Delft, Delft University of Technology*, Holanda, é um modelo 2D/3D que realiza simulações de hidrodinâmica, de morfodinâmica, de transporte de sedimentos coesivos ou não coesivos, de ondas, de qualidade de água e de ecologia. O modelo de hidrodinâmica resolve a equação de Navier Stokes para escoamento de fluídos incompressíveis, ou seja, baseia-se na equação de conservação da massa, na equação da conservação da quantidade de movimento e na equação do transporte (advecção-difusão) de constituintes conservativos (Oliveira, 2013). As simulações 2D são feitas sobre uma malha regular quadrada, referenciada num sistema de coordenadas cartesianas ou esféricas. Nas simulações 3D o modelo permite utilizar dois tipos de malha vertical, cada uma referenciada no seu sistema de coordenadas, o sistema de coordenadas sigma (modelo- σ) e o sistema de coordenadas cartesianas (modelo-Z). Oliveira (2013) refere, ainda, que o modelo de morfodinâmica considera o transporte em suspensão, calculado através da equação de advecção-difusão tridimensional para sedimentos em suspensão, e o transporte de fundo (por arrastamento) de sedimentos e a atualização do fundo (da batimetria), calculado através da formulação de Van Rijn. O modelo pode ser aplicado em áreas marinhas, estuarinas e fluviais.

3. Zona de estudo

3.1. Introdução

No presente capítulo é feita uma breve descrição e enquadramento da zona de estudo. Apresentam-se, sucintamente, as principais intervenções antrópicas realizadas que conduziram à evolução do trecho litoral e alguma informação relativa ao clima de agitação marítimo que o caracteriza.

3.2. Enquadramento da zona de estudo

O trecho litoral analisado situa-se na zona centro-ocidental de Portugal Continental e é delimitado a norte pela embocadura do rio Mondego e a sul pela embocadura do rio Lis. A embocadura do rio Mondego é constituída por dois molhes (40°10'8"45 N e 8°52'42" W) e a embocadura do rio Lis apresenta dois esporões (39°52'50" N e 8°58'18" N). O trecho é aproximadamente retilíneo e possui cerca de 30 km de extensão e direção média de 19,6° N (Oliviera e Brito, 2015). É, maioritariamente, composto por um sistema arenoso contínuo de praia-duna, com interrupção no afloramento rochoso de Pedrogão. Ao longo do trecho, existem sete estruturas marítimas artificiais transversais (esporões) distribuídas, além das obras que delimitam o trecho já referidas: cinco esporões na praia de Gala-Cova; um esporão na Costa de Lavos; um esporão em Leirosa; Pedrogão não possui nenhuma estrutura deste tipo.

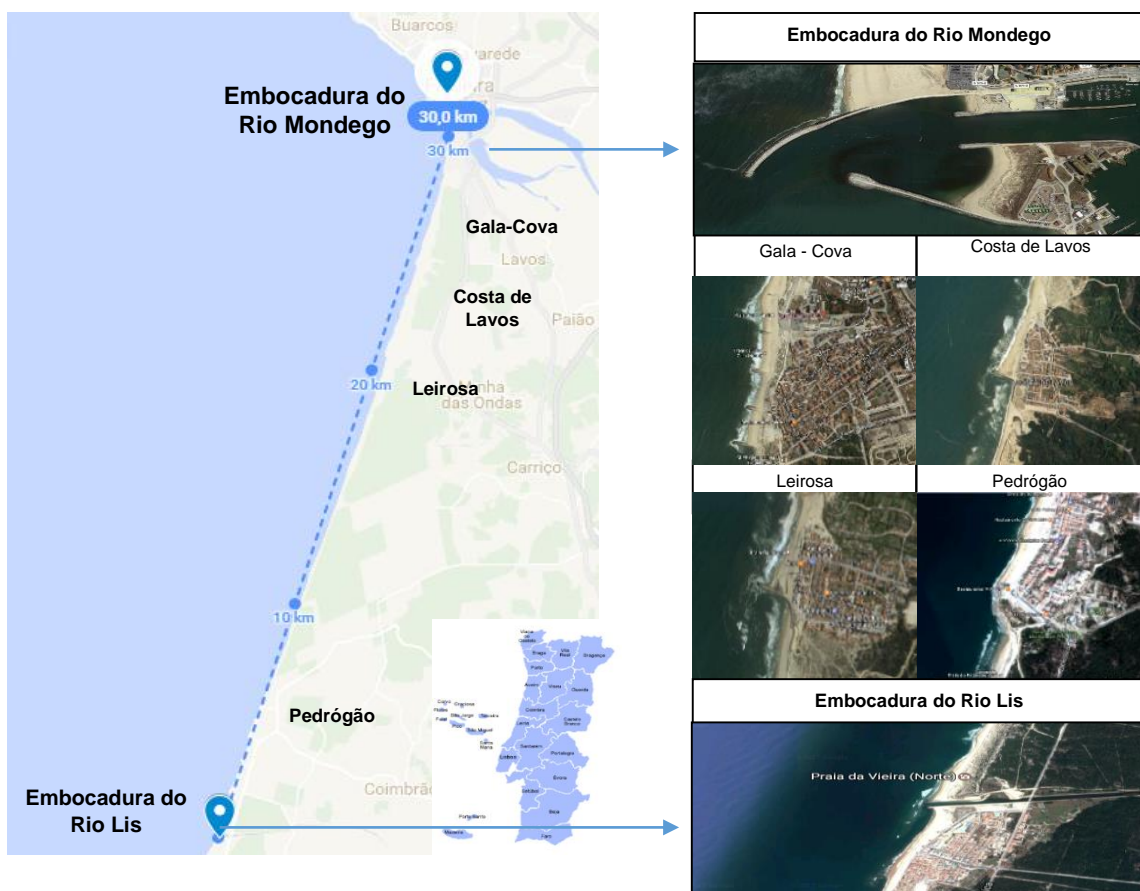


Figura 3.1 - Localização do trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Rio Lis, principais núcleos urbanos e estruturas transversais constituintes. Adaptado de Google Maps, Abril de 2017.

O trecho em análise é caracterizado por estar permanentemente sujeito a um regime de agitação marítima que conduz a um intenso transporte litoral de sedimentos. Desde o início do século passado que se registam intervenções antrópicas de diversos tipos no trecho de estudo (Simões, 1978); (Simões, 1979); (Dias, 1994); (Cunha, 1997); (Vicente, 1998); (Instituto da Água, 1999), com intuito de contrariar carências e acreções sedimentares indesejadas e modelar o perfil de costa. Destacam-se as seguintes intervenções realizadas, descritas em Oliveira e Brito (2015): construção dos molhes da embocadura do rio Mondego (1961-1965); a extração de areia na praia da figueira da foz (1973-1996); as intervenções de regularização fluvial, para a defesa contra as cheias, para regadio e para produção hidroelétrica; as intervenções de regularização portuária para melhorar a utilização do porto; as dragagens da embocadura para acesso ao porto, feitas regularmente; a alimentação artificial pontual 50 m a sul do enraizamento do molhe sul e 2,25 m acima do nível médio do mar (NMM), entre 1973-1976; a construção da defesa longitudinal aderente da Gala-Cova (1975); a construção do campo de cinco esporões da Gala-Cova (1978-1979); a construção do esporão da Leirosa (1978); a construção do esporão da Costa de Lavos (1979); e o prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego (2008-2010).



a)



b)

Figura 3.2 – Porto da Figueira da Foz a) antes (Fonte: Loureiro (1905)) e b) depois da construção dos molhes na embocadura do Rio Mondego (1961-1965) (Fonte: Google Maps, Abril de 2017).

Segundo os autores Cunha e Dinis (1998), a orla costeira da Figueira da Foz está sujeita a uma agitação marítima em que a ondulação tem altura mais frequente da ordem de 1 a 2 m (41,9%) e rumo predominante WNW, com 44,7% das ocorrências no verão (Junho, Julho, Agosto e Setembro), 28,9% nos períodos de transição (Abril, Maio, Outubro e Novembro) e 22,6% no inverno (Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março).

De acordo com o estudo de Oliveira (2016), onde se efetuou a caracterização da agitação marítima do trecho litoral em análise, com base na série temporal (1952-2010), que é também base de estudo nesta dissertação, concluiu-se que a zona de estudo está sujeita a um regime geral de agitação marítima com características médias Hs 2,15 m, Dir 299,5°N e Tp 11,6 s, Hs mais frequente de 1,00-1,50 m associada a Dir 300-310°N e Tp 8-10 s, e Hs máximo de 13,13 m.

Relativamente às condições de agitação marítima da costa ocidental portuguesa, acrescenta-se o conhecido facto de se encontrar frequentemente sob ação de temporais, importantes agentes de erosão costeira, com ondas de elevada energia e período que rebentam no litoral. A dinâmica costeira é essencialmente condicionada pela circulação atmosférica a oeste, no Atlântico. As condições de temporal na costa oeste estão predominantemente associadas a ondulação de NW, devido ao anticiclone próximo dos Açores entre os arquipélagos dos Açores e da Madeira e pela localização das depressões sobre as ilhas Britânicas, com zonas de geração no bordo NE do Anticiclone dos Açores (Costa *et al.*, 2001). Conforme descrito pelo autor, estas ondulações possuem alturas significativas máximas que variam entre 5 e 7 m, podendo atingir os 8 m, durante menos de 2 dias, mas que por vezes persistem por mais de 5 dias. A não tão frequente ondulação de W e SW surge em especial na parte sul da costa oeste, e pode ser caracterizada pela localização do Anticiclone dos Açores a cerca de 30°N e centros de baixas pressões a Oeste da Ilhas Britânicas, ou com o enfraquecimento do Anticiclone dos Açores e depressões localizadas a Sul da Islândia. À latitude da Península Ibérica, a circulação está associada a focos depressionários e à passagem das respetivas superfícies frontais. Nestas condições os temporais apresentam alturas significativas máximas que variam entre 5 e 8 m, persistindo raramente por mais de 2 dias (Costa *et al.*, 2001).

O autor Cunha (1999) acrescenta ainda que, temporais com ondas de altura máxima significativa de 9,5-10,0 m possuem um período de retorno de 5 anos, que para um período de retorno de 50 anos estima-se uma altura máxima significativa de 11,5-13,6 m e que as situações de tempestade resultantes de baixas pressões associadas a perturbações atmosféricas são, frequentemente acompanhadas de significativa sobrelevação meteorológica do nível do mar, alcançando maior extensão da costa e provocando maior impacto na zona incidente. Aspeto ainda mais relevante caso coincida com a preia-mar de marés vivas.

No estudo de Cunha (1999) caracteriza-se o regime de marés presente na Figueira da Foz. O sistema arenoso em estudo possui um regime mesomareal de tipo semi-diurno e com uma desigualdade ligeira entre as duas marés diárias. Com recurso à tabela de marés previstas para 1996 no Porto da Figueira da Foz, as marés apresentaram amplitude média de 2,2 m e uma moda de 2,4 m. A amplitude mínima atingiu 0,9 m e a máxima os 3,6 m, correspondendo o NMM (Nível Médio de Mar) aos +2 m ZH (Zero Hidrográfico).

Apresentam-se de seguida algumas fotografias do trecho arenoso em estudo, em Janeiro de 2017, na zona compreendida entre Gala-Cova e Leirosa, sob a ação de um temporal durante o Inverno, assim como danos causados em estruturas de proteção transversais e outras estruturas de praia.

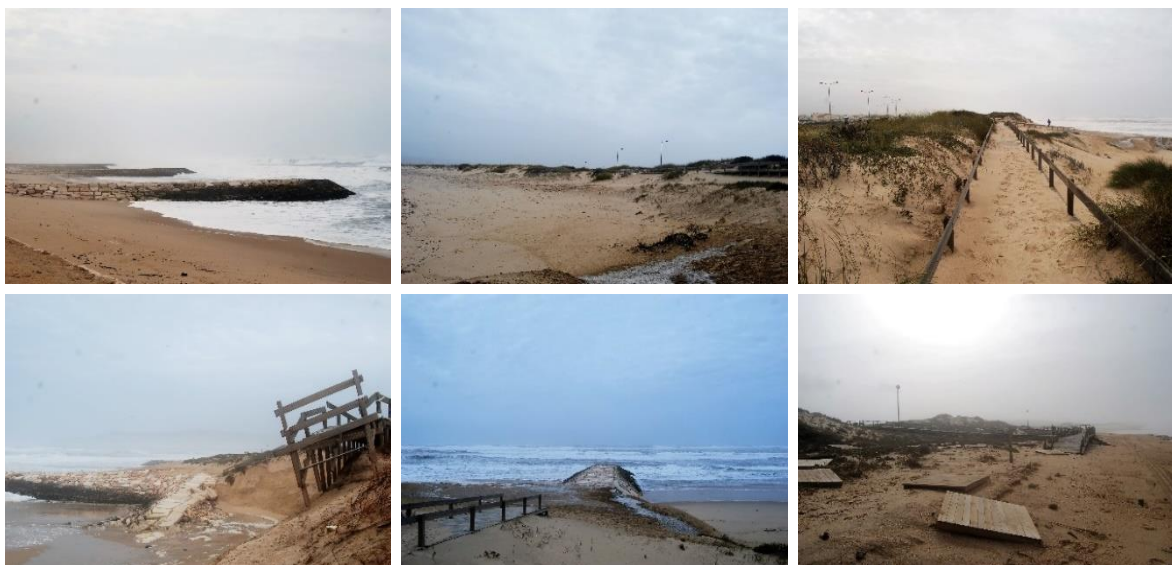


Figura 3.3 – Fotografias da zona de estudo, praias entre Gala-Cova e Leirosa, sujeitas a condições de temporal. Janeiro de 2017.

4. Tempestades marítimas na zona de estudo

4.1. Introdução

No presente capítulo é feita a análise de uma série cronológica de parâmetros de agitação marítima de *hindcast* ao largo na costa da Figueira da Foz, obtida por Dodet *et al.* (2010) e posterior caracterização do regime de tempestades marítimas associado à zona de estudo.

No estudo de Oliveira (2016), encontra-se descrita a metodologia aplicada para a obtenção da referida série temporal. Segundo o autor, Dodet *et al.* (2010) aplicou um modelo espectral de geração de propagação de ondas marítimas ao nordeste do Oceano Atlântico, com uma resolução espacial de 0.5° e um passo temporal de 6 horas, resultando a série cronológica constituída por três parâmetros: altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção média de incidência (Dir) no ponto de coordenadas geográficas $40^\circ 00' N$ e $9^\circ 00' W$, a -37 m ZH, centrado em frente ao trecho de estudo (Figura 4.1). O modelo foi validado pelos autores com observações das boias-ondógrafo de Bilbao-Vizcaya, Cabo Sillero, Leixões, Figueira da Foz, Sines e da Ocean Weather Station “Juliett”. A serie cronológica corresponde a um período de 59 anos, correspondentes ao período de 1952 a 2010, contemplando um total de 86200 valores dos referidos parâmetros de onda.

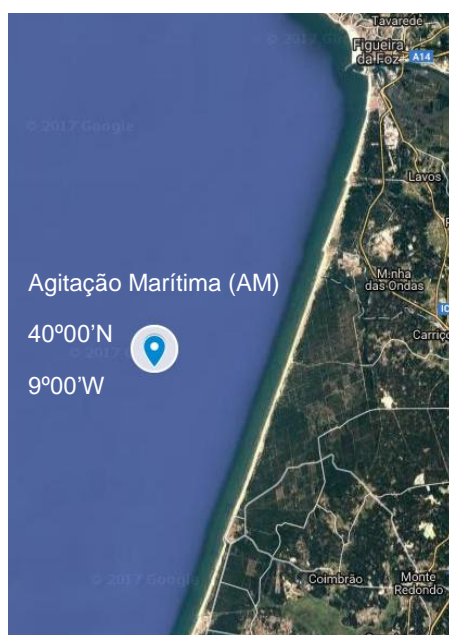


Figura 4.1 - Localização do ponto de obtenção da série de agitação marítima (AM) em frente ao trecho litoral de estudo, que se estende entre as embocaduras do Rio Mondego e Rio Lis. Fonte: Google Maps, Abril de 2017.

Antes de proceder à análise da série cronológica e caracterização do regime de tempestades marítimas, é apresentado o procedimento de identificação das tempestades marítimas, bem como o método utilizado no cálculo das suas potências relativas. De seguida, é feita uma análise estatística dos parâmetros: número de tempestades, duração e potência ao longo do período de estudo, com principal foco na sua distribuição anual e mensal. A caracterização do regime de tempestades marítimas, propriamente dita, incide sobre as varáveis duração e potência de onda dos eventos de

tempestade identificados. Por fim, são apresentadas as tempestades selecionadas para simulação e modelação numérica através do *software* LITPACK, nomeadamente através do modelo *Litprof*.

4.2. Identificação dos eventos de tempestade marítima

A identificação de condições extremas de agitação marítima normalmente associadas a eventos de tempestade é fundamental para o projeto e dimensionamento de estruturas e instalações costeiras. Em termos gerais, uma tempestade costeira é considerada como um conjunto de condições meteorológicas anómalas que tem o potencial de provocar danos na zona da costa atuante e envolvente (Ciavola *et al.*, 2014). Todavia, a definição de tempestades pode ser feita com base em diversos aspetos, sejam danos provocados, velocidade do vento, alturas de onda associadas entre outros e, portanto, estabelecer um critério de definição que permita individualizar e identificar uma tempestade é sempre um tema bastante complexo, que é alvo de permanente discussão. Outro fator relevante para a definição de tempestade é a identificação do local onde ocorre e as condições de agitação marítima associadas, uma vez que podem ser determinantes para o critério selecionado.

Na presente dissertação, a identificação das referidas tempestades é feita com recurso ao método designado por “*Peak-Over-Threshold Method*” ou método de pico acima do limiar. É um método muito utilizado para a definição de eventos individuais de tempestade em função de um certo valor “limite” de altura significativa (“*height threshold*”) e de uma duração mínima de tempestade (Ciavola *et al.*, 2014). Conforme descrito por Costa *et al.* (2001), e tendo por base a análise da série temporal de agitação marítima ao largo, com dados obtidos de 6 em 6 horas, durante 59 anos, correspondentes ao período em estudo, são estipulados valores limites de altura significativa que indicam situações de períodos de temporal. Na costa Oeste portuguesa os períodos de temporal ocorrem quando $H_s > 4,5 m$, e na costa Sul surgem quando se verifica o critério $H_s > 3,5 m$. Ora, para o trecho em análise, é válido o primeiro caso.

De forma a completar o critério supracitado e tendo por base o estudo de Costa *et al.* (2001), estipula-se, para o presente caso, a duração necessária para que se considere um evento de tempestade marítima. Sugere-se que o mesmo se inicie na presença de uma sequência de dados de 6h em 6h, com valores de altura significativa superior a 4,5 m e de duração superior a 24 h, i.e., 4 valores consecutivos com $H_s > 4,5 m$. Por outro lado, a tempestade termina na ausência de dados com valores de $H_s > 4,5 m$ durante 2 dias, ou seja, 48 horas ou 8 valores, após o último valor de $H_s > 4,5 m$. Assume-se, assim, que 2 dias é um período de tempo suficiente para permitir individualizar os eventos de tempestade e admitir a sua independência. Este pressuposto teve por base o estudo realizado por Costa *et al.* (2001), onde se verificou que “a duração dos temporais parece independente da localização, em qualquer das estações são mais de 75% as observações de temporais que persistem por menos de 2 dias.”

Da aplicação do critério enunciado à serie temporal de agitação marítima, obtiveram-se 328 eventos de tempestade marítima, cujas durações mínima e máxima se encontram sintetizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Durações mínima e máxima calculadas para os eventos identificados durante o período de 1952 a 2010 no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras dos Rios Mondego e Lis, por aplicação do critério de definição de tempestades *POT* (*Peak-Over-Threshold Method*).

	Duração (h)	Duração (dias)
Mínima	24	1
Máxima	378	16

Note-se, ainda, um outro critério também aplicado para definição de tempestades, utilizado quando a altura significativa corresponde ao dobro da altura significativa média para esse local. Para a zona de estudo, Oliveira (2016) concluiu que a altura significativa média da onda, H_s média, é 2.15 m e, portanto, verificam-se condições de tempestade quando $H_s > 4,30$ m, valor aproximadamente igual ao obtido pelo critério utilizado nesta dissertação.

4.3. Estimativa da potência de onda dos eventos de tempestade

A estimativa da potência de onda dos eventos de tempestade identificados no período 1952 a 2010, de acordo com o critério apresentado, é também objeto de estudo, revestindo-se de grande importância na caracterização das tempestades e na avaliação do seu grau de severidade.

De acordo com Dolan e Davis (1992) e, após a aplicação do método de *POT*, a energia total contida num evento de tempestade, também designada por potência relativa, expressa-se em $m^2 \cdot h$ e pode ser determinada com base na equação:

$$E = \int_{t1}^{t2} H_s^2 dt \quad (4.1)$$

onde H_s é a altura significativa da onda e respeita a condição $H_{sig} > H_{thresh}$. H_{thresh} é a altura limite da tempestade, definida como 4,5 m para o caso de estudo. $t1$ e $t2$ são os tempos de início e fim da tempestade, respetivamente.

De ora em diante, referir-se-á sempre à energia total contida num evento de tempestade como potência relativa ou simplesmente potência afeta a esse mesmo evento. Portanto, a potência relativa de um determinado evento é a soma das potências relativas de onda estimadas para cada período equivalente a 6 horas (intervalo entre valores de dados consecutivos), correspondente ao resultado do produto do quadrado da altura significativa registada pela duração (6 horas).

O esquema seguinte simplifica o conceito acima mencionado e exemplifica o cálculo da potência de onda para a altura significativa mínima a considerar, i.e., 4,5 m. No primeiro cenário apresenta-se a potência de onda para a atuação dessa onda durante 6 horas (apenas um valor de dados), e, de seguida, para um cenário que corresponde à situação limite de ocorrência de um evento de tempestade, ou seja, para uma duração de 24 horas (4 valores de dados consecutivos).

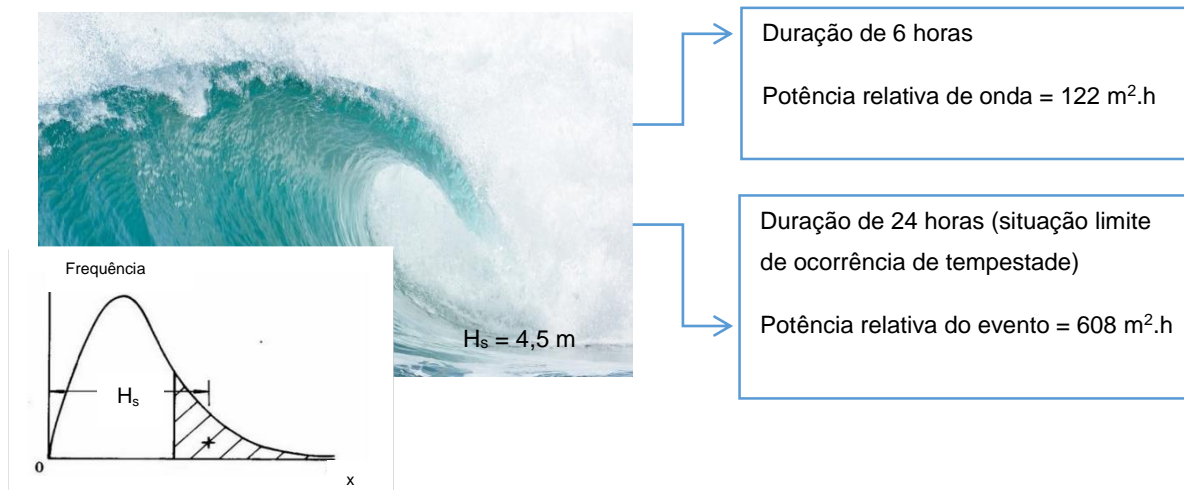


Figura 4.2 - Esquema exemplificativo do cálculo da potência de onda para as situações de atuação de ondas com $H_s = 4,5$ m durante 6h (valor de dados único) e 24 h (situação limite de ocorrência de tempestade).

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores mínimos e máximos de potência relativa calculada para os eventos de tempestade marítima.

Tabela 4.2 – Potências mínima e máxima calculadas para os eventos de tempestade identificados durante o período de 1952 a 2010 no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras dos Rios Mondego e Lis, por aplicação do método de *POT (Peak-Over-Threshold Method)*.

	Potência Relativa ($m^2.h$)
Mínima	646
Máxima	12700

4.4. Análise da série cronológica de agitação marítima e caracterização do regime de tempestades marítimas

4.4.1. Análise da série cronológica de agitação marítima

A análise da série cronológica de agitação marítima (1952-2010) no trecho litoral, com vista à posterior caracterização do regime de tempestades associado recai, essencialmente, nos parâmetros número de eventos, duração e potência, e na evolução distributiva ao longo dos 59 anos de estudo, primeiramente inter-anual e, posteriormente intra-anual, considerando a sazonalidade.

Número de eventos de tempestade

Distribuição inter-anual

Na Figura 4.3, apresenta-se o gráfico que mostra o número de tempestades identificadas em cada ano durante os 59 anos de estudo.

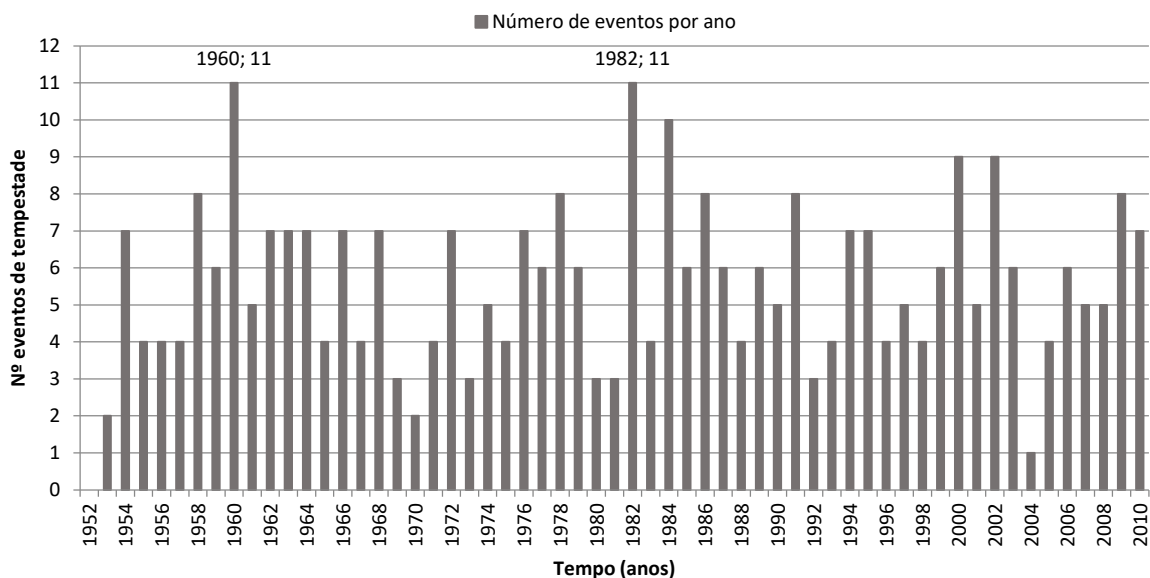


Figura 4.3 - Distribuição do número de eventos de tempestade inter-anual, no período de 1952 a 2010 no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

Da análise do gráfico da Figura 4.3 realça-se uma elevada irregularidade inter-anual registada ao longo dos 59 anos em análise. Observa-se que 11 foi o número máximo de eventos observado ao longo de um ano, nos anos de 1960 e 1982, e que apenas no ano de 1952 não foram registados quaisquer eventos, verificando-se a sua ocorrência nos 58 anos restantes. A Figura 4.4 mostra a frequência relativa do número de eventos de tempestade por ano, compreendidos entre [0 e 11].

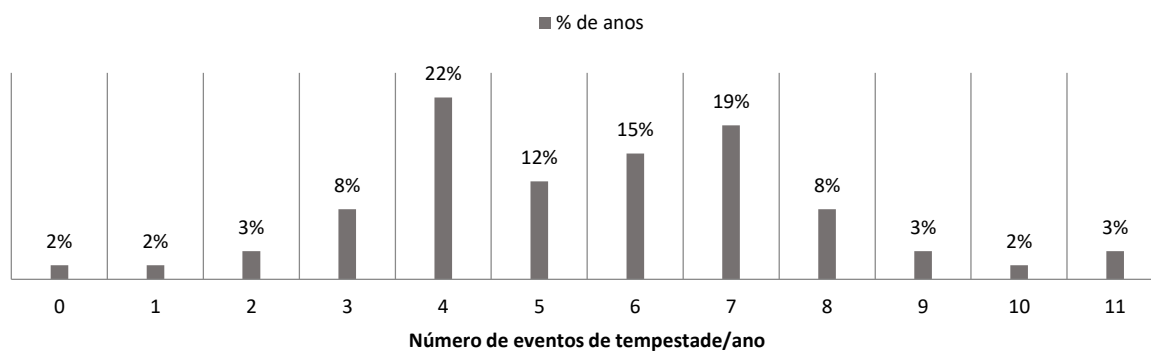


Figura 4.4 – Distribuição da percentagem de anos em que ocorreu um determinado número de eventos por ano, compreendidos entre [0 e 11], no período de 1952 a 2010 no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

É possível observar que o histograma se aproxima de uma “distribuição normal”. Durante o período de estudo, o número de eventos por ano mais frequente encontra-se entre 4 e 7, representando 68% do total de anos em estudo (40/59 anos), sendo que 4 e 7 são os números mais recorrentes.

Distribuição intra-anual

No âmbito da distribuição intra-anual, procedeu-se à discretização do número de eventos pelos meses do ano, como mostra o gráfico da Figura 4.5, de forma a poder avaliar com maior rigor a sua distribuição mensal.

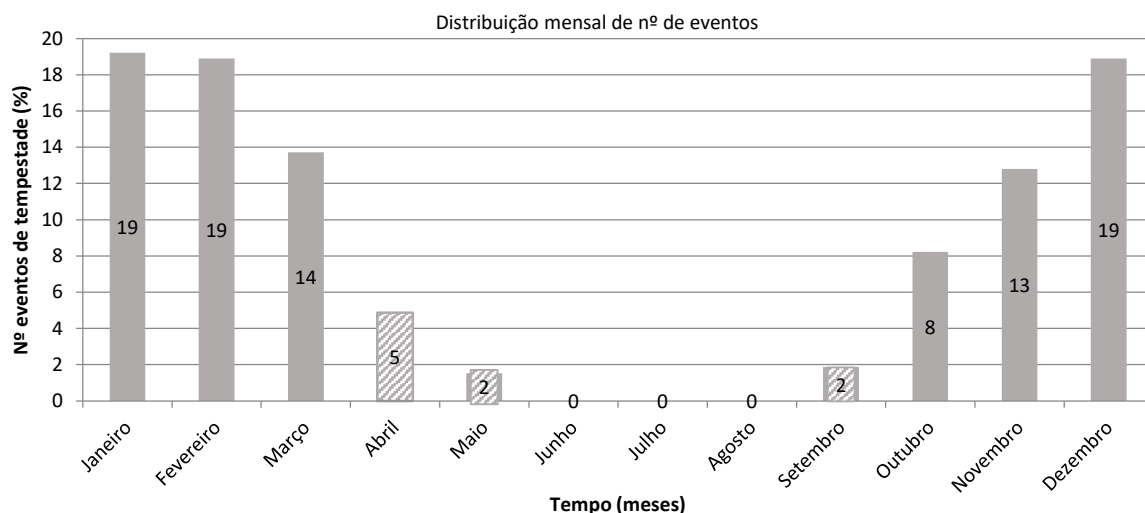


Figura 4.5 – Discretização do número de eventos pelos meses do ano, durante o período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

Da análise do gráfico constata-se que a distribuição de eventos intra-anual na série temporal de *hindcast* é caracterizada por uma variabilidade, visivelmente dependente da sazonalidade associada às estações marítimas (Inverno e Verão marítimos¹).

