



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

## **TRANSPORTE SEDIMENTAR POTENCIAL A SUL DA EMBOCADURA DO RIO MONDEGO**

LISBOA • agosto de 2016

**I & D** HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 2 - Proc. 0604/1307/19596 – **DHA/NEC**

## **Título**

**TRANSPORTE SEDIMENTAR POTENCIAL A SUL DA EMBOCADURA DO RIO MONDEGO**

## **Autoria**

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

**João Nuno Correia Oliveira**

Estagiário, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

**Filipa S. de Brito F. de Oliveira**

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Copyright © Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.

Av. do Brasil 101 • 1700-066 Lisboa

e-mail: [Inec@Inec.pt](mailto:Inec@Inec.pt)

[www.Inec.pt](http://www.Inec.pt)

Relatório 2 - Proc. 0604/1307/19596

Proc. 0604/1307/19596

# TRANSPORTE SEDIMENTAR POTENCIAL A SUL DA EMBOCADURA DO RIO MONDEGO

## Resumo

---

O presente estudo tem como objetivo caracterizar o transporte sedimentar longitudinal potencial (capacidade de transporte) entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis no período 1952-2010. Enquadra-se no âmbito de um estudo mais alargado, cujo objetivo é o estudo da dinâmica sedimentar costeira e a previsão da evolução futura da linha de costa do mesmo trecho.

O estudo baseia-se em modelação numérica dos processos físicos costeiros para determinar a série temporal (com frequência de 6 horas) de transporte sedimentar longitudinal potencial induzido pela agitação marítima e variação do nível do mar devida à maré astronómica e meteorológica, no período 1952-2010. Concluiu-se sobre a elevada variabilidade interanual e sazonal do transporte sedimentar longitudinal potencial,  $Q_s$ , e confirmou-se a direção dominante da deriva para sul (em 46 dos 59 anos em estudo). Obtiveram-se volumes anuais médios de  $Q_s$  Total e Resultante para sul de 918 e 270  $\times 10^3 \text{ m}^3$  e volumes anuais extremos de  $Q_s$  Total 578 e 1 500  $\times 10^3 \text{ m}^3$ . Da análise do diagrama de balanço sedimentar do ano de  $Q_s$  Total médio e da distribuição de  $Q_s$  ao longo do perfil transversal, concluiu-se que grande parte do volume mobilizado se deve aos eventos com  $H_{rms}$  2.00-5.00 m e Dir 295-305°N e identificaram-se as zonas onde essa mobilização é mais intensa. Da análise à sazonalidade concluiu-se que no verão marítimo apenas existe potencial para mobilizar cerca de 60% do volume sedimentar mobilizado no inverno, sendo evidente nas duas estações marítimas a deriva resultante na direção sul. Da análise adicional aos anos de  $Q_s$  Sul e  $Q_s$  Norte máximos identificaram-se extensões da zona ativa do perfil de praia de 1 500, 2 270 e 1 970 m nos três anos referidos, respetivamente.

Palavras-chave: Transporte sedimentar longitudinal, Figueira da Foz, Modelação numérica, Processos costeiros.

# POTENTIAL SEDIMENT TRANSPORT SOUTH OF MONDEGO RIVER MOUTH

## Abstract

---

The present study aims characterizing the potential longshore sediment transport (transport capacity) in the coastal zone between the Mondego river inlet and the Lis river inlet in the period 1952-2010. It is part of a wider scope study, which goal is studying the coastal stretch sediment dynamics and forecasting its coastline future evolution.

The study is based on numerical modelling of the coastal physical processes to determine the potential longshore sediment transport time series (with 6 hours frequency) induced by the wave climate and the sea level variation due to the astronomic tide and the meteorological surge, during the 1952-2010 period. It was concluded that the potential longshore sediment transport,  $Q_s$ , has high interannual and seasonal variability and the predominance of the south directed drift was confirmed (for 46 of the 59 years studied). Average annual volumes of  $Q_s$  Total and Resultant towards south of 918 and 270  $\times 10^3$   $m^3$  and extreme annual volumes of  $Q_s$  Total of 578 and 1 500  $\times 10^3$   $m^3$  were obtained. The analysis of the sediment budget for the year of average  $Q_s$  Total and of the cross-shore distribution of  $Q_s$  allowed to conclude that a large part of the sediment mobilized is due to the events with  $H_{rms}$  2.00-5.00 m and Dir 295-305°N and to identify the zones in which this mobilization is more intense. The analysis to the  $Q_s$  seasonality allowed to conclude that in the maritime summer the sediment mobilization capacity is about 60% of the winter capacity and that the resultant sediment drift is south directed in both seasons. From the additional analysis to the maxima  $Q_s$  South and North, the extension of the beach profile active zone was identified as 1 500, 2 270 e 1 970 m for the three referred years, respectively.

Keywords: Longshore sediment transport, Figueira da Foz, Numerical modelling, Coastal processes.

# Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento, motivação, objetivo e metodologia.....	1
1.2.	Organização do relatório.....	3
2.	Dinâmica litoral da zona de estudo: enquadramento e revisão da literatura.....	5
2.1.	Enquadramento .....	5
2.2.	Evolução da costa: do Cabo Mondego à embocadura do rio Lis .....	8
3.	Hidrodinâmica .....	12
3.1.	Agitação marítima .....	12
3.2.	Nível do mar.....	12
4.	Perfil de praia e sedimentos.....	15
4.1.	Dados e método.....	15
4.2.	Resultados .....	19
5.	Modelação do transporte sedimentar longitudinal potencial.....	20
5.1.	Análise de sensibilidade .....	21
5.1.1.	Altura de onda.....	21
5.1.2.	Direção de onda.....	22
5.1.3.	Período de onda .....	22
5.1.4.	Rugosidade de fundo.....	23
5.1.5.	Diâmetro mediano dos sedimentos .....	23
5.1.6.	Morfologia – perfil transversal.....	24
5.2.	Transporte sedimentar potencial .....	25
5.2.1.	Variabilidade interanual .....	26
5.2.2.	Ano de transporte potencial total médio .....	29
5.2.2.1.	Balanço sedimentar e distribuição transversal.....	29
5.2.2.2.	Sazonalidade .....	31
5.2.3.	Anos de Qs Sul e Qs Norte médios e máximos .....	32
5.2.3.1.	Transporte potencial para sul.....	32
5.2.3.2.	Transporte potencial para norte .....	34
6.	Considerações finais e recomendações .....	36
	Referências .....	37
	Anexo A - LITPACK – Sistema de modelos integrados para processos de dinâmica litoral.....	41
A.	LITPACK – Sistema de modelos integrados para processos de dinâmica litoral.....	43
A.1.	LITSTP – <i>Sediment Transport Module</i> .....	43
A.1.1.	Formulação científica.....	44
A.1.1.1.	Transporte de fundo .....	44
A.1.1.2.	Transporte em suspensão.....	45
A.2.	LITDRIFT – <i>The Longshore Current and Littoral Drift Module</i> .....	46
A.2.1.	Formulação científica.....	47
A.2.2.	<i>Input e output</i> .....	47
A.3.	Conversão dos principais dados coligidos em ficheiros de <i>input</i> .....	49
A.3.1.	<i>Cross-shore Profile</i> .....	49
A.3.2.	<i>Annual Wave Climate</i> .....	50
	Anexo B - Elementos adicionais.....	53

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Localização da zona de estudo e pormenor das principais estruturas e centros urbanos adjacentes (Fonte: Google Maps, dezembro de 2014). .....	6
Figura 4.1 – Parte do modelo digital do terreno da zona costeira delimitada pelas embocaduras dos rios Lis e Mondego, zona de estudo, adaptado de Oliveira (2014). .....	15
Figura 4.2 – Localização dos perfis transversais de praia, P1 a P18, na zona costeira delimitada pelas embocaduras dos rios Lis e Mondego, zona de estudo, adaptado de Oliveira (2014). .....	16
Figura 4.3 – Esquema representativo das zonas em que normalmente se divide a praia. Imagem adaptada de <a href="http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html">http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html</a> (consultado em outubro de 2015). .....	16
Figura 4.4 – Perfil de praia P7 e perfil de equilíbrio para $d_{50}=0.3$ mm, adaptado de Oliveira (2014). .....	19
Figura 5.1 – Convenção de sinais adotada para o sentido do transporte longitudinal: .....	20
Figura 5.2 – Relação entre $Q_s$ e $H_{rms}$ resultante da análise de sensibilidade à altura de onda. ....	21
Figura 5.3 – Relação entre $Q_s$ e $\alpha_0$ resultante da análise de sensibilidade à direção média incidente. ....	22
Figura 5.4 – Relação entre $Q_s$ e $T_z$ resultante da análise de sensibilidade ao período de onda. ....	22
Figura 5.5 – Relação entre $Q_s$ e $k$ resultante da análise de sensibilidade à rugosidade de fundo. ....	23
Figura 5.6 – Relação entre $Q_s$ e $d_{50}$ resultante da análise de sensibilidade ao diâmetro mediano dos sedimentos. ....	24
Figura 5.7 – Perfil transversal P7 e respetiva curva de $Q_s$ para análise de sensibilidade à morfologia. ....	24
Figura 5.8 – Perfis transversais P4, P10, P13 e P17 e respetivas curvas de $Q_s$ para análise de sensibilidade à morfologia. ....	25
Figura 5.9 – Transporte sedimentar potencial anual para o período de 1952 a 2010. ....	28
Figura 5.10 – Transporte potencial para norte e sul ao longo do perfil representativo e diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros $H_{rms}$ e $Dir$ , para 1994. ....	30
Figura 5.11 – Série temporal de $H_{rms}$ e $Dir$ para 1994. ....	30
Figura 5.12 – Série temporal de $Q_s$ normalizado e acumulado para 1994. ....	31
Figura 5.13 – $Q_s$ Norte, Sul, Resultante e Total para o verão marítimo de 1994 e inverno marítimo de 1994-1995. ....	32
Figura 5.14 – Transporte potencial para norte e sul ao longo do perfil representativo e diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros $H_{rms}$ e $Dir$ , para 1986. ....	33
Figura 5.15 – Diagramas: a) de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros $H_{rms}$ e $Dir$ para 1956; e b) de frequência de ocorrência discretizado por classes dos parâmetros $H_{rms}$ e $Dir$ para 1986. ....	33
Figura 5.16 – Transporte potencial para norte e sul ao longo do perfil representativo e diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros $H_{rms}$ e $Dir$ , para 1978. ....	35
Figura 5.17 – Diagramas: a) de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros $H_{rms}$ e $Dir$ para 1974; e b) de frequência de ocorrência discretizado por classes dos parâmetros $H_{rms}$ e $Dir$ para 1978. ....	35
Figura A.1 – Representação do algoritmo do módulo computacional LITDRIFT. ....	49

Figura B. 1 – Declive da face de praia dos perfis P1 a P18, localizados na zona costeira delimitada pelas embocaduras dos rios Lis e Mondego, zona de estudo, adaptado de Oliveira (2014). .....	55
Figura B. 2 – Perfis de praia representativos de cada sub-trecho da zona de estudo e perfis de equilíbrio para vários <b>d50</b> , adaptado de Oliveira (2014). .....	55

## Índice de Quadros

Quadro 3.1 – Previsões do nível do mar obtidas através do <i>WXTide</i> e do IH.....	13
Quadro 4.1 – Relação entre $d_{50}$ e o parâmetro $A$ da Equação 4.1 do perfil de equilíbrio. ....	17
Quadro 5.1 – Parâmetros de caracterização do caso de referência para análise de sensibilidade ao transporte sedimentar induzido por eventos com duração 6h.....	21
Quadro 5.2 – Estatísticas relativas ao transporte sedimentar potencial para o período de 1952 a 2010. ....	26
Quadro 5.3 – Transporte sedimentar potencial anual para o período de 1952 a 2010. ....	27
Quadro 5.4 – Componentes de $Q_s$ para anos de transporte médio e máximo. ....	29
Quadro B.1 – Parâmetros de caracterização dos casos em estudo para análise de sensibilidade ao transporte sedimentar induzido por eventos com duração de 6h. ....	56



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento, motivação, objetivo e metodologia

O presente estudo enquadra-se no âmbito do Programa “E2I – Estratégia de Investigação e Inovação 2013-2020”, mais precisamente no eixo estruturante “E3 – Recursos naturais: inteligência na valorização do ambiente” e temática prioritária “T1 – Sustentabilidade e alterações climáticas” da sua matriz programática.

Portugal possui uma linha de costa com uma extensão total de cerca de 987 km. A importância demográfica e económica da faixa litoral é bastante significativa uma vez que cativa cerca de ¾ da população e produz 85% da riqueza do país. A aplicação de políticas públicas que associem a gestão de riscos ambientais com os tipos de ordenamento do território e a ocupação urbana é essencial para que as zonas costeiras se mantenham sustentáveis. A fundamentação destas políticas assenta no recurso a instrumentos de apoio à gestão costeira, que permitem estabelecer cenários de previsão de evolução da linha de costa, com vista a salvaguardar território e preservar ou melhorar o bem-estar e segurança das populações, garantindo também a sustentabilidade do desenvolvimento económico local (Santos *et al.*, 2014).

Existem “graves problemas de erosão costeira quando existe intensa ocupação humana” (Dias *et al.* 1994), sendo nestes locais de maior densidade populacional imprescindível recorrer à implantação de estruturas de proteção costeira adequadas para salvaguardar propriedades edificações ou património em risco e populações aí existentes, juntamente com a adoção de medidas de mitigação ao longo de toda a costa para salvaguardar o património suscetível de ser afetado. A erosão costeira é um processo natural de longo prazo resultante da interação entre os sedimentos existentes ao longo da costa e a massa de água costeira, verificando-se sempre que a taxa de remoção de sedimentos excede a de deposição. Este balanço negativo de sedimentos resulta na migração da linha de costa na direção do continente, com o estreitamento da faixa de praia.

A artificialização do litoral com as estruturas de proteção referidas tem outras consequências diretas, destacando-se a perda de apetências turístico-balneares da faixa costeira, nomeadamente a sotamar das grandes obras de proteção costeira construídas transversalmente à costa. Estas constituem um obstáculo ao transporte sedimentar quando implementadas (até à sua saturação), e no caso de longos molhes, a perturbação da deriva litoral induz grande acumulação de areias a barlamar, o que resulta num significativo estreitamento da faixa de praia a sotamar (intensa erosão) provocado pela falta de abastecimento sedimentar.

A abordagem aos problemas de erosão costeira deve ter em conta o tipo e intensidade da ocupação litoral e as causas próximas e remotas da erosão. A sua análise deve ser feita em função dos recuos da linha de costa aí registados, fundamentais no diagnóstico da erosão e na determinação das

tendências evolutivas do litoral, permitindo uma avaliação dos fatores que perturbam a dinâmica sedimentar costeira.

O objetivo deste estudo é avaliar o transporte sedimentar potencial nas praias arenosas a sul da embocadura do rio Mondego, exatamente entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis, através da aplicação de um modelo numérico de transporte sedimentar longitudinal baseado nos processos físicos costeiros, o modelo *LITDRIFT* do sistema de modelos integrados para processos de dinâmica litoral *LITPACK*, com base em dados de agitação marítima e nível do mar correspondentes ao período 1952-2010. Pretende-se que os resultados sirvam de base a um futuro estudo de previsão da evolução futura da linha de costa do mesmo trecho, para avaliação do impacte do prolongamento recente (2008-2010) do molhe norte da embocadura do rio Mondego.

O troço da costa oeste portuguesa que se analisa neste estudo foi tema de vários estudos anteriores baseados em modelação numérica (e.g. Teixeira, 2006; Henriques, 2007). O que este estudo traz de novo é: uma análise mais detalhada e extensa, em termos espaciais (trecho em estudo com 30 km de extensão) e temporais (59 anos de dados de agitação marítima e nível do mar), e mais aprofundada, relativamente aos processos costeiros considerados (o sistema *LITPACK* tem por base um modelo intra-onda, que descreve os processos de transporte não-estacionários ao longo do ciclo da onda) e, consequentemente, aos parâmetros de dinâmica sedimentar caracterizados; e a consideração de dados de morfologia e de hidrodinâmica sinóticos.

Sumariamente, a metodologia adotada neste estudo estruturou-se em três fases principais: revisão da literatura sobre a dinâmica litoral da ZE e coleta de dados topo-hidrográficos; caracterização da hidrodinâmica e geomorfologia; e modelação do transporte sedimentar potencial longitudinal.

A primeira fase foi dedicada à compreensão da dinâmica litoral da ZE e baseou-se na análise crítica e reflexiva de estudos anteriores. Foi fundamental para contextualizar dados/resultados nas duas fases seguintes.

A segunda fase teve em vista caracterizar a hidrodinâmica, topo-hidrografia e sedimentologia da ZE e processar os dados necessários para a modelação. Com base na análise estatística de uma extensa série temporal de dados de agitação marítima (de 1952 a 2010), procedeu-se à caracterização do regime geral de agitação ao largo da ZE e da sua sazonalidade (por estação marítima e por mês). Compararam-se estes resultados com resultados de estudos anteriores. Esta componente do estudo relativa à caracterização da agitação marítima é descrita detalhadamente em Oliveira *et al.* (2015, 2016) e Oliveira e Oliveira (2016). Determinou-se a série sinótica de nível do mar, tendo em consideração as marés astronómica e meteorológica. Tratando-se de um trecho costeiro com extensão aproximada de 30 km, foi necessário estabelecer parâmetros de caracterização da topo-hidrografia e sedimentologia representativos de toda a ZE. Assim, definiram-se um perfil transversal de praia e três diâmetros característicos do grão de sedimento representativos da ZE com recurso a diversos estudos anteriores.

Na terceira fase caracterizou-se o transporte sedimentar potencial para as condições de agitação marítima e geomorfologia obtidas na fase anterior. Com recurso ao módulo computacional *LITDRIFT*, obteve-se a série temporal do transporte longitudinal potencial (de 1952 a 2010) ao longo do perfil de praia. Estes resultados permitiram: determinar a variabilidade interanual do transporte longitudinal potencial no período em apreço; analisar a distribuição do transporte longitudinal potencial no perfil transversal em anos de particular interesse e, assim, identificar a extensão da zona ativa da praia; e determinar o balanço sedimentar discretizado por classes de altura e direção de onda. A aplicação do modelo que se acabou de descrever foi precedida de uma análise de sensibilidade aos principais parâmetros de hidrodinâmica e geomorfologia com influência no transporte sedimentar que permitiu realizar uma melhor caracterização do transporte para as condições hidro-sedimentares da ZE e adquirir conhecimento sobre os parâmetros de calibração do modelo de evolução de linha de costa *LITLINE*, que se pretende aplicar em estudo futuro para avaliação do impacto do prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego nas praias adjacentes a sul.

## 1.2. Organização do relatório

O presente relatório encontra-se organizado em seis capítulos de texto principal mais três capítulos não numerados, que são as Referências e os Anexos A e B.

No presente capítulo faz-se o enquadramento do estudo, indica-se a sua motivação e o seu objetivo e apresenta-se uma breve descrição da metodologia aplicada.

No capítulo 2 faz-se o enquadramento geográfico da ZE e apresenta-se a revisão da literatura relativamente à sua dinâmica litoral.

No Capítulo 3 é analisada a hidrodinâmica da ZE. Faz-se uma síntese dos dados e método utilizados na análise da agitação marítima no período 1952-2010 e apresentam-se as principais conclusões da caracterização do regime geral e da sazonalidade do clima de agitação. Descreve-se também a metodologia utilizada para obtenção da variação do nível do mar no mesmo período.

No Capítulo 4 tratam-se a topo-hidrografia e sedimentologia. Descrevem-se as metodologias aplicadas para obtenção de dados e caracterizam-se o perfil de praia representativo da ZE e respetivos parâmetros sedimentológicos.