Verifica-se que os meses de Janeiro (19%), Fevereiro (19%) e Dezembro (19%) revelam maior propensão para ocorrência de eventos de tempestade marítima, como esperado. Março e Novembro também são meses onde a ocorrência de eventos é frequente, seguindo-se os meses de Outubro, Abril e, por fim, Maio e Setembro com frequência de ocorrências bastante reduzida. De referir que, durante os 59 anos de estudo, nunca se verificou a ocorrência deste tipo de eventos nos meses de Junho, Julho e Agosto. Esta última afirmação reforça o facto de se revelar uma manifesta interdependência entre eventos de tempestade marítima e sazonalidade. De facto, durante o Verão marítimo são praticamente inexistentes os eventos de tempestade e, nos meses de Abril, Maio e Setembro ocorrem em reduzido número. Pelo contrário, na estação de Inverno marítimo é quase sempre verificada a ocorrência de um largo número de tempestades, em particular nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro.

Ainda no domínio da análise mensal da distribuição do número de eventos, o gráfico da Figura 4.6 vem introduzir informação adicional relativa à distribuição mensal do número de eventos médio, máximo e mínimo determinado ao longo da série temporal em análise.

¹ Verão marítimo é a estação marítima que integra os meses de Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro. Inverno marítimo inclui os meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Outubro, Novembro e Dezembro

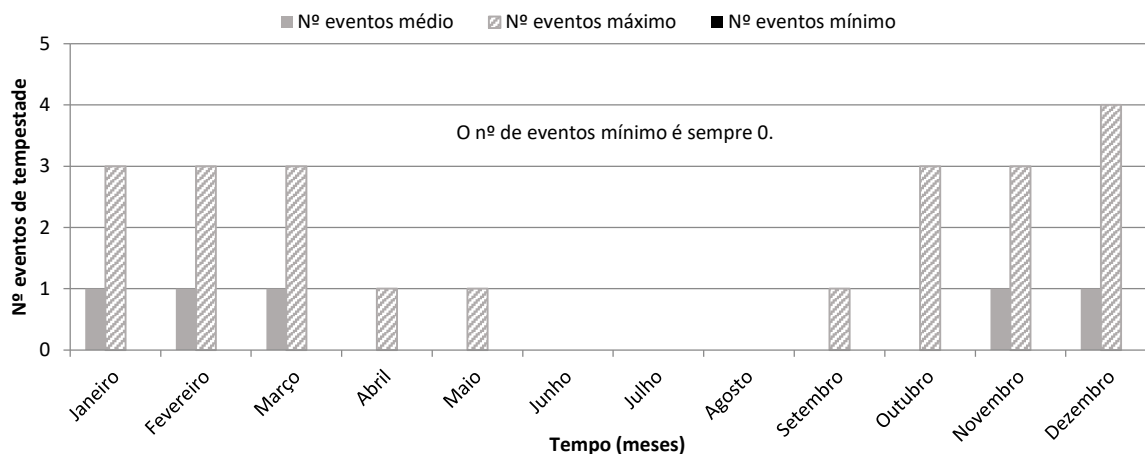


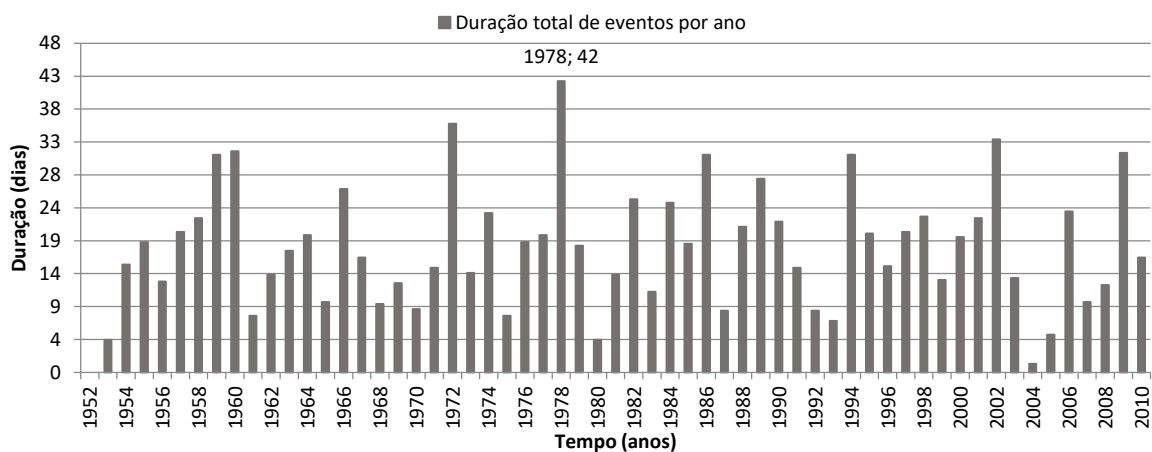
Figura 4.6 - Distribuição mensal do número de eventos médio, máximo e mínimo, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

Em conformidade com o descrito acima, o gráfico evidencia novamente a variabilidade na distribuição mensal de eventos associada à sazonalidade. Verifica-se que o número mínimo de eventos, em qualquer um dos meses, é sempre 0 e que o número máximo de eventos ocorreu em dezembro (4 eventos), sendo que nos restantes meses de Inverno marítimo surgiram no máximo 3 eventos de tempestade. Os meses de Verão marítimo apresentam, como expectável, um número máximo de eventos inferior, 1 evento. Relativamente ao número médio de eventos registado, varia entre 0 e 1, 0 nos meses de verão e outubro, e 1 nos restantes meses de Inverno.

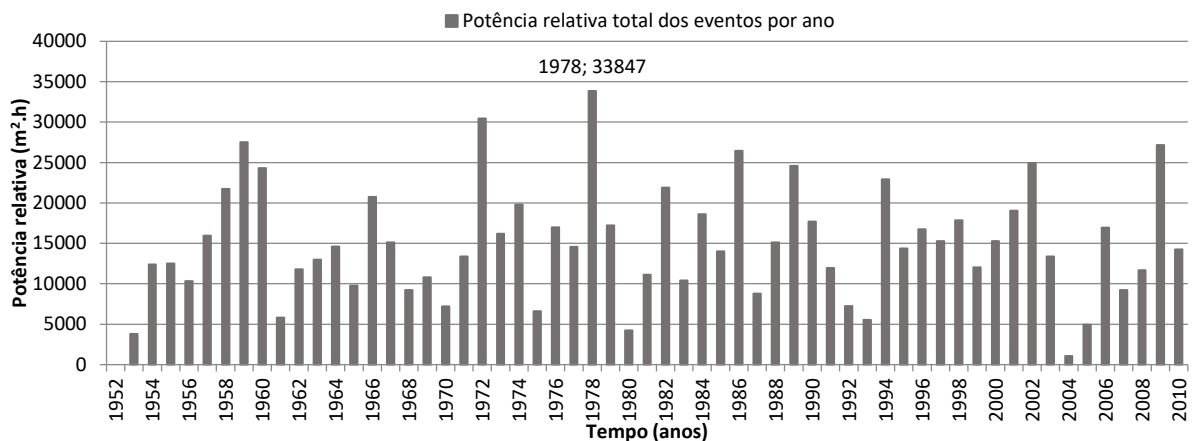
Duração e Potência dos eventos de tempestade

Distribuição inter-anual

Nos gráficos da Figura 4.7 apresentam-se a distribuição inter-anual das variáveis duração (em dias) e potência relativa (em m².h) ao longo dos 59 anos da série temporal de estudo.



a)



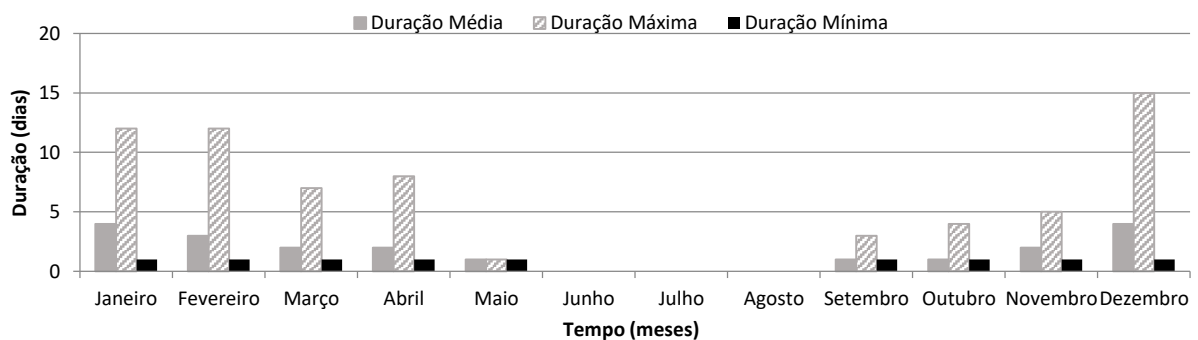
b)

Figura 4.7 - Distribuição da a) Duração e b) Potência relativa das tempestades ocorridas por ano, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

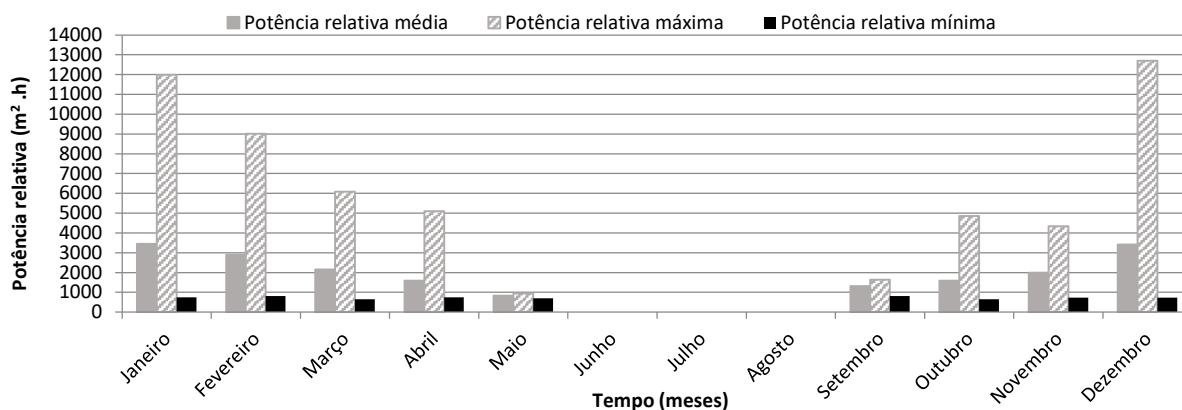
Como seria de esperar, da análise da Figura 4.7 observa-se que a evolução de ambas as variáveis no período de estudo foi muito semelhante, apresentando o seu pico no ano de 1978. Este facto evidencia uma clara dependência entre as variáveis duração e potência relativa, justificada pela expressão de cálculo da potência, permitindo confirmar que a duração é, regra geral, o fator determinante no cálculo da potência relativa de onda, uma vez que o outro parâmetro interveniente é a altura significativa, que se apresenta limitada inferiormente por 4,5 m e superiormente por questões de natureza do fenómeno de ondulação. Ainda assim, pressupõe-se que nas reduzidas situações (anos) em que possam ocorrer diferenças no “andamento” de ambos os gráficos, a causa reside nas variações de altura significativa de um ou mais eventos de tempestade marítima, que terão tido menores durações, mas maiores alturas significativas de onda, traduzindo-se numa maior potência registada. A título de exemplo, confirmam-se os valores registados no ano 1996, onde a duração de eventos registada é menor, comparativamente ao ano de 1995 e, ainda assim, a potência relativa é maior.

Distribuição intra-anual

A distribuição intra-anual pretende obter uma análise mais detalhada da evolução distributiva mensal da duração e potência relativa das tempestades. Na Figura 4.8 estão presentes os gráficos da distribuição mensal da duração e potência relativa média, máxima e mínima pelos meses do ano no período de 1952 a 2010.



a)



b)

Figura 4.8 - Distribuição mensal dos valores médios, máximos e mínimos de a) duração e b) potência, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

A análise dos gráficos da Figura 4.8 revela, novamente, uma distribuição mensal bastante idêntica de duração e de potência relativa, facto que reforça a dependência das variáveis e permite afirmar que, salvo algumas exceções, um evento de tempestade com uma longa duração está, predominantemente, associado a elevados valores de potência, e vice-versa. Em termos de valores máximos, observa-se que o evento de tempestade de maior duração (aproximadamente 16 dias) e potência relativa (12700 m².h) ocorreu no mês de Dezembro, seguindo-se os eventos ocorridos em Janeiro e Fevereiro, ambos com duração de 12 dias e potências elevadas. Os meses de Março, Abril, Outubro e Novembro são meses em que se registaram eventos com durações variáveis entre 4 e 8 dias e aproximadamente com a mesma gama de potências. Maio e Setembro podem ser considerados os meses de “transição”, com máximos de 1 e 3 dias de tempestade, respetivamente. Relativamente aos valores médios de duração e potência, estes assumem a mesma tendência distributiva assinalada anteriormente, e compreendem os intervalos de [0 a 4] dias e aproximadamente [0 a 3500] m².h.

Conclui-se da análise inter-anual e intra-anual, que as tempestades marítimas quer no seu número de ocorrências, na sua duração ou potência relativa são fortemente condicionadas pelas estações marítimas a que estão associadas e, portanto, pela sazonalidade. Confirma-se que a duração é o fator preponderante no cálculo da potência relativa de cada evento e, portanto, que tempestades com reduzidas durações envolvem menores potências e tempestades com maiores durações são portadoras de maiores potências (energia).

4.4.2. Caracterização do regime de tempestades marítimas

Na presente secção é feita a caracterização do regime de tempestades marítimas em função da duração e potência relativa dos eventos de tempestade ocorridos nos 59 anos de estudo, com base i) nos parâmetros estatísticos média, desvio-padrão, mínimo e máximo, e 1º, 2º e 3º quartis, dos parâmetros duração e potência relativa, ii) nos histogramas de frequência relativa correspondentes e iii) no histograma conjunto Duração-Potência.

Duração de eventos de tempestade

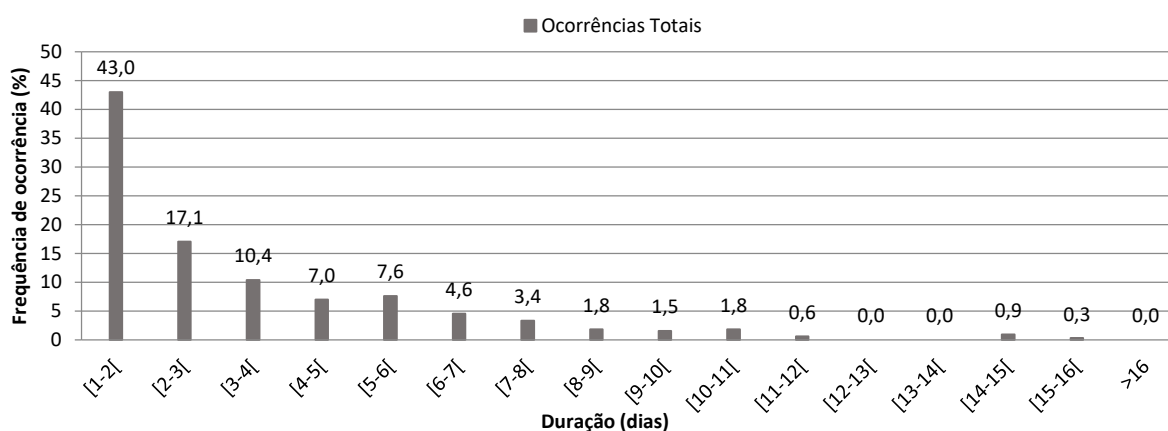
A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros estatísticos relativos à duração no regime de tempestades marítimas.

Tabela 4.3 - Parâmetros estatísticos relativos à duração no regime de tempestades marítimas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

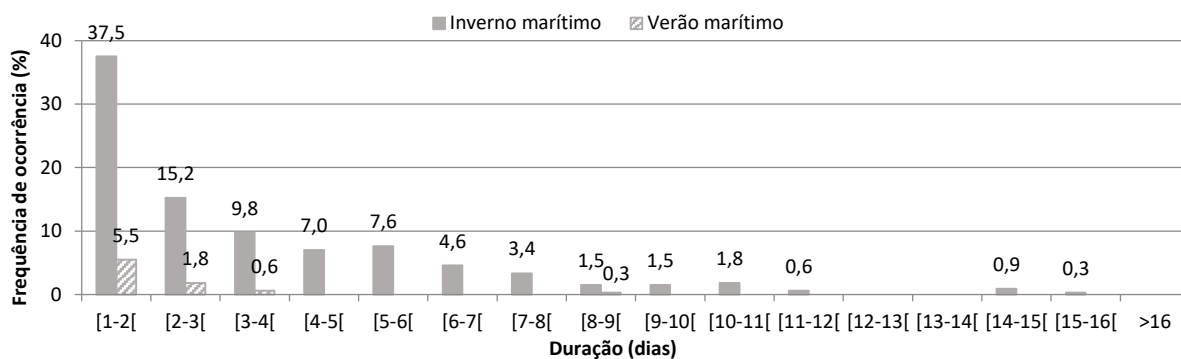
	Média	Desvio-padrão	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Mínimo	Máximo
Duração (dias)	3,2	2,7	1,3	2,3	4,5	1	16

O regime de tempestades marítimas é caracterizado por uma duração média de tempestades e desvio padrão de aproximadamente 3 dias. Novamente, os mínimos e os máximos de duração correspondem a 1 e 16 dias, respetivamente. O 1º quartil, a mediana e o 3º quartil correspondem a 25%, 50% e 75% dos dados e dividem a amostra em quatro partes iguais representando, assim, cada parte 1/4 da amostra. Verifica-se que 50% das tempestades possuem durações compreendidas entre aproximadamente 1 e 5 dias e têm mediana de 2 dias.

No histograma da duração avaliam-se as ocorrências que se geraram entre as durações mínimas e máximas registadas para um evento de tempestade marítima. Foram definidas 16 classes de frequência, em que cada classe corresponde a um semi-intervalo aberto no limite superior com amplitude de 1 dia. A Figura 4.9 apresenta os histogramas obtidos que traduzem distribuição de frequência de ocorrência, i.e., o número de eventos de tempestade ocorridos para cada uma das 16 classes definidas, em função da duração. Em primeiro lugar, apresentam-se os histogramas sem considerar a sazonalidade e de seguida considerando este fator.



a)



b)

Figura 4.9 - Histogramas da duração do regime de tempestades marítimas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis: a) não considerando a sazonalidade e b) considerando a sazonalidade.

Da análise do histograma a) da Figura 4.9 é possível apurar que a classe de frequência dominante é a classe de frequência [1-2[com 43 %, revelando uma grande discrepância relativamente às restantes classes em análise. Não foram registadas quaisquer ocorrências de eventos compreendidos nas classes de frequência [13-14[, [14-15[e >16. A distribuição de ocorrências diminui progressivamente com o aumento da duração desses mesmos eventos. Com efeito, conclui-se que, no período temporal de estudo, os eventos de tempestade marítima registados apresentam uma duração predominantemente de 1 a 2 dias, e quanto maior a duração dos eventos, menor são as ocorrências registadas.

No segundo histograma estabelece-se a relação de eventos ocorridos no Inverno e Verão marítimos, constatando-se, uma vez mais, que a evolução da percentagem de ocorrências tende a decrescer com o aumento da duração dos eventos em ambas as estações marítimas, e que a classe dominante é [1-2[, confirmando o exposto anteriormente, para o Inverno e Verão marítimos. A percentagem de ocorrências é esmagadora na estação de Inverno marítimo, 92% dos eventos de tempestade ocorrem nesta estação, comparativamente à estação do Verão. Ao contrário do que se sucede no Inverno marítimo, onde se registam ocorrências sucessivas com durações até 12 dias, no Verão o número de ocorrências deixa de possuir expressividade a partir da classe [4-5[, salvo casos excecionais.

Potência de eventos de tempestade

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros estatísticos relativos à potência no regime de tempestades marítimas.

Tabela 4.4 - Parâmetros estatísticos relativos à potência relativa no regime de tempestades marítimas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

	Média	Desvio-padrão	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Mínimo	Máximo
Potência (m ² .h)	2654	2201	1138	1775	3584	646	12700

O regime de tempestades marítimas é caracterizado por uma potência média de tempestades de 2654 m².h e um desvio padrão de 2201 m².h. Novamente, os mínimos e os máximos de potência correspondem a 646 m².h e 12700 m².h, respetivamente. Verifica-se que 50% das ocorrências de

tempestades possuem potências compreendidas entre 1137 m².h e 3584 m².h e têm mediana de 1775 m².h.

Em conformidade com o apresentado para a duração de eventos de tempestade, foram obtidos os histogramas da potência relativa para os dois casos descritos antes, i.e., tendo ou não em consideração a sazonalidade associada às estações marítimas. Nos histogramas foram estabelecidas 17 classes de frequência e, após a determinação dos mínimos e máximos de potência relativa associada aos eventos identificados, definiram-se semi-intervalos de limite superior aberto e de amplitude 800 m².h para cada classe de frequência. Na Figura 4.10 apresentam-se os histogramas de potência relativa do regime de tempestades marítimas para os dois casos referidos anteriormente.

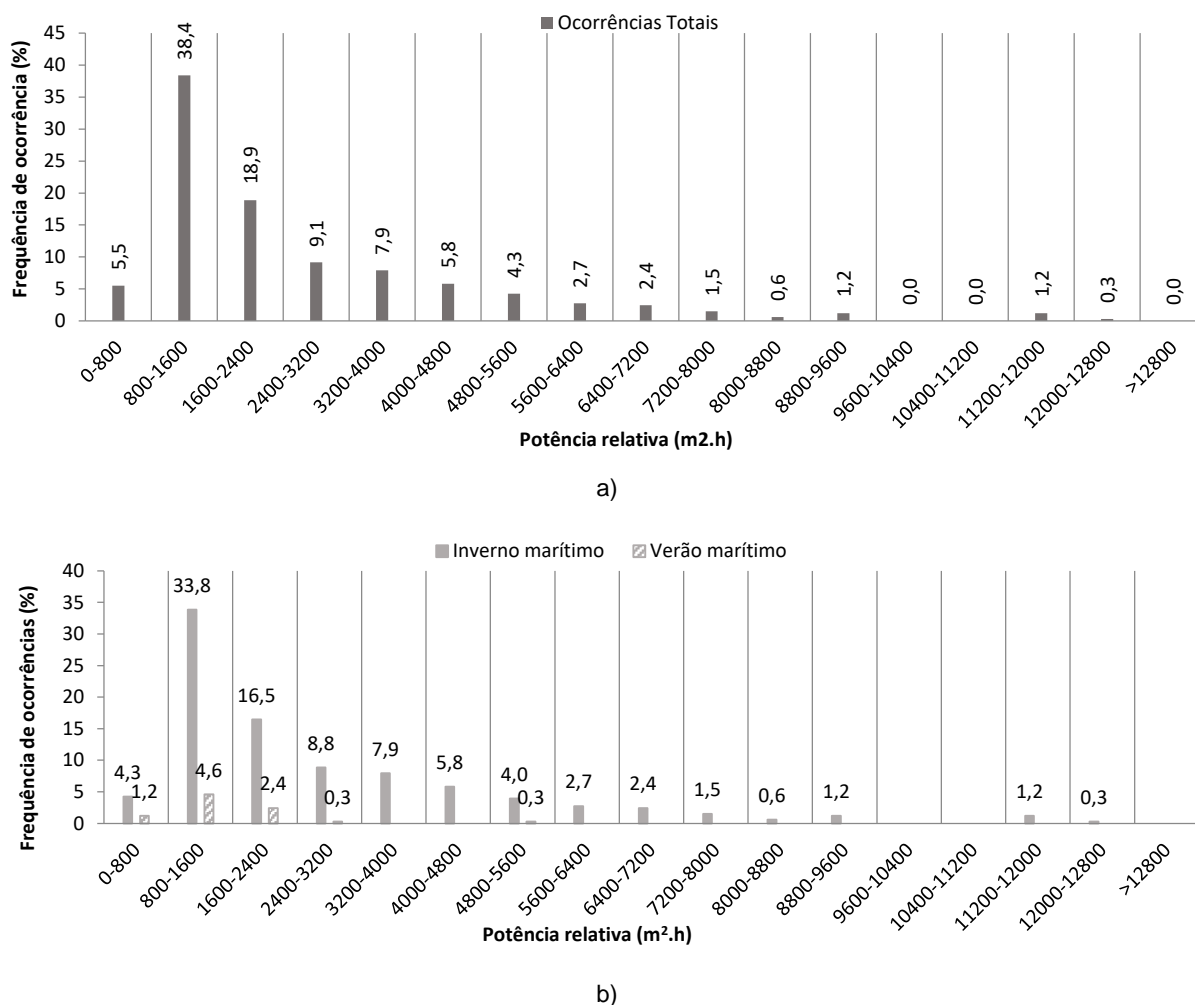


Figura 4.10 - Histogramas da potência relativa do regime de tempestades marítimas, no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis: a) não considerando a sazonalidade e b) considerando a sazonalidade.

No primeiro histograma relativo às ocorrências totais observa-se um pico de ocorrências de eventos para a classe de frequência que compreende a gama de potências relativas [800-1600[, correspondendo a aproximadamente 38% do total de ocorrências registadas, seguindo-se a classe [1600-2400[com 19% de ocorrências.

O segundo, introdutor do fator sazonalidade, não acrescenta nenhuma informação ao já referido para os histogramas de duração e, à semelhança do que acontece com as durações, depois do pico de ocorrências para a classe dominante, a distribuição de frequências de potência relativa é tendencialmente decrescente com o aumento da gama de potências relativa dos eventos, independentemente da estação marítima.

Duração - Potência Relativa

Nesta secção pretende-se fazer a caracterização conjunta das variáveis duração e potência relativa das tempestades marítima ocorridas, com o intuito de compreender com maior exatidão a relação direta e de dependência à qual estão sujeitas. Desta forma, apresenta-se na Figura 4.11 o histograma conjunto que combina os dois parâmetros, partindo dos histogramas marginais associados a cada um deles, obtidos anteriormente. Da referida combinação resultam as células preenchidas a cor representativas do número de ocorrências correspondentes a um evento de tempestade associado a uma determinada duração e respetiva potência relativa. As células por preencher correspondem a situações de inexistência de ocorrências simultâneas de ambas as classes.

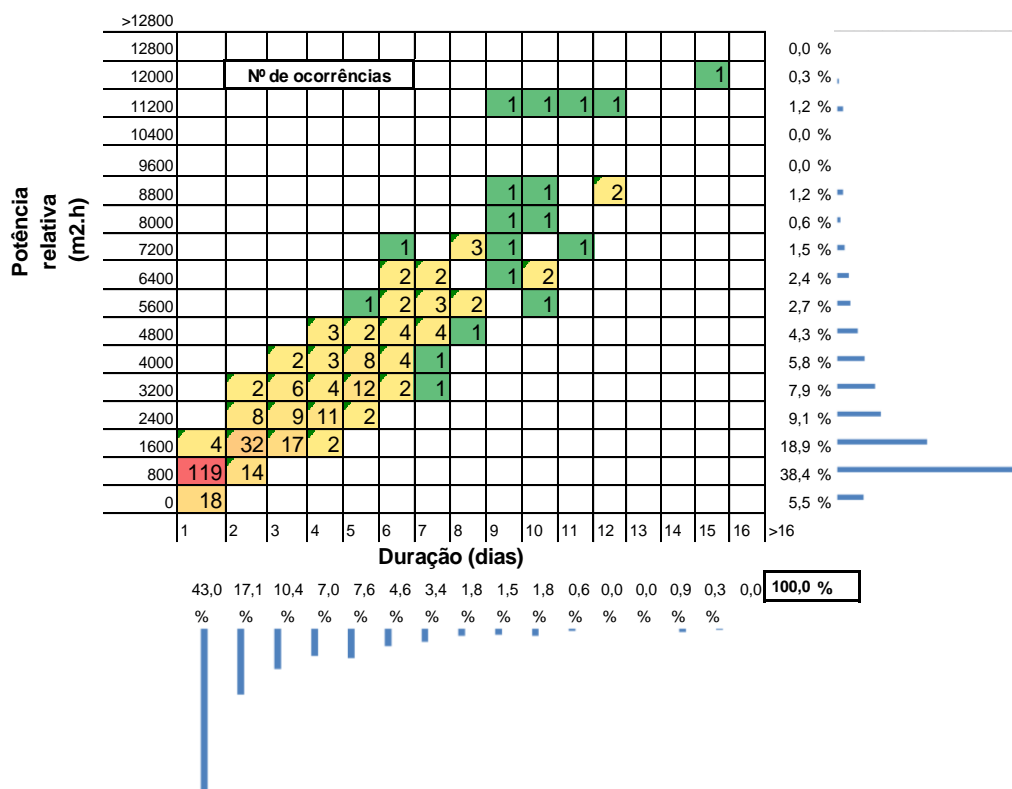


Figura 4.11 - Histograma conjunto Duração – Potência relativa dos eventos de tempestade ocorridos no período de 1952 a 2010, no trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis, complementado com os histogramas marginais de cada uma das grandezas.

A análise do histograma conjunto confirma o já observado anteriormente, i.e., o número de eventos é bastante mais elevado para durações reduzidas (inferiores a 2 dias), maioritariamente associadas a potências relativas também pequenas. Com efeito, a combinação de classes mais frequente é a 1ª classe de duração [1-2], associada a potências relativas compreendidas na 2ª classe de frequências,

[800-1600]. A esta combinação de classes correspondem 119 eventos de tempestades marítimas – 36% dos eventos identificados no período de estudo.

Por sua vez, a análise das variáveis duração e potência permite concluir que, para a zona de estudo e no período temporal de 1952 a 2010, os eventos de tempestade marítima registados apresentam durações de 1 a aproximadamente 16 dias, sendo mais frequente surgirem eventos de menores durações. Relativamente à potência relativa associada aos referidos eventos, também são bastante mais usuais as potências baixas, geralmente entre 800 e 1600 m².h, embora tenham sido valores estimados até 12700 m².h.