No Capítulo 5 trata-se a modelação do transporte sedimentar potencial na ZE. É feita uma análise prévia de sensibilidade à influência de alguns parâmetros no transporte sedimentar: altura, direção e período de onda, rugosidade de fundo, diâmetro mediano dos sedimentos e morfologia do perfil transversal. Calcula-se a série temporal de transporte sedimentar potencial no período 1952-2010 e analisa-se a variabilidade interanual desta grandeza. Analisa-se detalhadamente a sua distribuição transversal na zona ativa da praia, assim como a sua discretização por classes de altura e direção de onda incidente, para o ano de transporte potencial total médio e os anos de transporte potencial resultante nas direções sul e norte médio e máximo.

No Capítulo 6 apresentam-se as considerações finais relativas ao trabalho desenvolvido e recomendações para trabalho futuro baseadas na experiência adquirida.

O Anexo A compreende uma descrição breve (apenas dos aspetos considerados essenciais) do sistema de modelos *LITPACK*, utilizado na modelação dos processos de dinâmica litoral da ZE, nomeadamente no estudo da distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal (*LITDRIFT*).

No Anexo B apresentam-se resultados adicionais que completam e enriquecem os conteúdos apresentados nos capítulos acima descritos.

Neste relatório adotou-se o ponto, em vez de vírgula, como separador decimal.

Por último, salienta-se que, no decorrer do trabalho desenvolvido, foram elaborados dois artigos de conferência, apresentados publicamente na “3ª Conferência sobre morfodinâmica estuarina e costeira”, na Universidade do Algarve, em maio de 2015 (Oliveira *et al.*, 2015), e nas “4ªs Jornadas de Engenharia Hidrográfica”, no Instituto Hidrográfico em Lisboa, em junho de 2016 (Oliveira *et al.*, 2016), e um relatório (Oliveira e Oliveira, 2016).

## 2. Dinâmica litoral da zona de estudo: enquadramento e revisão da literatura

### 2.1. Enquadramento

O trecho litoral sobre o qual incide este estudo situa-se na zona centro-ocidental de Portugal (Figura 2.1). Trata-se da unidade fisiográfica delimitada a norte pela embocadura do rio Mondego, com os seus dois molhes (40°8'45" N e 8°52'42" O), e a sul pela embocadura do rio Lis, regularizada com dois pequenos esporões (39°52'50" N e 8°58'18" O). Caracteriza-se pela existência de praia natural em toda a sua extensão, interrompida por um afloramento rochoso em Pedrógão.

As obras costeiras que conferiram à embocadura do rio Mondego o seu aspeto atual iniciaram-se em 1929, de acordo com Dias *et al.* (1994), como parte integrante de um Plano Portuário adotado a nível nacional. Entre outras intervenções, destacam-se a construção do molhe norte com 900 m de comprimento, posteriormente prolongado em 400 m, convergente com o molhe a sul com 950 m de comprimento, resultando numa largura da embocadura de 325 m, com a cabeça dos molhes localizada na batimétrica -8 m ZH. Para conferir ao porto a operacionalidade necessária, dragagens regulares tornaram-se necessárias na zona da barra, no anteporto e no canal anterior, devido ao assoreamento de sedimentos com principal proveniência marinha. Segundo Abecasis *et al.* (1970), o molhe norte ficou concluído em 1965 e, a partir de 1960, verificou-se a norte da embocadura um acentuado avanço da linha de costa (LC), com taxas de acumulação de aproximadamente 30 m/ano junto ao molhe (Duarte e Reis, 1992). Em contrapartida, os efeitos de erosão a sul da foz foram imediatos com um agravamento no recuo da LC que chegou a atingir, junto à Cova, 30 m/ano em 1976 (Duarte e Reis, 1992).

Na Figura 2.1 destacam-se as diversas estruturas de estabilização da LC e proteção dos aglomerados populacionais existentes na zona de estudo (ZE): Gala-Cova, Costa de Lavos, Leirosa, Pedrógão e Vieira de Leiria. Este trecho foi fortemente influenciado pelas intervenções antrópicas efetuadas desde meados do século passado: a construção dos molhes da embocadura (1961-1965); a extração de areia na praia da Figueira da Foz (1973-1996); dragagens da embocadura para acesso ao porto; intervenções de regularização fluvial e portuária; a alimentação artificial pontual 50 m a sul do enraizamento do molhe sul (1973-1975); a construção das defesas longitudinais aderentes da Gala-Cova, Lavos, Leirosa e Pedrógão (1975-1979); a construção do esporão da Leirosa (1978), do esporão da Costa de Lavos (1979) e do campo de cinco esporões da Gala-Cova (1979); e, por último, o prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego (2008-2010).

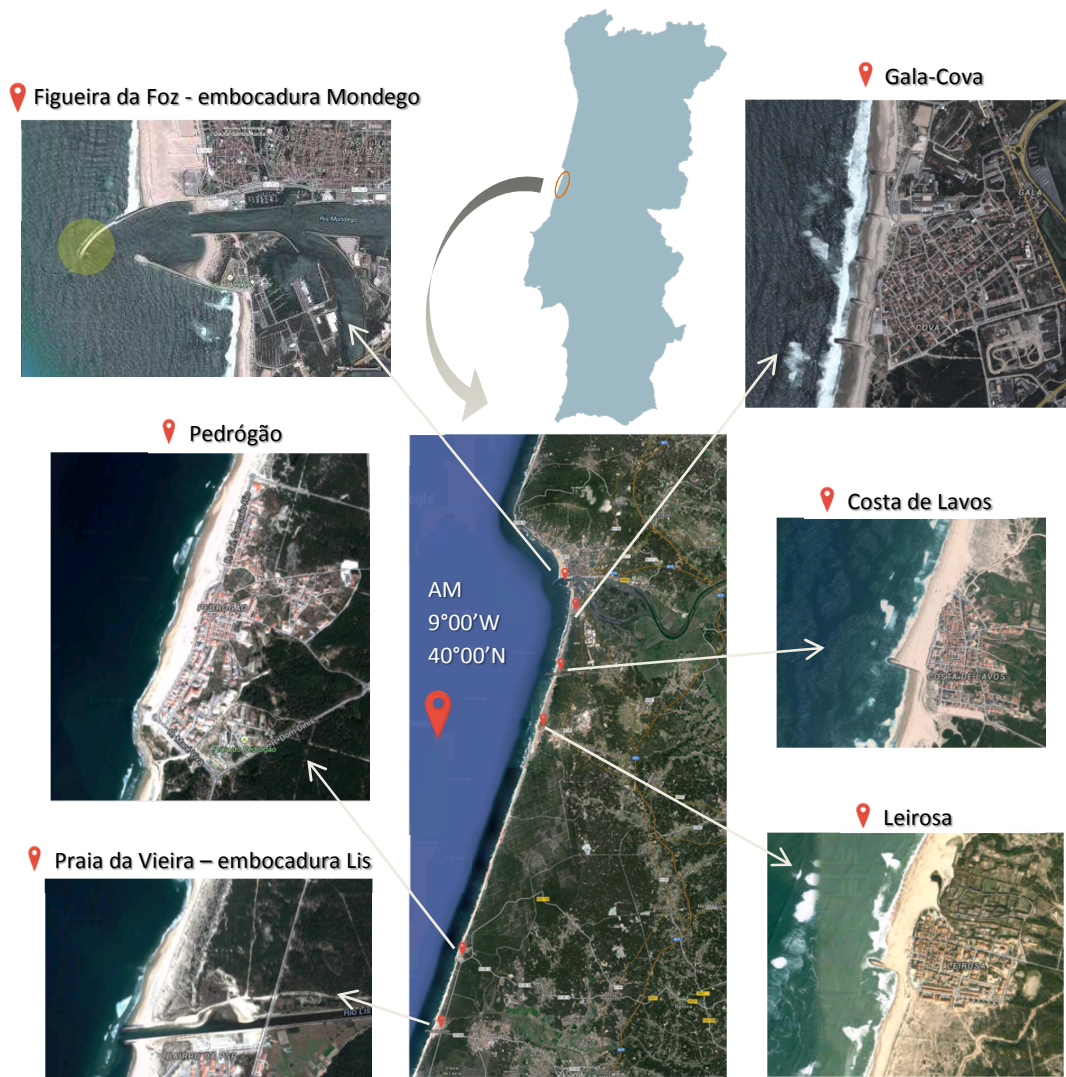


Figura 2.1 – Localização da zona de estudo e pormenor das principais estruturas e centros urbanos adjacentes (Fonte: Google Maps, dezembro de 2014).

A dinâmica marinha na costa portuguesa é condicionada pela circulação atmosférica a oeste, no Atlântico, sendo a ondulação mais frequente de direção NW, com o anticiclone próximo dos Açores. A ondulação de W e SW não ocorre tão frequentemente e está associada a focos depressionários e à passagem das respetivas superfícies frontais. A costa ocidental encontra-se sujeita à atuação de temporais com alguma frequência, sendo a agitação marítima por eles gerada responsável pela mobilização de uma grande quantidade de sedimentos existentes na praia emersa em direção ao largo, que posteriormente podem, ou não, ser repostos na face de praia. Cunha (1999) destaca que temporais com ondas de altura significativa máxima de 9.5-10.0 m têm um período de retorno de 5 anos e que com um período de retorno de 50 anos se estimam alturas máximas de 11.5-13.6 m. O mesmo autor refere que “as situações de tempestade que resultam de baixas pressões ligadas à passagem de perturbações atmosféricas são acompanhadas de significativa sobrelevação meteorológica do nível do mar, permitindo que a ondulação possa atingir áreas mais interiores”, o que se torna mais relevante quando coincide com a preia-mar de águas vivas.

Relativamente ao regime de marés da zona da Figueira da Foz, Cunha e Dinis (1998) procedem à sua caracterização: regime mesomareal, de tipo semidiurno e com uma ligeira desigualdade entre as duas marés diárias; de amplitude média de 2,2 m (desvio padrão de 0,62) e moda de 2,4 m (com base na tabela de marés previstas para o Porto da Figueira da Foz durante o ano de 1996), verificando-se uma amplitude mínima de 0,9 m (maré morta) e a máxima de 3,6 m (maré viva equinocial), correspondendo o nível médio de maré (NMM) aos +2 m do nível de zero hidrográfico (ZH).

O severo regime de agitação marítima a que está sujeita a extensa costa arenosa em estudo resulta num equilíbrio dinâmico precário (Cunha e Dinis, 1998). A orla costeira da Figueira da Foz, segundo os autores, 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, 28.9% nos períodos de transição e 22.6% no inverno. Estes e outros resultados de diversos estudos anteriores relativos à caracterização da agitação marítima em frente à ZE foram comparados, em Oliveira e Oliveira (2016), com os resultados obtidos no âmbito da análise da série cronológica de dados de agitação de 1952 a 2010, utilizada para a caracterização do transporte sedimentar potencial no mesmo período, apresentada na Secção 5.2 do presente relatório.

A ZE é abastecida por uma deriva litoral que tem sul como direção resultante, devido à ondulação predominante de WNW. Segundo Cunha (1999), os primeiros dados da deriva litoral de areias que transpõe para sul o Cabo Mondego, a principal fonte sedimentar da ZE, foram obtidos no âmbito de um estudo de Carvalho e Cordeiro (1961), desenvolvido com recurso à marcação de areias da praia, com prata radioativa. Os resultados indicaram um caudal sólido com um volume anual de areia calculado em  $0.40-0.55 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$  e os autores concluíram que para ondulação com um azimute superior a  $283^\circ\text{N}$ , é verificado o movimento de areias sobre o estrão do Cabo Mondego com o sentido norte-sul, sendo que, para rumos mais rodados a sul, a deriva sedimentar não transpõe o cabo. Uma posterior avaliação com base na comparação de levantamentos topo-hidrográficos realizados entre 1961 e 1966 (Oliveira, 1970) estimou um caudal médio anual de  $0.90 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$  que, tomando em conta alguns fatores posteriores à avaliação, resultou mais próximo de  $10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$  (Abecasis *et al.*, 1962, e Carvalho, 1971). Tendo em conta estes estudos e com base também na estabilidade das praias dos sectores a norte do cabo, Cunha e Dinis (1998) admitiram o valor médio de  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$  para a deriva litoral de areia que alimenta a Figueira da Foz, a partir do Cabo Mondego. Os volumes anuais de transporte sedimentar longitudinal potencial obtidos no presente trabalho são bastante variáveis e apresentam-se na Secção 5.2, onde se procede à caracterização da série temporal no período 1952 a 2010.

Era usual verificar-se extração de areias na zona de acumulação de sedimentos enquanto na zona de erosão eram construídas estruturas de defesa litoral para obviar à sua ocorrência. Segundo Cunha e Dinis (1998), em abril de 1993 foi imposto um limite ao volume de extração permitido na praia da Figueira da Foz, pois tratando-se de um ano com agitação marítima próxima da média, a sobreescavação excessiva e consequentes danos urbanos causados só poderiam ser justificados pelas extrações efetuadas. Mais tarde, a 6 de março de 1998, foi suspensa a extração de areia na

praia junto ao molhe norte, registando-se assim paragem no recuo da LC e até lenta acreção no areal do molhe a Buarcos. Como referem Cunha e Dinis (1998), “para além da movimentação longitudinal e transversal de areia no litoral ser muito variável de ano para ano, a retirada de volumes arenosos em qualquer ponto do circuito da LC, já frequentemente deficitário, aumentará a tendência erosiva nas praias adjacentes, em particular nas que se situam a sotamar da deriva dominante.”

## 2.2. Evolução da costa: do Cabo Mondego à embocadura do rio Lis

Tem-se verificado na faixa litoral ocidental portuguesa, a larga escala no tempo e no espaço, a propagação de uma tendência erosiva de norte para sul, originada predominantemente por carência sedimentar. Em geral, as obras de proteção costeira têm cumprido o objetivo de proteger populações e património em frentes marítimas ameaçadas por erosão. No entanto, estas intervenções pontuais não visam suprimir a carência sedimentar verificada e por isso a propagação desta “onda de erosão” continua a observar-se (Dias *et al.*, 1994). Cunha e Dinis (1998) destacam que esta propagação generalizada terá como consequência a reorientação da LC a sotamar das estruturas costeiras (naturais e construídas).

A faixa de praia imediatamente a norte da embocadura do rio Mondego, de orientação média WNW-ESE e delimitada pelo Cabo Mondego, engloba-se na fronteira norte da ZE e trata-se de um trecho costeiro bastante estudado (praias da Figueira da Foz e Buarcos). O perfil refletivo da praia predomina sobre o dissipativo, que ocorre apenas em condições de forte agitação (Cunha, 1999), sendo os sedimentos adjacentes ao cabo fundamentalmente areias muito grosseiras e areão, ocorrendo também bolsadas de cascalho, enquanto a sul as areias são grosseiras a médias, ricas em quartzo e bioclastos. A praia submersa apresenta areia fina a muito fina, micácea, bem calibrada e unimodal. Os movimentos de areia perpendicularmente à costa, associados à variação sazonal das características da agitação, são significativos mas não se encontram quantificados (Cunha e Dinis, 1998). Com o afastamento do Cabo Mondego, a LC tem uma inflexão para sudeste, rodando progressivamente para sul em Buarcos até se alinhar com a direção SSW a cerca de 4 km a sul da embocadura, mantendo um traçado retilíneo constante com essa orientação até à foz do rio Lis. Neste estudo, admite-se a orientação média de 19.5°N (ângulo medido a partir do Norte geográfico, no sentido dos ponteiros do relógio) para o estudo do transporte sedimentar, com base no estudo de caracterização morfológica levado a cabo por Oliveira (2014) que se apresenta na Secção 4.1.

Segundo Cunha (1999), as batimétricas de profundidades superiores a 25 m mantêm o traçado geral da costa frente à Figueira da Foz, não apresentando irregularidade na zona do Cabo Mondego. Na zona da embocadura do rio, as batimétricas acima de -5 m ZH são de tal forma influenciadas pelos molhes exteriores do porto que existe um desfasamento para leste da batimétrica do ZH em aproximadamente 600 m a sul da embocadura. O autor refere ainda que ao largo, antes do prolongamento do molhe norte, a barra submersa exterior geralmente tinha cerca de 300 m de largura e 4 m de altura, contornando o molhe norte na embocadura e apresentando um adelgaçamento junto à cabeça do molhe sul, acrescentando ser “provável que uma parte significativa do transporte litoral se faça ao longo desta barra, numa faixa situada aproximadamente aos -3 m de profundidade”.



O avanço, iniciado em 1962, que se registou na LC do Cabo Mondego ao molhe norte do porto da Figueira da Foz é justificado por Cunha e Dinis (1998) com a construção dos molhes exteriores do porto que, ao formar um obstáculo à deriva litoral predominante, interromperam o seu normal fluxo com consequente acumulação arenosa a norte do molhe até que, em 1982, a sua capacidade de retenção atingiu a saturação. De facto, como referido pelos mesmos autores, para o sector a norte dos molhes, entre 1958 e 1977, o avanço da linha de praia foi notório aquando da construção dos molhes. O ritmo médio da acreção registada chegou a atingir algumas dezenas de metros por ano, segundo Dias *et al.* (1994). No período seguinte de 1977-1982, por análise de fotografia aérea vertical, constataram um lento avanço da praia que, de 1982 a 1990, se traduziu numa estabilização generalizada, com exceção da zona adjacente ao molhe norte em que se verificou uma inversão da tendência geral, com recuos justificados pela extração de areias na praia, iniciada em 1977, atingindo um máximo em 1980, moldando o perfil topográfico de praia. Quando a extração excedia o afluxo sedimentar ou durante temporais de intensa ondulação com rumos de SW, essa depressão topográfica era propagada para norte, generalizando a berma erosiva.

Desde o início da década de 60 que a zona situada a sotamar dos molhes do porto da Figueira da Foz tem sofrido um forte recuo erosivo, ao ponto de, nos anos 70, se ter verificando profundo corte na duna primária adjacente ao molhe sul. A costa das povoações de Gala-Cova, Lavos, Leirosa e Pedrógão foi artificializada com o intuito de sustentar a intensa erosão costeira e impedir os recuos do areal, consequência direta da ação dos molhes e das variadas intervenções efetuadas nos troços fluvial e estuarino do rio Mondego, entre as quais se destacam as obras de regularização da bacia hidrográfica e as extrações de areia no rio, na praia e na barra e as frequentes dragagens portuárias de grandes volumes (Cunha *et al.*, 1998).

Do estudo de evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do rio Mondego levado a cabo por Oliveira e Brito (2015), por comparação de três levantamentos topo-hidrográficos (1975, 1978 e 2011) incluindo a parte submersa da praia, os autores retiraram importantes conclusões acerca da evolução das frentes marítimas dos núcleos populacionais da Gala-Cova, Costa de Lavos e Leirosa. Na Gala-Cova, as obras de proteção costeira em conjunto com a alimentação artificial limitaram a progressão do surto erosivo verificado no período 1975-1978 e promoveram a recuperação da praia durante o período 1978-2011, registando-se em 2011 um avanço de 25 m da LC em relação a 1975. Em oposição, a sotamar do último esporão do campo de esporões da Gala-Cova, o surto erosivo já verificado no período 1975-1978 foi fortemente intensificado no período 1978-2011. Relativamente à frente marítima da Costa de Lavos, cuja evolução morfológica foi semelhante à da frente marítima da Leirosa, registou-se um notável assoreamento a barlar do esporão, protegendo o núcleo populacional contra a ação das ondas, e concluiu-se que a sua construção foi determinante na presença da propagação da erosão observada entre 1975 e 2011. Já a sotamar do esporão da Costa de Lavos ECL, como do esporão de Lavos, o forte processo erosivo teve associado um notável recuo da LC e um notável rebaixamento da duna frontal.

De acordo com Cunha e Dinis (1998), teve início na década de 90 uma pequena tendência erosiva no sector Mira - Quaios (Bettencourt e Ângelo, 1992), que atingiu com maior intensidade a zona Cabo

Mondego - Figueira da Foz, zona mais vulnerável à erosão devido à sua orientação NW-SE que a torna mais exposta à agitação de tempestade (de SW e W) e ao facto de se situar a sotamar do grande esporão natural do Cabo Mondego que constitui um obstáculo à deriva litoral mais persistente. As praias imediatamente a norte do Cabo, Murtinheira e Quiaios, apresentaram-se sem problemas de erosão, segundo Cunha (1999).

Segundo Cunha (1999), de meados de dezembro de 1995 até ao final de janeiro de 1996, a ondulação proveniente de W, resultante da intensa agitação marítima observada, foi a causa de significativa erosão nas praias da Figueira da Foz e Buarcos. É durante os períodos de temporal que ocorre a remoção de grandes quantidades de areia da zona de rebentação e espraçamento para maiores profundidades, devido à maior intensidade das correntes de retorno geradas pelas ondas incidentes também mais energéticas. A reposição desta areia ocorre geralmente quando as condições de agitação são mais fracas, nos subsequentes períodos de bom tempo, no entanto, devido a contextos climáticos fora do normal no verão seguinte e até 1998, essa reposição foi negativamente influenciada: mesmo com o retorno das condições meteorológicas habituais e a atenuação ou inversão da tendência erosiva, é improvável a reposição na totalidade do prisma arenoso original tendo em conta a generalização do défice sedimentar na costa ocidental Portuguesa. Cunha (1999) observou que nos anos de 1997 e 1998 a evolução erosiva se propagou a todo o troço arenoso de Buarcos até ao molhe norte do porto da Figueira da Foz, sugerindo alimentações artificiais realizadas pontualmente para a recuperação destas praias erodidas devido a episódios de condições meteorológicas peculiares.

Com base no trabalho de execução de seis perfis de praia desde dezembro de 1995 a setembro de 1996, apresentado por Almeida e Amaral (1996) e Almeida (1997), Cunha e Dinis (1998) concluíram que a norte do Cabo Mondego não foi registado recuo da LC neste período. Apenas se verificou erosão durante o temporal de janeiro de 1996, explicada pela predominância de uma ondulação média mais próxima de W, enquanto a sul do Cabo se verificou recuo do areal na praia de Buarcos. A sul da embocadura do rio Mondego, a ondulação de W originou deriva litoral para norte, verificando-se retenção de areias junto ao molhe e acreção na praia do Cabedelo, enquanto a zona do Hospital sofreu erosão. Os autores concluíram também que uma ondulação mais frequente de SW, em detrimento de NW, contribui para o quadro de carência de alimentação nas praias a sul do cabo.

De acordo com a análise efetuada por André e Cordeiro (2013) devido ao esporão natural que é o promontório calcário a sul da praia do Pedrógão, o balanço sedimentar anual nesta praia não atingiu um défice tão elevado como a sul, onde o cordão dunar frontal já foi erodido. Note-se que, segundo Cunha (1999), um abastecimento sedimentar inferior à capacidade de transporte litoral causa, além da erosão mencionada, uma debilitação das barras arenosas submersas, implicando uma redução na ação de dissipação da energia das ondas incidentes. André e Cordeiro (2013) identificaram também erosão nas praias de Vieira de Leiria e de S. Pedro de Moel, sendo que, na primeira, o avanço do mar apenas foi impedido pelo frágil paredão e pelo reforço em enrocamento.

No período compreendido entre outubro de 2001 e março de 2012, André e Cordeiro (2013) justificaram, por análise de perfis topográficos transversais de praia, a maior acreção registada nas praias da Figueira da Foz com a predominância da ondulação de rumos próximos do Norte, devido ao aumento de sedimentos que transpuseram o Cabo Mondego, e quantificaram em 40 m/ano o aumento médio dessa acreção devido ao prolongamento do molhe norte.

No caso da Figueira da Foz, Dias *et al.* (1994) afirmam que é evidente que a erosão costeira a sotamar dos molhes se deve à retenção da deriva litoral pelo molhe norte ainda antes do seu prolongamento, mas também à progressiva diminuição do caudal sólido debitado pelo rio Mondego. Com base em levantamentos topográficos, André e Cordeiro (2013) concluíram que todo o troço costeiro a sul da embocadura do rio Mondego até à praia da Vieira, com exceção da praia da Cova e Gala, sofreu erosão diretamente relacionada com o prolongamento do molhe norte do porto da Figueira da Foz, destacando-se a erosão no troço que se localiza entre 6000 m a 16000 m da embocadura (Costa de Lavos, Leirosa e Osso da Baleia). Os sedimentos dragados do canal de navegação, da barra e do sector marinho envolvente à foz do Mondego e depositados ao largo do campo de esporões da Gala-Cova, não são suficientes, de acordo com os mesmos autores, para mitigar a interrupção que o prolongamento do molhe norte da Figueira da Foz causou na deriva litoral.

Todos os autores convergem para a mesma recomendação, como enfatizado por Cunha (1999), a monitorização das praias é da mais elevada importância para que, posteriormente, se disponha de dados para a compreensão da sua evolução e se possa prever comportamentos futuros bem fundamentados.

## 3. Hidrodinâmica

### 3.1. Agitação marítima

Nesta sessão apresenta-se de forma sumária o método utilizado e os resultados obtidos pelos mesmos autores do presente estudo em estudo previamente desenvolvido (Oliveira e Oliveira, 2016). Neste último estudo, analisou-se a série cronológica com 59 anos (de 1952 a 2010) de dados de agitação marítima, num total de 86200 trios de valores dos parâmetros Hs, Tp e Dir, indissociáveis na caracterização do regime de agitação marítima, que é utilizada no âmbito do presente trabalho para avaliar o transporte sedimentar potencial na ZE. Numa primeira fase, estimaram-se as frequências de ocorrência relativas dos parâmetros Hs, Tp e Dir por classes de intervalos semiabertos no limite superior e com amplitudes 0.50 m, 2 s e  $10^\circ$ , respetivamente, sendo consideradas para as direções escalões de  $5^\circ$  quando se justificou necessidade de mais pormenor. Foram analisados os parâmetros estatísticos média, desvio-padrão, mínimo e máximo, e 1º, 2º e 3º quartis das séries temporais destes três parâmetros, correspondentes aos regimes geral e sazonais. A sazonalidade considerada teve por base o inverno marítimo, de outubro a março, e o verão marítimo, de abril a setembro, e a mensalidade, na qual a análise incidiu sobre cada mês individualmente e na inter-mensalidade.

Concluiu-se que a zona de estudo está sujeita a um regime geral de agitação marítima de elevada energia caracterizado por uma forte sazonalidade. Com características médias Hs 2.15 m, Dir  $299.5^\circ\text{N}$  e Tp 11.6 s, e Hs mais frequente de 1.00-1.50 m associada a Dir  $300\text{-}310^\circ\text{N}$  e Tp 8-10 s, o regime geral regista eventos máximos com Hs de 13.13 m. Eventos de Hs > 5.00 m representaram 3.69% das ocorrências, sendo que Hs > 9.50 m ocorreram exclusivamente para Dir  $270\text{-}290^\circ\text{N}$  e Tp 16-22 s, e os valores médio e máximo de Hs no inverno/verão marítimo foram 2.66/1.63 m e 13.13/8.32 m, respetivamente. Da análise mensal verificou-se que as médias de Hs e Tp são máximas em janeiro, 3.02 m e 14 s, respetivamente, e mínimas em julho, 1.39 m e 9 s, restringindo-se as médias mensais de Dir a  $289\text{-}311^\circ\text{N}$ , com as obliquidades extremas, oeste/noroeste ( $289/311^\circ\text{N}$ ), em janeiro/agosto. Da comparação com outros estudos concluiu-se que a sazonalidade e anos atípicos influenciam as análises baseadas em períodos restritos e que uma análise baseada numa série temporal de dados de agitação marítima muito longa robustece a representatividade dos parâmetros expostos neste estudo.

### 3.2. Nível do mar

No presente estudo considerou-se a variação do nível do mar devida à variação da maré astronómica e da maré meteorológica. A metodologia aplicada baseou-se em dados de *hindcast* do modelo WXTide32 e de um modelo aplicado por Fortunato *et al.* (2014).

O WXTide32, aqui referido como WXTide, é um *software* de previsão de níveis de maré astronómica para *Windows*. O modelo permite obter previsões de maré astronómica desde 1970 até 2037, referidas a mais de 9500 estações em todo o mundo, das quais se destaca a estação portuguesa da

Figueira da Foz, de coordenadas 40°9' N e 8°52' W, utilizada neste estudo. Como *output*, através do comando *incremental tide*, o *WXTide* permite obter a listagem de previsões para a estação selecionada com um passo de 1 a 1440 minutos e até 99 dias de cada vez.

Compararam-se previsões do nível do mar (NM) obtidas com o *WXTide* com previsões obtidas pelo Instituto Hidrográfico (IH), disponibilizadas no *website* desta instituição, para os mesmos eventos de baixa-mar (BM) e preia-mar (PM), com o objetivo de avaliar a concordância entre as duas fontes. Apresentam-se no Quadro 3.1 os valores obtidos para dois períodos distintos, de 8 a 9 de março e de 10 a 11 de abril de 2015, através do *WXTide* e do IH.

Conclui-se que as previsões do nível do mar do IH são mais elevadas. A diferença de nível entre condições de preia-mar e baixa-mar não é constante apesar de sistemática, sendo mais elevada no caso de preia-mar (Quadro 3.1). Assim, tratando-se de previsões de maré astronómica com valores próximos nas duas fontes, o que suporta a sua fiabilidade, foram extraídos do *WXTide* os valores que formam a série temporal do nível do mar, de 6 em 6h para o período de 1970 a 2010, com as devidas correções referentes ao horário de verão. Os valores são referidos ao zero hidrográfico, ZH.

Quadro 3.1 – Previsões do nível do mar obtidas através do *WXTide* e do IH.

	Hora [hh:mm]	NM <i>WXTide</i> [m]	Hora [hh:mm]	NM IH [m]	Diferença (IH- <i>WXTide</i> ) [m]	Maré
08-03-2015	04:22	3.23	04:14	3.37	0.14	PM
	10:19	0.62	10:16	0.68	0.06	BM
	16:38	3.10	16:30	3.27	0.17	PM
	22:31	0.64	22:26	0.71	0.07	BM
09-03-2015	04:45	3.12	04:45	3.29	0.17	PM
	10:57	0.68	10:46	0.76	0.08	BM
	17:13	3.01	17:02	3.20	0.19	PM
	23:16	0.73	22:58	0.79	0.06	BM
10-04-2015	01:08	0.9	0:56	0.96	0.06	BM
	07:21	2.70	7:17	2.92	0.22	PM
	13:29	1.00	13:16	1.09	0.09	BM
	19:42	2.80	19:43	2.96	0.16	PM
11-04-2015	02:02	1.10	1:50	1.11	0.01	BM
	08:15	2.60	8:14	2.76	0.16	PM
	14:28	1.20	14:15	1.24	0.04	BM
	20:42	2.70	20:46	2.85	0.15	PM
<b>Média</b>					0.11	
<b>Média em PM</b>					0.17	
<b>Média em BM</b>					0.06	

Para entrar em conta com o efeito da maré meteorológica no nível do mar, foram utilizados dados de previsão do nível do mar gerados com base num modelo de *hindcast* de 250 m de resolução na plataforma continental Portuguesa, com erros quadráticos médios da ordem de 2-5 cm e níveis extremos com erros máximos da ordem de 15 cm (Fortunato *et al.*, 2014), referidos nesta secção como dados de *hindcast*. Estes dados compreendem o período de 1980 a 2006 e são compostos por

séries tri-horárias de níveis relativos ao ZH. A análise destes dados comparativamente aos dados provenientes do *WXTide* revelou a necessidade compatibilizar as ocorrências de baixa-mar e preia-mar das duas fontes. De seguida, foi extraída parte da série correspondente à sobre-elevação meteorológica para o período de 1980 a 2006, subtraindo o nível obtido do *WXTide* ao correspondente nível dos dados de *hindcast*. Uma vez que os fenómenos meteorológicos são aleatórios, admitiu-se a repetição da série de maré meteorológica de 1980-2006 nos restantes períodos.

A série temporal final do nível do mar de 1952 a 2010 resulta da composição das componentes de maré astronómica e meteorológica apresentadas, tendo em conta a ocorrência de anos bissextos. Esta série representa o nível do mar utilizado na criação do *annual wave climate file*, ficheiro de *input* dos parâmetros de caracterização das condições do clima de agitação marítima no sistema de modelos integrados *LITPACK*, apresentado no Anexo A.

## 4. Perfil de praia e sedimentos

As características topo-hidrográficas do perfil de praia, juntamente com as características dos sedimentos existentes na zona de estudo (ZE), são fundamentais na modelação do transporte sedimentar longitudinal. Esta secção tem como objetivo a escolha do perfil transversal de praia e do diâmetro mediano representativos das características de todo o trecho costeiro em estudo, parte integrante do *input* necessário para o sistema de modelos integrados *LITPACK* aplicado no presente estudo.

### 4.1. Dados e método

O **perfil transversal representativo** da zona em análise foi selecionado com base num estudo recente de caracterização morfológica do trecho litoral entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis (Oliveira, 2014). O modelo digital do terreno (MDT) elaborado, apresentado em parte na Figura 4.1, resultou 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 tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), do Instituto Geográfico Português e Instituto da Água (assim designado na altura).

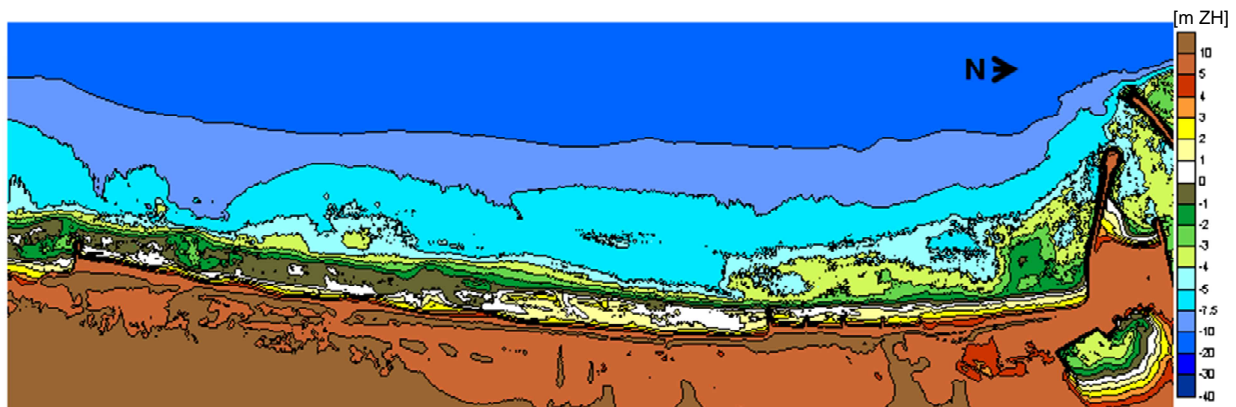


Figura 4.1 – Parte do modelo digital do terreno da zona costeira delimitada pelas embocaduras dos rios Lis e Mondego, zona de estudo, adaptado de Oliveira (2014).

No referido estudo, o autor recorreu à partição do trecho litoral em questão em sub-trechos condicionados pelas estruturas transversais existentes, construídas ou naturais, identificando as suas principais características morfológicas e selecionando, de entre dezoito perfis, o perfil transversal que melhor representa cada sub-trecho. Na Figura 4.2 identifica-se a localização dos perfis transversais de praia na ZE. Para definição da nomenclatura dada às zonas em que normalmente se divide a praia, apresenta-se um esquema representativo na Figura 4.3. Na Figura B.1 do Anexo B apresenta-se o declive da face de praia obtido para cada um dos perfis transversais obtidos por Oliveira (2014).

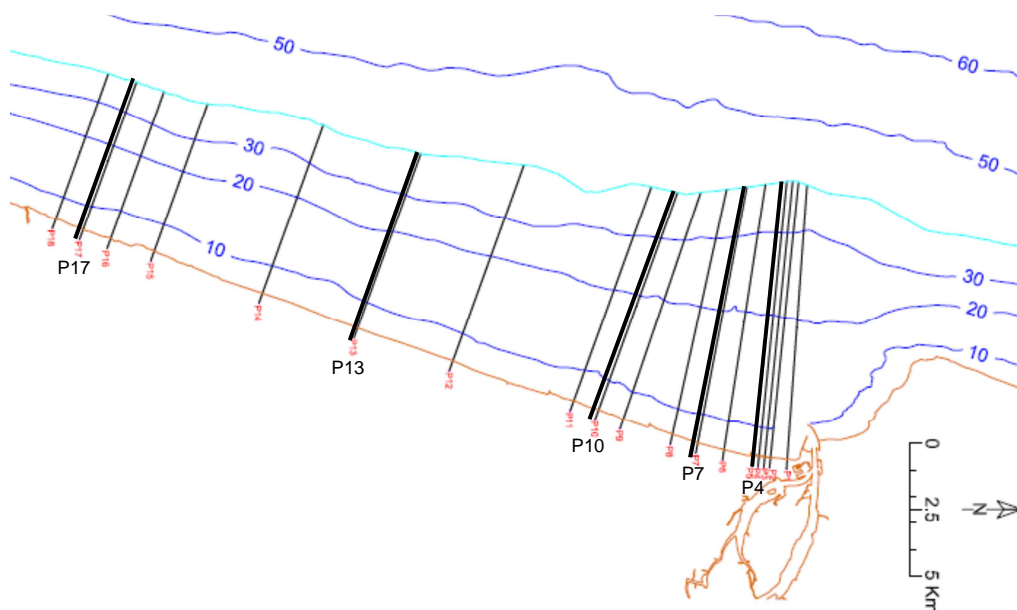


Figura 4.2 – Localização dos perfis transversais de praia, P1 a P18, na zona costeira delimitada pelas embocaduras dos rios Lis e Mondego, zona de estudo, adaptado de Oliveira (2014).

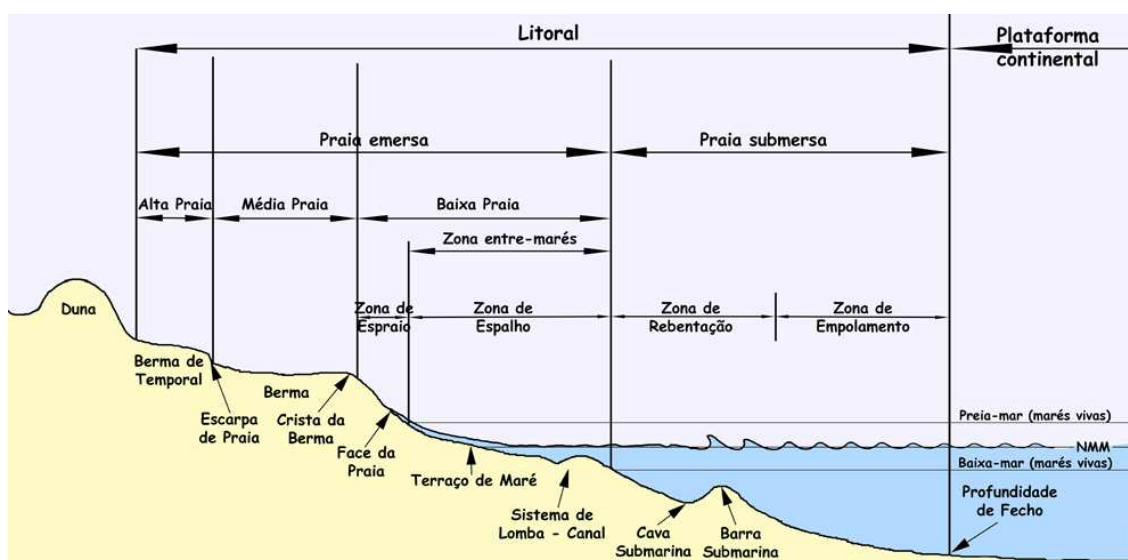


Figura 4.3 – Esquema representativo das zonas em que normalmente se divide a praia. Imagem adaptada de <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/praias.html> (consultado em outubro de 2015).