4.5. Seleção das tempestades a simular

A seleção dos eventos de tempestade marítima a simular através do modelo *Litprof* é feita tendo como único critério a escolha de eventos com igual potência relativa e diferente duração. Inerente a este critério de seleção, está o objetivo que motiva esta dissertação: permitir perceber de que forma respondem as praias a sul do rio Mondego à atuação de eventos de tempestade marítima com a mesma intensidade (potência) e diferentes durações. Qual a situação mais gravosa: Tempestades com menores durações, e consecutivamente, alturas significativas de onda superiores? Ou tempestades com maior duração associadas a alturas significativas de onda menores? Ora, para tal optou-se por estudar a resposta das praias do trecho em estudo sob a atuação de seis eventos de tempestade distintos, caracterizados por diferentes gamas de potências relativas (baixa, média e elevada), fazendo corresponder dois eventos a cada uma das situações. A seleção desses eventos, por gama de potência, é feita sob o critério da duração, sendo que um é caracterizado por uma reduzida duração e outro por uma elevada duração. Para realizar o procedimento descrito recorreu-se histograma conjunto de duração-potência relativa, obtido anteriormente (Figura 4.11). O esquema da Figura 4.12 ilustra o processo de seleção dos eventos de tempestade a simular através do modelo numérico *Litprof*.

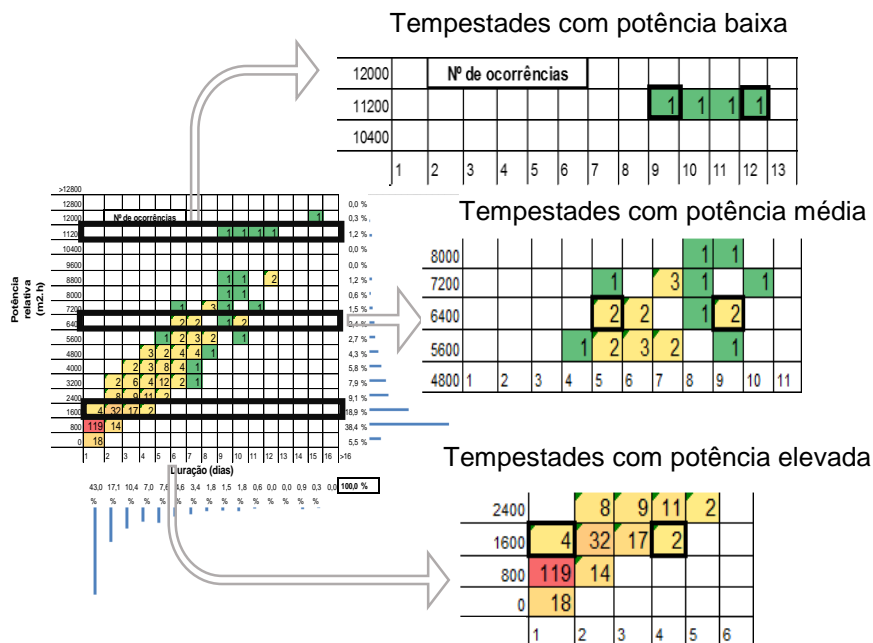


Figura 4.12 - Esquema ilustrativo da seleção dos seis eventos de tempestade a simular com recurso ao modelo numérico *Litprof*.

A seleção dos eventos de menor duração e maior duração, de entre os eventos identificados na Figura 4.12 para cada situação pretendida (potência baixa, média e elevada), foi feita consoante o valor de potência relativa mais próximo registado entre ambos os eventos, de forma a considerar os casos mais representativos da situação desejável e focar a comparação de ambos unicamente na variável duração.

Na Tabela 4.5 sintetizam-se os seis eventos de tempestades selecionados, assim como as suas durações e potências relativas associadas, para cada gama de potências (baixa, média e elevada).

Tabela 4.5 – Tempestades selecionadas, durações e potências relativas associadas, para cada gama de potências (baixa, média e elevada), no período de 1952 a 2010, para o trecho litoral de estudo, compreendido entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

		Tempestade com menor duração	Tempestade com maior duração
Tempestades de baixa potência	Data de início	22/11/86 12:00	20/12/55 12:00
	Data de fim	24/11/86 06:00	25/12/55 0:00
	Duração (h)	42	108
	Potência relativa (m².h)	2144	2055
Tempestades de potência média	Data de início	22/1/01 18:00	4/2/57 18:00
	Data de fim	29/1/01 0:00	15/2/57 12:00
	Duração (h)	150	258
	Potência relativa (m².h)	6794	6797
Tempestades de potência elevada	Data de início	6/1/96 0:00	29/11/59 18:00
	Data de fim	15/1/96 12:00	12/12/59 12:00
	Duração (h)	228	306
	Potência relativa (m².h)	11990	11464

5. Modelação numérica da morfodinâmica durante as tempestades marítimas

5.1. Introdução

Neste capítulo procede-se à aplicação do modelo numérico *Litprof*, que integra o sistema de modelação *LITPACK*, aos vários cenários de estudo, referentes às condições de hidrodinâmica associadas a cada tempestade selecionada. A descrição do sistema de modelação *LITPACK* encontra-se no ANEXO A. Nesta secção introduz-se alguma informação de interesse relativa à topo-hidrografia e sedimentologia da zona de estudo, bem como o perfil representativo do trecho litoral compreendido entre as embocaduras do rio Mondego e Lis e apresenta-se uma breve explicação de como foi obtido. A sua descrição detalhada encontra-se no estudo de Oliveira e Brito (2014), onde é feita uma caracterização morfológica do trecho em questão, também abordada em Oliveira (2016).

São apresentados, detalhadamente, os ficheiros de *input* (*Cross-shore Profile e Hydrodynamic Climate*) e outros parâmetros de interesse para a proceder ao *setup* do módulo numérico e à simulação. Por fim, são expostos os resultados obtidos para os diferentes cenários de simulação e é feita a sua análise, comparação e discussão.

Todos os conceitos e conteúdos relativos ao modelo numérico encontram-se nos manuais do *LITPACK* (DHI, 2014b), em particular do módulo *Litprof* (DHI, 2016).

5.2. Breve caracterização topo-hidrográfica e sedimentológica da zona

A escolha do perfil de praia e do diâmetro mediano dos sedimentos representativos do trecho litoral em estudo são essenciais na modelação do transporte sedimentar transversal e previsão da resposta do perfil transversal a simular através do *Litprof*.

De acordo com Oliveira e Brito (2014), para obter o perfil transversal representativo, foi elaborado um modelo digital do terreno (MDT), resultante da combinação de dados topo-hidrográficos provenientes de duas cartas náuticas elaboradas pelo Instituto Hidrográfico (IH) e de um levantamento topo-hidrográfico de 2011 com recurso à tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), do Instituto Geográfico Português e Instituto da Água (assim designado na altura). De seguida, procedeu-se à divisão do trecho litoral de aproximadamente 30 km em sub-trechos, estrategicamente localizados de acordo com as estruturas transversais principais e as características morfológicas associadas e seleccionou-se, de entre dezoito perfis, o perfil transversal representativo de cada sub-trecho.

Dos 18 perfis existentes, foram seleccionados apenas 5 perfis transversais representativos de cinco sub-trechos litorais: 1) do molhe sul da embocadura do rio Mondego ao último esporão do campo de esporões da Gala-Cova; 2) do último esporão do campo de esporões da Gala-Cova ao esporão da Costa de Lavos; 3) deste último esporão ao esporão da Leirosa; 4) do esporão da Leirosa ao promontório de Pedrogão; 5) do promontório de Pedrogão ao molho norte da embocadura do rio Lis.

Na Figura 5.1 encontram-se representados os perfis transversais de praia, P1 a P18, e destacam-se os cinco perfis transversais representativos de cada sub-trecho, no trecho litoral de estudo

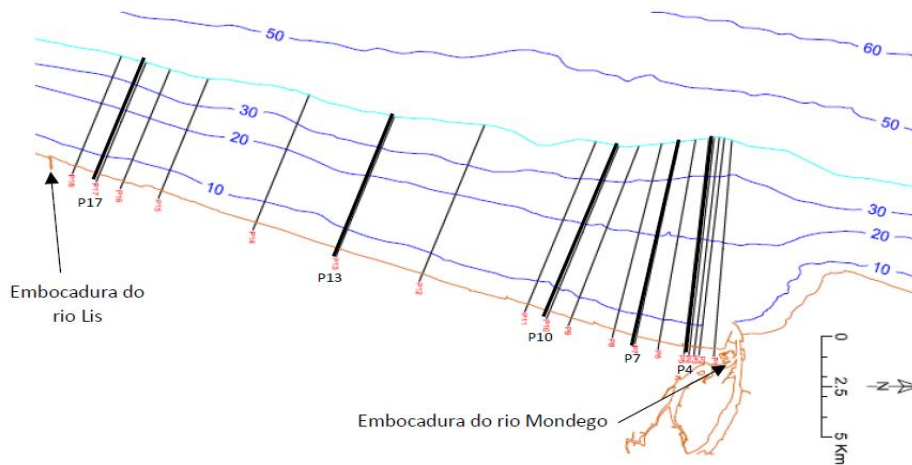


Figura 5.1 – Representação dos perfis transversais de praia, P1 a P18, e identificação dos cinco perfis transversais representativos de cada sub-trecho, no trecho litoral de estudo. Fonte: Oliveira (2016).

Da comparação dos perfis representativos selecionados com os perfis de equilíbrio (perfil estaticamente médio que mantém a sua forma à parte de pequenas variações) para os valores de d_{50} variáveis entre 0,2 e 0,6 mm, cuja descrição detalhada se encontra em Oliveira (2016), o autor concluiu que o perfil P7, compreendido entre o ultimo esporão do campo de esporões de Gala-Cova e o esporão da Costa de Lavos, é o perfil representativo do trecho em análise, uma vez que é o que mais se aproxima do que seria uma morfologia média da zona de estudo e com um declive da face de praia próximo da tendência média dos perfis analisados.

Em Oliveira (2016) a escolha do diâmetro mediano representativo foi feita em simultâneo com a seleção do perfil de praia, recorrendo ao cálculo de perfis de equilíbrio e seu ajustamento ao perfil representativo, concluindo-se que o perfil de equilíbrio para $d_{50} = 0.30$ mm é o que melhor se ajusta ao perfil transversal P7. Na Figura 5.2 encontra-se representado o perfil P7 representativo da zona de estudo e o perfil de equilíbrio para $d_{50} = 0.30$ mm.

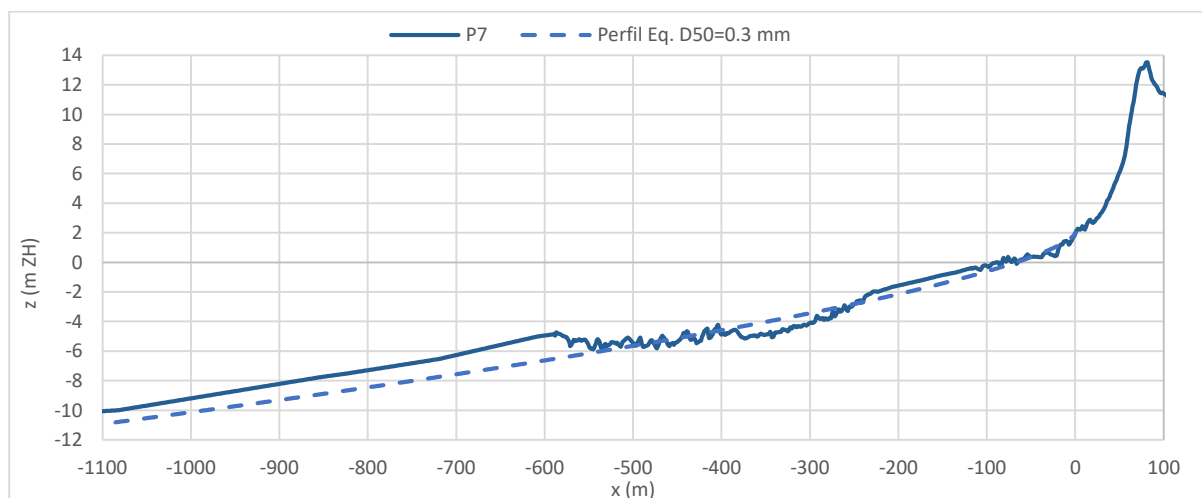


Figura 5.2 – Perfil transversal representativo da zona de estudo – Perfil P7 e perfil de equilíbrio associado para $d_{50} = 0.30$ mm. Adaptado de Oliveira e Brito (2014).

Para além da definição do perfil e diâmetro mediano representativo, foi necessário determinar a profundidade que limita a zona ativa da praia, onde ocorrem alterações da geometria do perfil consideráveis que envolvem, predominantemente, troca de sedimentos entre a praia emersa (parte superior da praia) e submersa (parte inferior da praia). Esta profundidade denomina-se por profundidade de fecho e traduz-se na profundidade a partir da qual os processos costeiros sedimentares não provocam transporte (longitudinal e/ou transversal) significativo e, portanto, o perfil transversal não sofre modificações significativas.

De acordo com Birkemeier (1985), a profundidade de fecho, h_c , é determinada através da equação:

$$h_c = 1,75 H_e - 57,9 \left(\frac{H_e^2}{gT_{H_e}^2} \right) \quad (5.1)$$

em que H_e é a altura significativa de onda que é excedida 12 horas por ano, T_{H_e} é o período associado à altura significativa de onda que é excedida 12 horas por ano e g é a aceleração da gravidade.

A profundidade de fecho obtida em Oliveira (2016) para o mesmo trecho de estudo foi de -13,6 m ZH, adotando-se -14 m ZH para o início da zona ativa. Para a obtenção desta profundidade foi utilizado o ano de 1973, onde se identificou a maior altura significativa de onda, $H_s^{max} = 13,13$ m, uma vez que a profundidade de fecho é tanto mais conservadora quanto mais elevadas forem as H_s registadas num dado período. Consecutivamente, obtiveram-se os valores de $H_e = 11,38$ m e $T_{H_e} = 18,05$ s.

5.3. Propagação do clima de agitação marítimo

Em conformidade com o descrito por Oliveira (2016), foi necessário proceder à propagação do clima de agitação marítimo de 1952 a 2010 desde a elevação -37 m ZH até à elevação -14 m ZH, para obter as condições hidrodinâmicas à entrada zona ativa e economizar tempo no cálculo do transporte transversal e evolução do perfil transversal de praia. Para tal, foi utilizada a ferramenta *Transfer Wave Climate* contida no módulo numérico *LITDRIFT* e no software *Littoral Processes FM*.

5.4. Ficheiro de Input: Cross-shore profile – Perfil transversal

Este ficheiro de entrada descreve a forma e as propriedades do perfil transversal representativo da zona de estudo. O perfil transversal é descrito por uma série de dados caracterizada por 5 parâmetros: 1) Batimetria (m); 2) Rugosidade de fundo (m); 3) Diâmetro mediano do sedimento, d_{50} (mm); 4) Velocidade de queda w_s (m/s); 5) Dispersão geométrica dos sedimentos $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ (-).

A orientação do perfil é definida relativamente à normal do perfil transversal, como mostra a Figura 5.3.

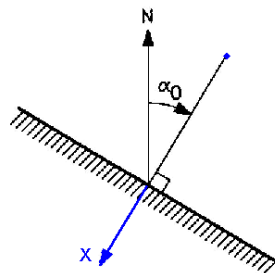


Figura 5.3 – Definição da orientação do perfil. Fonte: DHI (2014b).

O perfil transversal em estudo apresenta uma orientação da perpendicular à linha de costa de 289,5 °N.

5.4.1. Batimetria

Na presente dissertação, é utilizado um perfil transversal simplificado representativo de toda a zona de estudo, obtido a partir dos perfis transversais representativos de cada sub-trecho da zona de estudo e dos perfis de equilíbrio associados. A utilização de um perfil simplificado é comum quando se pretende realizar a análise de processos físicos em estudos exploratórios, uma vez que os perfis reais, como é caso do perfil P7 representativo da zona de estudo, estão normalmente associados a geometrias mais irregulares que geram maior complexidade nos processos e maior dificuldade de interpretação dos fenómenos.

Na Figura 5.4 apresenta-se o perfil simplificado e perfil P7 representativo da zona. O perfil simplificado, esquematizado na Figura 5.5, encontra-se subdividido em 3 zonas principais, sendo estas o perfil submerso, a face da praia e a face da duna e é limitado pelas cotas de -14 m ZH (profundidade de fecho) a 14 m ZH, com 1300 m de extensão. A extensão foi definida com o intuito de abranger a extensão de duna suficiente para incluir todas as situações possíveis de erosão da mesma.

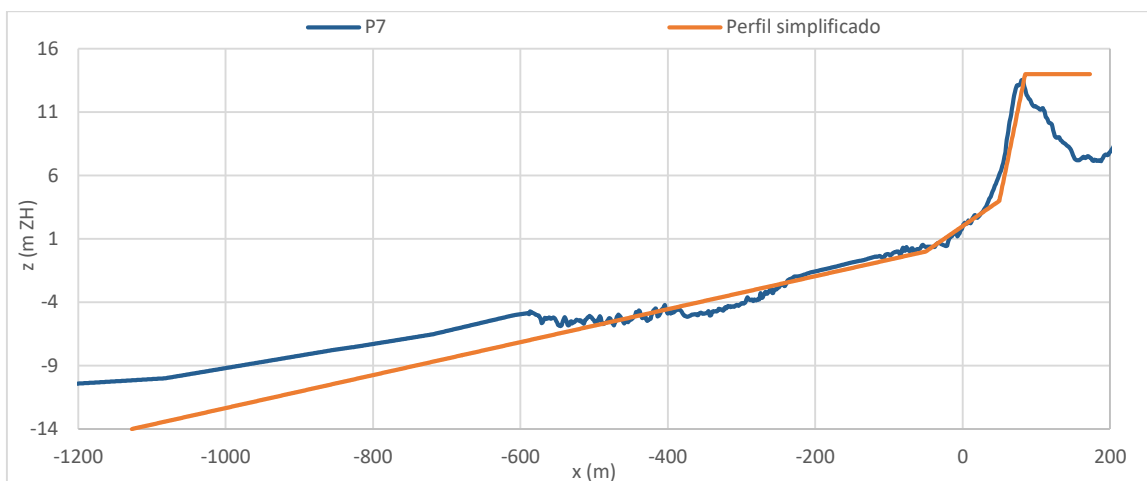


Figura 5.4 - Perfil transversal P7 representativo da zona de estudo e perfil simplificado obtido a partir dos perfis transversais que caracterizam cada sub-trecho da zona de estudo, compreendida entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

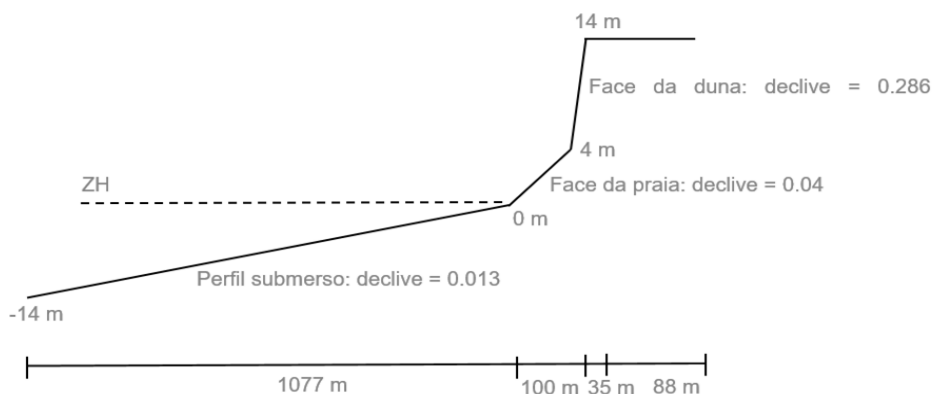


Figura 5.5 - Representação esquemática do perfil transversal simplificado da zona de estudo, compreendida entre as embocaduras do Rio Mondego e Lis.

5.4.2. Rugosidade de fundo

O valor da rugosidade de fundo utilizado é o valor padrão recomendado nos módulos computacionais do *LITPACK*, $k = 0,004$ m.

5.4.3. Diâmetro mediano do sedimento, d_{50}

O diâmetro mediano do sedimento utilizado na modelação é o $d_{50} = 0,5$ mm. Ainda que o diâmetro mediano representativo da zona de estudo, segundo Oliveira (2016), seja $d_{50} = 0,3$ mm, no presente caso, o estudo dedica-se ao transporte de sedimentos que são mobilizados, maioritariamente, na zona emersa da praia, mais concretamente na face da praia e face frontal da duna, onde se verifica um diâmetro maior do grão deslocado face à zona de perfil submerso, zona de principal foco no estudo de Oliveira (2016).

5.4.4. Velocidade de queda, w_s

A velocidade de queda, $w_s = 0.06109$ m/s, foi obtida através da calculadora integrada no módulo computacional *LITSTP*, a partir dos valores de $d_{50} = 0,5$ mm, da temperatura média da água, $T_s = 15^\circ\text{C}$ e da densidade relativa dos sedimentos, de valor 2,65 correspondente à areia quartzítica.

5.4.5. Dispersão geométrica dos sedimentos, $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$

A dispersão geométrica dos sedimentos assume o valor padrão recomendado de 1.3, pois na ausência de informação ou medições de campo dos valores de d_{84} e d_{16} , a experiência revela que valores arbitrados podem resultar em resultados muito irrealistas no cálculo do valor da capacidade do transporte sedimentar.

5.5. Ficheiro de *Input: Hydrodynamic climate* – Clima de hidrodinâmica

O ficheiro de entrada, denominado *Hydrodynamic Climate*, descreve as condições de hidrodinâmica associadas às ondas e nível do mar atuantes durante o período em análise. O ficheiro é caracterizado pelos 6 parâmetros seguintes: 1) Tempo (h); 2) Altura de onda, H_{rms} (m); 3) Direção de onda ($^\circ\text{N}$); 4) Período de onda, T_z (s); 5) Fator de dispersão (-); 6) Nível do mar (m).

5.5.1. Tempo

Este parâmetro define o incremento de horas associado à série temporal do clima de agitação marítima em estudo. Como já referido, a série apresenta dados de parâmetros de ondas obtidos de 6h em 6h, pelo que o parâmetro em questão se inicia em 0 e incrementa 6h ao passo anterior, até ao último valor.

5.5.2. Altura de onda, H_{rms}

A altura de onda é definida pela altura média quadrática, H_{rms} . Assumindo que as alturas de onda seguem uma distribuição de Rayleigh, é válida a seguinte relação entre os parâmetros H_s e H_{rms} (GODA, 1985):

$$H_{rms} = \frac{H_s}{\sqrt{2}} \quad (5.2)$$

5.5.3. Direção de onda

Este parâmetro descreve o ângulo de incidência da onda.

5.5.4. Período de onda, T_z

O período de onda é representado pelo período médio de zero ascendente T_z , obtido a partir do período de pico T_p . Existem diversas equações válidas para relacionar ambas as variáveis, dependendo do espectro de onda considerado. O espectro utilizado foi o de Pierson-Moskowitz e utilizou-se a seguinte equação para definir T_p em função de T_z (Molin, 2002):

$$T_p = 1,408 T_z \quad (5.3)$$

5.5.5. Fator de dispersão

O parâmetro relativo ao fator de dispersão, representativo do decréscimo nas tensões de radiação por consequência da dispersão direcional das ondas, pode tomar os valores 0.35, 0.5 e 0.8. O primeiro valor está associado a um mar de elevada complexidade direcional e o último a um mar unidirecional, sendo o valor de 0.5 o valor “standard” e o mais utilizado em situações gerais. No presente caso, é utilizado o fator de dispersão de 0.8, de forma a representar o caso mais condicionante de mar, com ondas bem definidas a incidir no perfil de praia.

5.5.6. Nível do mar

O nível de mar deve incluir a componente relativa à variação da maré astronómica e da maré meteorológica.

A metodologia aplicada para obtenção da maré astronómica teve por base a utilização das tabelas de previsão obtidas pelo Instituto Hidrográfico (IH) para o ano de 2017, disponibilizadas no respetivo *website*. Das referidas tabelas foram retirados os níveis de mar durante a baixa-mar (BM), 0.50 m ZH, e preia-mar (PM), 3.50 m ZH, para o porto da Figueira da Foz e, assim, constituída a maré em condições de águas vivas para obter grandes amplitudes de maré (Figura 5.6).

ELEMENTOS DE MARÉS 2017

PORTO	PMmáx.	mês	dia	hora	min	PMAV.	PMAM.	NM.	BMAM.	BMAV.	BMmin.	mês	dia	hora	min
VIANA DO CASTELO	3.76	3	29	03	29	3.51	2.71	2.00	1.28	.49	.23	4	27	09	17
LEIXÕES	3.78	3	29	03	31	3.52	2.70	2.00	1.30	.49	.24	3	29	09	40
AVEIRO	3.58	3	29	03	54	3.37	2.67	2.00	1.33	.59	.36	4	27	21	40
FIGUEIRA DA FOZ	3.77	3	29	03	31	3.50	2.70	2.00	1.31	.50	.26	4	27	21	35
PENICHE	3.76	3	29	03	17	3.50	2.70	2.00	1.31	.51	.27	4	27	21	25

Figura 5.6 – Obtenção dos valores de PMAV e BMAV para a Figueira da foz, com recurso às tabelas de previsão de marés de 2017 do IH. Fonte: *website* do Instituto Hidrográfico (consultado a 10/2/2017).

A componente relativa à maré meteorológica, i.e., a sobrelevação de origem meteorológica, foi calculada com recurso ao estudo de FORTUNATO *et al.* (2011), onde foi aplicado um método para obter níveis máximos e séries temporais associadas para diferentes períodos de retorno para a região de Aveiro, com base na análise estatística de séries temporais longas em estações costeiras. Para o presente estudo, foi utilizado o nível máximo determinado para o período de retorno de 10 anos que corresponde a 4,27 m ZH.

Marégrafo	Período de retorno (anos)				
	5	10	25	50	100
Aveiro (presente método)	4.18	4.27	4.38	4.45	4.52

Figura 5.7 – Níveis máximos (m, ZH) obtidos para vários períodos de retorno (anos) para Aveiro. Fonte: FORTUNATO *et al.* (2011).

Posto isto, partindo dos valores definidos anteriormente, obteve-se por subtração do nível de preia-mar em águas vivas (PMAV) ao nível máximo considerado (4,27 m ZH), o valor da sobrelevação, 0,77 m ZH, e assumiu-se que seria constante para todas as tempestades.

Tabela 5.1 - Obtenção do valor da sobrelevação a considerar no nível de mar e definição dos valores de PMAV, BMAV e nível máximo para auxílio dos cálculos.

Tabela de elementos de maré 2017(IH)	Figueira da Foz	PMAV (m ZH)	3,5
		BMAV (m ZH)	0,5
Artigo Fortunato et.al (2011)	Aveiro	Nível máximo para (T=10 anos) (m ZH)	4,27
		Sobrelevação (m ZH)	0,77

O nível de mar é então obtido através da soma da maré de águas vivas à sobrelevação de origem meteorológica.

Tabela 5.2 - Obtenção do nível de mar a considerar na modelação das tempestades marítimas.

Nível mínimo do mar (m)	BMAV+Sobrelevação	1,27
Nível máximo do mar (m)	PMAV+Sobrelevação	4,27

Note-se que nesta etapa poderiam ter sido utilizadas outras abordagens para obtenção da componente maré astronómica, como por exemplo a utilização das marés que ocorreram exatamente nas datas das tempestades a simular, ou diferentes valores de sobrelevação para cada tempestade. No entanto, uma vez que se pretendeu avaliar a evolução morfológica considerando a agitação marítima o principal fator forçador, estabeleceu-se que o nível de mar fosse igual para todos os casos para facilitar a sua comparação. Assim, e como recorrer a um nível de mar constante também não era o caso mais representativo da realidade, optou-se por utilizar o método supracitado para todas as tempestades e fazer coincidir o pico da tempestade, i.e., a maior altura de onda registada, com um dos picos do nível de mar (situação de preia-mar acrescida da sobrelevação meteorológica). A Figura 5.8 exemplifica o referido.

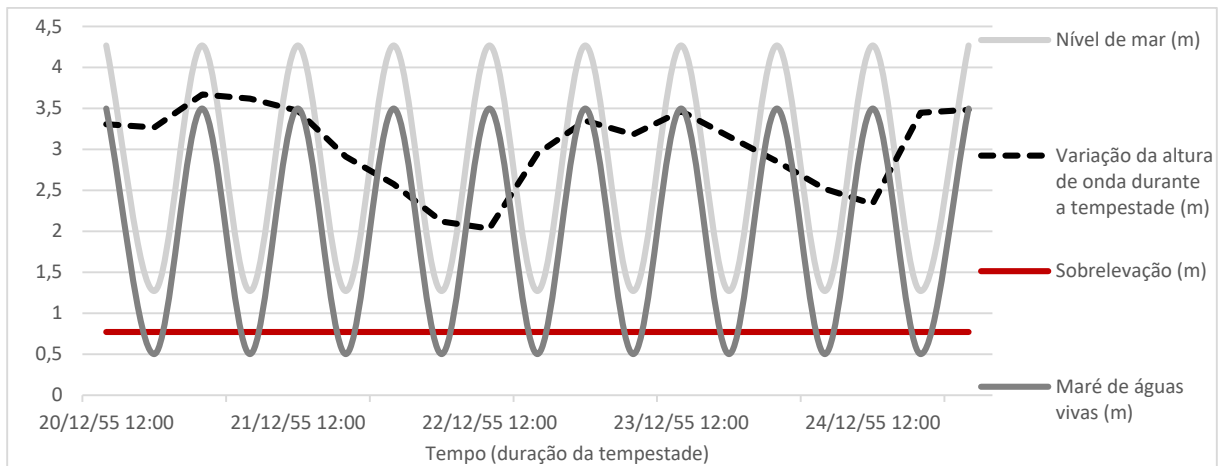


Figura 5.8 – Definição de sobrelevação, maré de águas vivas, nível do mar e variação da altura de onda durante uma tempestade.

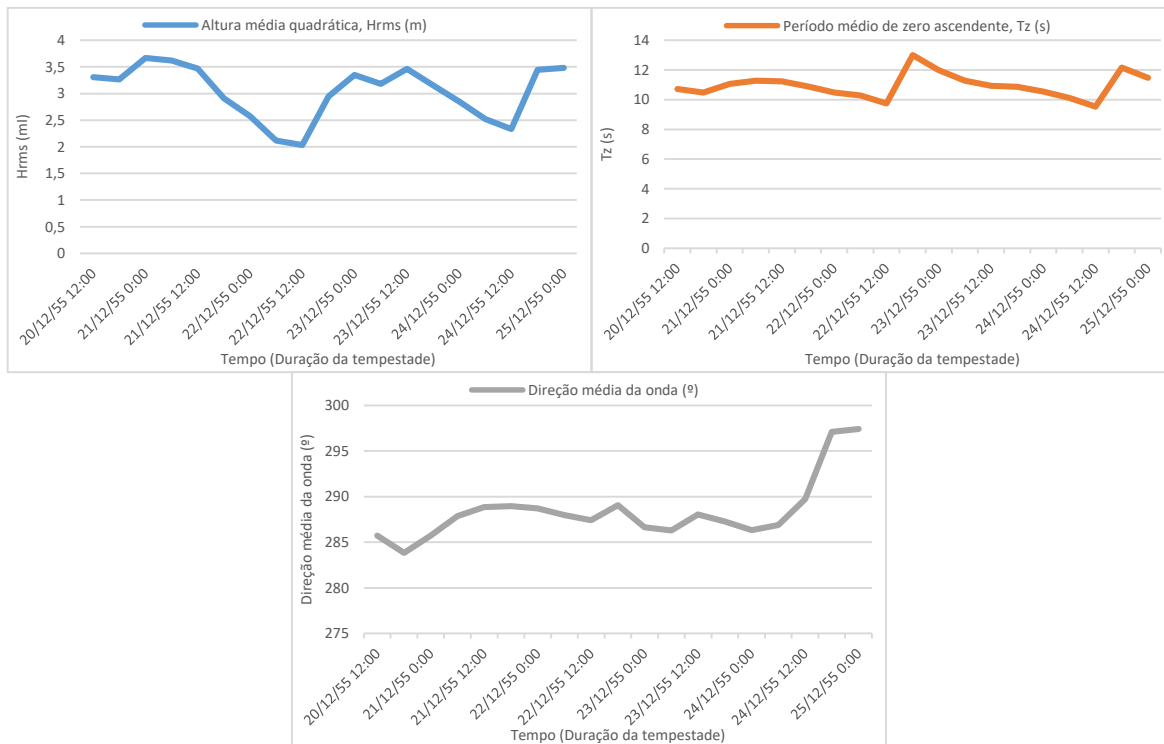
5.5.7. Condições hidrodinâmicas a simular

Nesta secção apresentam-se as condições de hidrodinâmica a simular no modelo *Litprof* associadas às seis tempestades selecionadas na secção 4.5., para as diferentes gamas de potência identificadas.

Tempestades de baixa potência



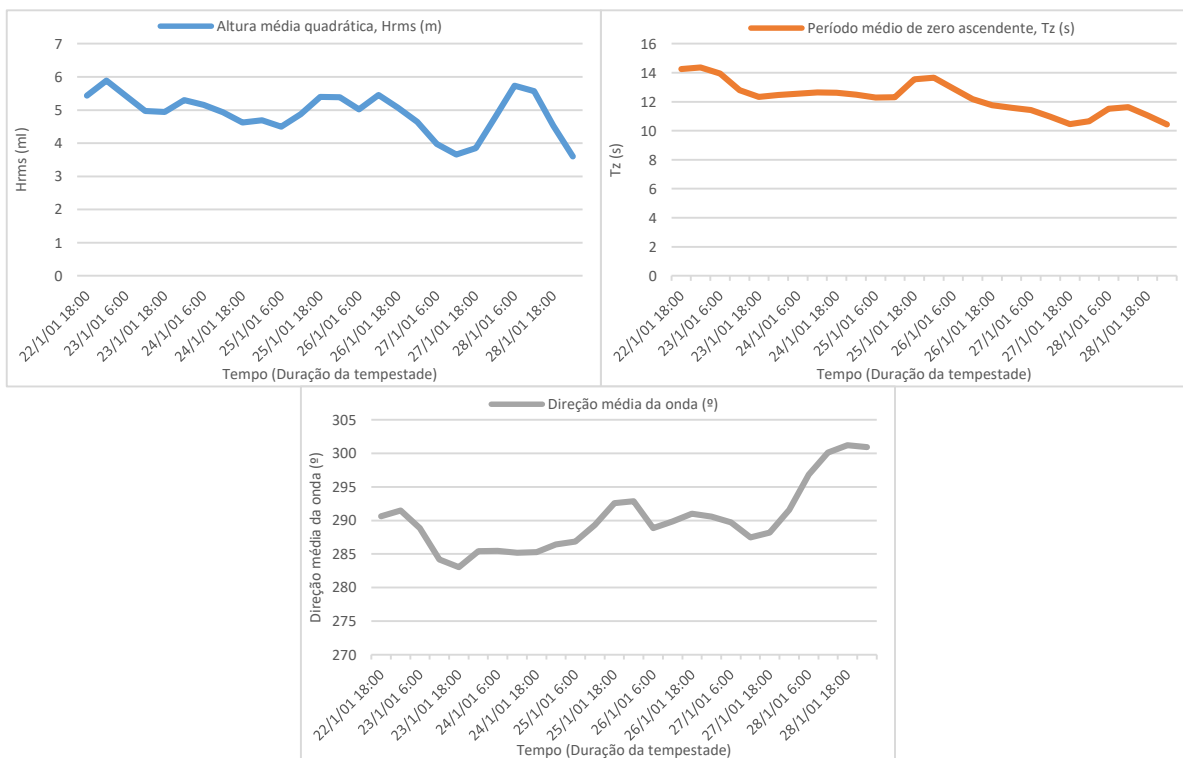
a)



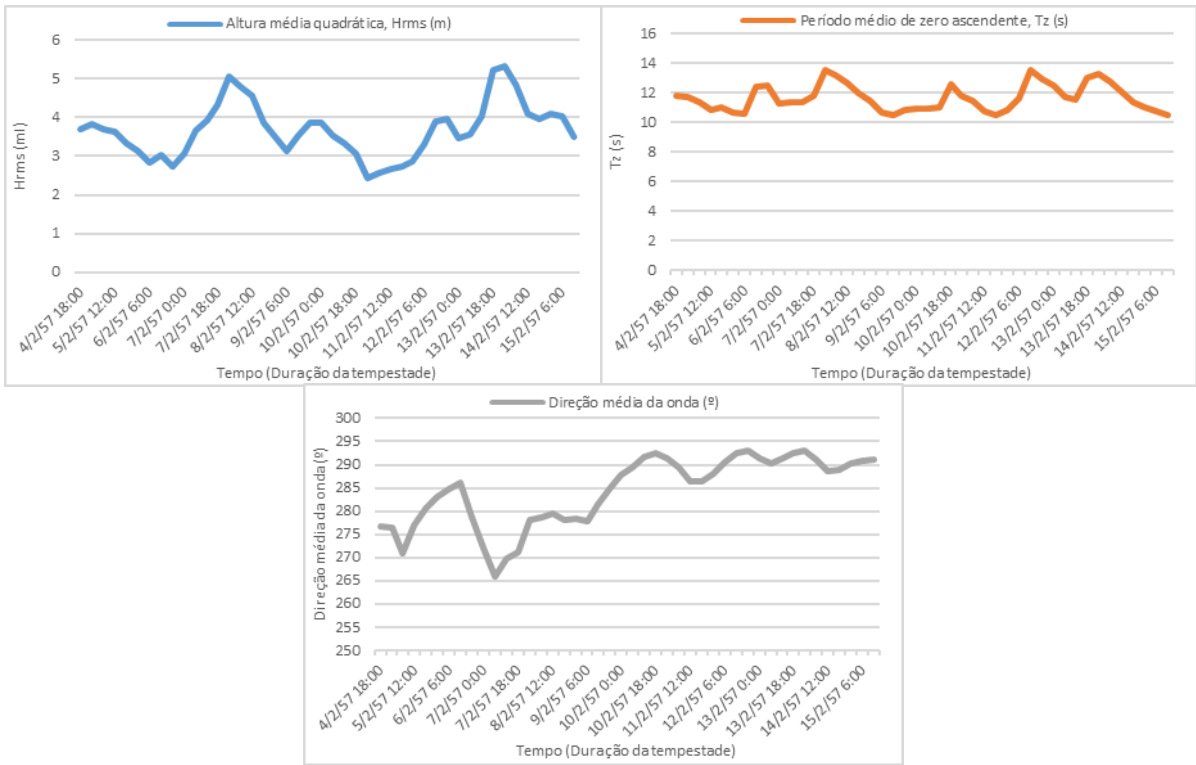
b)

Figura 5.9 – Condições de hidrodinâmica a simular para a tempestade com a) menor duração e b) maior duração) e potências relativas reduzidas.

Tempestades de potência média



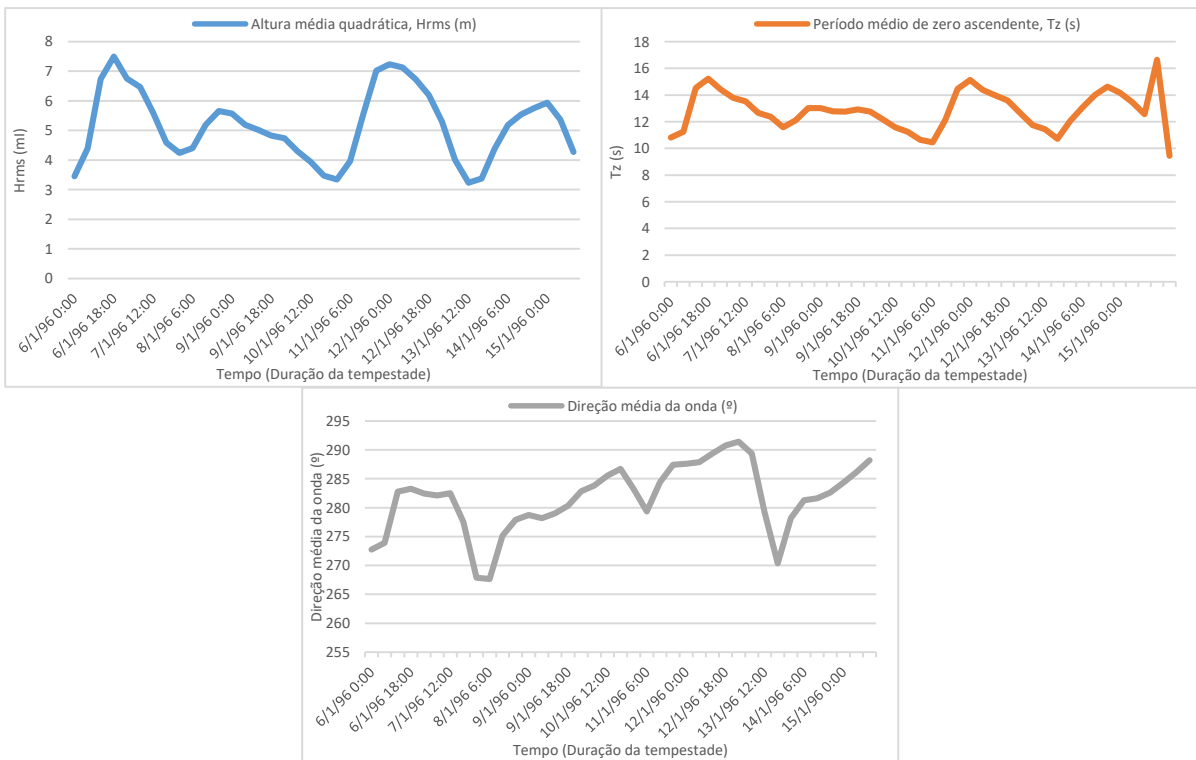
a)



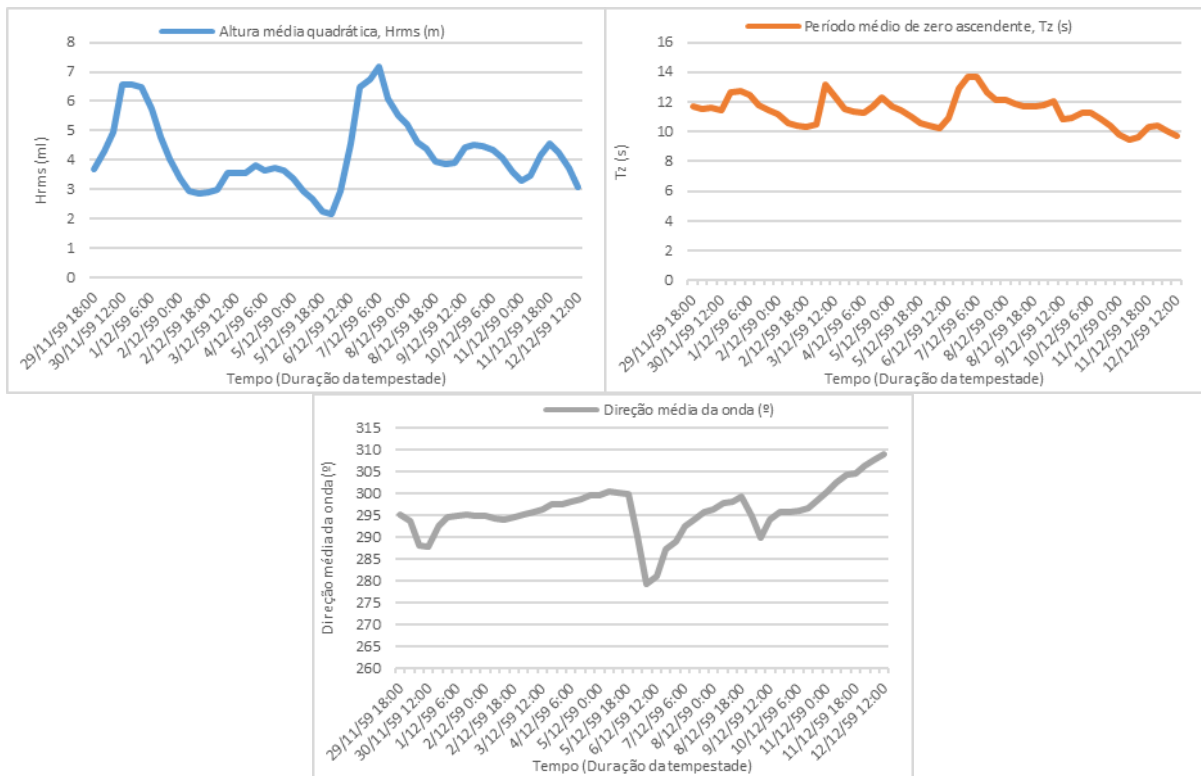
b)

Figura 5.10 - Condições de hidrodinâmica a simular para a tempestade com a) menor duração e b) maior duração) e potências relativas médias.

Tempestades de potência elevada



a)



b)

Figura 5.11 - Condições de hidrodinâmica a simular para a tempestade com a) menor duração e b) maior duração) e potências relativas elevadas.

5.6. Outros parâmetros utilizados no *setup* do modelo

É ainda importante referir que no *setup* do modelo, além dos parâmetros apresentados, foi necessário introduzir alguns parâmetros adicionais relativos às condições de ondas e sedimentos: a descrição espectral das ondas segue a distribuição de Rayleigh com ondas irregulares; na descrição sedimentológica considerou-se uma distribuição graduada do grão e a existência de rugas de fundo com os parâmetros de descrição $C1=0.1$, $C2=2$, $C3=16$ e $C4=3$; relativamente aos parâmetros de transporte de sedimentos, consideraram-se os valores de 2.65, 0.045 e 0.4 respetivamente, para a densidade relativa dos sedimentos, o valor crítico do parâmetro de Shields e a porosidade dos sedimentos; para os parâmetros de cálculo dos sedimentos, considerou-se a teoria de onda de Doering e Bowen, incluindo-se os termos convectivos e uma descrição da concentração de fundo determinística.

5.7. Resultados e Discussão

Nesta secção é feita a apresentação, análise e discussão dos resultados de evolução morfológica da componente transversal da praia a curto prazo por ação de tempestades marítimas, obtidos a partir da aplicação do modelo numérico *Litprof* ao perfil simplificado, adotado para a zona de estudo. A análise dos resultados foca, essencialmente, as variações registadas na geometria do perfil, os volumes de sedimento mobilizados e transportados na componente transversal de praia e a localização das zonas de acreção e erosão do perfil durante tempestades de maior e menor duração para cada uma das três gamas de potência (baixa, média e elevada). O objetivo deste trabalho exploratório é, portanto, estudar a resposta de um perfil de praia sob ação de duas tempestades de diferentes durações, uma com menor duração e outra maior duração, mas caracterizadas por potências de valor semelhante. O estudo é efetuado para as três gamas de potência referidas, i.e., potências baixas, médias e elevadas, de forma a perceber se o comportamento do perfil diverge consoante a potência da tempestade. No final, é feito o mesmo estudo para um perfil de diferentes características geométricas, com o intuito de verificar se são gerados diferentes resultados relativamente ao objetivo do estudo e confirmar a independência dos resultados obtidos perante o perfil escolhido. Para tal, optou-se por utilizar o perfil P7, representativo da zona de estudo. Antes da apresentação dos resultados, é introduzido, sucintamente, o fenómeno da física da tempestade marítima e os processos de morfodinâmica envolvidos.

Durante um evento de tempestade ocorre a subida temporária do nível do mar, designada por sobrelevação de origem meteorológica ou “*storm surge*” que surge, como referido no Capítulo 2, da ação combinada de baixas pressões e ventos fortes prolongados. Com efeito, as ondas sujeitas a estas condições atingem a costa com alturas e energia de ordem superior ao normal, provocando alterações na topo-hidrografia dos perfis de praia. As modificações geradas advêm de processos contínuos e cíclicos, que se iniciam com a mobilização e extração dos sedimentos da zona emersa, i.e., da duna frontal e face da praia, conduzindo ao recuo e rebaixamento da base da duna, e transporte em direção ao largo para posterior deposição na zona submersa, muitas vezes sob a forma de bancos longitudinais ou barras litorais.

No final destes processos, o volume total erodido na parte emersa da praia deverá ser igual ou próximo do volume total depositado na parte submersa para que o perfil esteja em equilíbrio. A estabilidade das praias depende, fortemente, da continuidade e intensidade destas trocas. Diferenças pouco significativas justificar-se-ão pela deposição de sedimentos transportados por correntes ou ondas e/ou erosão da parte subaérea (duna).

5.7.1. Evolução do perfil simplificado da zona de estudo

Antes da análise da evolução do perfil simplificado da zona de estudo para as tempestades consideradas de gamas de potência baixa, média e elevada, relembre-se a configuração do perfil simplificado de estudo, apresentado na Figura 5.12, e as principais zonas constituintes: a duna, com crista à cota +14 m ZH e base à cota +4 m ZH; a face da praia com topo à cota +4 m ZH e base ao nível do ZH; e perfil submerso, com início ao nível do ZH.

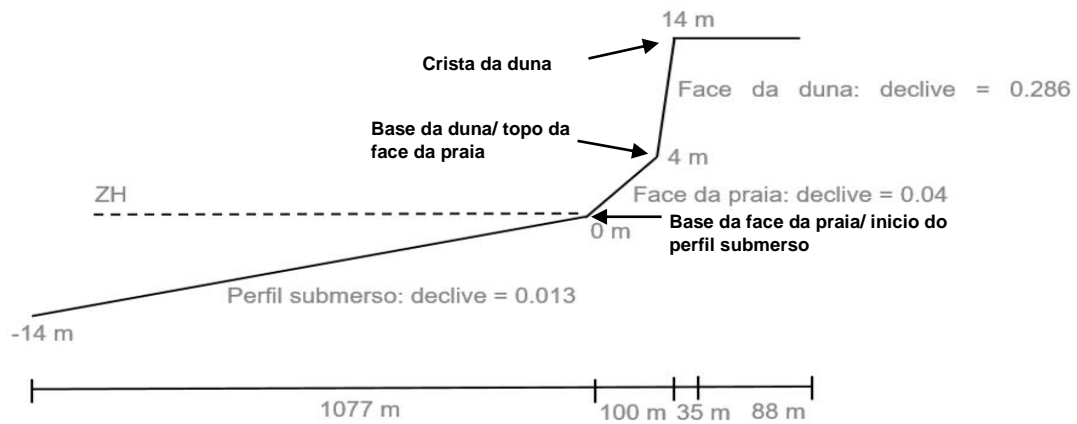
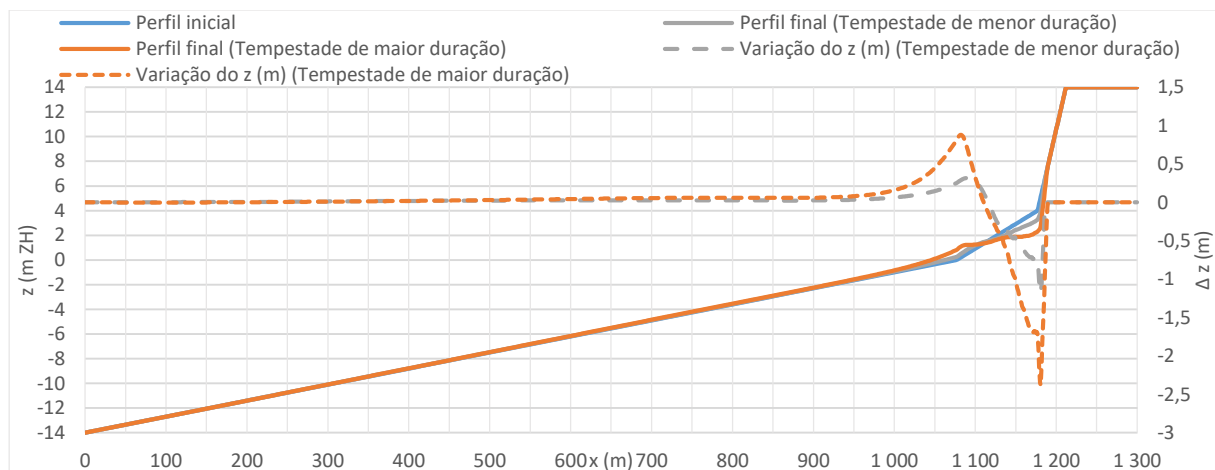


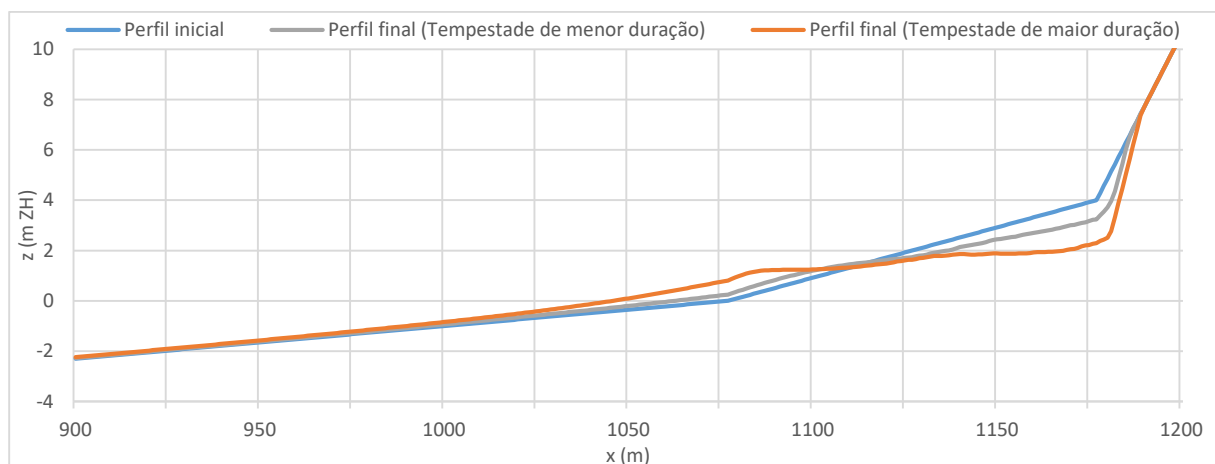
Figura 5.12 – Configuração do perfil simplificado e designação das principais zonas constituintes.

Tempestades de baixa potência

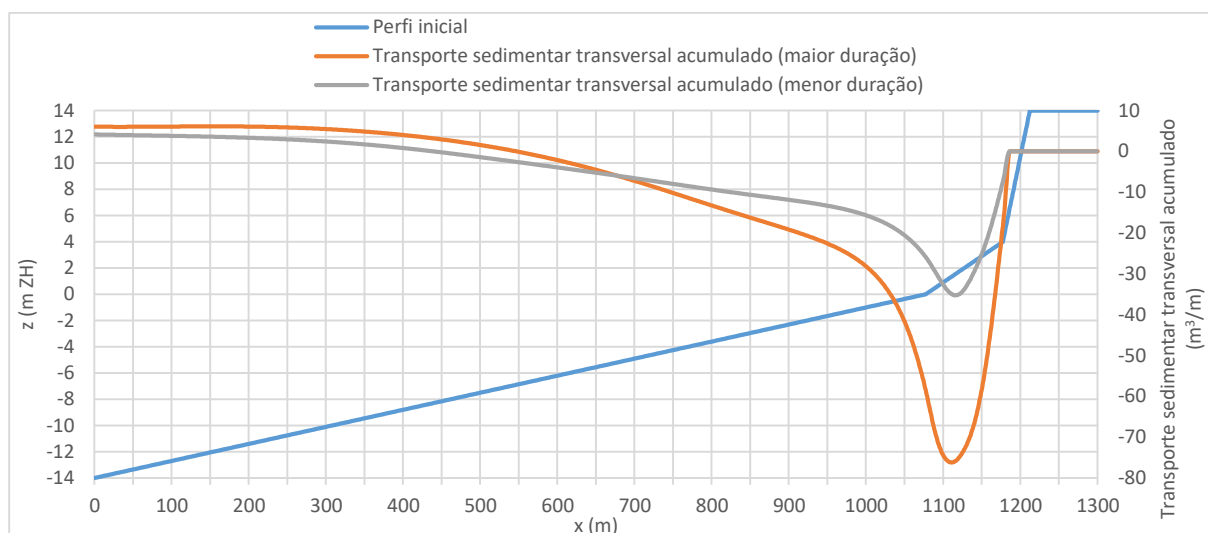
A Figura 5.13 apresenta a evolução do perfil transversal de praia e do transporte sedimentar acumulado para as condições de tempestades de menor e maior duração para a gama de potências baixa.



a)



b)



c)

Figura 5.13 – Evolução do perfil transversal simplificado do caso de estudo para as tempestades de menor duração (42h) e maior duração (108h) de baixa potência: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.

Na Tabela 5.3 apresentam-se todos os valores relativos a volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e, relativamente à duna, os volumes de erosão da mesma e o rebaixamento e recuo da base.

Tabela 5.3 – Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (42h) e maior duração (108h) de baixa potência.

	Tempestades de baixa potência			
	Tempestade de maior duração		Tempestade de menor duração	
	Acreção	Erosão	Acreção	Erosão
Volume (m^3/m)	82	-76	39	-35
Balanço sedimentar (m^3/m)	6		4	
	Duna			
Erosão dunar² (m^3/m)	-19		-8	
Recuo da base da duna (m)	-6		-4	
Rebaixamento da base da duna (m)	-1,7		-0,8	

² O termo erosão dunar está associado à perda total de volume desde a crista até à base da duna.

Da análise dos gráficos da Figura 5.13 pode ver-se que:

Para ambas as tempestades:

- Existe uma zona de variação do perfil inicial provocada pela mobilização e deslocamento de sedimentos que abrange a totalidade da face da praia, o topo do perfil submerso e a face frontal da duna, nomeadamente a base. Extensão da zona: 200 m, compreendida entre as elevações: -1 m ZH e +8 m ZH. Esta zona apresenta uma maior variação para a tempestade de maior duração.
- O processo erosivo inicia-se com erosão da face da duna à cota +8 m ZH aos 1180 m, provocando rebaixamento do perfil até aos 1110 m, zona da face da praia.
- Simultaneamente ocorre transporte e deposição dos sedimentos erodidos na zona adjacente (do lado do mar) ao ponto de abcissa 1110 m, zona da face da praia e topo do perfil submerso, até aos 1000 m.
- Há formação de barra litoral nesta extensão, com crista aos +1 m ZH e extensão até -2 m ZH/ZH para a tempestade de maior/menor duração, respetivamente.
- Na tempestade de maior duração há tendência para formação de uma berma na face da praia.
- A face frontal da duna sofre erosão, particularmente na sua base.

Da análise da Tabela 5.3 é possível verificar que:

Para a tempestade de maior duração:

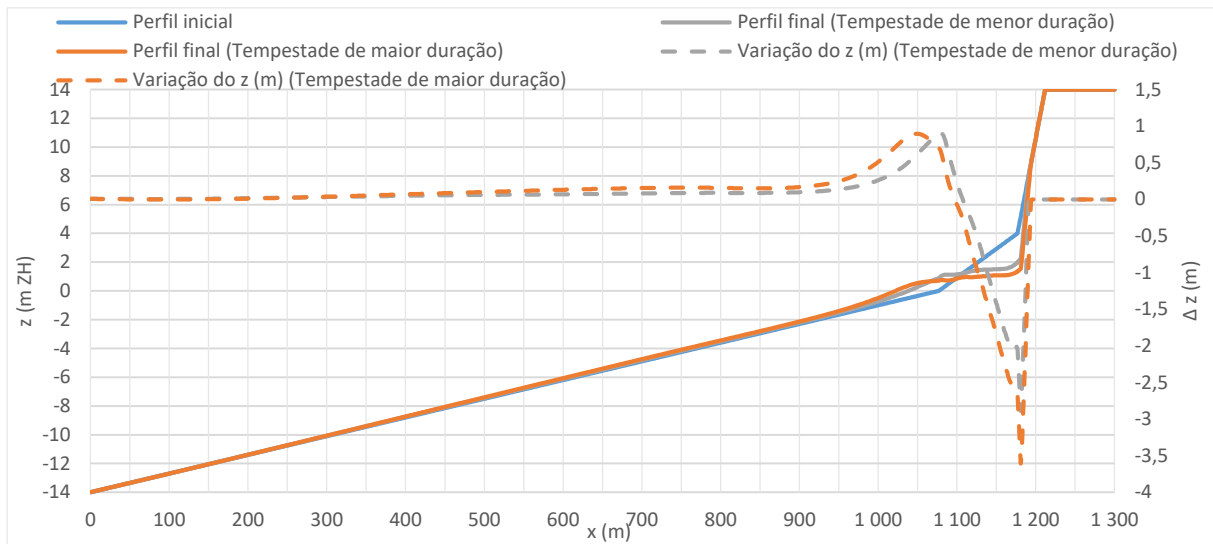
- Os volumes de acreção e erosão são de 82 m³/m e 76 m³/m, respetivamente, praticamente o dobro dos valores obtidos para a tempestade de menor duração.
- O balanço sedimentar é positivo.
- A erosão dunar é cerca de 25% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 1,7 m e 6 m, respetivamente.