A seleção dos perfis representativos foi feita tendo em conta: i) a centralidade do perfil no respetivo sub-trecho (para minimizar o efeito das estruturas transversais mais próximas na geometria do perfil) e ii) a geometria interior à envolvente do conjunto dos perfis desse sub-trecho (para minimizar singularidades morfológicas pouco representativas na extensão global do sub-trecho). Ela resultou na escolha dos perfis denominados P4, P7, P10, P13 e P17, apresentados na Figura B.7 do Anexo B para representar, respetivamente, cada um dos cinco sub-trechos, que são: 1) do molhe sul da embocadura do rio Mondego ao último esporão do campo de esporões da Gala-Cova (EGC); 2) do último esporão do campo de EGC ao esporão da Costa de Lavos (ECL); 3) do ECL ao esporão da Leirosa (EL); 4) do EL ao promontório de Pedrogão; e 5) do promontório de Pedrogão ao molhe norte da embocadura do rio Lis. Foram ainda comparados estes perfis de praia com os perfis de equilíbrio



obtidos para valores de  $d_{50}$  de 0.2 a 0.6 mm, em intervalos de 0.1 mm, também apresentados na Figura B.2 do Anexo B.

O **perfil teórico de equilíbrio** é um perfil estatisticamente médio que mantém a sua forma à parte de pequenas variações, incluindo as sazonais. Num perfil de equilíbrio do tipo sugerido por Dean (1987), a profundidade,  $d$ , aumenta exponencialmente com a distância à LC,  $x$ , de acordo com a Equação 4.1, onde  $A$  é um parâmetro de declividade e  $m$  é um expoente adimensional.

$$d = A \times x^m \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Dean (1987), sugeriu  $m = 0.67$  como valor médio para o expoente adimensional. No entanto, este valor tem uma grande variabilidade dependendo do tipo de praia em questão, variando tipicamente entre 0.4 e 0.8, respetivamente para perfis refletivos ( $\Omega < 1.5$ ) e perfis dissipativos ( $\Omega > 5.5$ ) (Cowell *et al.*, 1999 e Masselink e Huges, 2003), sendo função da velocidade de queda adimensional  $\Omega$ , expressa na Equação 4.2, onde  $H_0$  representa a altura de onda ao largo,  $T$  o período de onda e  $w_s$  a velocidade de queda dos sedimentos.

$$\Omega = H_0 / (w_s T) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

O parâmetro de declividade  $A$  foi empiricamente relacionado com a velocidade de queda dos sedimentos  $w_s$  por Dean (1987), através da Equação 4.3, apresentando-se no Quadro 4.1 alguns valores de  $A$  em função do diâmetro mediano dos sedimentos,  $d_{50}$ , uniforme ao longo do perfil.

$$A = 0.067 w_s^{0.44} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Quadro 4.1 – Relação entre  $d_{50}$  e o parâmetro  $A$  da Equação 4.1 do perfil de equilíbrio.

$d_{50}$ [mm]	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
<b>A</b> [-]	0.043	0.062	0.080	0.092	0.103	0.132	0.178	0.234	0.318	0.390

O perfil de equilíbrio aumenta de inclinação com o aumento da dimensão dos sedimentos. Na realidade, há uma seleção natural dos sedimentos na zona ativa do perfil de praia, com o tamanho mediano do grão a diminuir com o aumento da distância à LC. É por isso interessante proceder-se posteriormente a testes de sensibilidade ao transporte sedimentar fazendo variar  $d_{50}$  ao longo do perfil. Como trabalho futuro, sugere-se o teste de diferentes  $d_{50}$ : sedimento mais grosseiro na face de praia e mais fino na barra submersa, visto que o sistema de modelos integrados *LITPACK* permite simular tal diferenciação do tamanho do grão ao longo do perfil transversal.

Constata-se que o perfil de equilíbrio não depende da altura de onda, pelo facto de a profundidade limitar a altura de onda na zona de rebentação. No entanto, é a altura de onda que define a extensão da zona litoral na qual o conceito de perfil de equilíbrio é válido, através da profundidade de fecho.

Acrescenta-se que as referidas relações entre o tamanho do grão dos sedimentos, o perfil de equilíbrio e o clima de agitação são de grande importância. A título de exemplo, salienta-se a necessidade de, por motivos de estabilidade, as alimentações artificiais serem efetuadas com areias mais grosseiras ou tão grosseiras quanto os sedimentos nativos. De outra forma, os sedimentos depositados serão naturalmente transportados em direção ao largo formando um novo e menos inclinado perfil de equilíbrio, característico de um grão mais fino.

A **profundidade de fecho** é a profundidade a partir da qual os processos costeiros não induzem transporte (longitudinal e/ou transversal) significativo, ou seja, o perfil de praia não sofre alterações apreciáveis (Figura 4.3). Para profundidades inferiores, verificam-se alterações sazonais, ou devidas a temporais, na geometria do perfil, pois é nessa zona que ocorrem as transferências transversais de sedimentos entre a praia emersa e a praia submersa.

Na formulação de Birkemeier (1985), mais conservativa que a de Hallermeier (1981), a profundidade de fecho,  $d_c$ , é dada pela Equação 4.4.

$$d_c = 1.75H_e - 57.9 \left( \frac{H_e^2}{gT_e^2} \right) \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Onde  $H_e$  representa a altura da onda significativa que é excedida 12 horas por ano,  $T_e$  o período associado a essa altura da onda e  $g$  a aceleração da gravidade.

A profundidade de fecho é condicionada pelo tamanho da amostra, sendo mais conservadora quando é calculada com base num período em que ocorrem  $H_s$  mais elevadas. Assim, para a obtenção de  $H_e$ , foi utilizado o ano de 1973, por se tratar do ano em que foi registada a altura significativa mais elevada,  $H_s^{max}=13.13$  m, e determinou-se  $H_s=11.381$  m como sendo a onda que foi excedida 12 h/ano. A este evento corresponde um período de 18.05 s, valor atribuído a  $T_e$ . A profundidade de fecho correspondente é 15.6 m em relação ao nível médio do mar, equivalente a -13.6 m ZH, sendo a teoria de perfil de equilíbrio válida para profundidades inferiores a esta.

A extensão da zona ativa e o declive da face de praia dependem tanto do diâmetro mediano dos sedimentos como das condições de agitação marítima. Os resultados preliminares da distribuição do transporte sedimentar longitudinal total ao longo do perfil transversal para o clima de agitação marítima no ano de 1973 obtidos com recurso ao módulo computacional *LITDRIFT* indicam uma profundidade de fecho ligeiramente superior. Optou-se por considerar o início da zona ativa na batimétrica -14 m ZH, onde o volume de transporte sedimentar calculado se verifica residual.

Definido o início da zona ativa, foi necessário proceder à determinação das condições de hidrodinâmica na batimétrica -14 m ZH. Assim, recorrendo ao módulo *Transfer Wave Climate* integrado no *LITDRIFT*, transferiu-se a série temporal de agitação marítima para esta profundidade. Este procedimento veio permitir uma grande economia de tempo no cálculo computacional do transporte longitudinal e da evolução da LC.

Para definir o **diâmetro mediano dos sedimentos**,  $d_{50}$  e os diâmetros  $d_{16}$  e  $d_{84}$ , dimensões relativamente às quais 16% e 84% em peso das partículas têm diâmetro inferior, respetivamente, necessários para o cálculo da dispersão geométrica,  $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ , considerou-se informação proveniente de estudos anteriores realizados para a zona. No âmbito desses estudos, é referida uma gama alargada, entre 0.30 e 0.65 mm, de valores para  $d_{50}$ . Salientam-se os valores sugeridos por Henriques (2007), que considerou  $d_{50}=0.425$  mm e  $d_{90}=0.650$  mm, e Simões e Castanho (1978), que admitiram as granulometrias médias da costa oeste portuguesa, com  $d_{35}=0.30$  a 0.35 mm,  $d_{50}=0.35$  a 0.60 mm e  $d_{60}=0.45$  a 0.60 mm.

## 4.2. Resultados

Da ponderação dos perfis representativos de cada sub-trecho e sua comparação com os perfis de equilíbrio para os vários  $d_{50}$ , apresentados conjuntamente na Figura B.7 do Anexo B, foi escolhido como **perfil representativo** da extensão global do trecho em análise, para efeitos de avaliação do transporte longitudinal, o perfil **P7**. Justifica-se esta escolha pelo facto de se tratar do perfil mais aproximado do que seria uma **morfologia média** da ZE e com um **declive** da face de praia próximo da tendência **média** dos perfis analisados.

A escolha do **diâmetro mediano** foi feita a par com a escolha do perfil representativo devido à relação intrínseca entre a forma do perfil de praia e a dimensão dos sedimentos que o constituem. Dos vários  $d_{50}$  passíveis de representar a ZE, de acordo com a gama de valores sugeridos pelos autores dos estudos mencionados, o perfil de equilíbrio para  **$d_{50}=0.30$  mm** é aquele cuja morfologia mais se aproxima ao perfil representativo, P7, considerando-se assim um  $d_{50}$  uniforme para todo o perfil transversal. O perfil P7 e o perfil de equilíbrio para  $d_{50}=0.30$  mm apresentam-se em pormenor na Figura 4.4, onde é evidente a sua aproximação.

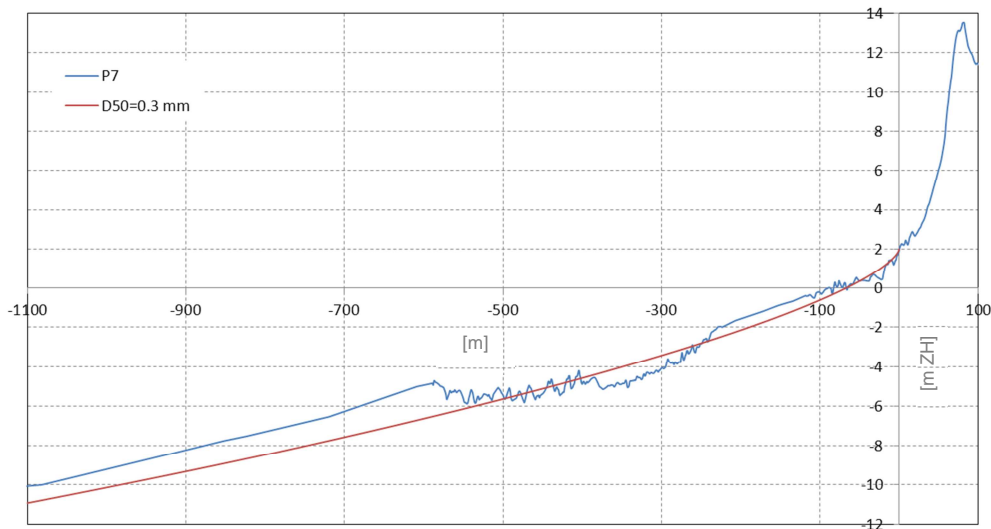


Figura 4.4 – Perfil de praia P7 e perfil de equilíbrio para  $d_{50}=0.3$  mm, adaptado de Oliveira (2014).

Para efeitos de análise do transporte longitudinal potencial seria interessante a título de trabalho futuro, como mencionado na secção anterior, a consideração de um diâmetro mediano variável ao longo do perfil transversal. Sugere-se, com base nos estudos anteriormente mencionados, uma variação linear de  $d_{50}=0.60$  mm na face de praia até 0.25 mm à profundidade de fecho dos perfis.

## 5. Modelação do transporte sedimentar longitudinal potencial

Neste capítulo analisa-se o transporte sedimentar longitudinal potencial (capacidade de transporte) para o período entre 1952-2010. Esta análise foi motivada pelo facto de ser esta capacidade que, mediante o abastecimento de sedimentos ao sistema em estudo, determina a ocorrência de erosão, acumulação ou equilíbrio, consoante a capacidade seja superior, inferior ou igual ao abastecimento. A análise da evolução da linha de costa (LC) torna-se mais crítica e existe uma maior percepção acerca do comportamento esperado quando se conhece antecipadamente o processo da dinâmica sedimentar litoral que o origina.

Para a modelação do transporte sedimentar potencial, representado por  $Q_s$ , utilizou-se o módulo computacional *LITDRIFT*, apresentado no Anexo A. Esta grandeza corresponderá ao transporte sedimentar efetivo caso exista volume sólido para preencher esse transporte potencial na totalidade, o que só poderá ser avaliado no âmbito da modelação da evolução da LC, após calibração do modelo utilizado.

As componentes do transporte sedimentar longitudinal potencial analisadas são o transporte potencial dirigido para sul,  $Q_s$  Sul, o transporte potencial para norte,  $Q_s$  Norte, e as estatísticas que deles resultam: o transporte potencial total,  $Q_s$  Total (soma do módulo das duas componentes anteriores); e o transporte potencial na direção predominante,  $Q_s$  Resultante. De acordo com a convenção de sinais adotada (Figura 5.1), o  $Q_s$  Sul tem sentido negativo e dirige-se para a esquerda de um observador em terra de frente para o mar (direções incidentes superiores à direção da normal à LC, que neste caso é  $289.5^\circ N$ ), enquanto  $Q_s$  Norte tem sentido positivo e dirige-se para a direita do mesmo observador.

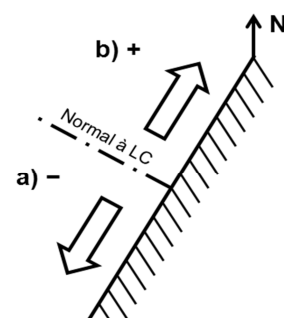


Figura 5.1 – Convenção de sinais adotada para o sentido do transporte longitudinal: a)  $Q_s$  Sul (+); b)  $Q_s$  Norte (-).

Na Secção 5.1 faz-se uma análise de sensibilidade a vários parâmetros de hidrodinâmica e geomorfologia com o objetivo de quantificar a influência de cada um deles sobre  $Q_s$ . Na Secção 5.2 apresentam-se os resultados obtidos na modelação do transporte potencial para o período de 59 anos em estudo, com o objetivo de analisar o impacte da variabilidade interanual do clima de agitação marítima no  $Q_s$  da zona de estudo (ZE) e também o  $Q_s$  em anos estatisticamente relevantes.

Dados os requisitos do sistema de modelos utilizado, daqui em diante utilizar-se-á o parâmetro altura média quadrática,  $H_{rms}$ , para caracterizar a altura de onda, obtida por  $H_s$  através da Equação A.18 do Anexo A.

## 5.1. Análise de sensibilidade

Nesta secção faz-se uma análise de sensibilidade aos principais parâmetros de hidrodinâmica e geomorfologia que têm influência no transporte sedimentar longitudinal ao longo do perfil de praia do trecho em estudo: altura, direção e período de onda, rugosidade de fundo ( $k$ ), diâmetro mediano dos sedimentos ( $d_{50}$ ) e geometria do perfil de praia. Como caso de referência, admitiu-se a atuação de uma onda com valores médios dos parâmetros  $H_{rms}$ ,  $Dir$  e  $T_z$  no período 1952-2010, durante 6 horas, sobre o perfil de praia representativo para a ZE previamente selecionado, P7, e  $d_{50}=0.3$  mm (Quadro 5.1).

Quadro 5.1 – Parâmetros de caracterização do caso de referência para análise de sensibilidade ao transporte sedimentar induzido por eventos com duração 6h.

Caso	$H_{rms}$ [m]	$Dir$ [°N]	$T_z$ [s]	$k$ [m]	$d_{50}$ [mm]	Perfil	$Q_s$ [m <sup>3</sup> ]
Referência (REF)	1.5	299	9	0.004	0.3	P7	- 1 168

### 5.1.1. Altura de onda

A magnitude da deriva litoral é fortemente influenciada pela altura de onda. Com base no transporte longitudinal potencial anual médio obtido para o caso de referência,  $Q_{s_{ref}}$ , em que se considerou uma altura de onda  $H_{rms}=1.5$  m, conclui-se que valores inferiores ao caso de referência, como 0.5 e 1.0 m, originam menos de metade do transporte potencial, apenas 13 e 45%, respetivamente. Os valores de  $Q_s$  obtidos nesta análise encontram-se no Quadro B.1 do Anexo B. Para  $H_{rms}=2.0$  m, verifica-se um aumento do transporte potencial para o dobro de  $Q_{s_{ref}}$ , e para alturas de 3.0, 4.0, 5.0 e 6.0 m verificam-se valores de  $Q_s$  5.6, 11.7, 20.0 e 30.0 vezes superiores a  $Q_{s_{ref}}$ , respetivamente.

Na Figura 5.2 apresenta-se a variação de  $Q_s$  com  $H_{rms}$ . Ajustou-se uma função polinomial de grau 2 aos pares de valores ( $H_{rms}, Q_s$ ), com um valor de  $R^2$  de 0.9998. O quadrado do coeficiente de correlação,  $R$ , denominado coeficiente de determinação, é uma medida do ajuste de um modelo estatístico linear generalizado aos valores observados. Indica que o modelo se ajusta tanto melhor à amostra quanto mais próximo da unidade for o seu valor.

Como sugerem várias formulações de cálculo do transporte potencial sedimentar longitudinal (vd. Komar & Inman, 1970; Kamphuis *et al.*, 1986; e Kamphuis, 1991), a variação de  $Q_s$  ocorre mediante uma potência aplicada à altura de onda. O grau do polinómio do ajuste que se obteve, 2º grau, é concordante com a formulação sugerida pelo estudo de avaliação do transporte sedimentar longitudinal através de diferentes formulações (Kamphuis, 1991), levado a cabo por Laranjeiro e Oliveira (2003), como sendo aquela cujo resultado mais se adequa à costa oeste portuguesa, nomeadamente à praia de Buarcos, situada imediatamente a norte da praia da Figueira da Foz.

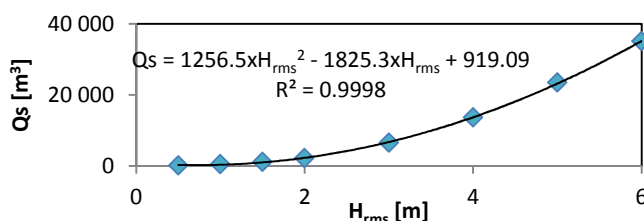


Figura 5.2 – Relação entre  $Q_s$  e  $H_{rms}$  resultante da análise de sensibilidade à altura de onda.

### 5.1.2. Direção de onda

A direção média incidente é outro parâmetro de forte influência na deriva litoral. Avaliou-se a sua influência no transporte sedimentar longitudinal através da obliquidade em relação à direção normal à orientação média da LC, 289.5°N, representada pelo ângulo  $\alpha_0$ . Apresentam-se no Quadro B.1 do Anexo B os valores de  $Q_s$  obtidos para um conjunto de valores de  $\alpha_0$ .

Na Figura 5.3 apresenta-se a variação de  $Q_s$  com  $\alpha_0$ . Verifica-se uma tendência do aumento do transporte potencial com o aumento da obliquidade até 50°, valor próximo do resultante da formulação do CERC (1984) (45°), correspondendo aproximadamente à direção 340°N, onde  $Q_s$  é 4.4 vezes o  $Q_{s,ref}$  (299°N), verificando-se um decréscimo para obliquidades superiores. A estes pares de valores, ajustou-se uma função polinomial de grau 3. O valor  $R^2$  obtido neste ajuste permite afirmar que, para as características da zona em estudo e incidência de ondas com  $H_{rms}$  e  $T_z$  com os valores de referência, os valores de  $Q_s$  podem obter-se de forma explícita e simples através da equação apresentada na Figura 5.3 para diferentes valores da obliquidade em relação à normal à LC. Outras formulações, e.g. Komar & Inman (1970) e Kamphuis (1991), sugerem diferentes relações entre  $Q_s$  e este parâmetro.

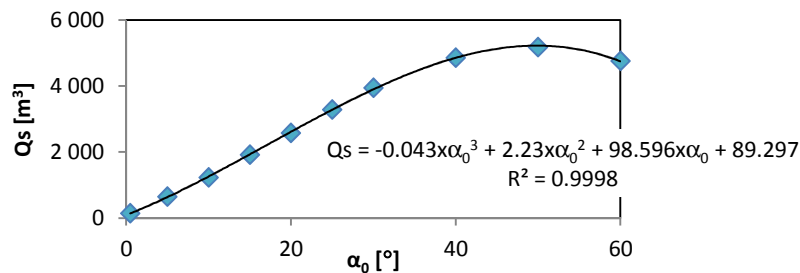


Figura 5.3 – Relação entre  $Q_s$  e  $\alpha_0$  resultante da análise de sensibilidade à direção média incidente.