Para a tempestade de menor duração:

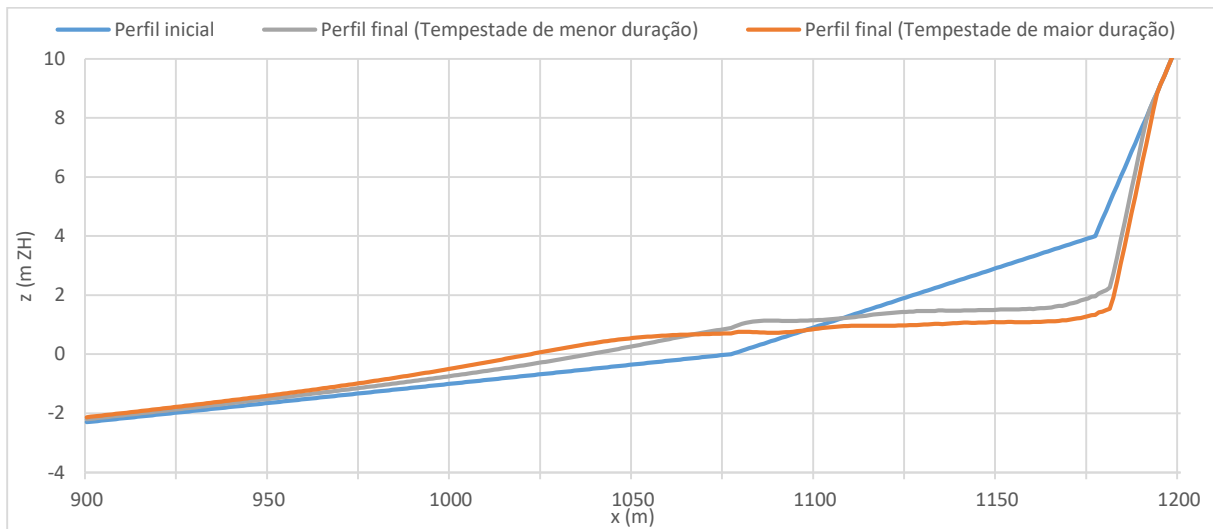
- Os volumes parciais de acreção e erosão são de 39 m³/m e 35 m³/m, respetivamente.
- O balanço sedimentar é positivo.
- A erosão dunar é cerca de 22% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 0,8 m e 4 m, respetivamente.

Tempestades de potência média

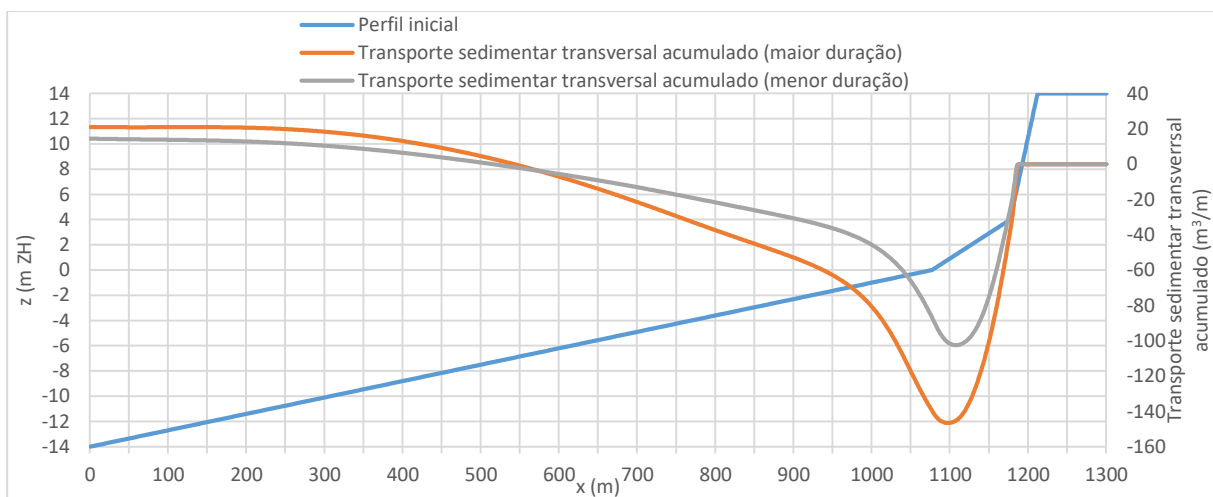
A Figura 5.14 apresenta a evolução do perfil transversal de praia e do transporte sedimentar acumulado para as condições de tempestades de menor e maior duração para a gama de potências média.



a)



b)



c)

Figura 5.14 - Evolução do perfil transversal simplificado do caso de estudo para as tempestades de menor duração (150h) e maior duração (258h) de potência média: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção) b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.

Na Tabela 5.4 apresentam-se todos os valores relativos a volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e, relativamente à duna, os volumes de erosão da mesma e o rebaixamento e recuo da base.

Tabela 5.4 - Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (150h) e maior duração (258h) de potência média.

	Tempestades de potência média			
	Tempestade de maior duração		Tempestade de menor duração	
	Acreção	Erosão	Acreção	Erosão
Volume (m³/m)	168	-147	117	-103
Balanço sedimentar (m³/m)	21		14	
	Duna			
Erosão dunar (m³/m)	-39		-26	
Recuo da base da duna (m)	-9		-7	
Rebaixamento da base da duna (m)	-2,7		-2	

Da análise da Figura 5.14 pode ver-se que:

Para ambas as tempestades:

- A zona de variação do perfil inicial provocada pela mobilização e deslocamento de sedimentos abrange a totalidade da face da praia, o topo do perfil submerso e a face frontal da duna, nomeadamente a sua base. Extensão da zona: 300 m, compreendida entre as elevações: -2 m ZH e +9 m ZH. As zonas de acreção e erosão apresentam uma maior variação para a tempestade de maior duração.
- O processo erosivo inicia-se com erosão da face da duna à cota +9 m ZH aos 1200 m, provocando rebaixamento do perfil até aos 1100 m, zona da face da praia.
- Simultaneamente ocorre transporte e deposição dos sedimentos erodidos na zona adjacente (do lado do mar) ao ponto de abcissa 1100 m, zona da face da praia e topo do perfil submerso, até aos 900 m.
- Há formação de barra litoral nesta extensão, com crista aos +1 m ZH e extensão até -2 m ZH.
- Há formação de uma berma na face da praia para ambas as tempestades.
- A face frontal da duna sofre erosão e fica escarpada.

Da análise da Tabela 5.4 é possível verificar que:

Para a tempestade de maior duração:

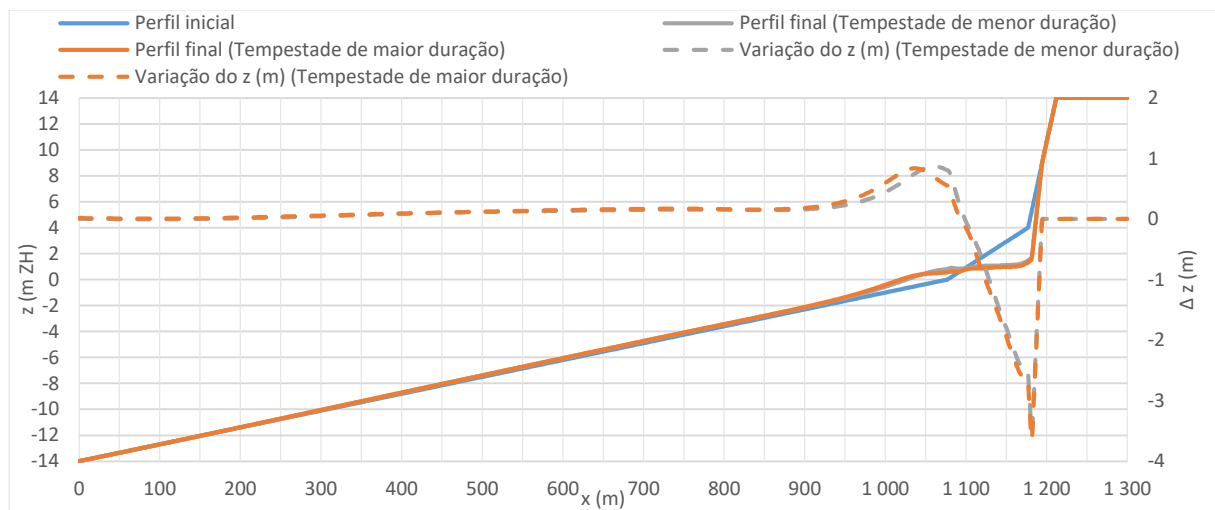
- Os volumes de acreção e erosão são de 168 m³/m e 147 m³/m, respetivamente, valores superiores aos obtidos para a tempestade de menor duração.
- O balanço sedimentar é positivo.
- A erosão dunar é cerca de 26% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 2,7 m e 9 m, respetivamente.

Para a tempestade de menor duração:

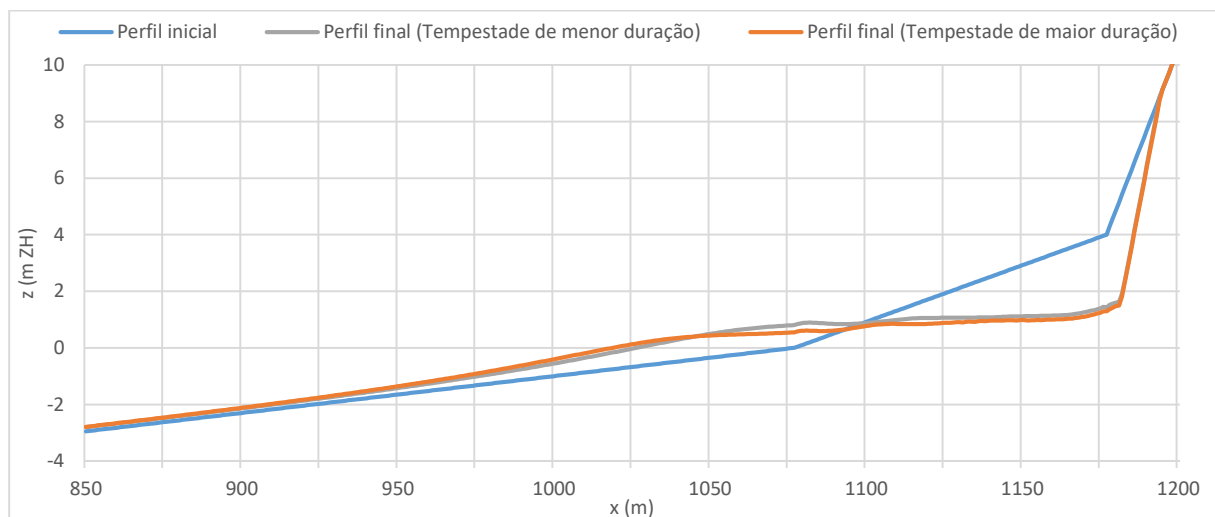
- Os volumes de acreção e erosão são de $117 \text{ m}^3/\text{m}$ e $103 \text{ m}^3/\text{m}$.
- O balanço sedimentar é positivo.
- A erosão dunar é cerca de 26% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 2 m e 7 m, respectivamente.

Tempestades de potência elevada

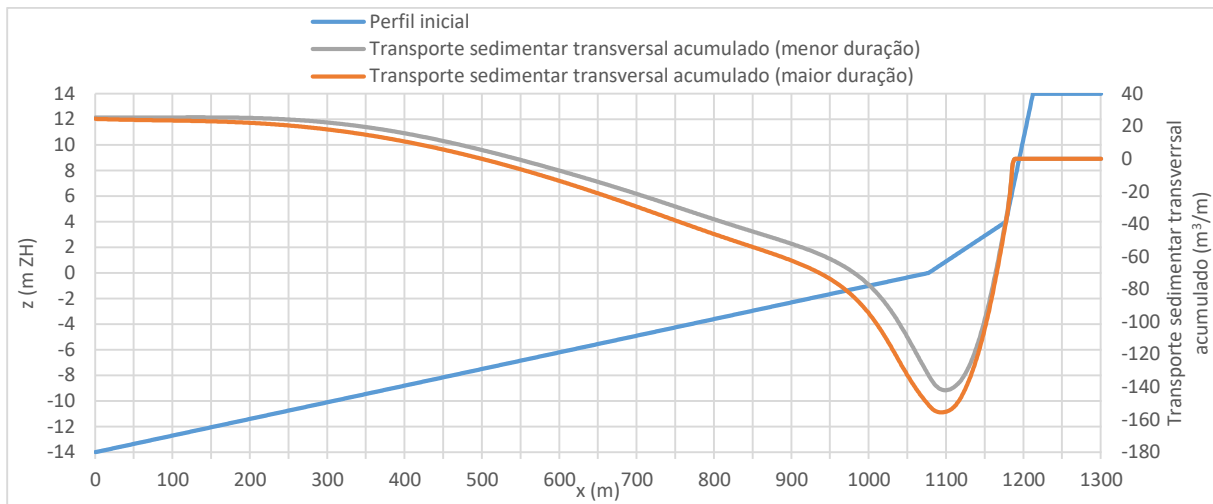
A Figura 5.15 apresenta a evolução do perfil transversal de praia para as condições de tempestades de menor e maior duração para a gama de potências elevada. É possível observar a variação da elevação ocorrida e o transporte transversal acumulado durante cada tempestade.



a)



b)



c)

Figura 5.15 - Evolução do perfil transversal simplificado do caso de estudo para as tempestades de menor duração (228h) e maior duração (306h) de potência elevada: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.

Na Tabela 5.5 apresentam-se todos os valores relativos a volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e, relativamente à duna, os volumes de erosão da mesma e o rebaixamento e recuo da base.

Tabela 5.5 - Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (228h) e maior duração (306h) de potência elevada.

	Tempestades de potência elevada			
	Tempestade de maior duração		Tempestade de menor duração	
	Acreção	Erosão	Acreção	Erosão
Volume (m³/m)	180	-156	168	-142
Balanço sedimentar (m³/m)	25		25	
	Duna			
Erosão dunar (m³/m)	-40		-38	
Recuo da base da duna (m)	-9		-9	
Rebaixamento da base da duna (m)	-2,7		-2,6	

Da análise da Figura 5.15 pode ver-se que:

Para ambas as tempestades:

- A zona de variação do perfil inicial provocada pela mobilização e deslocamento de sedimentos abrange a totalidade da face da praia, o topo do perfil submerso e a face frontal da duna. Extensão da zona: 350 m, compreendida entre as elevações: -3 m ZH e +10 m ZH. As zonas de acreção e erosão apresentam uma maior variação para a tempestade de maior duração.
- O processo erosivo inicia-se com erosão da face da duna à cota +10 m ZH aos 1200 m, provocando rebaixamento do perfil até aos 1100 m, zona da face da praia.

- Simultaneamente ocorre transporte e deposição dos sedimentos erodidos na zona adjacente (do lado do mar) ao ponto de abcissa 1100 m, zona da face da praia e topo do perfil submerso, até aos 850 m.
- Há formação de barra litoral nesta extensão, com crista aos +1 m ZH e extensão até -2 m ZH.
- Há formação de uma berma na face da praia para ambas as tempestades.
- A face frontal da duna sofre erosão e fica escarpada.

Da análise da Tabela 5.5 é possível verificar:

Para a tempestade de maior duração:

- Os volumes de acreção e erosão são de 180 m³/m e 156 m³/m, respetivamente, valores superiores aos obtidos para a tempestade de menor duração.
- O balanço sedimentar é positivo.
- A erosão dunar é cerca de 26% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 2,7 m e 9 m, respetivamente.

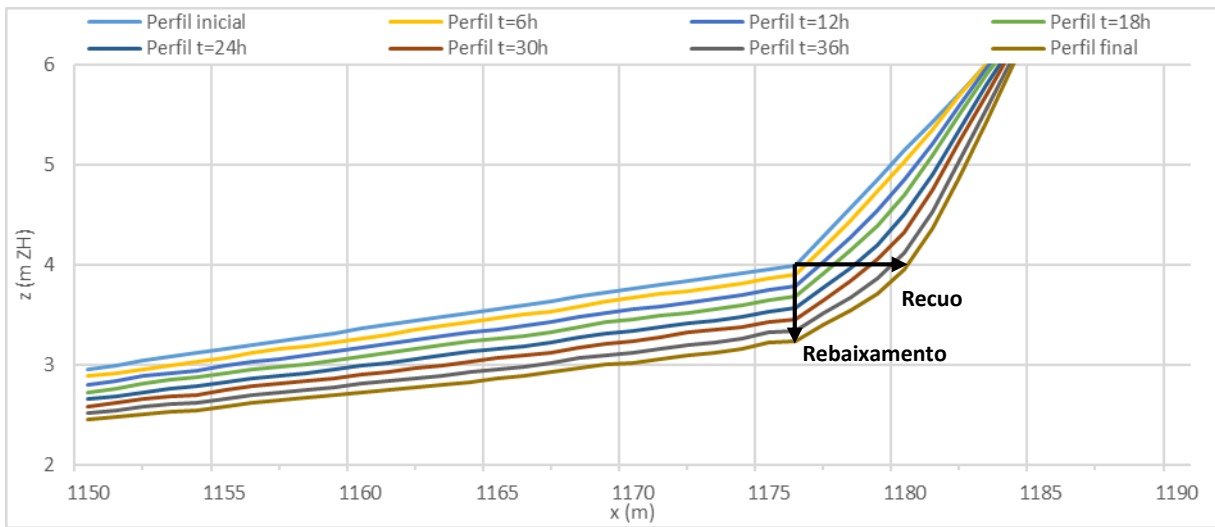
Para a tempestade de menor duração:

- Os volumes parciais de acreção e erosão são de 168 m³/m e 142 m³/m, respetivamente.
- O balanço sedimentar positivo.
- A erosão dunar é cerca de 27% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 2,6 m e 9 m, respetivamente.

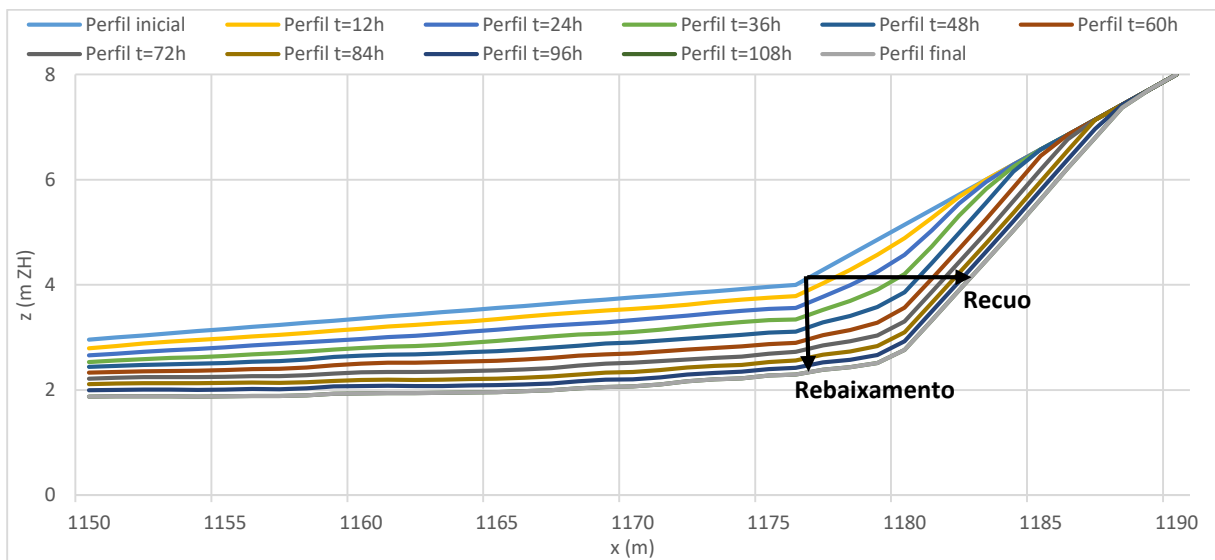
Evolução do perfil e da taxa de transporte na base da duna

Esta etapa consiste em analisar a evolução do perfil e da taxa de transporte durante as tempestades marítimas para compreender se o transporte sedimentar é superior nas primeiras horas ou se não revela variação significativa ao longo da tempestade. A título de exemplo, foram analisados estes dois parâmetros, para todas as tempestades, no ponto que se considerou ser de maior interesse: ponto coincidente com a base da duna, onde se verificou significativa variação do perfil durante a tempestade, conduzindo ao seu recuo e rebaixamento.

Tempestades de potência baixa



a)



b)

Figura 5.16 - Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para a) Tempestade de menor duração (42h) e b) Tempestade de maior duração (108h).

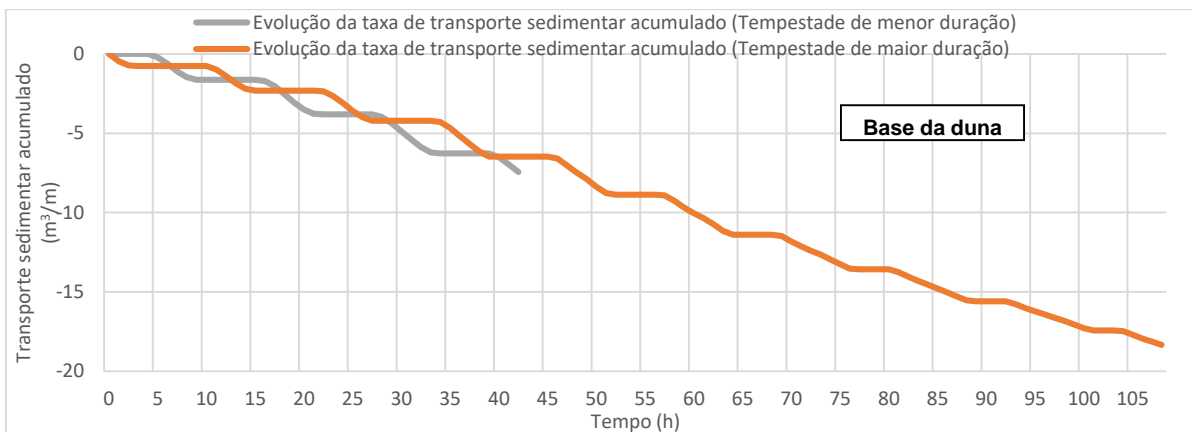
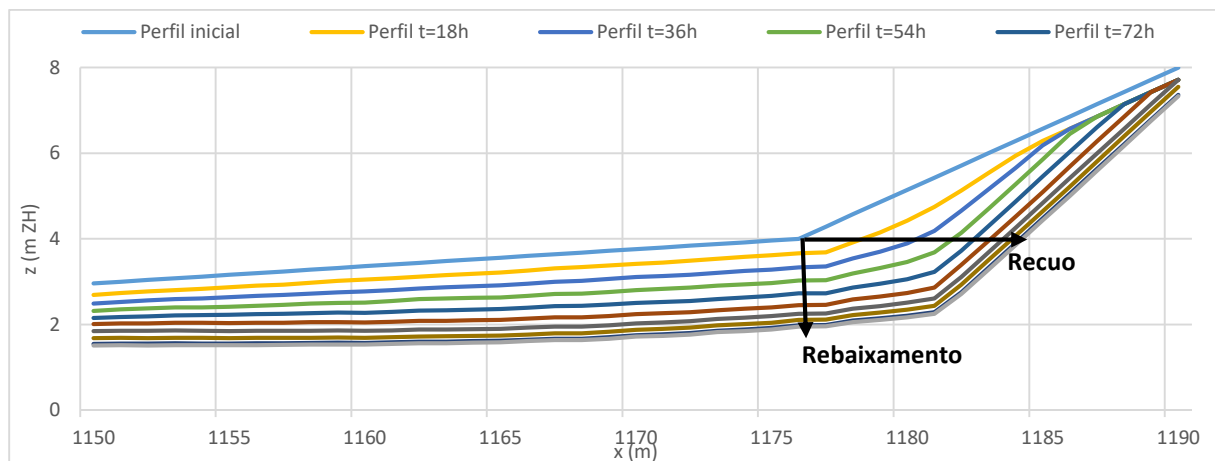


Figura 5.17 – Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de baixa potência de menor (48h) e maior duração (108h).

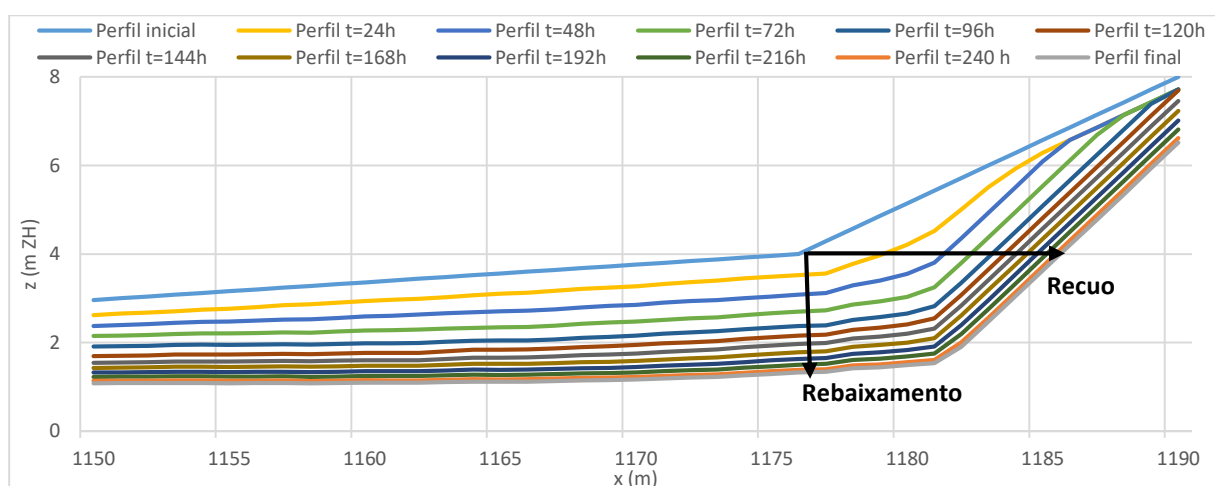
Da Figura 5.16 a) é possível verificar que, para a tempestade de menor duração, a evolução do perfil no ponto coincidente com a base da duna é praticamente uniforme ao longo da tempestade. Porém, a Figura 5.16 b), relativa à tempestade de maior duração de potência baixa, indica uma diminuição progressiva na variação do perfil, i.e., do transporte sedimentar durante a tempestade.

Da Figura 5.17 conclui-se que a taxa de transporte sedimentar evolui de forma semelhante em ambas as tempestades, embora seja maior na tempestade de menor duração. Facto correspondente ao esperado, uma vez que as tempestades possuem potência semelhante e tempestades com menor duração implicam ondas de maior altura e maior capacidade energética para efetuar o transporte de sedimentos. Observa-se que, para ambas as tempestades, a evolução da taxa de transporte apresenta “patamares” de duração decrescente que indicam fases de inexistência de transporte. Os “patamares” correspondem a períodos em que o nível do mar não atingiu a base da duna. Cada vez que este ponto é atingido pelas ondas, ocorre rebaixamento do perfil, aumentando a sua exposição a esta força atuante na vez seguinte. Isso explica o fato da duração dos “patamares” decrescer ao longo da tempestade.

Tempestades de potência média



a)



b)

Figura 5.18 - Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de potência média de a) menor duração (150h) e b) maior duração (258h).

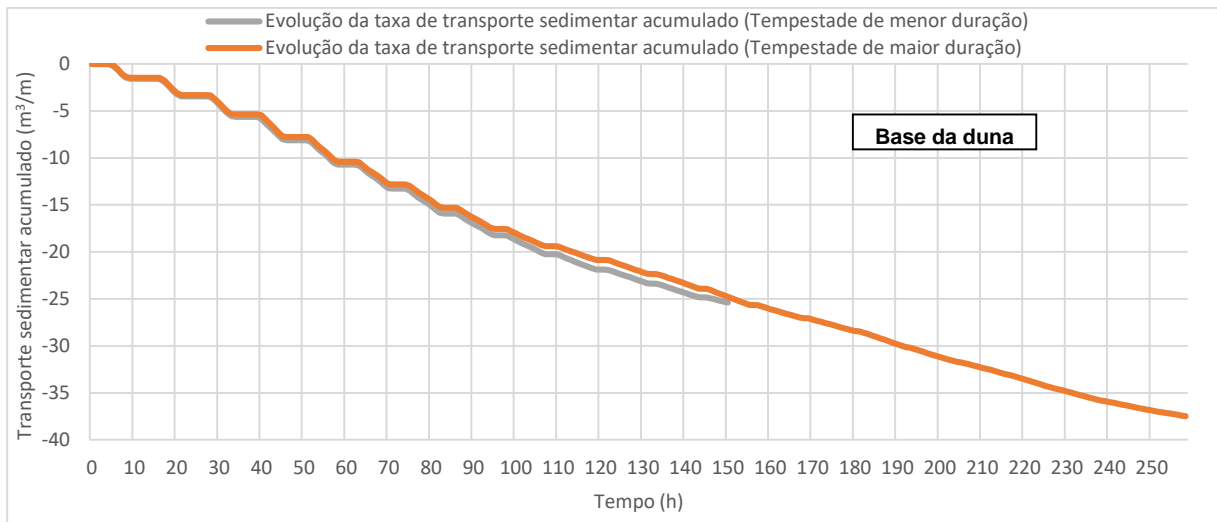
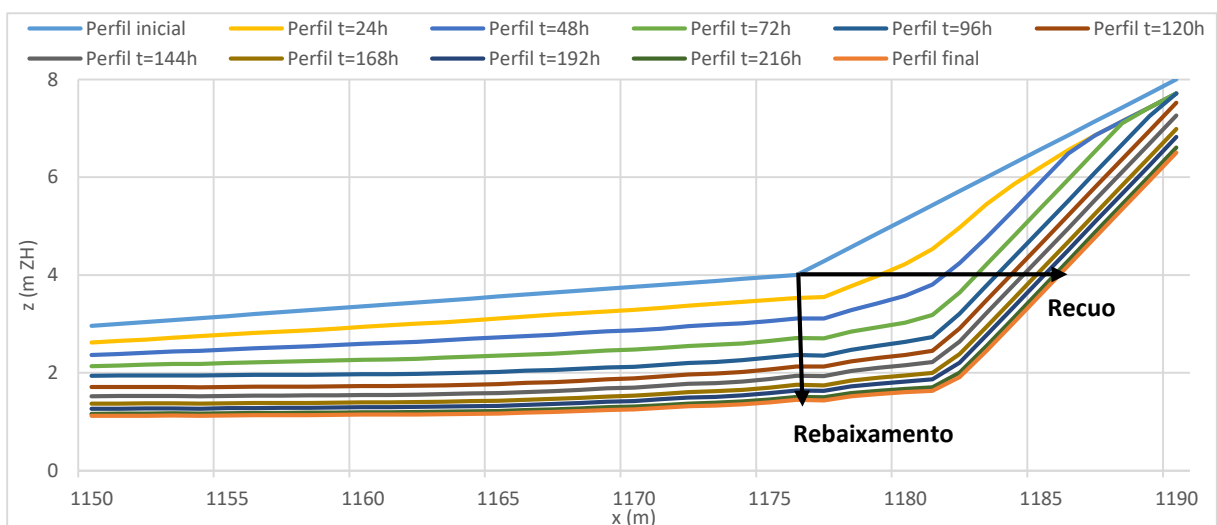


Figura 5.19 - Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de potência média de menor (150h) e maior duração (258h).