### 5.1.3. Período de onda

A influência do período das ondas no transporte sedimentar potencial não é tão determinante quanto a altura ou direção. No Quadro B.1 do Anexo B apresentam-se os valores de  $Q_s$  para os vários períodos  $T_z$  testados, ilustrando-se na Figura 5.4 a variação de  $Q_s$  com este parâmetro. Para a gama de valores testados, observa-se um máximo de  $Q_s$ , 1.3 vezes  $Q_{s,ref}$ , para o período de 11 s, e um mínimo de  $Q_s$ , 0.6 vezes  $Q_{s,ref}$ , para o período de 5 s. Ajustou-se uma função polinomial de grau 3 a estes pares de valores e obteve-se a relação expressa na Figura 5.4 que, de uma forma explícita, permite determinar  $Q_s$  para as condições da ZE na presença de ondas incidentes com  $H_{rms}$  e  $T_z$  com os valores de referência.

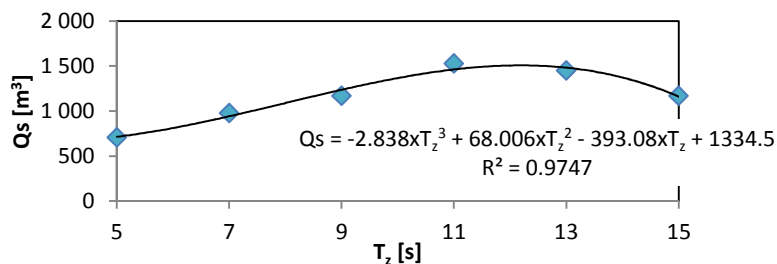


Figura 5.4 – Relação entre  $Q_s$  e  $T_z$  resultante da análise de sensibilidade ao período de onda.

#### 5.1.4. Rugosidade de fundo

Os valores de rugosidade de fundo considerados para a análise de sensibilidade de  $Q_s$  (Quadro B.1 do Anexo B) tiveram em conta a sua relação com o diâmetro mediano dos sedimentos, ou seja, apresentam-se valores de  $k$  [m] que correspondem aos vários  $d_{50}$  [mm] encontrados na ZE multiplicados pelo fator 2.5, mas também valores superiores, uma vez que o objetivo é também executar uma análise de sensibilidade à rugosidade de fundo como parâmetro de calibração do modelo de evolução da LC.

Como referência considerou-se a rugosidade padrão recomendada nos módulos computacionais do *LITPACK*,  $k=0.004$  m. O menor valor de rugosidade testado,  $0.50 \times 10^{-3}$  m, origina um  $Q_s$  1.6 vezes superior ao  $Q_{s_{ref}}$  e valores de rugosidade superiores, como  $10 \times 10^{-3}$  e  $15 \times 10^{-3}$  m, originam valores de  $Q_s$  de 81% e 72% o  $Q_{s_{ref}}$ , respetivamente.

Na Figura 5.5 apresenta-se a variação de  $Q_s$  com  $k$ , com base nos pares de valores especificados no Quadro B.1 do Anexo B, à qual se ajustou a função logarítmica apresentada na mesma figura. A equação que relaciona  $k$  com  $Q_s$  sob as condições características da ZE permite uma melhor interpretação da rugosidade enquanto parâmetro de calibração do modelo de evolução da LC.

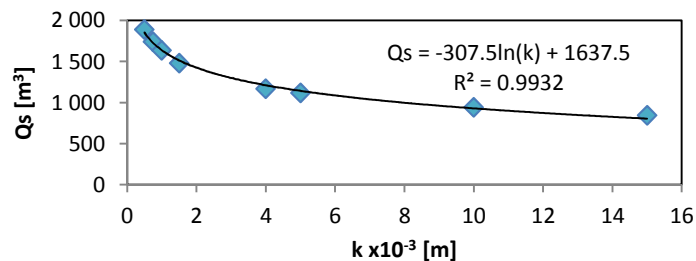


Figura 5.5 – Relação entre  $Q_s$  e  $k$  resultante da análise de sensibilidade à rugosidade de fundo.

#### 5.1.5. Diâmetro mediano dos sedimentos

O diâmetro mediano dos sedimentos é outro dos parâmetros que mais influência tem no cálculo da deriva litoral. Os valores de  $Q_s$  obtidos nesta análise para os vários valores de  $d_{50}$  testados encontram-se no Quadro B.1 do Anexo B. O transporte potencial aumenta com o aumento de  $d_{50}$ , verificando-se 66% de  $Q_{s_{ref}}$  para  $d_{50}=0.2$  mm, e para os diâmetros de 0.4, 0.5 e 0.6 mm, respetivamente, um incremento de transporte em 31%, 72% e 97%.

Na Figura 5.6 apresenta-se a variação de  $Q_s$  com  $d_{50}$ , juntamente com a equação da reta que melhor se ajusta ao comportamento linear demonstrado por estes pares de valores. Esta análise permite estimar valores de  $Q_s$  resultantes da escolha de um outro  $d_{50}$  representativo para a ZE.

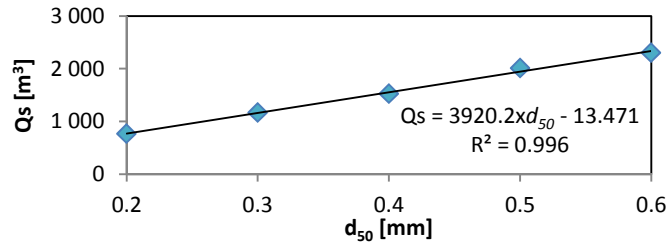


Figura 5.6 – Relação entre  $Q_s$  e  $d_{50}$  resultante da análise de sensibilidade ao diâmetro mediano dos sedimentos.

### 5.1.6. Morfologia – perfil transversal

O perfil transversal de praia tem uma grande influência nos processos envolvidos no transporte sedimentar em ambas as componentes direcionais, longitudinal e transversal. Ao invés da utilização de diferentes valores para o declive médio do perfil P7, nesta análise de sensibilidade à morfologia de fundo optou-se pela utilização dos perfis representativos de cada sub-trecho do estudo de Oliveira (2014), analisado no Capítulo 4 (Figura B.2 do Anexo B). É assim possível fazer uma avaliação prévia da magnitude da variação de  $Q_s$  caso fosse utilizado um outro perfil representativo da ZE, determinando a sub ou sobrevalorização do transporte potencial resultante da consideração de cada um dos perfis P4, P10, P13 e P17.

Os valores de  $Q_s$  obtidos para os diferentes perfis utilizados encontram-se no Quadro B.1 do Anexo B, e nas Figuras 5.7 e 5.8 apresentam-se, respetivamente, os perfis transversais P7 e P4, P10, P13 e P17 e P7, com as respetivas curvas de distribuição transversal de  $Q_s$ . Constata-se que a variabilidade de  $Q_s$  é reduzida uma vez que atinge o máximo de 16% (P10) em relação ao caso de referência. Em percentagem, por comparação com o perfil P7, representativo do sub-trecho 2 e da ZE: o perfil P4, representativo do sub-trecho 1, apresenta um transporte potencial superior a  $Q_{s,ref}$  em 6%; no sub-trecho 3, P10 apresenta um  $Q_s$  superior em 16%; no sub-trecho 4, P13 apresenta um  $Q_s$  inferior em 4%; e no sub-trecho 5, P17 apresenta um  $Q_s$  superior em apenas 3%. Nas Figuras 5.7 e 5.8 é possível também observar-se a relação entre a variação do transporte e a geometria de cada perfil, destacando a influência de irregularidades batimétricas, como por exemplo a existência de barras submersas, na distribuição transversal do transporte sedimentar.

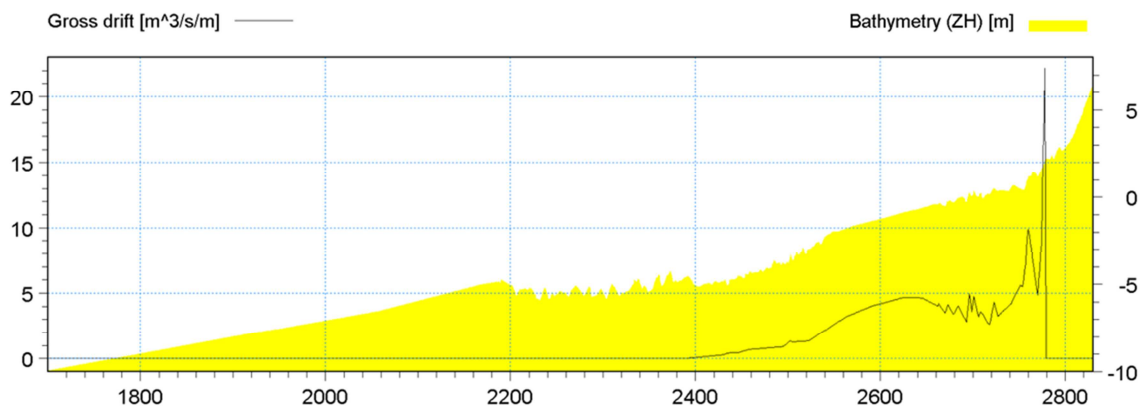


Figura 5.7 – Perfil transversal P7 e respetiva curva de  $Q_s$  para análise de sensibilidade à morfologia.



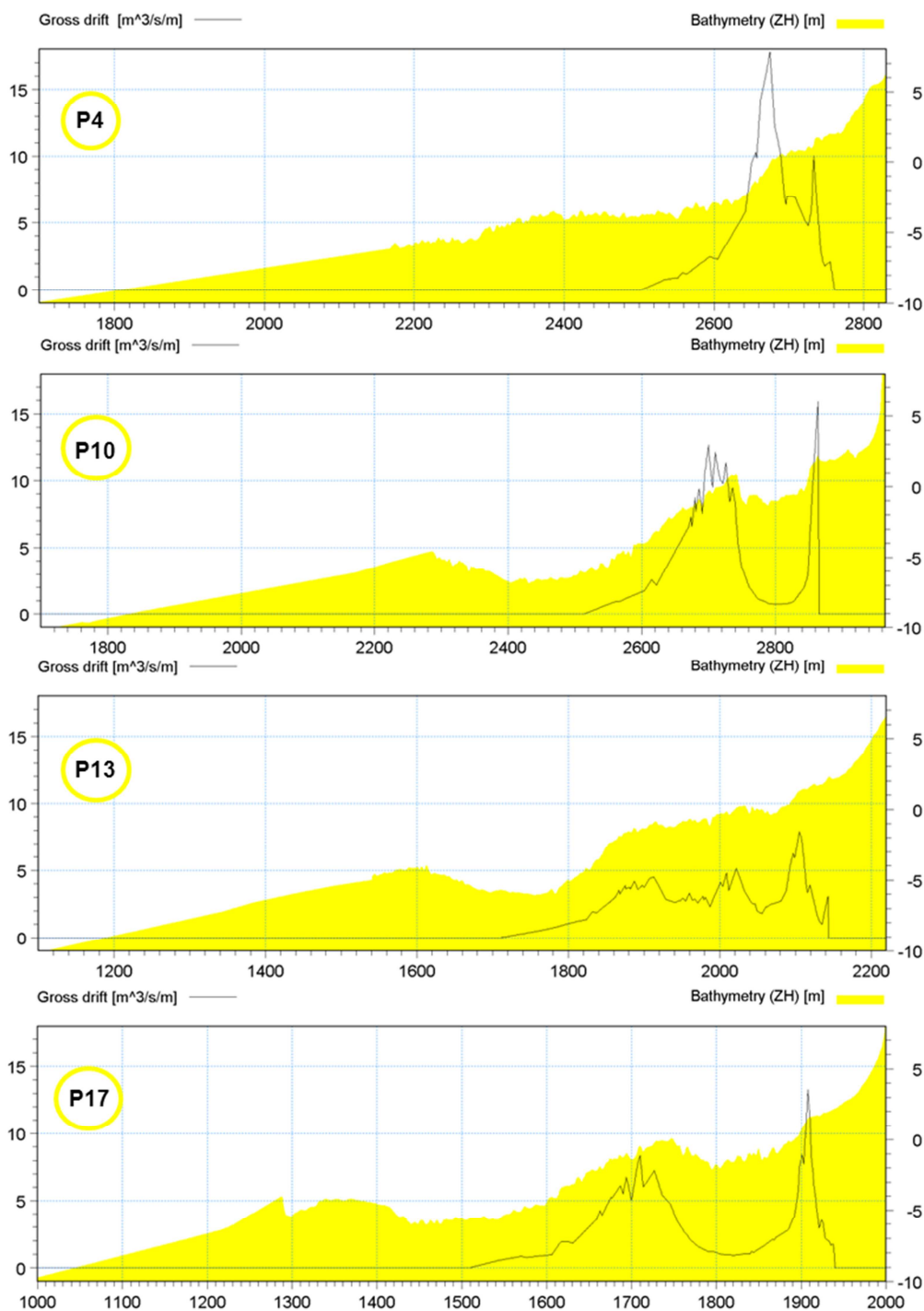


Figura 5.8 – Perfis transversais P4, P10, P13 e P17 e respetivas curvas de Qs para análise de sensibilidade à morfologia.

## 5.2. Transporte sedimentar potencial

Nesta secção apresenta-se a análise do impacto da variabilidade interanual do clima de agitação marítima da ZE para o período de 1952 a 2010, baseada no volume de transporte sedimentar potencial anual. Apresenta-se também a análise de Qs em anos relevantes inseridos no período em estudo, nomeadamente no ano considerado médio em termos de Qs Total, e nos anos extremos e médios em termos de Qs Sul e Qs Norte.

### 5.2.1. Variabilidade interanual

No Quadro 5.2 apresentam-se as estatísticas relativas ao **transporte sedimentar longitudinal potencial** para o período de 1952 a 2010 resultantes da análise das componentes obtidas para cada um dos **59 anos** do período em estudo que se apresentam no Quadro 5.3, juntamente com a direção resultante da deriva no respetivo ano. As células a sombreado do Quadro 5.3 identificam os anos em que a respetiva componente de Qs foi superior à média dos 59 anos e os valores a negrito identificam extremos de interesse de cada componente de Qs no período total. A Figura 5.9 representa graficamente os valores do Quadro 5.3 para uma melhor visualização da variabilidade de Qs ao longo dos 59 anos em análise.

Examinando as componentes de Qs apresentadas no Quadro 5.3 e na Figura 5.9, pode desde logo concluir-se que existe uma **elevada variabilidade interanual** do transporte sedimentar potencial para os 59 anos de agitação marítima em estudo neste trecho costeiro, não se identificando nenhum padrão para a variação temporal de Qs.

No Quadro 5.2 apresentam-se os valores médios, desvio-padrão e extremos das componentes de Qs, para os 59 anos em apreço. É visível na Figura 5.9 que apenas em **39%** dos **anos** em estudo verificaram **Qs Total superior à média, 918 309 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>**. Ao longo dos 59 anos, **54%** dos valores anuais de transporte potencial para **sul** apresentaram valores **superiores à média** anual de Qs Sul, **- 597 087 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>**, e **44%** dos valores anuais de transporte potencial para **norte** apresentaram valores **superiores à média** anual de Qs Norte, **321 223 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>**. Em 46 dos 59 anos (**78%**), a **deriva** litoral registou-se, como esperado, predominantemente para **sul**. A indicação qualitativa da elevada variabilidade interanual de cada componente por observação da Figura 5.9, é suportada pelos valores de desvio-padrão que se apresentam no Quadro 5.2. Acrescenta-se ainda que os **máximos de transporte potencial resultante** para **sul** e **norte** ascenderam aos **- 718 000** e **300 000 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>**, respetivamente.

Quadro 5.2 – Estatísticas relativas ao transporte sedimentar potencial para o período de 1952 a 2010.

	Qs Sul [m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> ]	Qs Norte [m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> ]	Qs Total [m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> ]	Qs Resultante [m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> ]
<b>Média Anual</b>	- 597 087	321 223	918 309	- 275 864
<b>Desvio-padrão</b>	132 968	183 919	187 409	260 564
<b>Máximo</b>	- 914 639	828 505	1 497 824	
<b>Mínimo</b>	- 282 663	95 097	578 095	

Da análise dos Quadro 5.2 e Quadro 5.3, constata-se o seguinte: o ano de **1994** foi o ano em que se observou um **transporte sedimentar potencial total** mais próximo da **média** anual para os 59 anos em análise, com aproximadamente  $917 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ; o ano em que o **transporte potencial para sul** mais se aproximou do valor **médio** mobilizado para sul foi **1956**, com aproximadamente  $600 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ , sendo **1986** o ano em que este transporte potencial foi **máximo**,  $915 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ; finalmente, o ano em que o **transporte potencial para norte** mais se aproximou da **média** foi **1974**, com aproximadamente  $320 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ , sendo **1978** o ano em que esta componente foi **máxima**,  $830 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ . Esta informação sintetiza-se no Quadro 5.4 onde se apresentam também os valores das restantes componentes de Qs para os anos supramencionados.

Quadro 5.3 – Transporte sedimentar potencial anual para o período de 1952 a 2010.

Ano	Qs Sul [m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> ]	Qs Norte [m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> ]	Qs Total [m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> ]	Qs Resultante [m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup> ]	Direção
1952	- 483 325	172 956	656 281	- 310 369	Sul
1953	- 482 718	95 377	<b>578 095</b>	- 387 341	Sul
1954	- 709 947	109 192	819 139	- 600 750	Sul
1955	- 282 663	416 837	699 500	134 170	Norte
1956	- 597 753	130 452	728 205	- 467 300	Sul
1957	- 575 185	274 577	849 762	- 300 610	Sul
1958	- 549 348	629 707	1 179 055	80 360	Norte
1959	- 754 210	379 713	1 133 923	- 374 500	Sul
1960	- 607 407	501 653	1 109 061	- 105 760	Sul
1961	- 558 258	264 962	823 220	- 293 290	Sul
1962	- 752 094	200 176	952 269	- 551 920	Sul
1963	- 438 644	505 908	944 553	67 260	Norte
1964	- 472 534	525 045	997 578	52 510	Norte
1965	- 702 981	196 565	899 546	- 506 420	Sul
1966	- 506 460	805 146	1 311 606	<b>298 690</b>	Norte
1967	- 679 138	95 097	774 234	- 584 040	Sul
1968	- 554 867	241 054	795 921	- 313 810	Sul
1969	- 472 351	407 877	880 228	- 64 470	Sul
1970	- 529 991	466 632	996 623	- 63 360	Sul
1971	- 507 321	202 317	709 638	- 305 010	Sul
1972	- 880 191	347 695	1 227 886	- 532 480	Sul
1973	- 703 720	244 311	948 030	- 459 420	Sul
1974	- 594 147	326 194	920 341	- 267 950	Sul
1975	- 546 626	229 093	775 719	- 317 530	Sul
1976	- 635 010	103 268	738 278	- 531 740	Sul
1977	- 448 125	356 462	804 588	- 91 670	Sul
1978	- 669 319	<b>828 505</b>	<b>1 497 824</b>	159 190	Norte
1979	- 749 710	441 968	1 191 679	- 307 750	Sul
1980	- 607 107	174 642	781 750	- 432 470	Sul
1981	- 506 522	435 834	942 355	- 70 690	Sul
1982	- 848 672	252 394	1 101 067	- 596 270	Sul
1983	- 599 034	289 597	888 631	- 309 440	Sul
1984	- 812 990	95 173	908 163	<b>- 717 800</b>	Sul
1985	- 360 522	545 705	906 227	185 190	Norte
1986	<b>- 914 639</b>	212 346	1 126 984	- 702 310	Sul
1987	- 400 854	488 306	889 161	87 450	Norte
1988	- 595 485	146 989	742 474	- 448 500	Sul
1989	- 624 151	714 160	1 338 311	90 030	Norte
1990	- 689 338	137 218	826 556	- 552 180	Sul
1991	- 672 528	165 362	837 890	- 507 100	Sul
1992	- 541 401	123 312	664 713	- 418 100	Sul
1993	- 631 333	151 553	782 885	- 479 800	Sul
1994	- 678 849	238 449	917 298	- 440 400	Sul
1995	- 558 197	358 963	917 160	- 199 300	Sul
1996	- 576 907	593 779	1 170 685	16 900	Norte
1997	- 326 005	467 657	793 662	141 700	Norte
1998	- 632 332	148 038	780 370	- 484 300	Sul
1999	- 684 469	168 732	853 201	- 515 800	Sul
2000	- 754 761	422 987	1 177 748	- 331 700	Sul

Quadro 5.3 – Transporte sedimentar potencial anual para o período de 1952 a 2010 (continuação).