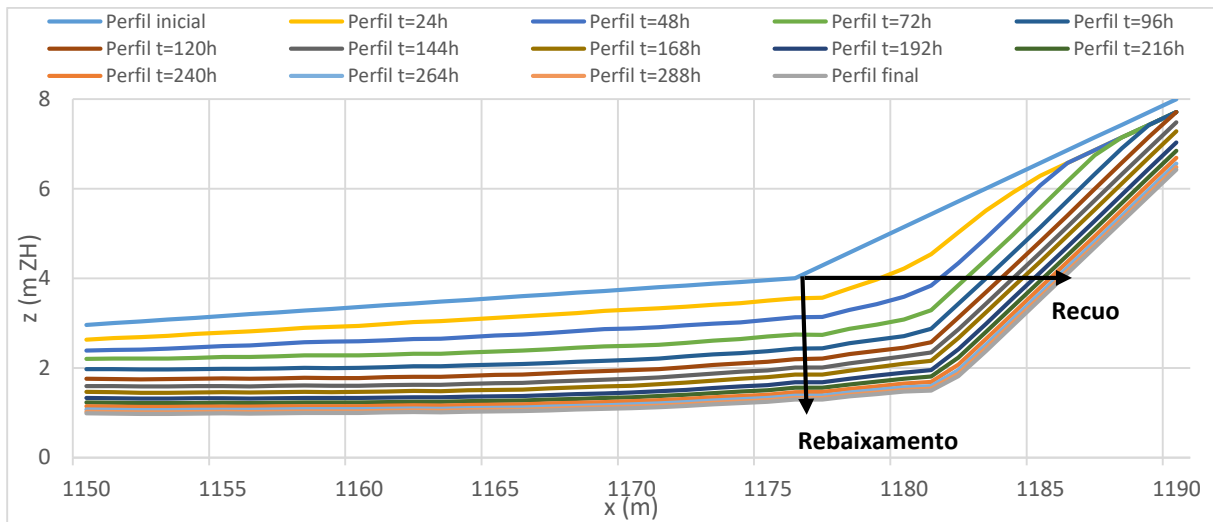
Da análise da Figura 5.18 é possível verificar que, para ambas as tempestades de menor e maior duração, a variação do perfil no ponto coincidente com a base da duna tende a diminuir ao longo da tempestade, revelando-se muito reduzida nas últimas horas de tempestade.

Da Figura 5.19 conclui-se que a taxa de transporte sedimentar evolui de forma semelhante nas primeiras horas para ambas as tempestades, revelando-se ligeiramente superior na tempestade de menor duração. Conforme descrito para as tempestades de baixa potência, também aqui a evolução da taxa de transporte apresenta “patamares” nas primeiras horas de tempestade, i.e., períodos de inexistência de transporte e, a partir de um certo tempo (aproximadamente $t=110h$), verifica-se o aumento progressivo do transporte acumulado. A justificação é a apresentada para as tempestades de potência baixa. A taxa de transporte sedimentar tende a diminuir nas últimas horas de tempestade, indicando uma situação de estabilização ou menor transporte de sedimentos nas ultimas horas de ocorrência da tempestade, conforme concluído para a Figura 5.18.

Tempestades de potência elevada



a)



b)

Figura 5.20 - Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de potência elevada de a) menor duração (228h) e b) maior duração (306h).

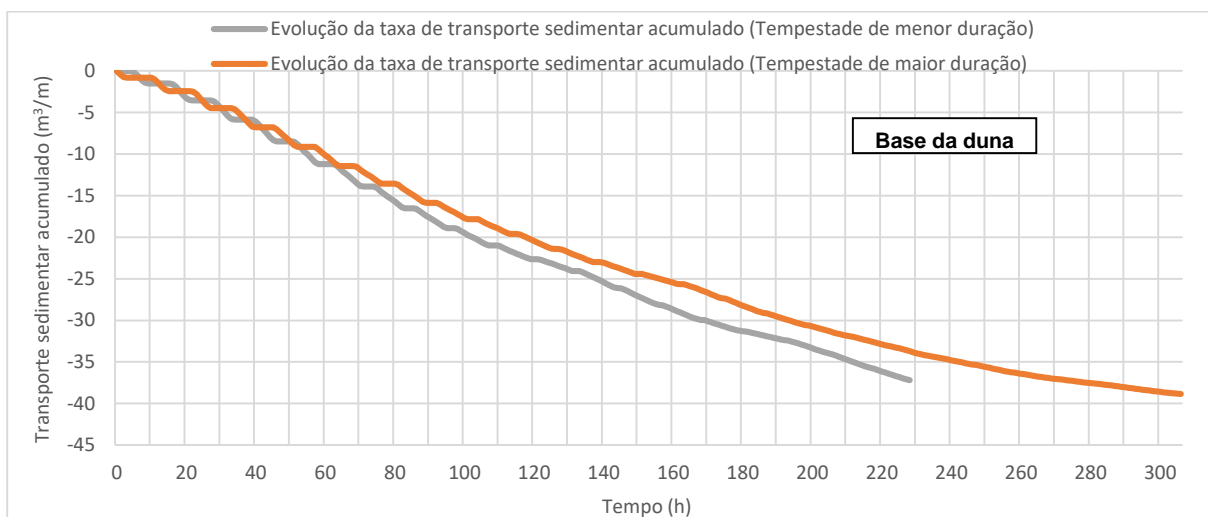


Figura 5.21 - Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de potência elevada de menor (228h) e maior duração (306h).

Da análise da Figura 5.20 é possível verificar que, para ambas as tempestades de menor e maior duração, a variação do perfil no ponto coincidente com a base da duna tende a diminuir ao longo da tempestade, sendo a variação muito reduzida nas últimas horas de tempestade.

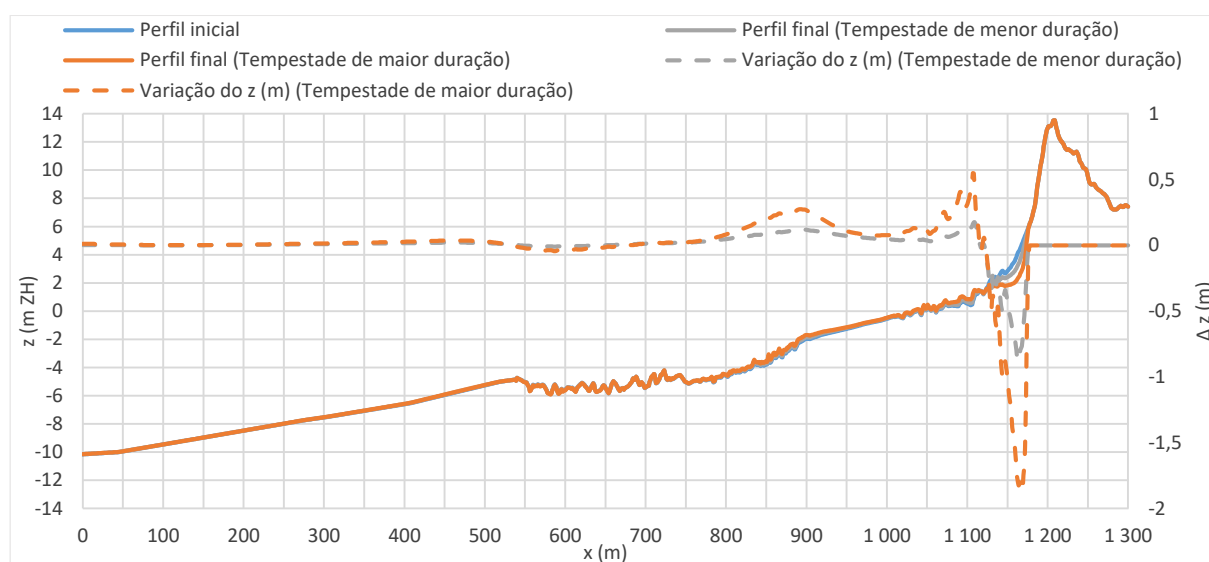
Da Figura 5.21 confirma-se o concluído para as tempestades de gama de potência baixa e média, i.e., que a taxa de transporte sedimentar evolui de forma semelhante para ambas as tempestades, revelando-se superior na tempestade de menor duração. Observa-se que, para ambas as tempestades, a taxa de transporte evolui mais rapidamente nas primeiras horas de tempestade, apresentando os referidos “patamares” e tende para a situação de estabilização ou menor transporte de sedimentos (aproximadamente a partir de $t=140h$).

5.7.2. Evolução do perfil P7 representativo da zona de estudo

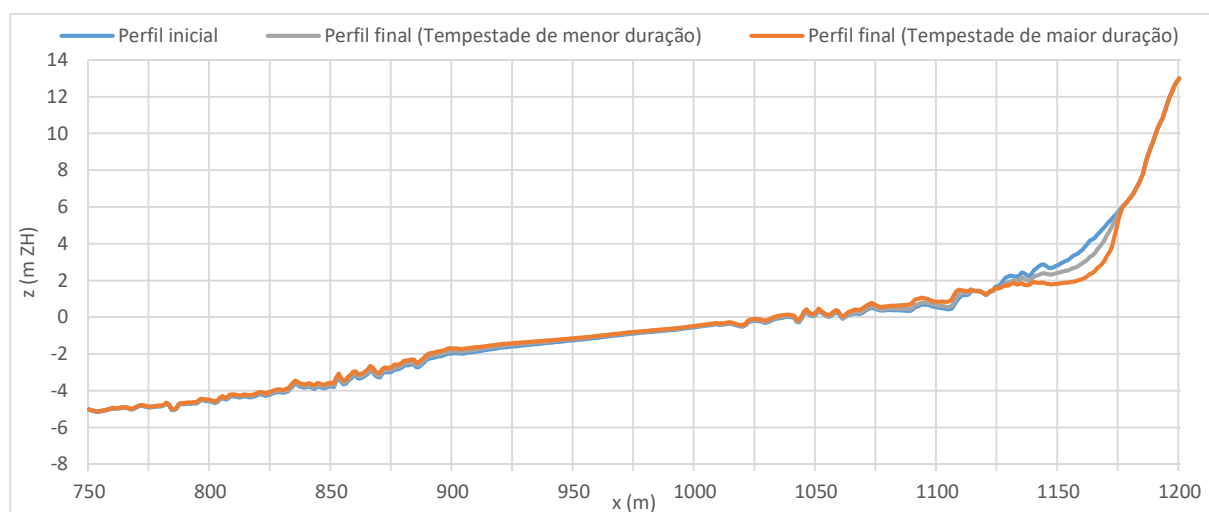
Foi feito o mesmo estudo, apresentado na secção 5.7.1., para o perfil P7 representativo da zona de estudo, com o intuito de perceber se o perfil utilizado é condicionante dos resultados obtidos. Para facilitar a comparação dos resultados dos dois perfis (simplificado e P7) admite-se, para o perfil P7, as mesmas elevações dos limites das três principais zonas constituintes do perfil de praia, definidas anteriormente para o perfil simplificado. Assim, tem-se: a face da duna com início à cota +14 m ZH e fim à cota +4 m ZH; a face da praia com início à cota +4 m ZH e fim ao nível do ZH; e perfil submerso, com início ao nível do ZH.

Tempestades de potência baixa

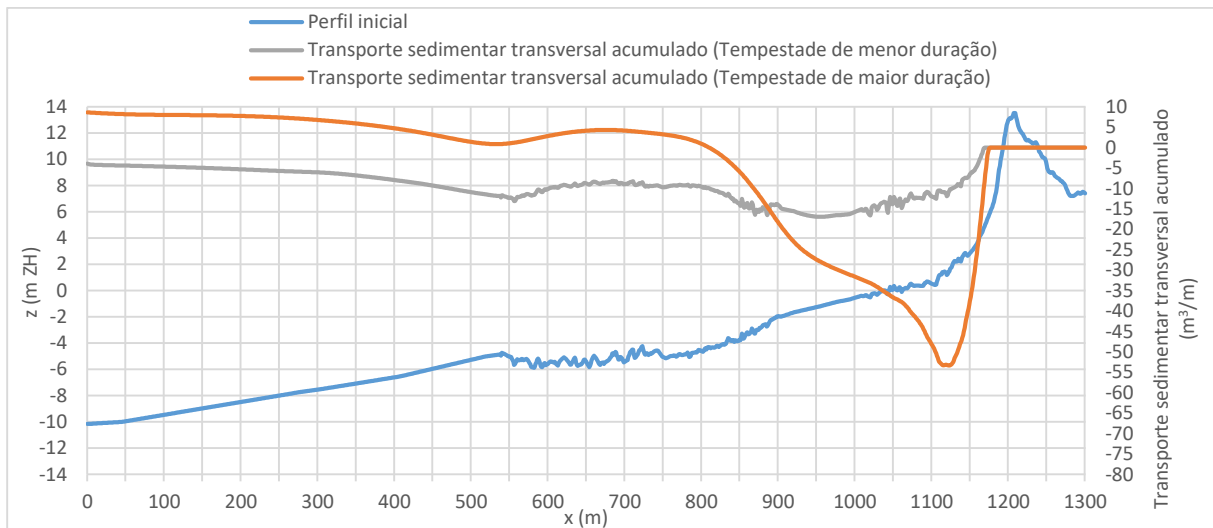
A Figura 5.22 apresenta a evolução do perfil transversal de praia para as condições de tempestades de menor e maior duração para a gama de potências baixa. É possível observar a variação da elevação ocorrida e o transporte transversal acumulado durante cada tempestade.



a)



b)



c)

Figura 5.22 - Evolução do perfil transversal P7 representativo do caso de estudo para as tempestades de menor duração (42 h) e maior duração (108 h) de baixa potência: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.

Na Tabela 5.6 apresentam-se todos os valores relativos a volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e, relativamente à duna, os volumes de erosão da mesma e o rebaixamento e recuo da base.

Tabela 5.6 - Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (42 h) e maior duração (108 h) de baixa potência.

	Tempestades de baixa potência			
	Tempestade de maior duração		Tempestade de menor duração	
	Acreção	Erosão	Acreção	Erosão
Volume (m^3/m)	66	-57	31	-25
Balanço sedimentar (m^3/m)	9		6	
	Duna			
Erosão dunar (m^3/m)	-22		-9	
Recuo da base da duna (m)	-10		-6	
Rebaixamento da base da duna (m)	-1,8		-0,9	

Da análise dos gráficos da Figura 5.22 pode ver-se que:

Para ambas as tempestades:

- Existe uma zona de maior variação do perfil inicial provocada pela mobilização e deslocamento de sedimentos que abrange a totalidade da face da praia e a base da duna. Extensão da zona: 300 m, compreendida entre as elevações: ZH e +6 m ZH. Esta zona apresenta uma maior variação para a tempestade de maior duração.
- O processo erosivo inicia-se com erosão da face da duna à cota +6 m ZH aos 1175 m, provocando rebaixamento do perfil até aos 1125 m, zona da face da praia.

- Simultaneamente ocorre transporte e deposição, de distribuição praticamente uniforme, dos sedimentos erodidos na zona adjacente (do lado do mar) ao ponto de abcissa 1125 m, zona da face da praia e perfil submerso.
- A face frontal da duna sofre erosão, particularmente na sua base, mantendo-se a posição da crista.

Da análise da Tabela 5.6 é possível verificar que:

Para a tempestade de maior duração:

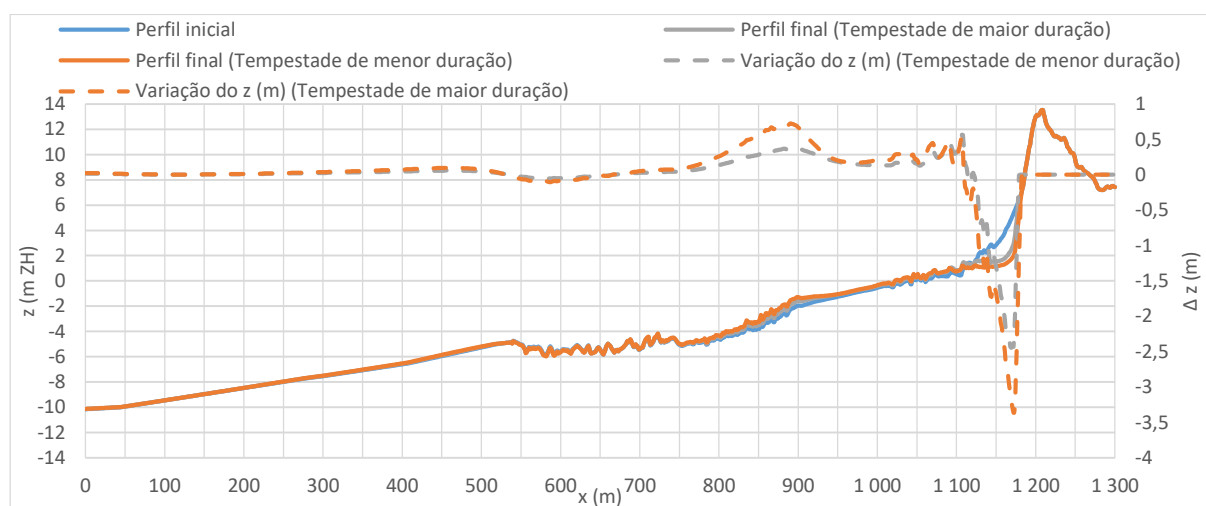
- Os volumes de erosão e acreção são de 66 m³/m e 57 m³/m, respetivamente, praticamente o dobro dos valores obtidos para a tempestade de menor duração.
- O balanço sedimentar é positivo.
- A erosão dunar é cerca de 39% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 1,8 m e 10 m, respetivamente.

Para a tempestade de menor duração:

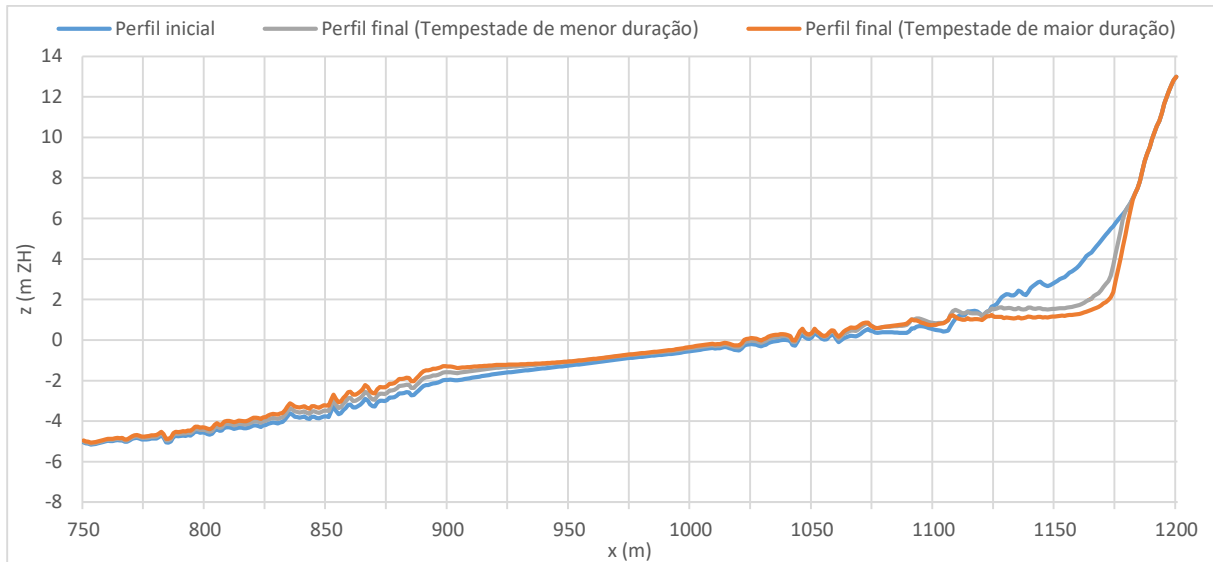
- Os volumes de erosão e acreção são de 31 m³/m e 25 m³/m
- O balanço sedimentar positivo.
- A erosão dunar é cerca de 35% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 0,9 m e 6 m, respetivamente.

Tempestades de potência média

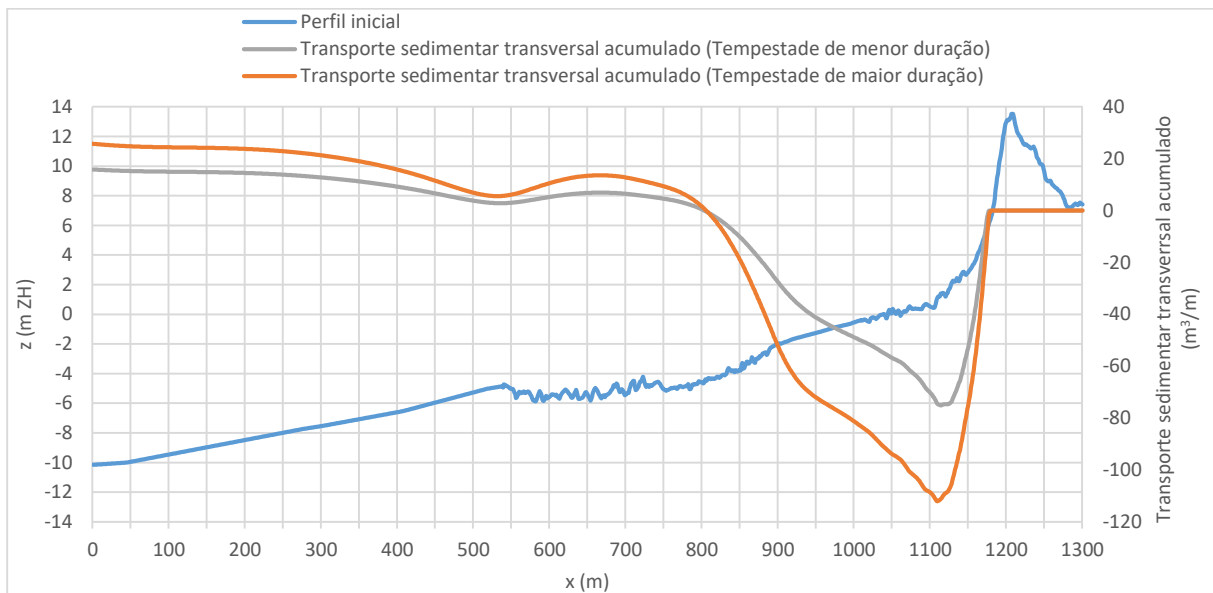
A Figura 5.23 apresenta a evolução do perfil transversal de praia para as condições de tempestades de menor e maior duração para a gama de potências média. É possível observar a variação da elevação ocorrida e o transporte transversal acumulado durante cada tempestade.



a)



b)



c)

Figura 5.23 - Evolução do perfil transversal P7 representativo do caso de estudo para as tempestades de menor duração (150 h) e maior duração (258 h) de potência média: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.

Na Tabela 5.7 apresentam-se todos os valores relativos a volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e, relativamente à duna, os volumes de erosão da mesma e o rebaixamento e recuo da base.

Tabela 5.7 - Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (150h) e maior duração (258h) de potência média.

	Tempestades de potência média			
	Tempestade de maior duração		Tempestade de menor duração	
	Acreção	Erosão	Acreção	Erosão
Volume (m³/m)	146	-120	95	-79
Balanço sedimentar (m³/m)	26		16	
	Duna			
Erosão dunar (m³/m)	-51		-34	
Recuo da base da duna (m)	-15		-13	
Rebaixamento da base da duna (m)	-2,6		-2,2	

Da análise dos gráficos da Figura 5.23 pode ver-se que:

Para ambas as tempestades:

- Existe uma zona de variação do perfil inicial provocada pela mobilização e deslocamento de sedimentos que abrange a totalidade da face da praia, o topo do perfil submerso e a face da duna. Extensão da zona: 400/450 m, compreendida entre as elevações: -5 m ZH e +8 m ZH. Esta zona apresenta uma maior variação para a tempestade de maior duração.
- O processo erosivo inicia-se com erosão da face da duna à cota +8 m ZH aos 1180 m, provocando rebaixamento do perfil até aos 1120 m, zona da face da praia.
- Simultaneamente ocorre transporte e deposição, praticamente uniforme ao longo do perfil, dos sedimentos erodidos, com especial tendência para formação de barra na zona adjacente (do lado do mar) ao ponto de abcissa 1125 m, zona da face da praia, e zona de fossa do perfil submerso adjacente ao ponto de abcissa 950 m.
- Há tendência para formação de uma berma na face da praia, entre os pontos de abcissa 1050 m e 1175 m, para ambas as tempestades.
- A face frontal da duna sofre erosão, particularmente na sua base, mantendo-se a posição da crista.

Da análise da Tabela 5.7 é possível verificar que:

Para a tempestade de maior duração:

- Os volumes de acreção e erosão são de 146 m³/m e 120 m³/m, respetivamente, valores superiores aos obtidos para a tempestade de menor duração.
- O balanço sedimentar é positivo.
- A erosão dunar é cerca de 43% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 2,6 m e 15 m, respetivamente.

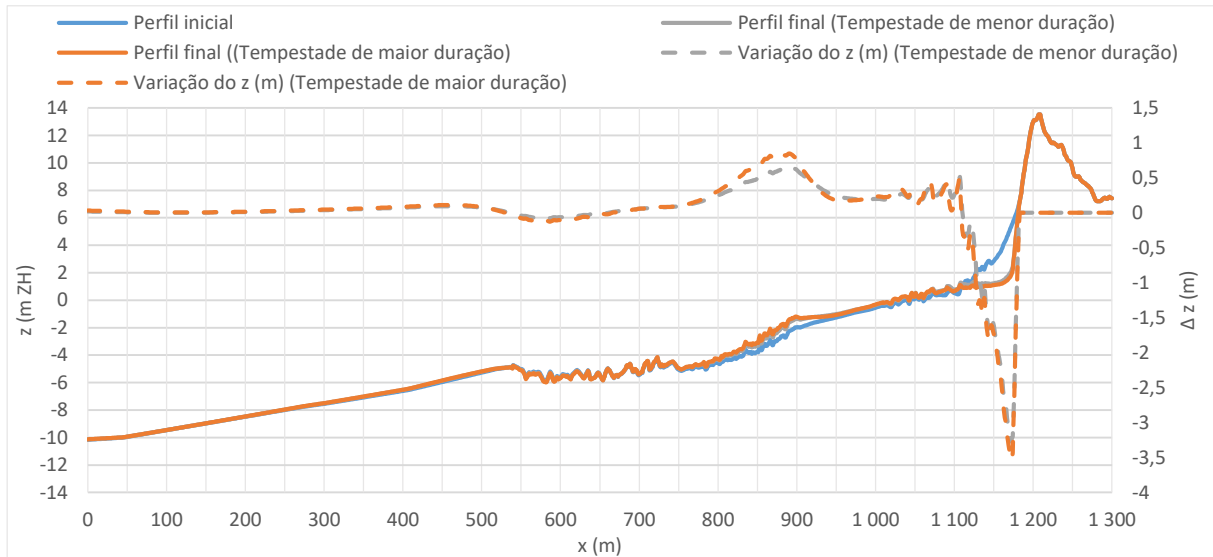
Para a tempestade de menor duração:

- Os volumes de acreção e erosão são de 95 m³/m e 79 m³/m, respetivamente.
- O balanço sedimentar positivo.

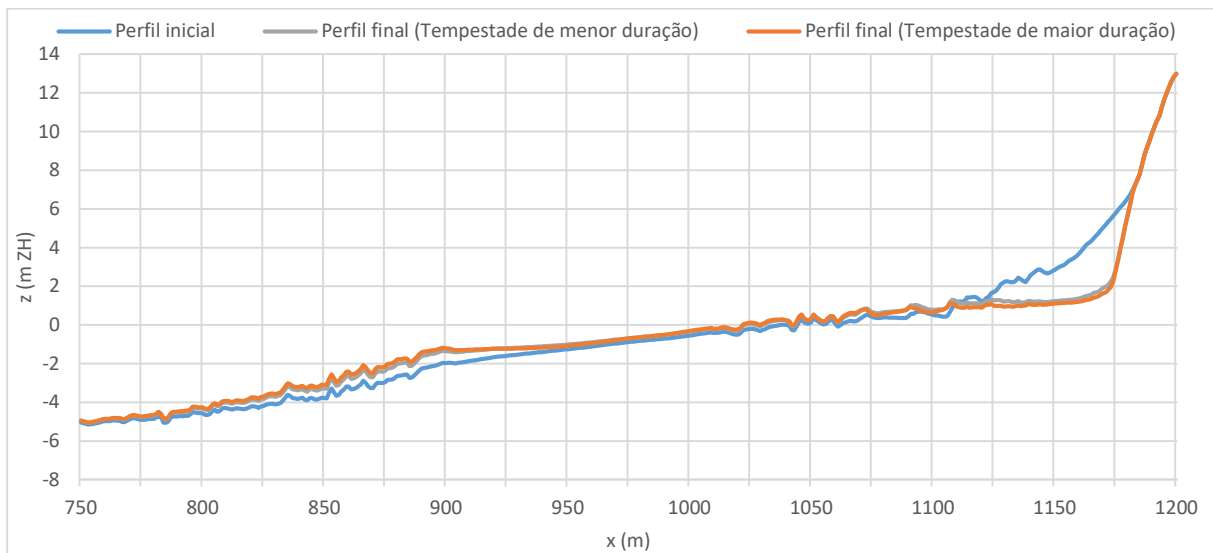
- A erosão dunar é cerca de 42% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 2,2 m e 13 m, respetivamente.

Tempestades de potência elevada

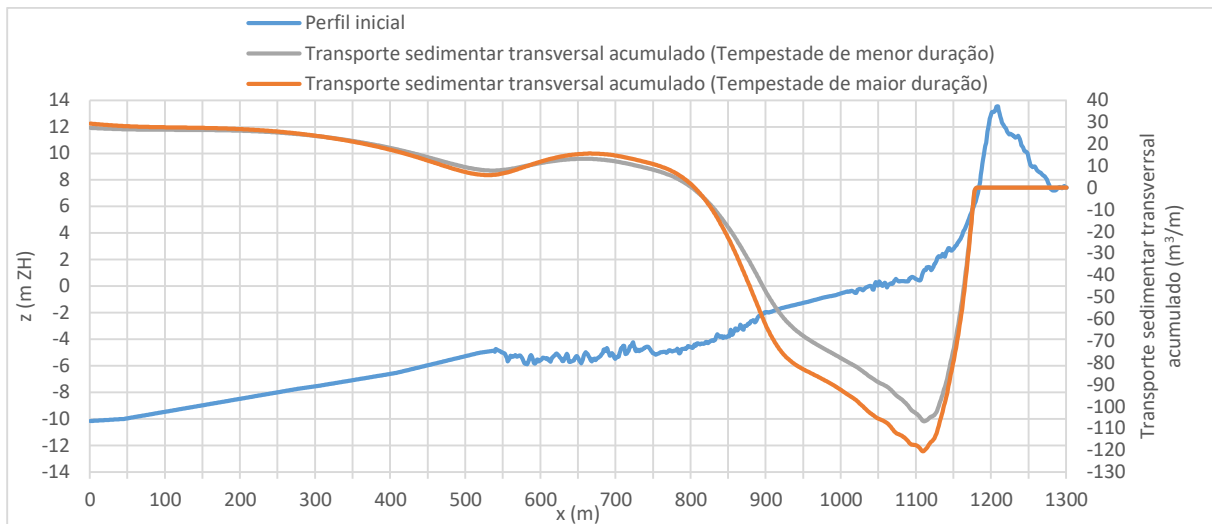
A Figura 5.24 apresenta a evolução do perfil transversal de praia para as condições de tempestades de menor e maior duração para a gama de potências elevada. É possível observar a variação da elevação ocorrida e o transporte transversal acumulado durante cada tempestade.



a)



b)



c)

Figura 5.24 - Evolução do perfil transversal simplificado do caso de estudo para as tempestades de menor duração (228h) e maior duração (306h) de potência elevada: a) perfil completo e variação do perfil ($\Delta z < 0$ erosão, $\Delta z > 0$ acreção), b) pormenor e c) transporte sedimentar transversal acumulado.

Na Tabela 5.8 apresentam-se todos os valores relativos a volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e, relativamente à duna, os volumes de erosão da mesma e o rebaixamento e recuo da base.

Tabela 5.8 - Volumes parciais de acreção e erosão, balanço sedimentar e erosão dunar obtida no final da tempestade, para as tempestades de menor duração (228h) e maior duração (306h) de potência elevada.

	Tempestades de potência elevada			
	Tempestade de maior duração		Tempestade de menor duração	
	Acreção	Erosão	Acreção	Erosão
Volume (m^3/m)	160	-130	140	-112
Balanço sedimentar (m^3/m)	29		27	
	Duna			
Erosão dunar (m^3/m)	-54		-50	
Recuo da base da duna (m)	-15		-15	
Rebaixamento da base da duna (m)	-2,7		-2,5	

Da análise dos gráficos da Figura 5.24 pode ver-se que:

Para ambas as tempestades:

- Existe uma zona de variação do perfil inicial provocada pela mobilização e deslocamento de sedimentos que abrange a totalidade da face da praia, o topo do perfil submerso e a face da duna. Extensão da zona: 400/450 m, compreendida entre as elevações: -5 m ZH e +8 m ZH. Esta zona apresenta uma maior variação para a tempestade de maior duração.
- O processo erosivo inicia-se com erosão da face da duna à cota +8 m ZH aos 1180 m, provocando rebaixamento do perfil até aos 1120 m, zona da face da praia.

- Simultaneamente ocorre transporte e deposição, praticamente uniforme ao longo do perfil, dos sedimentos erodidos, com especial tendência para formação de barra na zona adjacente (do lado do mar) ao ponto de abcissa 1125 m, zona da face da praia, e zona de fossa do perfil submerso adjacente ao ponto de abcissa 950 m.
- Há tendência para formação de uma berma na face da praia, entre os pontos de abcissa 1050 m e 1175 m, para ambas as tempestades.
- A face frontal da duna sofre erosão, particularmente na sua base.

Da análise da Tabela 5.8 é possível verificar que:

Para a tempestade de maior duração:

- Os volumes de acreção e erosão são de 160 m³/m e 130 m³/m, respetivamente, valores superiores aos obtidos para a tempestade de menor duração.
- O balanço sedimentar é positivo.
- A erosão dunar é cerca de 42% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 2,7 m e 15 m, respetivamente.

Para a tempestade de menor duração:

- Os volumes parciais de acreção e erosão são de 140 m³/m e 112 m³/m, respetivamente.
- O balanço sedimentar positivo.
- A erosão dunar é cerca de 45% do volume de erosão total. O rebaixamento e recuo da base da duna são de 2,5 m e 15 m, respetivamente.

Evolução do perfil e taxa de transporte na base da duna

À semelhança do efetuado para o perfil simplificado, procedeu-se à análise da evolução do perfil e taxa de transporte para as tempestades marítimas no ponto coincidente com a base da duna, onde se verificou significativa variação do perfil durante a tempestade. A análise efetuada encontra-se no Anexo B.

5.7.3. Comparação e discussão de resultados

Nesta secção é feita a comparação dos resultados obtidos para os perfis simplificado e P7 para as tempestades em análise e discussão dos resultados obtidos. Na Figura 5.25 encontram-se representados os perfis em análise, i.e., o perfil simplificado e o perfil P7, representativo da zona de estudo.

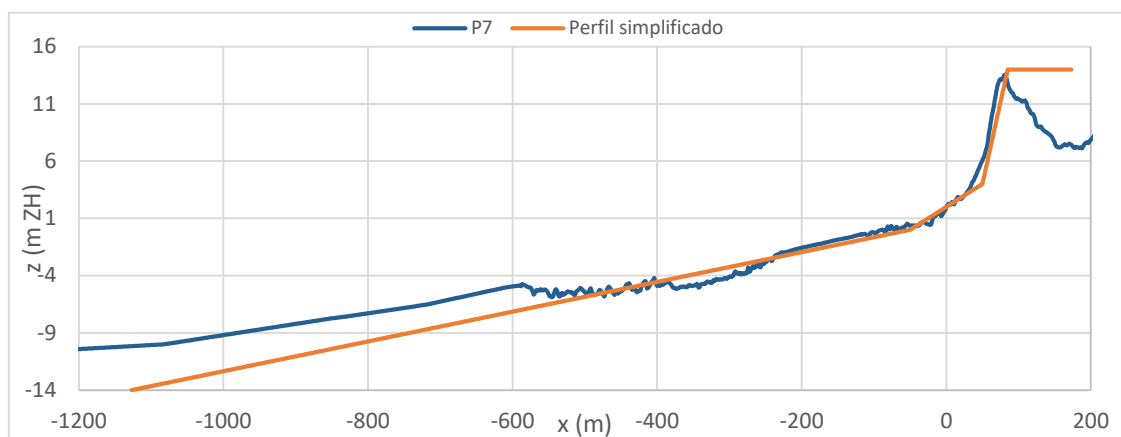


Figura 5.25 – Comparação dos perfis simplificado e perfil P7 representativo da zona de estudo.

Tempestades de potência baixa

A Tabela 5.9 apresenta a comparação dos resultados de volumes de erosão e acreção, assim como o volume de erosão da duna, recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de menor e maior duração de baixa potência, para os perfis simplificado e P7 representativo da zona de estudo.

Tabela 5.9 - Comparação dos resultados obtidos, para as tempestades de potência baixa, para os perfis simplificado e perfil P7.

		Perfil simplificado	P7	
Tempestade de maior duração	Acreção	Volume (m ³ /m)	82	65
	Erosão	Volume (m ³ /m)	-76	-57
	Balanco sedimentar (m ³ /m)		6	9
	Erosão Duna	Volume (m ³ /m)	-19	-22
		% do Volume total de erosão	25	39
		Recuo da base da duna (m)	-6	-10
		Rebaixamento da base da duna (m)	-1,7	-1,8
Tempestade de menor duração	Acreção	Volume (m ³ /m)	39	31
	Erosão	Volume (m ³ /m)	-35	-25
	Balanco sedimentar (m ³ /m)		4	6
	Erosão Duna	Volume (m ³ /m)	-8	-9
		% do Volume total de erosão	22	35
		Recuo da base da duna (m)	-4	-6
		Rebaixamento da base da duna (m)	-0,8	-0,9

Da análise da Tabela 5.9 verifica-se que:

- Os volumes de acreção e erosão são superiores no perfil simplificado.
- Em ambos os perfis os volumes de acreção e erosão são bastante próximos. O balanço sedimentar final é positivo.
- O volume de erosão dunar, rebaixamento e recuo da base da duna são bastante próximos em ambos os perfis, verificando-se ligeiramente superiores no perfil P7.

Tempestades de potência média

A Tabela 5.10 apresenta a comparação dos resultados de volumes de erosão e acreção, assim como o volume de erosão da duna, recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de menor e maior duração de baixa potência, para os perfis simplificado e P7 representativo da zona de estudo.

Tabela 5.10 - Comparação dos resultados obtidos, para as tempestades de potência média, para os perfis simplificado e perfil P7.

			Perfil simplificado	P7	
Tempestade de maior duração	Acreção	Volume (m ³ /m)	168	146	
	Erosão	Volume (m ³ /m)	-147	-120	
	Balanço sedimentar (m ³ /m)		21	26	
	Erosão dunar	Volume (m ³ /m)		-39	-51
		% do Volume total de erosão		26	43
		Recuo da base da duna (m)		-9	-15
		Rebaixamento da base da duna (m)		-2,7	-2,6
Tempestade de menor duração	Acreção	Volume (m ³ /m)	117	95	
	Erosão	Volume (m ³ /m)	-103	-79	
	Balanço sedimentar (m ³ /m)		14	16	
	Erosão dunar	Volume (m ³ /m)		-26	-34
		% do Volume total de erosão		26	42
		Recuo da base da duna (m)		-7	-13
		Rebaixamento da base da duna (m)		-2	-2,2

Da análise da Tabela 5.10 verifica-se que:

- Os volumes de acreção e erosão são superiores no perfil simplificado.
- Em ambos os perfis os volumes de acreção e erosão são bastante próximos. O balanço sedimentar final é positivo.
- Para ambas as tempestades de menor duração e maior duração, o volume de erosão dunar e recuo da base da duna são superiores no perfil P7. O rebaixamento da base da duna é muito próximo para os dois perfis.

Tempestades de potência elevada

A Tabela 5.11 apresenta a comparação dos resultados de volumes de erosão e acreção, assim como o volume de erosão da duna, recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de menor e maior duração de baixa potência, para os perfis simplificado e P7 representativo da zona de estudo.

Tabela 5.11 - Comparação dos resultados obtidos, para as tempestades de potência elevada, para os perfis simplificado e perfil P7.

			Perfil simplificado	P7	
Tempestade de maior duração	Acreção	Volume (m ³ /m)	180	160	
	Erosão	Volume (m ³ /m)	-156	-130	
	Balanço sedimentar (m ³ /m)		25	29	
	Erosão dunar	Volume (m ³ /m)		-40	-54
		% do Volume total de erosão		26	42
		Recuo da base da duna (m)		-9	-15
		Rebaixamento da base da duna (m)		-2,7	-2,7
Tempestade de menor duração	Acreção	Volume (m ³ /m)	168	140	
	Erosão	Volume (m ³ /m)	-142	112	
	Balanço sedimentar (m ³ /m)		25	27	
	Erosão dunar	Volume (m ³ /m)		-38	-50
		% do Volume total de erosão		27	45
		Recuo da base da duna (m)		-9	-15
		Rebaixamento da base da duna (m)		-2,6	-2,5

Da análise da Tabela 5.11 verifica-se que:

- Os volumes de acreção e erosão são superiores no perfil simplificado.
- Em ambos os perfis os volumes de acreção e erosão são bastante próximos. O balanço sedimentar final é positivo.
- Para ambas as tempestades de menor duração e maior duração, o volume de erosão dunar e recuo da base da duna são superiores no perfil P7. O rebaixamento da base da duna é muito próximo para os dois perfis.

As diferenças registadas entre os resultados obtidos para os perfis em análise justificam-se, essencialmente, pela diferença na sua geometria. O perfil simplificado, apesar de constituir uma boa aproximação ao perfil real P7, apresenta apenas três declives diferentes, correspondentes a cada “zona” constituinte do perfil. Esta característica permite ao perfil simplificado responder ao fenómeno que o solicita sem outras condicionantes de geometria, potenciando a formação de zonas de acreção e erosão e, portanto, a formação de barras e fossas ou rebaixamento, como é o caso. O perfil P7 é um perfil real e apresenta na sua geometria singularidades, nomeadamente na face da praia e perfil submerso – zonas de maior irregularidade e fossa natural no perfil submerso, que potenciam a deposição de sedimentos nessas zonas e uma distribuição mais uniforme ao longo de todo o perfil, reduzindo a tendência para formação de barras e fossas tão significativas quanto as do perfil

simplificado. Este facto explica os volumes de acreção e erosão serem sempre inferiores no perfil P7, ainda que a diferença entre ambos seja reduzida.

A discrepância nos valores de erosão dunar e recuo da base da duna entre os perfis deve-se ao facto do início da duna, i.e., o ponto que se considerou ser coincidente com a base da duna (à cota +4 m ZH) estar recuado 15 metros no perfil P7, comparativamente ao perfil simplificado, resultado do ajustamento entre os perfis em relação ao nível médio do mar, + 2 m ZH. Os valores de rebaixamento da base da duna variam entre 0,8 m e 2,7 m, revelando-se bastante próximos em ambos os perfis para todas as tempestades.

A modelação numérica da morfodinâmica, no caso do perfil P7 representativo da zona de estudo, sob as condições de hidrodinâmica associadas aos 6 eventos extremos seleccionados de menor e maior duração, subdivididos em 3 gamas de potências, baixa, média e elevada, permite confirmar o efeito da duração para cada uma das gamas de potência, obtido para o perfil simplificado. Conclui-se, assim, que a duração da tempestade é, regra geral, dominante no processo de modelação do perfil de praia. Em qualquer um dos casos, uma maior duração de tempestade conduz sempre a maiores taxas de transporte e, conseqüentemente, maiores alterações no perfil de praia. Além disso, verifica-se que a taxa de transporte sedimentar é crescente com o aumento da potência da tempestade, como seria de esperar e, portanto, tempestades com maiores potências geram também maiores modificações no perfil, independentemente da sua duração.

Em todos os casos, é visível uma zona de maior mobilização e transporte de sedimentos, que abrange a totalidade da face da praia, o topo do perfil submerso e a duna frontal, nomeadamente a sua base. A erosão da duna frontal representa uma parte significativa do volume total erodido. A zona da face da praia sofre rebaixamento e na zona adjacente (do lado do mar) verifica-se a deposição dos sedimentos erodidos, havendo formação de barra litoral, mais evidente no perfil simplificado, como referido.

O estudo da evolução do perfil e da taxa de transporte sedimentar no perfil transversal no ponto coincidente com a base da duna, onde se verificou haver significativa erosão, revelou que a taxa de transporte, independentemente da gama de potência, evolui de forma semelhante para as tempestades de menor e maior duração, sendo, no entanto, sempre superior na tempestade de menor duração. Isto deve-se ao facto de ambas as tempestades possuírem potência semelhante e, portanto, tempestades com menor duração implicam ondas de maior altura e maior capacidade energética para fazer o transporte de sedimentos, traduzindo-se numa maior taxa de transporte. A evolução dos perfis no ponto de análise permitiu comprovar o observado na evolução da taxa de transporte durante as tempestades, que é a diminuição progressiva da variação do perfil/taxa de transporte durante a tempestade, revelando-se bastante reduzida nas últimas horas de duração, e conduzindo a uma situação de quase estabilização do perfil.

6. Considerações finais e recomendações futuras

A presente dissertação possibilitou o estudo do efeito erosivo das tempestades marítimas, verificadas durante 59 anos (1952-2010), no trecho arenoso de 30 km a sul da embocadura do rio Mondego, partindo de uma série cronológica de agitação marítima e da caracterização do seu regime de tempestades, permitindo complementar a informação disponível em estudos anteriores sobre a zona e expandir o conhecimento da dinâmica costeira existente. A conhecida exposição da costa oeste portuguesa a eventos energéticos deste tipo, de elevada aleatoriedade, conduz à necessidade permanente do estudo e caracterização destes fenómenos, seja a nível das suas consequências ou a nível dos processos envolvidos, numa tentativa de proceder à proteção, gestão e planeamento fundamentados destas zonas, visando a sua sustentabilidade. Neste seguimento, este estudo previu o efeito erosivo nas praias do trecho litoral em análise, sob ação de tempestades marítimas, recorrendo a modelação numérica, com o intuito de analisar o efeito destes eventos extremos na morfologia do trecho e comparar o efeito erosivo em eventos selecionados com a mesma potência e diferente duração.

Da análise da série de agitação marítima, que explora a evolução da distribuição inter-anual e intra-anual das tempestades identificadas no período de estudo, nomeadamente, no seu número, duração e potência, concluiu-se que a zona de estudo é caracterizada por uma variabilidade e irregularidade significativas, fortemente condicionadas pela sazonalidade, e confirmou-se que a duração é o fator preponderante no cálculo da potência relativa de cada evento e, com efeito, tempestades com reduzidas durações envolvem menores potências e tempestades com maiores durações são portadoras de maiores potências. A distribuição anual do número de eventos permitiu concluir que 4 e 7 foram os números mais frequentes de tempestades ocorridas por ano. Da distribuição mensal apurou-se que os meses de Janeiro, Fevereiro e Dezembro revelam maior propensão para ocorrência de eventos, e que nos meses de Junho, Julho e Agosto nunca se registou qualquer ocorrência. O número máximo de eventos registado mensalmente foi de 4, no mês de Dezembro, sendo que nos restantes meses de Inverno marítimo surgiram no máximo 3 eventos. Os meses de Verão marítimo apresentaram, como expectável, um número máximo de eventos inferior, apenas 1 evento. Relativamente à análise da distribuição dos parâmetros duração e potência da tempestade, observou-se um mínimo/máximo de 1/16 dias e 646/12700 m².h, respetivamente, com ocorrência dos valores máximos também no mês de Dezembro.

A caracterização do regime de tempestades marítimas, em termos de duração e potência das tempestades, primeiramente, caracterizadas como fatores independentes, e posteriormente mediante a sua caracterização conjunta, foi efetuada em duas fases: a primeira não considerando o fator sazonalidade, e a segunda considerando este fator. Da caracterização em função da duração, não considerando a sazonalidade, apurou-se uma duração média das tempestades de 3 dias, sendo a classe de frequência dominante [1-2] dias, com 43% das ocorrências, e verificando-se uma diminuição progressiva das ocorrências com o aumento da duração dos eventos. A introdução do fator sazonalidade revelou uma percentagem de ocorrências na estação de Inverno marítimo de 92%, com ocorrências sucessivas até durações de 12 dias. No Verão marítimo o número de ocorrências deixa de

possuir expressividade a partir da classe [4-5] dias, salvo casos excepcionais. Da caracterização em função da potência determinou-se que o regime de tempestades marítimas está associado a uma potência média de 2654 m².h e classe de frequência dominante de [800-1600] m².h (38% do total de ocorrências). Da caracterização conjunta duração-potência, i.e., da combinação das classes frequentes de ambos os parâmetros, 1^a classe de duração [1-2] dias com a 2^a classe de potência, [800-1600] m².h, correspondem 36% dos eventos identificados no período de estudo

Da modelação numérica da morfodinâmica durante as tempestades marítimas, efetuada para o perfil simplificado e confirmada para o perfil P7, foi determinado o efeito da duração para cada uma das gamas de potência, sob as condições de hidrodinâmica associadas aos 6 eventos extremos selecionados de menor e maior duração, subdivididos em 3 gamas de potências (baixa, média e elevada), concluindo-se que, perante eventos erosivos com potência semelhante e diferente duração, o evento de maior duração, associado a ondas de menor altura, gera sempre maiores taxas de transporte e, conseqüentemente, maiores alterações no perfil de praia, comparativamente a eventos de menor duração, que, por possuírem a mesma potência, estão evidentemente associados a maiores alturas de onda.

A simulação de diferentes tempestades associadas a diversas gamas de potência permitiu, também, verificar que a taxa de transporte sedimentar é crescente com o aumento da potência da tempestade e, portanto, tempestades com maiores potências geram também maiores modificações no perfil, independentemente da sua duração. O estudo da evolução do perfil e da taxa de transporte sedimentar no perfil transversal revelou que a taxa de transporte, independentemente da gama de potência, evolui de forma semelhante para as tempestades de menor e maior duração, revelando-se, no entanto, ligeiramente superior na tempestade de menor duração e, ainda, uma diminuição progressiva da variação do perfil/taxa de transporte durante a tempestade que conduz a uma situação de quase estabilização do perfil nas últimas horas de tempestade.

Futuramente, seria interessante complementar o estudo realizado através da determinação do efeito erosivo num perfil de praia sob ação de vários eventos extremos sucessivos de reduzida duração e potência, cuja soma das durações e potências fosse semelhante à de um evento de longa duração e potência elevada, e realizar o estudo comparativo do efeito erosivo para as duas situações. Outra sugestão para trabalhos futuros seria a utilização de outros modelos de morfodinâmica, por exemplo o modelo XBeach, que inclui a ação de ondas infragravíticas e os processos de espriamento, a fim de comparar a qualidade dos resultados obtidos.

Referências Bibliográficas

- Abreu, T. A. M. D. A., 2006. *Transporte de Sedimentos em Zonas Costeiras – Parametrização de Momentos Estatísticos de Hidrodinâmica*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, área de especialização em Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente. Coimbra.
- Antunes, C., 2014. *Eventos extremos e a variação do nível do mar*. Lisboa, 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica.
- Birkemeier, W., 1985. *Field Data on Seaward Limit of Profile Change*. Journal Of Waterway, Vol. 111, No. 3 (Port, Coastal And Ocean Engineering), Pp. 598-602.
- Ciavola, P. et al., 2014. *Prediction of Storm Impacts on Beach and Dune Systems*. Hydrometeorological Hazards: Interfacing Science And Policy, Pp. 227-252.
- Coelho, C. D. B., 2005. *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira*. Dissertação de Doutoramento. Portugal.
- Coleman, A., 2001. *ADEPT Collections*. [Online].
- Costa, M., Silva, R. e Vitorino, J., 2001. *Contribuição para o Estudo do Clima de Agitação Marítima na Costa Portuguesa*. 2as Jornadas Portuguesas De Engenharia Costeira E Portuária - Associação Internacional De Navegação, Pp. 20.
- Cunha, P., 1999. *Erosão no Troço Costeiro Cabo Mondego - Figueira da Foz: Controlos Naturais/Antrópicos e Implicações na Gestão do Litoral e das Adjacentes Bacias Hidrográficas*. Universidade De Coimbra. IV Simpósio De Hidráulica E Recursos Hídricos Dos Países De Língua Oficial Portuguesa (Comunicações). Pp 22.
- Cunha, P. e Dinis, J., 1998. *A Erosão nas Praias do Cabo Mondego à Figueira da Foz (Portugal Centro-Oeste), De 1995 A 1998*, Territorium,. Revista de Geografia Física Aplicada ao Ordenamento do Território e Gestão de Riscos Naturais, Editora Minerva, Coimbra, 5, Pp 31-50.
- Davidson-Arnott, R., 2009. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge University Press.
- DHI, 2014b. *LITPACK - An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics*. Copenhaga, Dinamarca: Danish Hydraulic Institute.
- DHI, 2016. *Profile Development. LITPROF User Guide*. Danish Hydraulic Institute.
- Dodet, G., Bertin, X. e Taborda, R., 2010. *Wave Climate Variability In The North-East Atlantic Ocean Over The Last Six Decades*. *Ocean Modelling*, Volume Vol. 31, Pp 120-131.
- Dolan e Davis, 1992. *An Intensity Scale For Atlantic Coast Northeast Storms*. Journal Of Coastal Research, Pp. 840–853.

- Dronkers, J., 2016. *Dynamics Of Coastal Systems*. Netherlands: World Scientific.
- Engelund, F. & Fredsoe, J., 1976. *A sediment transport model for straight alluvial channels*, Nordic Hydrology, 7, pp. 296-306.
- Fortes, C. et al., 2011. *Rebentação Das Ondas E O Transporte De Sedimentos*. O Projecto Brisa. 7as Jornadas Portuguesas De Engenharia Costeira E Portuária.
- Fortunato, A. B., Rodrigues, M., Dias, J. M. & Oliveira, A., 2011. *Modelação Da Inundação Costeira Na Ria De Aveiro* - 11º Congresso da Água.
- Fredsoe, J., 1984. *Turbulent boundary layers in wave-current motion*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 110 (HY8), pp 1103-1120.
- Fredsøe, J. & Deigaard, R., 1992. *Mechanics of Coastal Sediment Transport - Advanced Series on Ocean Engineering Volume 3*. Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark: World Scientific.
- Goda, Y., 1985. *Random Seas And Design Of Maritime Structures*. University Of Tokyo Press.
- Hedegaard, I. e Deigaard, R., 1988. *A Model For Cross-Shore Sediment Transport And Coastal Profile Development*. 2nd Symp. On Wave Research And Coastal Engineering, Hannover.
- Hoefel, F. G., 1998. *Formodinâmica De Praias Arenosas Ocênicas: Uma Revisão Bibliográfica*. Universidade Do Vale Do Itajaí - Itajaí, Santa Catarina: UNIVALI.
- Holthuijsen, L. H., 2007. *Waves In Oceanic And Coastal Waters*. New York: Cambridge University Press.
- Instituto da água, I.P., 2009. *Estratégia Nacional para a Gestão Integrada da Zona Costeira*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, Pp. 84.
- Larson, M. e Kraus, N. C., 1989. *SBEACH: Numerical Model For Simulating Storm-Induced Beach Change*; Report 1: Empirical Foundation And Model Development, Vicksburg, MS.: Technical Report CERC-89-9, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- 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, Vicksburg, MS: Technical Report CERC-89-9, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Lax, P. & Wendroff, B., 1960. *Systems of conservation laws*. Comm. Pure and Applied Mathematics, 13, pp.217-37
- LNEC, 2000. *Transporte Litoral Perpendicular À Costa* - Relatório 1.
- Loureiro, A., 1905. *Os Portos Marítimos De Portugal E Ilhas Adjacentes*. Lisboa: Imprensa Nacional.
- Molin, B., 2002. *Hydrodynamique Des Structures Offshore*. Editions TECHNIP.

- Oliveira, F. S. B. F., 2013. *Erosão De Dunas Durante Tempestades: Aplicação De Modelos Numéricos*, Congresso De Métodos Numéricos Em Engenharia, 25-28 Junho 2013, Bilbao, Espanha.
- Oliveira, F. S. B. F. e Contente, J., 2012. *Efeitos De Escala Em Modelação Numérica Da Erosão De Um Perfil De Praia*, Lisboa: 7º Simpósio Sobre A Margem Ibérica Atlântica.
- Oliveira, F. S. B. F., Oliveira, T. C. A., Silva, R. e Larangeiro, S. H. C. D., 2004. *Dinâmica Sedimentar Do Trecho Litoral Praia Da Vieira - Praia Velha Hidrodinâmica E Transporte Longitudinal De Sedimentos*. 7º Congresso Da Água, APRH.
- Oliveira, F. S. D. B. F. D. e Brito, F. A., 2014. *Caracterização Morfológica Do Trecho Litoral Entre As Embocaduras Dos Rios Mondego E Lis*.
- Oliveira, J. N. C., 2016. *Modelação Do Impacte Do Prolongamento Do Molhe Norte Da Embocadura Do Rio Mondego Nas Praias Adjacentes A Sul*.
- Oliveira, J. N. C., Oliveira, F. S. B. F., Teixeira, A. T. e Bertin, X., 2016. *Caracterização Da Agitação Marítima A Sul Da Embocadura Do Rio Mondego*. 4as Jornadas De Engenharia Hidrográfica, IH, Lisboa, Portugal, Pp. 242-245.
- Oliveira, F. S. B. F. e Brito, F. A., 2015. *Evolução Da Morfologia Costeira A Sul Da Embocadura Do Rio Mondego, De 1975 A 2011*. VIII Congresso Sobre Planeamento E Gestão Das Zonas Costeiras Dos Países De Expressão Portuguesa.
- Pinotes, P. M. A., 2014. *Identificação De Tempestades Extremas Na Costa Portuguesa*.
- Rijn, L. V., 2013. *Basic Hydrodynamic Processes In The Coastal Zone*.
- Rogers, S. M. e Nash, D., 2003. *The Dune Book*, Sea Grant Publication. North Carolina Sea Grant.
- Rubey, N. W., 1933. *Settling Velocities Of Gravel, Sand And Silt Particles*. Amer. J. Of Science, 5th Series, Vol. 25, No 148, Pp 325-338.
- Sancho, F., 2002. *Transformação De Ondas*. Departamento De Engenharia Civil, Universidade De Coimbra
- Santos, F., Lopes, A.M., Moniz, G., Ramos, L. e Taborda, R. (2014). *Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança*. Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral, Pp. 255.
- Shields, A., 1936. *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik auf die Geschiebebewegung: Berlin, Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Mitteilungen*, no. 26, 25 p.
- U.S. Army Corps Of Engineers, 2003. *Coastal Engineering Manual, PART II - Coastal Hydrodynamics, Chapt 3 - Surf Zone Hydrodynamics*, EM 1110-2-1100. Em: Washington D.C., EUA

ANEXO A

*LITPACK – Sistema de modelação integrada para processos de
dinâmica litoral*

A. LITPACK – Sistema de modelação integrada para processos de dinâmica litoral

1.1. Introdução

O anexo A introduz o sistema de modelação *LITPACK* (*Littoral Processes And Coastline Kinetics*), *software* profissional de engenharia desenvolvido pelo *Danish Hydraulic Institute (DHI Water e Environment)*, e os componentes e módulos que o integram, fazendo-se uma descrição mais detalhada do módulo numérico de evolução de costa utilizado no presente estudo – *Litprof* - e uma breve referência ao módulo *STP* (*Sediment Transport Module*), utilizado para o cálculo do transporte sedimentar.

Todos os conceitos e conteúdos relativos ao modelo numérico encontram-se nos manuais do *LITPACK* (DHI, 2014b), em particular do módulo *Litprof* (DHI, 2016).

1.2. Considerações gerais

A concepção e implementação de estratégias eficientes de gestão costeira, localmente ou regionalmente, requerem um conhecimento detalhado dos processos de transporte e sedimentação de materiais de praia. O *LITPACK* é utilizado para simular o transporte de sedimentos não coesivos por ondas e correntes, o transporte sedimentar litoral, a evolução da linha de costa e desenvolvimento do perfil ao longo de praias quase uniformes. O *software* constitui uma ferramenta de grande interesse a utilizar numa ampla gama de aplicações de gestão de zonas costeiras, entre as quais se destacam: a avaliação do impacto das obras costeiras na dinâmica do litoral, a otimização de projetos de realimentação de praias e de proteção de áreas costeiras, a estimativa de sedimentação em canais e a realização de estudos de evolução morfológica de linha costa (DHI, 2014b).

O *LITPACK* inclui a mesma interface gráfica que o *MIKE 21* e *MIKE 3*, denominada por *MIKE ZERO*, pertencentes à *DHI*.

O sistema de modelação apresenta na sua constituição cinco modelos numéricos de evolução de linha de costa, totalmente determinísticos, destinados à simulação de processos costeiros de carácter distinto: **STP** – Módulo principal. Transporte sedimentar, em ondas e correntes, de sedimentos não-coesivos; **LITDRIFT** – Corrente longitudinal e transporte sedimentar litoral devido a ondas e correntes; **LITLINE** – Evolução da linha de costa; **LITTREN** – Evolução sedimentar de canal/escavação, no caso de desequilíbrio sedimentar; **LITPROF** – Evolução do perfil transversal de praia.