Ano	Qs Sul [ $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ]	Qs Norte [ $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ]	Qs Total [ $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ]	Qs Resultante [ $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ]	Direção
2001	- 430 668	483 836	914 504	53 100	Norte
2002	- 470 719	500 027	970 746	29 300	Norte
2003	- 526 990	260 338	787 327	- 266 600	Sul
2004	- 593 610	145 477	739 086	- 448 200	Sul
2005	- 622 737	219 443	842 179	- 403 300	Sul
2006	- 450 067	315 103	765 170	- 134 900	Sul
2007	- 584 214	150 349	734 563	- 433 900	Sul
2008	- 813 573	105 875	919 448	- 707 700	Sul
2009	- 742 836	439 741	1 182 577	- 303 100	Sul
2010	- 532 569	502 007	1 034 576	- 30 500	Sul

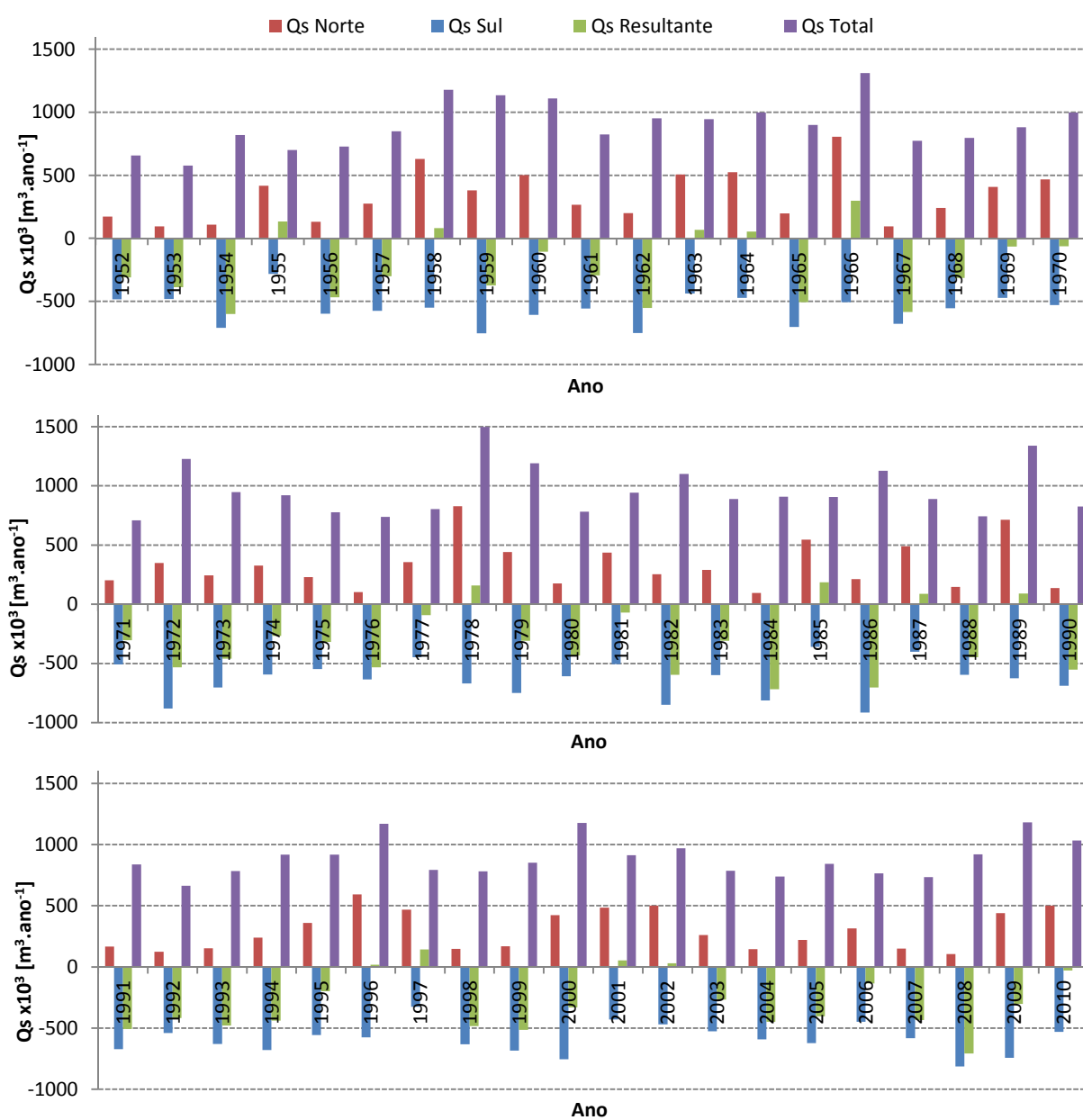


Figura 5.9 – Transporte sedimentar potencial anual para o período de 1952 a 2010.

Quadro 5.4 – Componentes de Qs para anos de transporte médio e máximo.

Ano	Qs Sul [ $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ]	Qs Norte [ $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ]	Qs Total [ $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ]	Qs Resultante [ $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ]
<b>1994</b> (Qs Total médio)	- 678 849	238 449	917 298	- 440 400
<b>1956</b> (Qs Sul médio)	- 597 753	130 452	728 205	- 467 300
<b>1986</b> (Qs Sul máximo)	- 914 639	212 346	1 126 984	- 702 310
<b>1974</b> (Qs Norte médio)	- 594 147	326 194	920 341	- 267 950
<b>1978</b> (Qs Norte máximo)	- 669 319	828 505	1 497 824	159 190

### 5.2.2. Ano de transporte potencial total médio

Nesta secção analisa-se o ano de **1994** em termos balanço sedimentar, distribuição transversal de Qs e sazonalidade verão-inverno marítimos. Considera-se este ano **representativo** pelo facto de verificar **Qs Total** mais próximo da **média dos 59 anos**, significando que se trata do ano em que o clima de agitação, agente indutor do transporte sedimentar, mais se aproximou do comportamento médio do período em estudo, para as condições consideradas representativas da ZE.

No ano de **1994** a **média de  $H_{rms}$**  foi **1.65 m**, superior à média do período de **59 anos**, **1.48 m**, sendo **mais frequente** a ocorrência de  $H_{rms}=1.18 \text{ m}$ , também superior à moda do período em estudo, **1.03 m**. Em relação à **direção** de incidência das ondas, as **médias** são aproximadamente iguais entre si, tomando o valor de **298°N**, sendo **mais frequente** em 1994 a direção média, reforçando o comportamento médio deste ano, enquanto no período completo a moda toma o valor da **direção normal** à orientação média da **LC**, 289.5°N. Conclui-se assim que, apesar de em 1994 a média de  $H_{rms}$  ser mais elevada, foi o fator direção que determinou este ano como ano médio de Qs Total.

#### 5.2.2.1. Balanço sedimentar e distribuição transversal

Apresenta-se na Figura 5.10 o diagrama de balanço sedimentar (em formato de rosa de ventos) com o transporte potencial discretizado em função dos parâmetros de agitação marítima  $H_{rms}$  e Dir, à entrada do perfil (-14 m ZH) para 1994, juntamente com a curva de distribuição do transporte potencial para norte e sul ao longo do perfil representativo. Pode observar-se que uma **elevada** percentagem do **transporte potencial** de sedimentos se deve aos eventos com alturas de onda nas classes de **2.0 a 5.0 m**, incidentes no intervalo de direções de **295°N a 305°N**. Na mesma figura, as curvas de distribuição do transporte potencial no perfil permitem identificar as zonas onde é mais elevada a mobilização de sedimentos. A **zona ativa** do perfil de praia em termos de transporte longitudinal, tem neste ano uma **extensão** aproximada de **1500 m** e inicia-se na batimétrica -11.30 m ZH. Constata-se que o transporte se inicia gradualmente até se evidenciar um primeiro volume significativo na batimétrica -5 m ZH, aproximadamente a 650 m da costa, causado pela existência de uma barra submersa, e dois picos de transporte nas batimétricas – 2 e 1.5 m ZH, respetivamente a 230 e 20 m da costa, devidos à brusca mudança de declive de fundo. A área delimitada por cada curva corresponde aos **volumes** potenciais de transporte para **sul** ( $680 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ) e para **norte** ( $240 \times 10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ ), significativamente superior no primeiro caso.

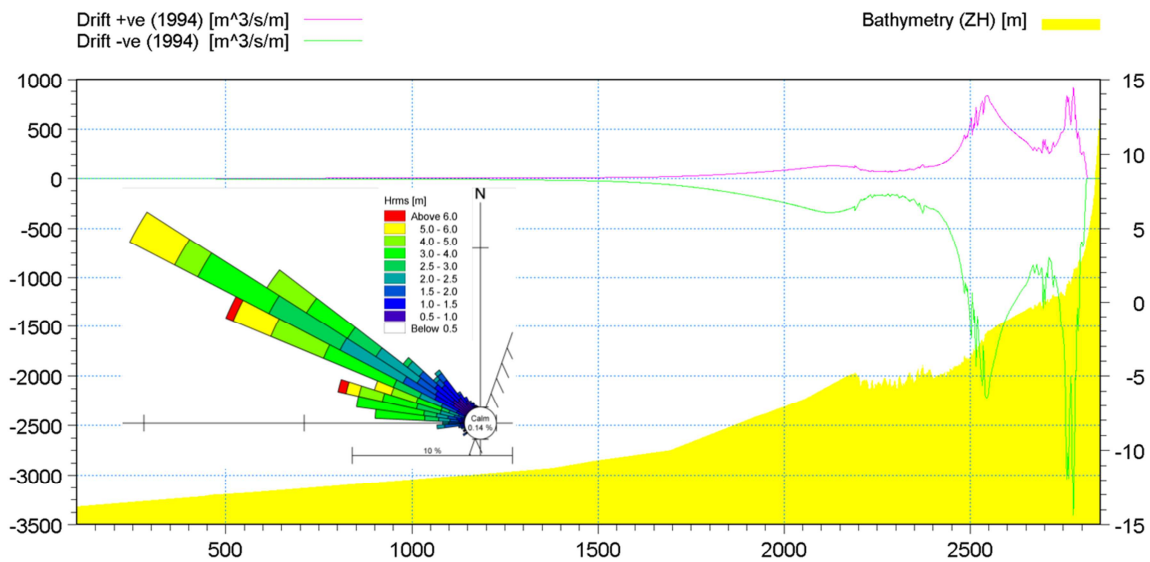


Figura 5.10 – Transporte potencial para norte e sul ao longo do perfil representativo e diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir, para 1994.

Nas Figura 5.11 e Figura 5.12 apresentam-se as séries temporais dos parâmetros altura e direção de onda, assim como as séries temporais correspondentes ao transporte sedimentar potencial normalizado (que ocorre no intervalo de 6 horas) e acumulado ao longo do ano representativo. A sua análise conjunta revela que os eventos com **direção** incidente mais rodada a **norte** estão maioritariamente **associados a alturas** correspondentes a classes **inferiores a 2 m**, sendo mais **frequentes** nos meses de **verão** marítimo. As **alturas mais elevadas** registam-se para direções **inferiores a 300°N**, sendo para estas direções que se verifica a ocorrência de **transporte** na direção **norte**, tal como aconteceu durante grande parte do mês de fevereiro. A evolução da curva de Qs acumulado confirma a ocorrência dos eventos mais energéticos (associados às bruscas variações da curva) durante o inverno, quando é mais significativo o transporte para norte. No entanto, a tendência geral da deriva mantém-se para sul.

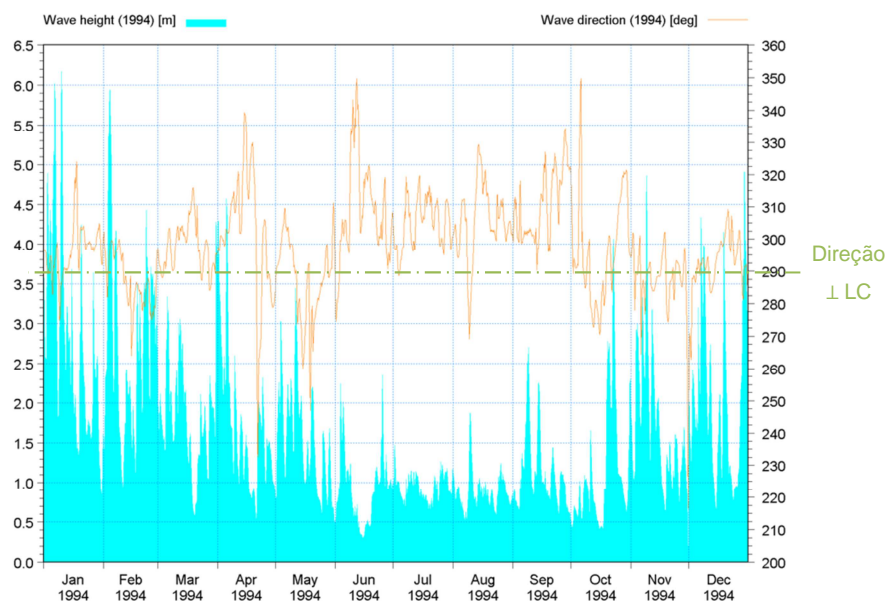


Figura 5.11 – Série temporal de  $H_{rms}$  e Dir para 1994.

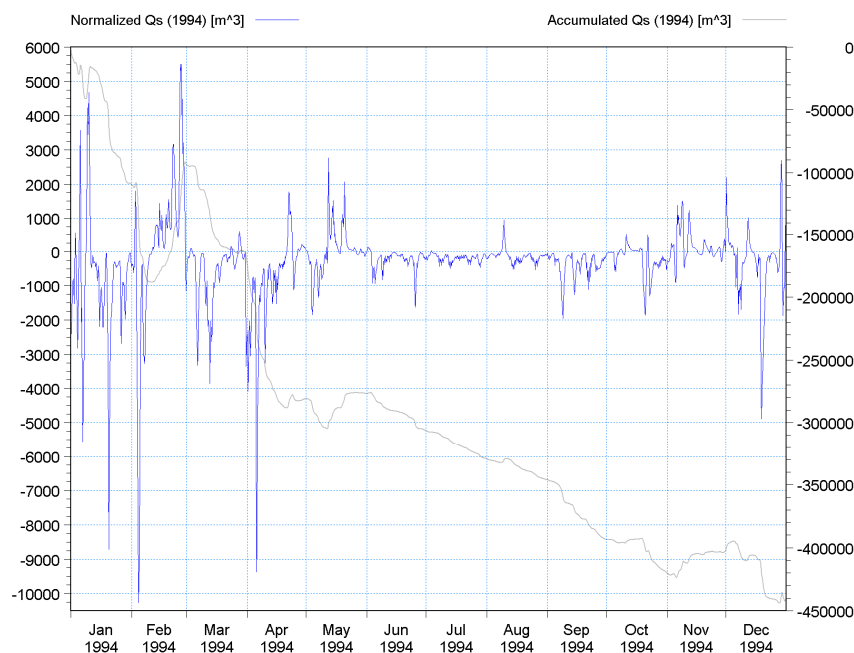


Figura 5.12 – Série temporal de Qs normalizado e acumulado para 1994.

#### 5.2.2.2. Sazonalidade

Para uma avaliação mais detalhada da **sazonalidade** do transporte sedimentar potencial, analisou-se o período de **abril de 1994 a março de 1995** de forma a abranger duas estações marítimas completas e consecutivas, com o maior número de meses pertencentes ao ano definido como representativo: o verão de 1994 e o inverno de 1994-1995.

Na Figura 5.13 observa-se que foi no inverno marítimo que se verificou o potencial de mobilização de sedimentos mais elevado, **523 830 m<sup>3</sup>**, sendo que no **verão** apenas se verificou potencial para mobilizar **60%** deste volume, **312 842 m<sup>3</sup>**. No **verão**, o potencial de mobilização dos sedimentos dividiu-se em 15% para norte e 85% para sul, resultando numa **deriva** para **sul** de **43%** do volume resultante para sul neste ciclo verão-inverno. De forma semelhante, no **inverno** verifica-se 22% para norte e 78% para sul, resultando numa deriva para sul de **57%** do volume resultante no ciclo. Nas **duas estações** é evidente a tendência da **deriva resultante** para **sul** existente na costa oeste portuguesa e também a sazonalidade da intensidade dessa deriva, mais elevada no inverno. Apesar da percentagem de sedimentos mobilizados no inverno para sul ser inferior ao caso do verão, o que se deve à importância que a deriva para norte ganha no inverno, em termos de **volume a deriva para sul no inverno é bastante superior**.

Este comportamento foi verificado para o ano de Qs Total médio, que poderá não ser o ano de comportamento médio em termos de sazonalidade. Sugere-se como trabalho futuro a extensão desta análise ao período dos 59 anos em estudo. Será interessante conhecer também o inverno com maior transporte para norte (situação mais anormal), o inverno com maior transporte para sul, assim como a estação em que se verificou a maior diferença entre o transporte para norte e para sul, pois estas condições extremas são relevantes na evolução da LC, em particular junto a estruturas transversais.

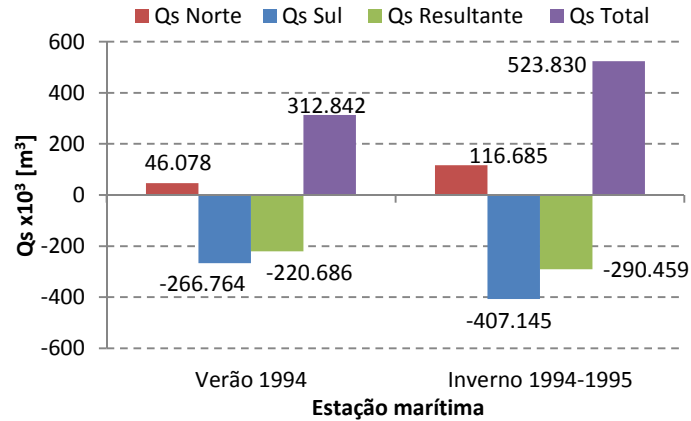


Figura 5.13 – Qs Norte, Sul, Resultante e Total para o verão marítimo de 1994 e inverno marítimo de 1994-1995.

### 5.2.3. Anos de Qs Sul e Qs Norte médios e máximos

Nas secções que se seguem faz-se a análise do balanço sedimentar e da distribuição transversal de Qs aos **anos máximos de Qs Sul** (1986) e **Qs Norte** (1978), comparando o seu comportamento com o ano representativo analisado na secção anterior (1994) e com os **anos médios** em termos das respetivas componentes (1956 e 1974). Espera-se que nos anos de valores extremos de Qs a extensão da zona ativa do perfil de praia seja maior e que a intensidade do transporte ao longo do perfil também seja superior aos valores verificados nos anos de Qs médio.

#### 5.2.3.1. Transporte potencial para sul

O ano de **1986** foi o ano em que **Qs Sul** registou o seu valor **máximo**. Compara-se este ano com Qs Sul obtido em **1956**, ano em que o volume mobilizado para sul mais se aproximou da **média** dos 59 anos em estudo. No ano de **1986** a **média das alturas** de onda foi de **1.65 m**, superior à média do ano de **1956**, **1.36 m**, sendo **mais frequente** a ocorrência de  $H_{rms}=2.23$  m, também superior à moda do ano médio, **1.45 m**. No ano extremo registaram-se em geral alturas de onda superiores ao ano médio: mínimo 1.26 m vs. 1.14 m; máximo 7.89 m vs. 5.50 m; e mediana 1.26 m vs. 1.14 m. Em relação à **direção** de incidência das ondas, as **médias** divergem em apenas  $2^\circ$ , **300°N** em 1986 vs. **302°N** em 1956, sendo **mais frequente** a direção **290°N** em 1986 e a direção **292°N** em 1956, valores superiores à direção normal à orientação média da LC (289.5°N).

No diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir para 1986, representado na Figura 5.14 juntamente com a distribuição de Qs Norte e Qs Sul ao longo do perfil representativo, pode observar-se que **grande** parte do **transporte potencial** se deve às ondas incidentes com alturas nas classes de **3.0 a 6.0 m**, e direções no intervalo de **290°N a 300°N**. A **zona ativa** do perfil de praia em termos de ocorrência de transporte longitudinal inicia-se na batimétrica -12.90 m ZH e tem uma **extensão** aproximada de **2270 m**, bastante superior à extensão obtida para o ano de Qs Total médio.

A comparação entre a distribuição de Qs Norte e Qs Sul no ano de Qs Sul máximo em apreço (Figura 5.14) e 1994 (ano representativo) (Figura 5.10), evidencia que o **transporte se inicia** a uma **maior profundidade** e os picos de transporte potencial para norte atingem caudais sólidos menores, da



ordem dos  $500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , enquanto os picos de transporte potencial para sul atingem valores mais elevados, excedendo os  $3500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . As áreas delimitadas por cada curva totalizam os volumes apresentados no Quadro 5.4 para **Qs Norte** ( $212 \times 10^3 \text{ m}^3$ ) e **Qs Sul** ( $915 \times 10^3 \text{ m}^3$ ).

Na Figura 5.15 a) apresenta-se o diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir para 1956. Conclui-se, através da comparação com o diagrama do mesmo tipo para o ano de **1986** (Figura 5.14), que são os eventos com **alturas mais elevadas** e incidentes no intervalo de direções de **290°N a 300°N** que pesam no **comportamento extremo** deste último ano, visto ainda que em 1956 se regista um volume bastante considerável de Qs para direções superiores a 300/305°N, inexistente em 1986. Na Figura 5.15 b) apresenta-se o diagrama de frequência de ocorrência discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir para 1986. Conclui-se que a **elevada frequência** de eventos incidentes no intervalo de direções de **290°N a 300°N**, nomeadamente de ondas com alturas nas classes de **1.5 a 7.0 m**, tem um **elevado peso** na contribuição do **transporte sedimentar para sul**.

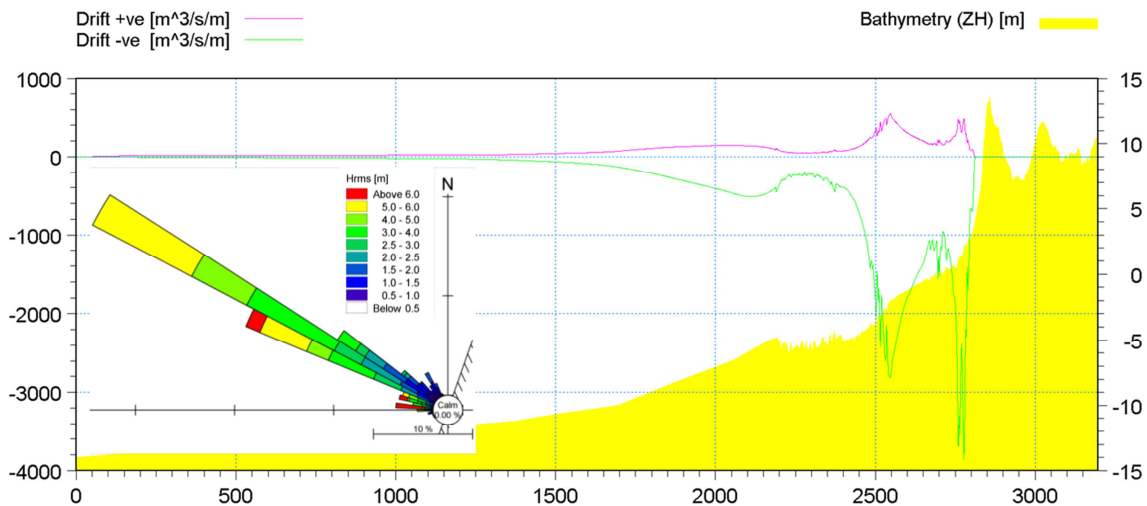


Figura 5.14 – Transporte potencial para norte e sul ao longo do perfil representativo e diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir, para 1986.

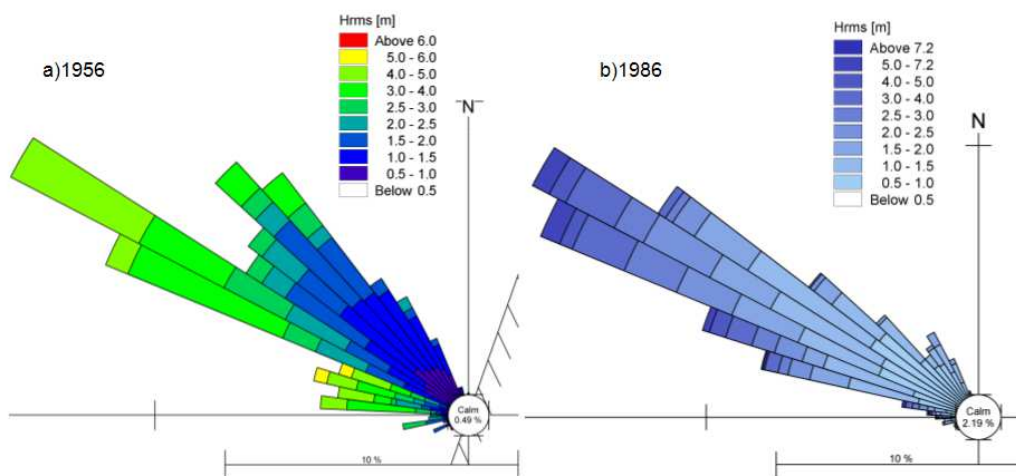


Figura 5.15 – Diagramas: a) de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir para 1956; e b) de frequência de ocorrência discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir para 1986.

### 5.2.3.2. Transporte potencial para norte

O ano de **1978** foi o ano em que **Qs Norte** registou o seu valor **máximo**. Compara-se este com o Qs Norte em **1974**, ano em que o volume mobilizado para norte mais se aproximou da **média** dos 59 anos em estudo. No ano de **1978** a **média das alturas** de onda foi de **1.61 m**, ligeiramente superior à média do ano de **1974**, **1.57 m**, sendo **mais frequente** a ocorrência de  $H_{rms}=1.17$  m, inferior à moda do ano médio, **2.43 m**. Registam-se alturas de onda semelhantes nos dois anos, sendo a **mediana** de  $H_{rms}$  aproximadamente igual nos dois casos, **1.25 m**. Em relação à **direção** de incidência das ondas, as **médias** são próximas, **299°N** em 1978 vs. **300°N** em 1974, sendo **mais frequente** a direção **291°N** em 1978 e a direção **285°N** em 1974, valor superior à direção normal à orientação média da LC no ano de Qs Norte extremo e inferior no ano de Qs Norte médio. Registam-se então médias de direção muito próximas, mas modas opostas em relação à normal à LC, sendo também a **mediana** aproximadamente igual nos dois casos, **300°N**.

No diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir para 1978, representado na Figura 5.16 juntamente com a distribuição de Qs Norte e Qs Sul ao longo do perfil representativo, pode observar-se que **grande** parte do **transporte** potencial se deve às ondas incidentes com alturas nas classes de **3.0 a 6.0 m** e direções no intervalo de **290°N a 300°N**, e alturas nas classes **superiores a 3.0 metros** e direções no intervalo de **270°N a 285°N**. Conjugando esta informação com a informação descrita na secção anterior, onde que se analisou o ano com máximo Qs Sul, pode concluir-se que o transporte para norte é maioritariamente gerado pelo conjunto destas últimas incidências, com alturas mais elevadas e direções mais rodadas a sul, também mais oblíquas relativamente à direção da normal à LC (289.5°N). A **zona ativa** do perfil de praia em termos de ocorrência de transporte longitudinal inicia-se na batimétrica -12.30 m ZH e tem uma extensão aproximada de **1970 m**, inferior à **extensão** obtida para o ano de Qs Sul máximo, mas ainda assim superior ao caso do ano representativo.

A comparação entre a distribuição de Qs Norte e Qs Sul no ano de Qs Norte máximo (Figura 5.16) e 1986, ano de Qs Sul máximo (Figura 5.14), evidencia que em 1978 o **transporte** se **inicia** ligeiramente **mais próximo da costa**, sendo que o transporte para norte apresenta um aumento mais acentuado logo desde início. Os picos de transporte potencial verificam-se aproximadamente nas mesmas posições que nos anos de 1994 e 1986 anteriormente analisados, devido às características do perfil considerado nas várias simulações, com caudais sólidos ligeiramente inferiores no transporte para sul mas bastante superiores no transporte para norte: o pico que dista 750 m da LC tem intensidade superior ao dobro da verificada nos anos anteriores, aproximadamente  $600 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , à distância 230 m verifica-se um pico de  $3\,500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e 200 metros mais perto da LC regista-se um último pico de  $1\,800 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . As áreas delimitadas por cada curva totalizam os volumes apresentados no Quadro 5.4 para **Qs Norte** ( $829 \times 10^3 \text{ m}^3$ ) e **Qs Sul** ( $669 \times 10^3 \text{ m}^3$ ).

Na Figura 5.17 a) apresenta-se o diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir, para 1974. Conclui-se, através da comparação com o mesmo diagrama para o ano de **1978** (Figura 5.16), que são os eventos com **alturas mais elevadas** e incidentes no intervalo

de direções de **265°N a 285°N**, e também a **reduzida frequência** de eventos com alturas de classes **inferiores a 2.5 m** para direções superiores a **300°N**, que pesam no **comportamento extremo** deste último ano (1978). Na Figura 5.17 b) apresenta-se também o diagrama de frequência de ocorrência de  $H_{rms}$  e Dir para 1978. Conclui-se que, apesar de ser **reduzida a frequência** de eventos com direção incidente inferior a 290°N, estes foram suficientemente **energéticos** para conseguir mobilizar o **volume sólido** que tornou este o ano **extremo** de transporte para **norte**.

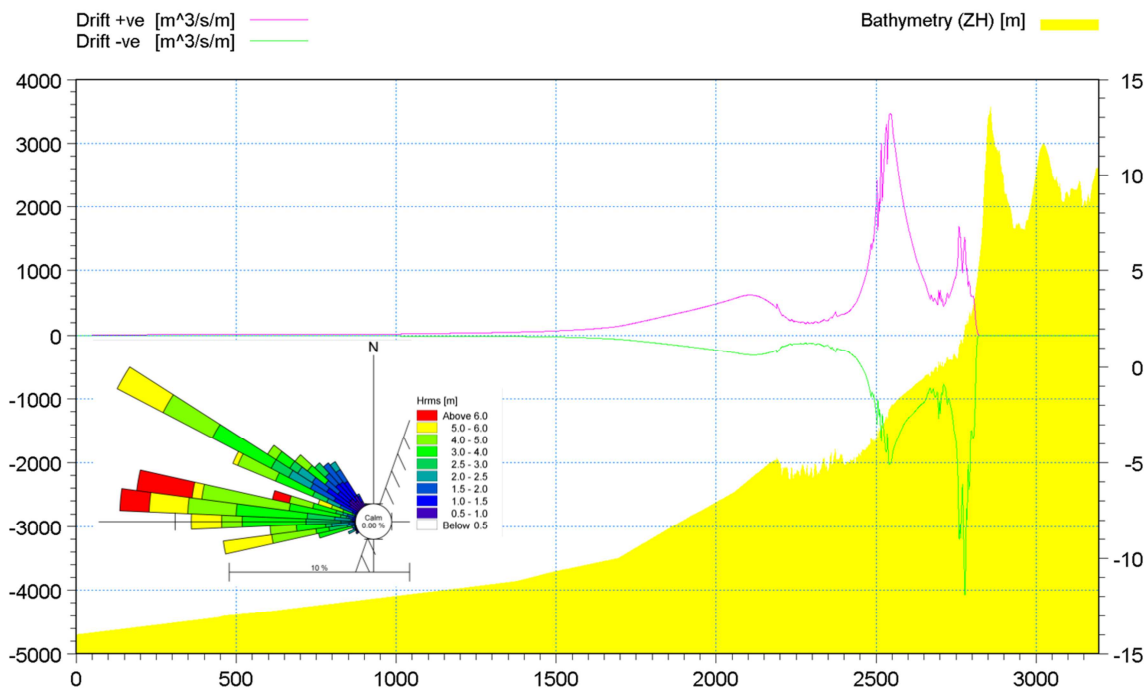


Figura 5.16 – Transporte potencial para norte e sul ao longo do perfil representativo e diagrama de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir, para 1978.

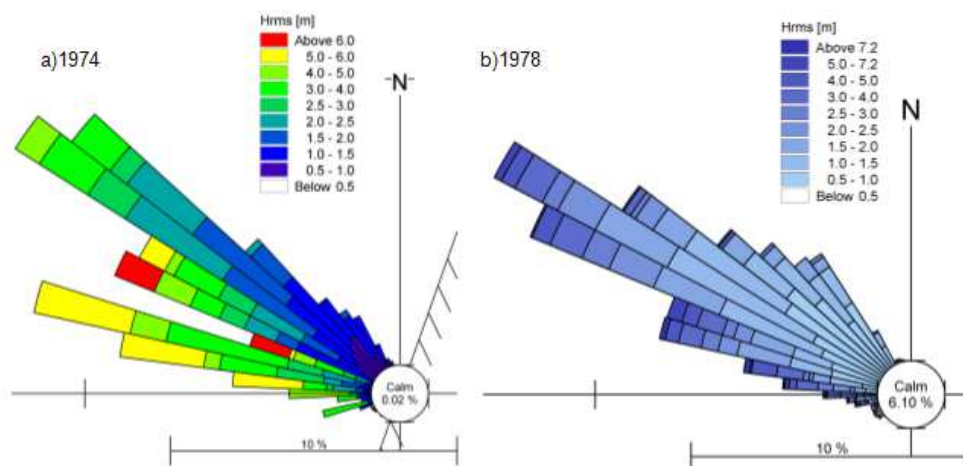


Figura 5.17 – Diagramas: a) de balanço sedimentar discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir para 1974; e b) de frequência de ocorrência discretizado por classes dos parâmetros  $H_{rms}$  e Dir para 1978.

## 6. Considerações finais e recomendações

Da modelação do **transporte sedimentar longitudinal potencial** concluiu-se sobre a **elevada variabilidade interanual** e **sazonal** desta grandeza e a direção dominante da **deriva para sul** (em 46 dos 59 anos em estudo). Obtiveram-se volumes anuais médios de Qs Total e Resultante para sul de 918 e 270 x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> e volumes anuais extremos de Qs Total 578 e 1 500 x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>. Da análise do diagrama de **balanço sedimentar** do ano de Qs Total médio e da **distribuição** de Qs ao longo do **perfil transversal**, concluiu-se que grande parte do volume mobilizado se deve aos eventos com  $H_{rms}$  2.00-5.00 m e Dir 295-305°N e identificaram-se as zonas onde essa mobilização é mais intensa. Da análise à **sazonalidade** concluiu-se que no verão marítimo apenas existe potencial para mobilizar cerca de 60% do volume sedimentar mobilizado no inverno, sendo evidente nas duas estações marítimas a deriva resultante na direção sul. Da análise adicional aos anos de Qs Sul e Qs Norte máximos identificaram-se **extensões da zona ativa** do perfil de praia de 1 500, 2 270 e 1 970 m nos três anos referidos, respetivamente.

Da análise que levou a estas conclusões, **sugere-se** o estudo do transporte longitudinal potencial considerando a granulometria dos sedimentos **variável** ao longo do perfil transversal (sedimento mais grosseiro na face de praia e mais fino na barra submersa), como sugerido nas secções 4.1 e 4.2, para introduzir uma variação que, embora não existam dados rigorosos na literatura acerca das características dos sedimentos nos locais implicados, aproximará da realidade os resultados obtidos. Recomenda-se também a extensão do estudo da **sazonalidade** do transporte potencial, efetuado para o ano de Qs Total médio, ao período completo dos 59 anos, como referido na Secção 5.2.2.2, para melhor compreensão da evolução da LC junto a estruturas transversais durante a ocorrência de eventos extremos relevantes e a identificação dos fenómenos que os originam (por associação ao regime de agitação marítima).

## Referências

- Abecasis, F., Castanho, J.P. e Matias, M. F. (1970). *Coastal regime. Carriage of material by swell and currents. Model studies and in situ observations. Influence of port structures. Coastal defence work. Breakwaters*, Memória do LNEC 362, Lisboa, 40 p.
- Abecasis, F., Matias, M.F., Carvalho J.J. e Vera-Cruz, D. (1962). *Methods of determining sand and silt movement along the coast, in estuaries and in maritime rivers*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *Technical paper* nº186, Lisboa, 25 p.
- Almeida, A. Campar (1997). Os efeitos do Inverno de 1995/96 sobre as praias da Figueira da Foz, *IV Encontro sobre riscos naturais urbanos* (Resumos), I.E.G. – Faculdade de Letras da Universidade de Coimbra, Coimbra, 24 de janeiro de 1997, 1 p.
- Almeida, A. Campar e AMARAL, V. (1996). A acção do Inverno de 1995/96 sobre as praias da Figueira da Foz, *Cadernos de Geografia*, nº 15, Coimbra, pp 55-60.
- André, J.N. e Cordeiro, M.F.N. (2013). Alteração da linha de costa entre a Figueira da Foz e S. Pedro de Moel após o prolongamento do molhe norte do Mondego, *Actas do VI Congresso Nacional de Geomorfologia*, Coimbra, pp 6-10.
- Bagnold, R.A. (1954). *Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear*, *Proceedings of the Royal Society (London)*, Ser. A, 225, pp 49-63.
- Bettencourt, P. e Ângelo, C. (1992). Faixa costeira Centro Oeste (Espinho - Nazaré): enquadramento geomorfológico e evolução recente, *Geonovas*, nº especial 1 (A Geologia e o Ambiente), Lisboa, pp 7-30.
- Birkemeier, W.A. (1985). *Field data on seaward limit of profile change*, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 111, No. 3, pp 598-602.
- Carvalho, J.J.R. (1971). Características das ondas na rebentação, (caso de batimetria paralela), Sua aplicação ao transporte sólido litoral, *3<sup>as</sup> Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, pp III-2-1 a III-2-15.
- Carvalho, J.J.R. e Barceló, J. (1966). Agitação marítima na costa Oeste de Portugal Metropolitano – Contribuição para o seu estudo, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória nº 290, Lisboa, 34 p.
- Carvalho, J.J.R. e Cordeiro, S. (1961). Ensaios laboratoriais do porto da Figueira da Foz: Estudo dos movimentos aluvionares na costa com o emprego de areias radioactivas, *3º Relatório do Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, 2174/61, Lisboa, 35 p.
- CEM (2002). *Coastal Engineer Manual, U.S. Army Corps of Engineers, CEM Part II, Water Wave Mechanics, EM 1110-2-1100*, Washington D.C., EUA, 121 p.
- CERC (1984). *Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, U.S. Government Printing Office*, Washington D.C., EUA.
- Cowell, P.J., Hanslow, D.J. e Meleo, J.F. (1999). *The Shoreface. In Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, John Wiley and Sons, Chichester, pp 39-71.