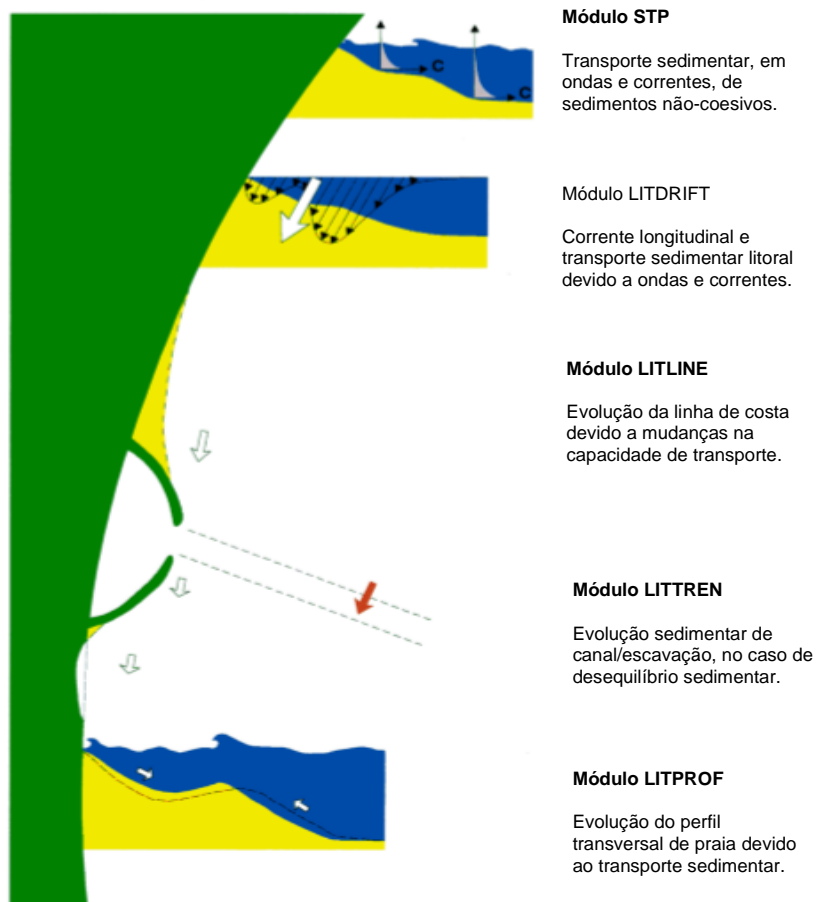


Figura A.1 - Módulos numéricos de evolução de linha de costa, pertencentes ao sistema de modelação **LITPACK**. Adaptado de DHI (2014b).

1.3. Litprof

1.3.1. Descrição geral

O *Litprof* consiste, como referido, num modelo numérico de carácter determinístico ou vulgarmente designado por modelo baseado em processos, desenvolvido para a modelação do transporte de sedimentos não-coesivos devidos à ação de ondas e correntes na faixa litoral. O modelo descreve as mudanças morfológicas do perfil transversal de praia, i.e., o perfil normal à linha de costa, com base numa série temporal de agitação marítima e nível do mar. Na sua constituição apresenta três sub-modelos de processos físicos costeiros: um modelo de hidrodinâmica, um modelo morfodinâmico quasi-3D de transporte sedimentar e um modelo morfológico (de evolução de fundo).

O modelo é baseado no pressuposto de que os gradientes das condições hidrodinâmicas e sedimentares na direção longitudinal são desprezáveis e que as isolinhas de profundidade são aproximadamente paralelas ao litoral. Assim, é possível afirmar que a morfologia costeira é descrita unicamente pelo perfil transversal de praia.

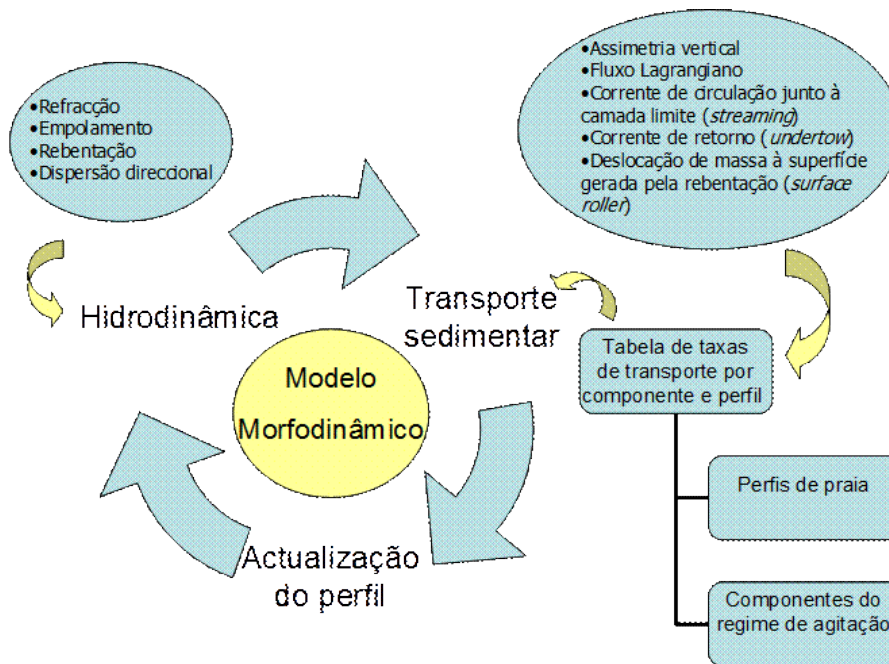


Figura A.2 - Esquema simplificado do modelo *Litprof* e dos três sub-modelos de processos físicos costeiros que o constituem. Adaptado de LNEC (2000).

O *Litprof* opera através de sucessivas chamadas para o programa de transporte de sedimentos *STP* e, utilizando a funcionalidade do programa *PRFTABL*, calcula as taxas de transporte sedimentar para determinadas condições hidrodinâmicas. Os processos de transformação da onda considerados para o efeito são os descritos em DHI (2016): o empolamento, a refração, a dispersão direccional e o decaimento devido à dissipação associada ao atrito de fundo e, por fim, a rebentação. De acordo com Oliveira e Contente (2012), é necessário considerar o contributo dos seguintes processos gerados pela propagação da onda em direção à linha de costa para o transporte sedimentar: assimetrias do movimento orbital da onda; o fluxo Lagrangiano; a corrente de circulação junto à camada limite (*streaming*); a deslocação de massa à superfície gerada pela rebentação (*surface roller*) e a corrente de retorno (*undertow*). Sendo que o modelo não efetua a estimativa das ondas infragravíticas (resultantes das interações harmónicas não lineares dos grupos de ondas curtas), é desprezado o escoamento na zona de espraiamento (*swash*), considerando, assim, que a zona ativa termina na última célula molhada devido à ação integrada do *setup* (sobrelevação do nível do mar devido à rebentação das ondas) e das ondas curtas (ou gravíticas) (Oliveira e Contente, 2012). Todos os processos envolvidos na transformação da onda e gerados pela propagação da onda em direção à linha de costa a considerar na utilização do módulo estão descritos nas secções 2.2 e 2.3 do capítulo 2 da presente dissertação.

O modelo tem em consideração dois modos de transporte sedimentar: o modo de fundo ou arrastamento e o modo de suspensão. No final de cada passo temporal de cálculo, a cota de fundo é atualizada e pode ser descrita através da equação da continuidade para os sedimentos.

A informação exposta nas secções seguintes foi maioritariamente retirada do relatório elaborado por LNEC (2000) – Transporte Litoral Perpendicular à Costa – e dos manuais do utilizador de DHI (2016).

1.3.2. Equação governante e condições de fronteira

A equação governante do módulo numérico é a equação de continuidade dos sedimentos e expressa-se da seguinte forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{1-n} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (\text{A.1})$$

onde h é o nível de fundo, q é a taxa de transporte transversal sedimentar local, n é a porosidade do material de fundo e x é a direção do perfil transversal de praia.

A equação (A.1) é válida para o sistema de coordenadas cujo eixo x tem a direção do perfil transversal de praia, normal à linha de costa (paralela ao eixo y).

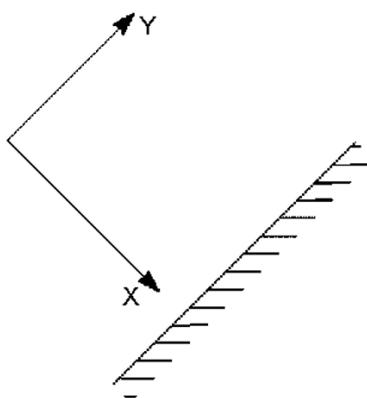


Figura A.3 – Definição do sistema de coordenadas utilizado no *Litprof*. Fonte: DHI (2016).

Em conformidade com o descrito em LNEC (2000), a equação governante é discretizada utilizando a técnica de Lax e Wendroff (1960), que é uma técnica para diferenças finitas explícitas de 2ª ordem. A condição fundamental de estabilidade é a condição de Courant- Friedrichs- Lewy.

$$0 < \sigma < 1 \quad (\text{A.2})$$

onde, σ é o número de Courant, e expressa que o quociente $\Delta t / \Delta x$ deve ser escolhido de forma a que o domínio de dependência da equação diferencial esteja contido no domínio de dependência da equação discretizada. O número de Courant é definido por:

$$\sigma = c \frac{dt}{dx} \quad (\text{A.3})$$

em que c é a velocidade junto ao fundo, definida através de:

$$c = \frac{1}{1-n} \frac{dq}{dz} = \frac{1}{1-n} \frac{dq}{dx} \quad (\text{A.4})$$

onde z é a coordenada espacial vertical.

Tem-se como condições de fronteira que a taxa de transporte sedimentar local, q , na linha de costa e na posição mais ao largo do perfil de praia é nula. No caso de existirem estruturas submersas, q assume o valor zero para os pontos do perfil correspondentes às posições da estrutura.

1.3.3. Cálculo do transporte sedimentar – *STP (Sediment Transport Module)*

O módulo *STP* é a base do cálculo do transporte sedimentar para todos os restantes módulos integrantes do *LITPACK*. O módulo considera as duas componentes relativas ao transporte por arrastamento ou transporte de fundo e ao transporte em suspensão. Assim, o caudal total de sedimentos mobilizados numa determinada direção, é a soma dos caudais sólidos transportados por cada uma das componentes, calculados separadamente, segundo a mesma direção (LNEC, 2000). O transporte é calculado numa faixa de massa de fluido, compreendida entre a camada de superfície e a camada limite de fundo.

$$q_t = q_b + q_s \quad (\text{A.5})$$

onde q_t é o caudal sedimentar total, q_b é o caudal sólido transportado por arrastamento e q_s é o caudal sólido transportado em suspensão.

Transporte por arrastamento

O cálculo desta componente do transporte sedimentar é feito com recurso a um modelo de camada limite. O modelo foi inicialmente proposto por Engelund e Fredsoe (1976), e posteriormente foi atualizado por Fredsoe (1984) para incluir a ação de ondas e correntes e o fenómeno de rebentação (LNEC, 2000). O desenvolvimento deste modelo tem como principal objetivo o cálculo do campo de velocidades instantâneo e as componentes da tensão tangencial instantâneas na base da camada limite. A obtenção desta informação permite calcular, posteriormente, a distribuição vertical da concentração de sedimentos em suspensão, recorrendo à equação da dispersão, dependente da viscosidade turbulenta e velocidade de queda.

As componentes do transporte por arrastamento na direção da corrente média, Φ_{b1} e do transporte por arrastamento na direção normal à direção da corrente média, Φ_{b2} , são quantidades médias no tempo:

$$\Phi_{b1} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \cos \phi(t) dt \quad (\text{A.6})$$

$$\Phi_{b2} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \sin \phi(t) dt \quad (\text{A.7})$$

onde T é o período de onda, $\phi(t)$ representa a direção instantânea do movimento fluido e Φ_b é o parâmetro adimensional do transporte por arrastamento, obtido através de uma abordagem determinística e expresso da seguinte forma:

$$\Phi_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0,7\sqrt{\theta_c}) \quad (\text{A.8})$$

onde θ' e θ_c representam a tensão de radiação e a tensão de radiação crítica no fundo, respetivamente. p é um parâmetro de descrição da concentração no fundo, função da inclinação do fundo β , e expressa-se por:

$$p = \left(1 + \left(\frac{\left(\frac{\pi}{6}\right)\beta}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (\text{A.9})$$

O transporte sólido por arrastamento inicia-se tendo por base o conceito de tensão crítica, introduzido por Shields (1936) – curva de Shields, para o início do movimento dos sedimentos no fundo.

As tensões de radiação, provenientes de um excesso da quantidade de movimento devido à ação das ondas e das correntes, constituem o parâmetro instantâneo de Shields, apresentado na sua forma adimensional por:

$$\theta' = \frac{U_f^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (\text{A.10})$$

onde U_f é a velocidade de arrastamento instantânea, s é a densidade relativa do sedimento, g é a aceleração gravítica e d_{50} representa o diâmetro mediano do sedimento.

Assim, tem-se que o caudal sólido total por arrastamento é obtido a partir da soma das componentes na direção do escoamento e na direção perpendicular ao escoamento, obtidas, respetivamente, pelas seguintes expressões:

$$q_{b1} = \Phi_{b1} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (\text{A.11})$$

$$q_{b2} = \Phi_{b2} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (\text{A.12})$$

Transporte em suspensão

O caudal sólido representativo do transporte médio de sedimentos em suspensão, q_s , segundo uma dada direção, pode ser expresso da seguinte forma (Hedegaard e Deigaard (1988)):

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d_{50}}^D CU dy dt \quad (\text{A.13})$$

onde C é a concentração dos sedimentos, U é a velocidade média do escoamento na direção pretendida e D é a profundidade da água local.

O perfil vertical da concentração de sedimentos é determinado através da equação de difusão vertical em regime turbulento:8.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{A.14})$$

onde o coeficiente de difusão turbulenta dos sedimentos, \mathcal{E}_s , é igual à viscosidade turbulenta \mathcal{E} , e w_s é a velocidade de queda.

No caso de se tratar de sedimentos com granulometria uniforme, a equação de dispersão será resolvida uma única vez. No caso de granulometria variada, será resolvida tantas vezes quantas o número de frações N , em que o total de sedimentos em suspensão for dividido, e as diferentes contribuições do material em suspensão serão adicionadas no final, segundo o somatório:

$$C(z, t) = \sum_{i=1}^N C_i(z, t) \quad (\text{A.15})$$

A velocidade de queda w_s , para qualquer fracção de sedimentos cujo diâmetro representativo é o diâmetro d_i , é expressa segundo a formulação de Rubey (1933):

$$w_s = \sqrt{g(s-1)d_i} \left(\frac{2}{3} + \frac{36 v^2}{g(s-1)d_i^3} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{36 v^2}{g(s-1)d_i^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.16})$$

onde v é a viscosidade cinemática e expressa por:

$$v = (1,78 - 0,0570812T_s + 0,0570812 T_s^2 - 8,27141 * 10^{-6}T_s^3)10^{-6} \quad (\text{A.17})$$

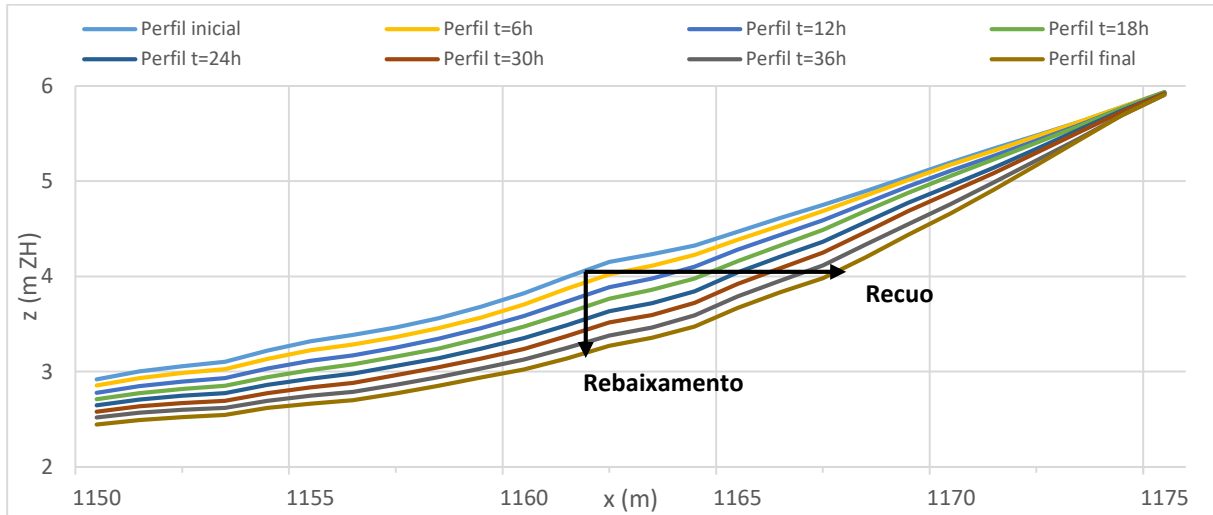
considerando T_s a temperatura da água em graus celsius.

ANEXO B

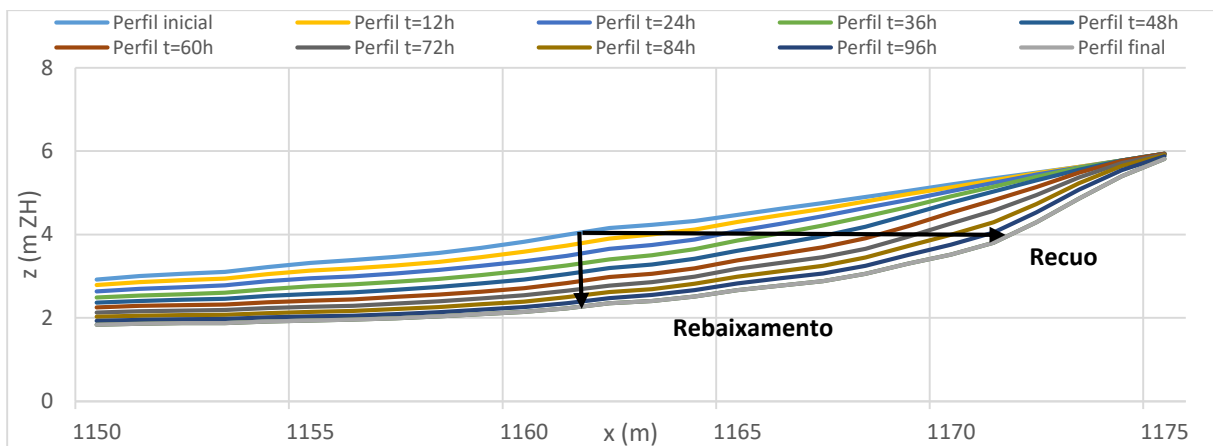
Evolução do perfil e taxa de transporte sedimentar na base da duna

B. Evolução do perfil e taxa de transporte sedimentar na base da duna

Tempestades de potência baixa



a)



b)

Figura B.1 - Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para a) Tempestade de menor duração (42h) e b) Tempestade de maior duração (108h).

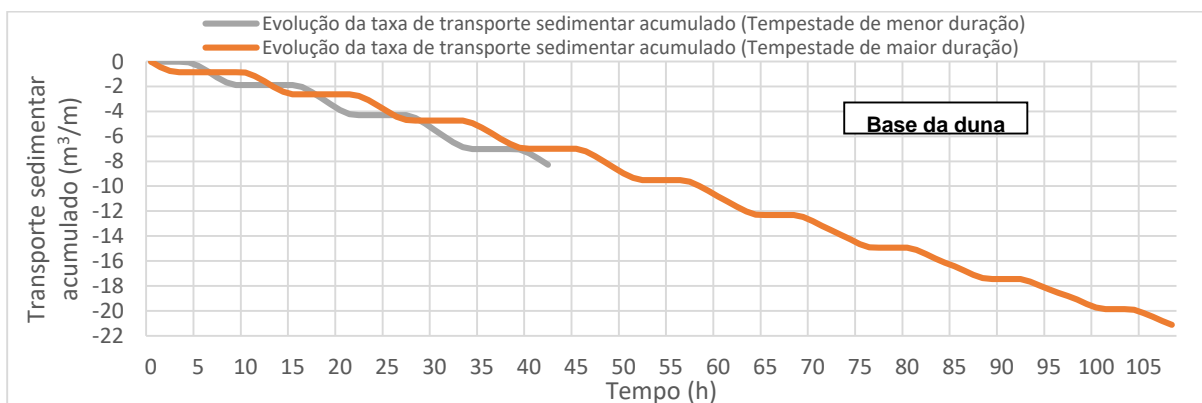
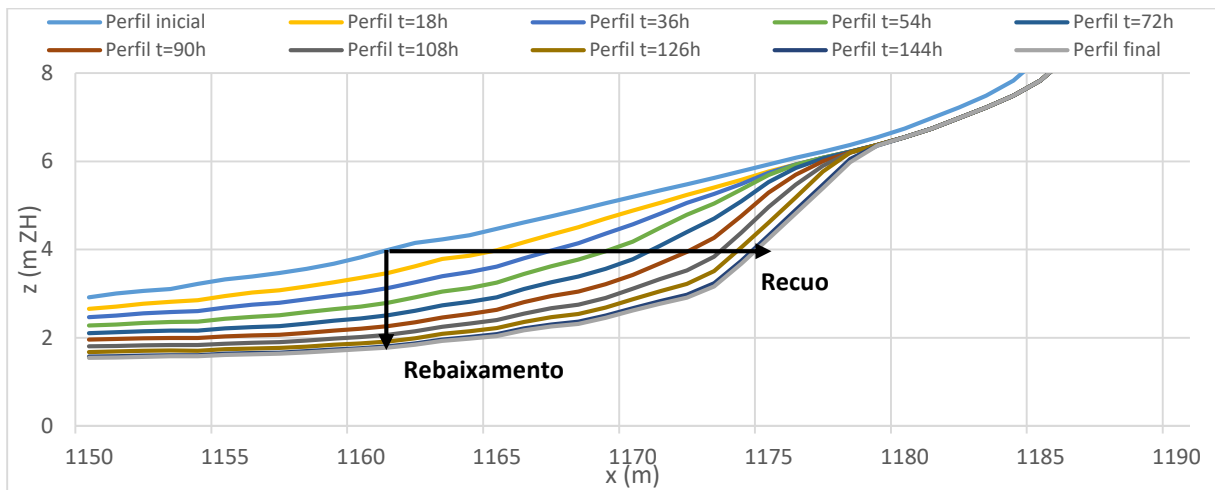
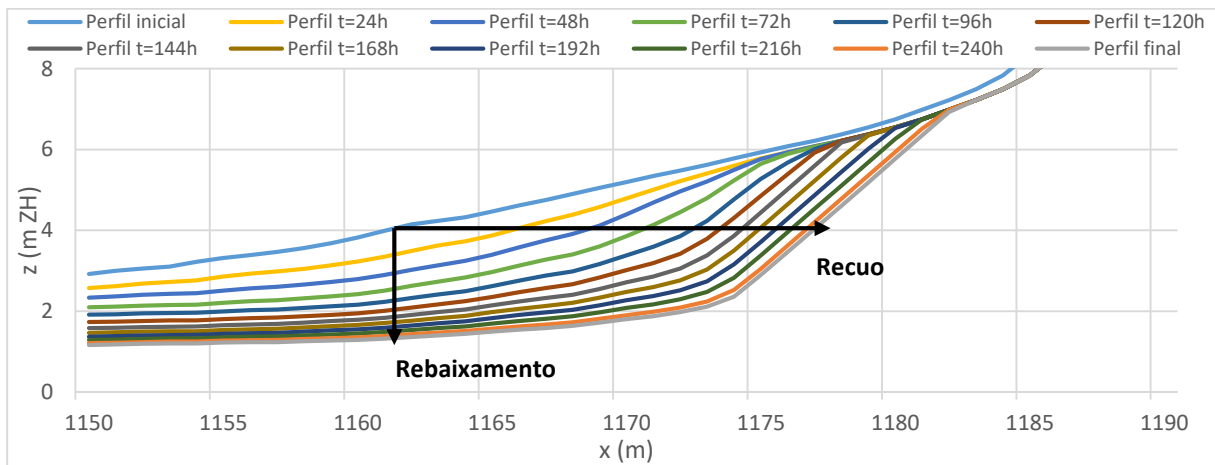


Figura B.2 – Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de baixa potência de menor (48h) e maior duração (108h).

Tempestades de potência média



a)



b)

Figura B.3 - Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de potência média de a) menor duração (150h) e b) maior duração (258h).

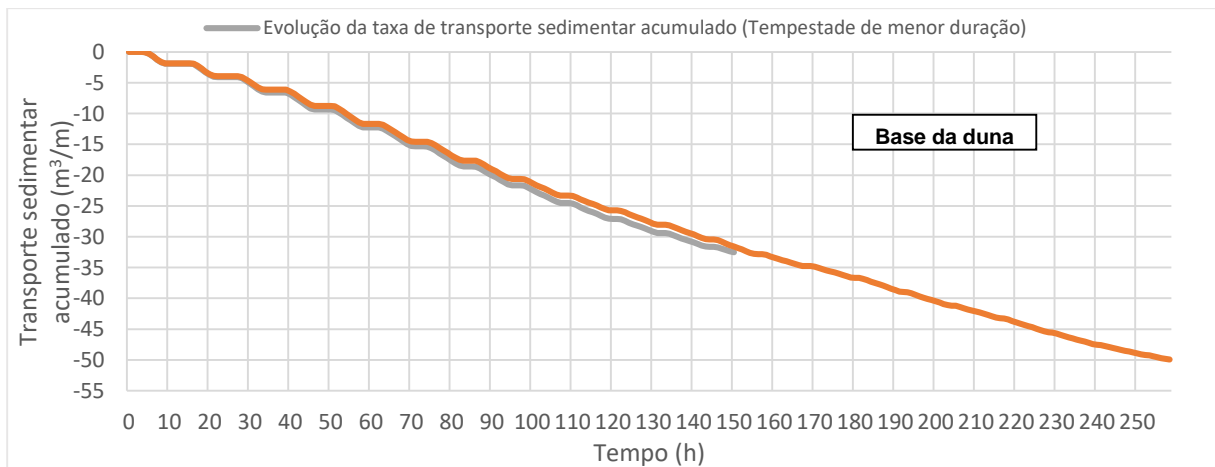
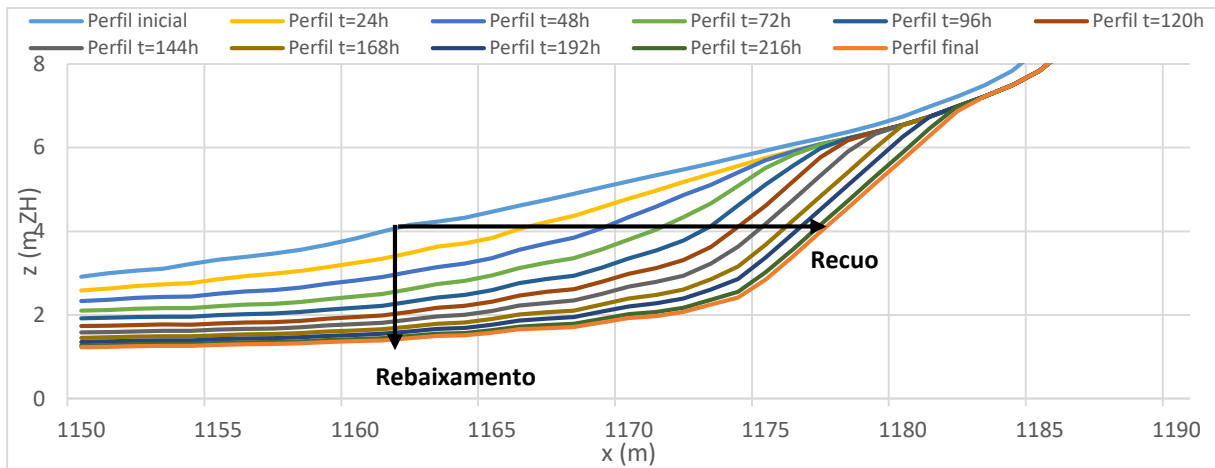
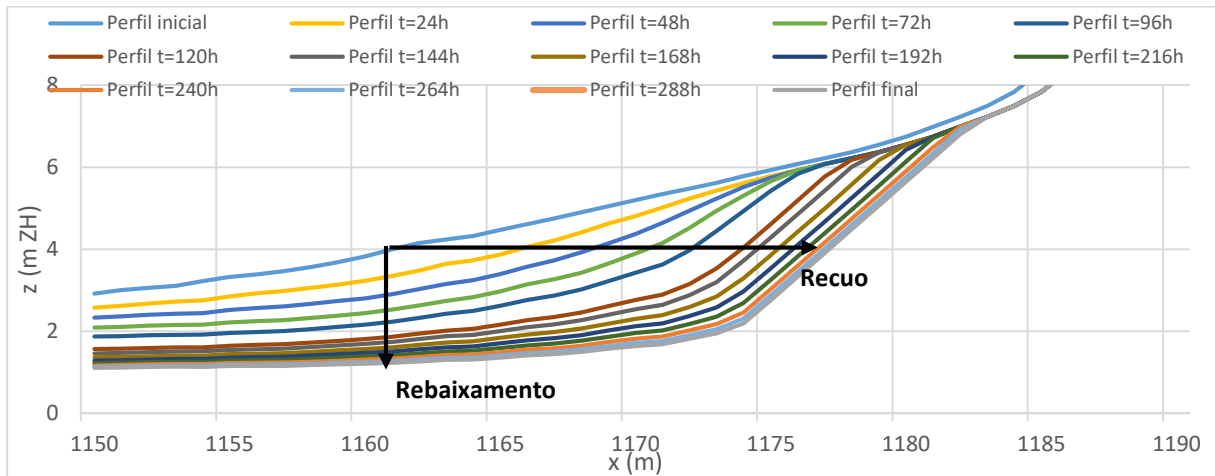


Figura B.4 - Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de potência média de menor (150h) e maior duração (258h).

Tempestades de potência elevada



a)



b)

Figura B.5 - Pormenor da evolução do perfil com identificação do recuo e rebaixamento da base da duna para as tempestades de potência elevada de a) menor duração (228h) e b) maior duração (306h).

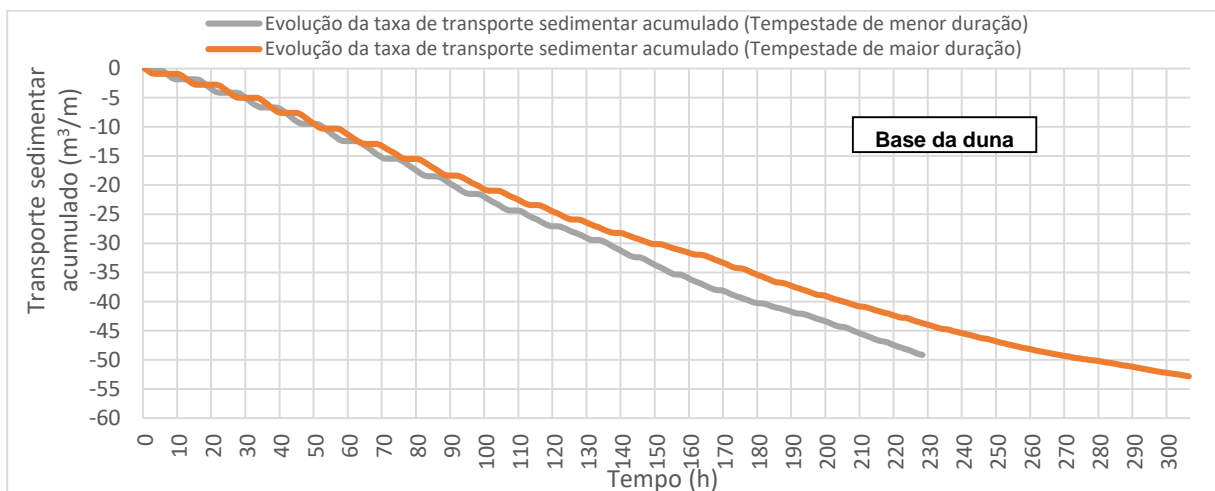


Figura B.6 - Evolução da taxa de transporte sedimentar na base da duna durante as tempestades de potência elevada de menor (228h) e maior duração (306h).