- Cunha, P.P. (1999). Erosão no troço costeiro Cabo Mondego - Figueira da Foz: controlos naturais/antrópicos e implicações na gestão o litoral e das adjacentes bacias hidrográficas, *IV Simpósio de Hidráulica e recursos hídricos dos países de língua oficial portuguesa* (Comunicações), Universidade de Coimbra, 22 p.
- Cunha, P.P. e Dinis, J.L. (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.
- Cunha, P.P., Dinis, J.L. e André, J.N. (1998). Interacção entre as operações de dragagem no Porto da Figueira da Foz e a dinâmica sedimentar no Estuário do Mondego e costa adjacente (Portugal central), *Seminário sobre dragagens, dragados e ambientes costeiros* (Actas), Associação Eurocoast-Portugal (Ed.), Lisboa, pp 27-45.
- Dean, R. G. (1987). *Coastal sediment processes: Toward engineering solutions*, *Proceedings of Coastal Sediments, American Society of Civil Engineers*, pp 1-24.
- Deigaard, R., Okayasu, A., e Frederiksen, J.H. (1998). *A note on the horizontal momentum exchange in combined waves and current*, *Coastal Engineering* 34 (3-4), pp 259-275.
- DHI (2014a). *LITDRIFT - Longshore current and littoral drift, User Guide*, Danish Hydraulic Institute, Copenhaga, Dinamarca, 108 p.
- DHI (2014b). *LITLINE - Coastline Evolution, User Guide*, Danish Hydraulic Institute, Copenhaga, Dinamarca, 166 p.
- DHI (2014c). *LITPACK - An integrated modelling system for littoral processes and coastline kinetics, Short introduction and tutorial*, Copenhaga, Dinamarca, 64 p.
- DHI (2014d). *LITSTP - Noncohesive sediment transport in currents and waves, User Guide*, Danish Hydraulic Institute, Copenhaga, Dinamarca, 100 p.
- Dias, J.A., Ferreira, O. e Pereira, A.R. (1994). Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré, edição eletrónica (2005): [w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks](http://w3.ualg.pt/~jdias/JAD/ebooks).
- Dodet, G., Bertin, X. e Taborda, R. (2010). *Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades*, *Ocean Modelling*, Vol. 31, pp 120-131.
- Duarte, D.N. e Reis, R.P. (1992). Estudo preliminar da evolução da linha de costa adjacente à embocadura do estuário do Mondego entre 1801 e 1989, Estimações das taxas de acreção e erosão costeiras, *III Congr. Geol. España e VIII Congresso Latinoamericano de Geologia*, 2, pp 146-150, Salamanca.
- Fortunato, A.B., Rodrigues, M., Dias, J.M. e Oliveira, A. (2014). Modelação da inundaçao costeira na ria de Aveiro, *11º Congresso da água*, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Porto, 15 p.
- Fredsøe, J. (1984). *The turbulent boundary layer in combined wavecurrent motion*, *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers*, Vol. 110, No. HY8, pp 103-1120.
- Hallermeier, R.J. (1981). A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, *Coastal Engineering*, 4, pp 253-277.

- Hedegaard, I.B. e Deigaard, R. (1988). *A Model for Cross-shore Sediment Transport and Coastal Profile Development*, 2nd Symp. on Wave Research and Coastal Engineering, Hanover, Alemanha.
- Henriques, J.P.V. (2007). *Coastline evolution at the south of the Figueira da Foz Harbor: Application of a mathematical computational model*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Horikowa, K. (1988). *Nearshore Dynamics and Coastal Processes: Theory, Measurement, and Predictive Models*, University of Tokyo Press, Japão.
- Kamphuis, J.W. (1991). *Alongshore sediment transport rate*. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 6, pp 624-641.
- Kamphuis, J.W. (2010). *Introduction to Coastal Engineering and Management, 2nd Edition*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, ISBN-13 978-981-283-484-3.
- Kamphuis, J.W., Davies, M.H., Nairn, R.B. e Sayao, O.J. (1986). *Calculation of littoral sand transport rate*, *Coastal Engineering*, 10(1), pp 1-21.
- Komar, P.D. e Inman, D.L. (1970). *Longshore sand transport on beaches*, *Journal of Geophysical Research*, 75(30), pp 5514-5527.
- Laranjeiro, S.H.C.D. e Oliveira, F.S.B.F. (2003). *Assessment of the longshore sediment transport at Buarcos beach (West Coast of Portugal) through different formulations*, *Proceedings of CoastGis'03*, Génova, Itália.
- Masselink, G., e Hughes, M.G. (2003). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*, Edward Arnold, Londres, Reino Unido, 354 p.
- Nielsen, P. (1979). *Some Basic Concepts of Wave Sediment Transport*, Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Series Paper 20.
- Oliveira, F.S.B.F. (2014). *Caracterização morfológica do trecho litoral entre as embocaduras dos rios Mondego e Lis*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, DHA/NEC, Lisboa.
- 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, Universidade de Aveiro, Aveiro, CD-ROM, 15 p.
- Oliveira, I.B.M. (1970). *Estudo em modelo reduzido do porto da Figueira da Foz*, 5º Relatório do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 4600/70, Lisboa, 109 p.
- Oliveira, J.N.C. e Oliveira, F.S.B.F. (2016). *Agitação marítima a sul da embocadura do rio Mondego*. Relatório 1 – Proc. 604/1307/19596 – DHA/NEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.
- Oliveira, J.N.C., Oliveira, F.S.B.F. e Teixeira, A.A.T. (2016). *Agitação marítima e potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego*. Actas das 4<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico, Lisboa, pp 241-244.
- Oliveira, J.N.C., Oliveira, F.S.B.F., Teixeira, A.A.T. e Bertin, X. (2015). *Caracterização da agitação marítima a sul da embocadura do rio Mondego*. 3ª Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira (Resumos), Universidade do Algarve, Faro, pp 29-30.

- Raudkivi, A.J. (1988). *The Roughness Height under Waves*, *Journal of Hydraulics Research*, Vol. 26, No. 5.6.
- 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.
- Santos, F.D., Lopes, A.M., Moniz, G., Ramos, L. e Taborda, R. (2014). *Gestão da Zona Costeira – O Desafio da Mudança*, Grupo de Trabalho do Litoral, 242 p.
- Simões, J.A.M.P. e Castanho, J.P. (1978). *Estudo da erosão litoral a sul da embocadura do rio Mondego*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Serviço de Hidráulica, Divisão de Portos e Praias, Lisboa, 69 p.
- Taborda, R. e Ribeiro, M. (2016). *Shoreline evolution modelling on platform beaches*, *Actas das 4<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, Lisboa, pp 265-268.
- Teixeira, A.A.T. (2006). *Evolução da Linha Litoral a Sul do Porto da Figueira da Foz – estudos em modelo matemático*. Instituto Superior Técnico, CEHIDRO - Grupo de Costas e Portos, Lisboa, 25 p.
- Vicente, C. (1990). *Evolução Costeira devida a Obras Portuárias: Casos da Praia da Figueira da Foz e da Embocadura da Ria de Aveiro*, 1<sup>o</sup> *Simpósio sobre a Protecção e Revalorização da Faixa Costeira do Minho ao Liz*, Porto, pp 164-177.



Anexo A - *LITPACK* – Sistema de modelos integrados para processos de dinâmica litoral

---



## **A. LITPACK – Sistema de modelos integrados para processos de dinâmica litoral**

O sistema de modelos integrados *LITPACK* é composto por cinco modelos numéricos determinísticos que descrevem os principais processos físicos costeiros (DHI, 2014c). Tem por base um modelo intra-onda, que descreve os processos de transporte não-estacionários ao longo do ciclo da onda, o modelo numérico *Quasi-3D LITSTP*. Integra ainda mais quatro modelos numéricos: um modelo bidimensional no plano vertical (2D-V) para cálculo do transporte sedimentar na componente longitudinal, o modelo *LITDRIFT*; um modelo de evolução da linha de costa baseado no conceito de modelo de 1-linha, o modelo *LITLINE*; um modelo de evolução morfológica do perfil de praia a curto prazo, o modelo *LITPROF*; e um modelo de assoreamento de escavações submersas, o modelo *LITREN*. Com recurso a estes modelos, o sistema é adequado a uma ampla variedade de aplicações no domínio da engenharia costeira.

Todos os modelos, designados por módulos computacionais nos respetivos manuais do utilizador, utilizam uma aproximação determinística que resulta na possibilidade de parametrizar individualmente os processos e assim calibrar adequadamente o modelo para o caso de estudo, ao contrário da maioria dos modelos baseados em formulações empíricas.

Os **módulos computacionais** aplicados neste trabalho foram os seguintes: *LITSTP* – Transporte de sedimentos não-coesivos devido a ondas e correntes; *LITDRIFT* – Correntes longitudinais e deriva litoral; e *LITLINE* – Evolução da linha de costa.

A descrição que se segue para cada módulo computacional é feita com o objetivo de apresentar os principais processos costeiros simulados nas diversas aplicações efetuadas nas várias fases do presente estudo. Para obter informação mais detalhada relativa ao funcionamento passo-a-passo (*interface do software*) e aos pressupostos científicos (*scientific background*) dos módulos computacionais aplicados, recomenda-se a leitura dos manuais do utilizador intitulados *LITPACK* (DHI, 2014c), *LITSTP* (DHI, 2014d), *LITDRIFT* (DHI, 2014a) e *LITLINE* (DHI, 2014b), disponibilizados juntamente com o *software*.

### **A.1. LITSTP – Sediment Transport Module**

O módulo computacional *STP* calcula o transporte de sedimentos não-coesivos sob ação combinada de ondas e correntes. Considera o transporte em duas componentes: o transporte de sedimentos por arrastamento, também denominado por transporte de fundo, e o transporte de sedimentos em suspensão. Apesar de não serem independentes, estas componentes são calculadas separadamente. O caudal total de sedimentos mobilizados e transportados num determinado instante segundo uma direção é então a soma de cada componente nessa direção. Este módulo é integrado em todos os outros módulos do *LITPACK*, constituindo a base para todos os cálculos de transporte sedimentar.

### A.1.1. Formulação científica

Segundo o modelo de camada limite de fundo desenvolvido por Fredsøe (1984), o transporte de sedimentos no fundo, mobilizado pela turbulência e ação das tensões de arrastamento ou atrito, está relacionado com a formação periódica de vórtices nas zonas adjacentes às cristas das rugas. Fora dessa camada limite, a média das velocidades é descrita por um perfil logarítmico, sendo a diminuição da intensidade das correntes médias junto à camada de fundo causada pelo aumento da intensidade da turbulência, efeito expresso através de uma rugosidade aparente  $k_w$ , superior à rugosidade natural do fundo  $k$ .

A base para a descrição do transporte sedimentar por arrastamento é o referido modelo de Fredsøe (1984) para a camada limite de fundo resultante da ação de ondas e correntes, considerando o fenómeno da rebentação. O objetivo do modelo é o cálculo do campo de velocidades instantâneo e das componentes da tensão tangencial instantâneas na base da camada limite. Esta informação permite calcular a distribuição vertical da concentração de sedimentos em suspensão através da equação da dispersão, dependente da viscosidade turbulenta e da velocidade de queda.

#### A.1.1.1. Transporte de fundo

A tensão de corte instantânea junto ao fundo,  $\tau_b(t)$ , também denominada tensão de atrito ou de arrastamento, resultante da ação combinada de ondas e correntes, é responsável pelo transporte sedimentar. Segundo Fredsøe (1984), a sua magnitude e direção instantâneas, ao longo do período de onda  $T$ , resultam da resolução da equação integral da conservação do momento linear segundo a direção da corrente média e a sua direção normal, direções  $x$  e  $y$ , respetivamente, apresentadas nas Equações A.1 e A.2,

$$\int_{z_0}^{\delta_{wc}+z_0} \rho \frac{d}{dt} (u(t) \cos \phi(t) - u_{\infty}(t) \cos \gamma(t)) dz = -\tau_b(t) \cos \phi(t) + \tau_{wc}(t) \quad (\text{Eq. A.1})$$

$$\int_{z_0}^{\delta_{wc}+z_0} \rho \frac{d}{dt} (u(t) \sin \phi(t) - u_{\infty}(t) \sin \gamma(t)) dz = -\tau_b(t) \sin \phi(t) \quad (\text{Eq. A.2})$$

em que os parâmetros intervenientes têm o seguinte significado:  $\delta_{wc}$  - espessura da camada limite ao longo do período da onda;  $z_0$  - parâmetro de rugosidade de fundo;  $\rho$  - massa volúmica da água;  $t$  - instante de tempo;  $u(t)$  - velocidade instantânea do escoamento combinado no interior da camada limite;  $\phi(t)$  - ângulo entre o escoamento instantâneo dentro da camada limite e a corrente média;  $u_{\infty}(t) = u_{bm} \sin(\omega t)$  - velocidade instantânea do escoamento oscilatório puro, em que  $u_{bm}$  corresponde à velocidade orbital máxima fora da camada limite e  $\omega = 2\pi/T$  à frequência angular com período da onda  $T$ ;  $\gamma(t)$  - ângulo entre a direção instantânea das ondas e a direção da corrente permanente;  $z$  - altura em relação ao fundo marinho; e  $\tau_{wc}$  - tensão de corte instantânea associada à corrente fora da camada limite.

O início do transporte sólido por arrastamento tem como critério a curva de Shields, que traduz os resultados experimentais para o conceito de tensão crítica por ele introduzido. O parâmetro de Shields pode ser calculado pela Equação A.3,

$$\theta' = \frac{U_f^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (\text{Eq. A.3})$$

onde  $s = \rho_s/\rho$  representa a densidade relativa dos sedimentos, em que  $\rho_s$  é a massa volúmica dos sedimentos,  $\rho$  a massa volúmica da água,  $g$  representa a aceleração da gravidade,  $d_{50}$  o diâmetro mediano dos sedimentos e a velocidade de arrastamento,  $U_f$ , pode ser dada em função da tensão de corte efetiva máxima,  $\tau'_{bm} = \max|\tau'_b(t)|$ , pela Equação A.4.

$$U_f = \sqrt{\tau'_{bm}/\rho} \quad (\text{Eq. A.4})$$

As componentes do transporte médio por arrastamento nas direções x e y, são quantidades médias no tempo,  $\Phi_{b,x}$  e  $\Phi_{b,y}$ , calculadas respetivamente através das Equações A.5 e A.6,

$$\Phi_{b,x} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(\tau'_b(t) \cos \phi(t)) dt \quad (\text{Eq. A.5})$$

$$\Phi_{b,y} = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(\tau'_b(t) \sin \phi(t)) dt \quad (\text{Eq. A.6})$$

em que  $\phi(t)$  representa a direção instantânea do movimento fluido,  $\tau'_b$  a tensão de corte efetiva junto ao fundo e  $\Phi_b$  a taxa de transporte de fundo adimensional, dada pela Equação A.7,

$$\Phi_b = \frac{30}{\pi \tan(\phi_m)} (\theta' - \theta_c)(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c}) \quad (\text{Eq. A.7})$$

onde  $\phi_m$  representa o ângulo de atrito interno,  $\theta'$  o parâmetro de Shields em função da tensão de corte efetiva máxima e  $\theta_c$  o parâmetro de Shields crítico.

Assim, as taxas volumétricas de transporte de fundo segundo as direções x e y,  $q_{b,x}$  e  $q_{b,y}$  respetivamente, são obtidas através das Equações A.8 e A.9.

$$q_{b,x} = \Phi_{b,x} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (\text{Eq. A.8})$$

$$q_{b,y} = \Phi_{b,y} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (\text{Eq. A.9})$$

### A.1.1.2. Transporte em suspensão

O caudal sólido representativo do transporte médio de sedimentos em suspensão,  $q_s$ , é obtido com base na integração do produto da concentração dos sedimentos,  $C$ , pela velocidade média do escoamento nessa direção,  $U$ , como apresentado na Equação A.10 (Hedegaard e Deigaard, 1988),

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d_{50}}^D CU dy dt \quad (\text{Eq. A.10})$$

sendo o perfil vertical da concentração de sedimentos determinado através da equação vertical de dispersão, Equação A.11,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right] + w_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (\text{Eq. A.11})$$

em que se toma para o coeficiente de difusão turbulenta dos sedimentos,  $\varepsilon_s$ , o valor do coeficiente de viscosidade turbulenta do escoamento, e onde  $w_s$  representa a velocidade de queda dos sedimentos, obtida pela Equação A.12 (Rubey, 1933), válida para qualquer fração de sedimentos com diâmetro representativo  $d_i$ ,

$$w_s = \sqrt{g(s-1)d_i} \left[ \left( \frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g(s-1)d_i^3} \right)^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{36\nu^2}{g(s-1)d_i^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{Eq. A.12})$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática dada pela Equação A.13, considerando a temperatura  $T$  em graus celsius.

$$\nu = (1.78 - 0.0570812T + 0.0570812T^2 - 8.27141 \times 10^{-6}T^3) \times 10^{-6} \quad (\text{Eq. A.13})$$

A condição de fronteira para a concentração de sedimentos em suspensão na base da camada limite,  $C_b$ , é imposta no nível de referência  $Z = 2d_{50}$ . Os valores de  $C_b$  são determinados em função de  $\theta'$ , utilizando as considerações dinâmicas de Bagnold (1954), que supõe necessária uma determinada concentração de sedimentos na vizinhança do fundo para, através da interação grão-a-grão, possibilitar a transferência das tensões de arrastamento para o fundo.

A concentração  $C_b$  só é válida para o caso de fundos planos, i.e., sem rugas, o que ocorre para valores de  $\theta'$  ligeiramente superiores a 0.8. Para valores de  $\theta'$  inferiores, verifica-se a existência de formas de fundo irregulares que levaram à necessidade de efetuar modificações ao nível da dispersão, da concentração de fundo e da rugosidade de fundo, para que o modelo de transporte de sedimentos tenha em conta o efeito das rugas. Os valores de  $C_b$  e de  $\varepsilon_s$  são baseados directamente em medições de laboratório levadas a cabo por Nielsen (1979), enquanto a rugosidade é expressa por Raudkivi (1988) através das dimensões das rugas. O modelo de transporte de sedimentos converge gradualmente para uma descrição de fundo plano com aumento das tensões de arrastamento ou da velocidade média do escoamento.

As equações são resolvidas através de métodos de interpolação e de diferenças finitas utilizando variáveis temporais definidas numa malha intercalada no período da onda e variáveis espaciais definidas numa malha vertical não-equidistante.

O *LITSTP* também possibilita a resolução da equação vertical da dispersão para ondas assimétricas, incluindo os efeitos do fluxo Lagrangiano, correntes de circulação junto à camada limite e correntes induzidas por diferenças de densidades.

## **A.2. LITDRIFT – The Longshore Current and Littoral Drift Module**

O módulo computacional *LITDRIFT* combina o *LITSTP* com um modelo hidrodinâmico para obter uma descrição detalhada da distribuição do transporte sedimentar longitudinal ao longo de um perfil de praia. É uma ferramenta de grande utilidade para a análise do balanço sedimentar em estudos de evolução morfológica baseados nos processos costeiros.

Este módulo computacional considera ondas regulares ou irregulares, o efeito da dispersão direcional e a reformulação das ondas já rebentadas, podendo ser aplicado em perfis de praia complexos com barras longitudinais. Sendo um modelo 2D-V, assume que as condições são uniformes ao longo da linha de costa (LC). Tem ainda em conta o nível do mar, correntes de maré, tensões de atrito devidas ao vento, refração e empolamento das ondas e a distribuição granulométrica dos sedimentos de fundo.

O *LITDRIFT* possibilita, também, a transferência de um clima de agitação do largo para um determinado ponto do perfil mais próximo da costa, através do módulo *Transfer Wave Climate*, gerando como *output* um ficheiro de *annual wave climate* que pode ser utilizada como *input* no próprio *LITDRIFT* ou no *LITSTP*.

### A.2.1. Formulação científica

O módulo computacional *LITDRIFT* inclui, no seu modelo hidrodinâmico, uma descrição de propagação, empolamento e rebentação de ondas, com cálculo das forças geradoras de correntes devidas aos gradientes das tensões de radiação, e equilíbrio de momento para as direções longitudinal e transversal, resultando na sobrelevação do nível do mar induzida pela rebentação das ondas e nas velocidades de correntes longitudinais.

A Equação A.14, para o equilíbrio de momento na direção paralela à costa, determina o perfil de velocidades das correntes longitudinais, sendo a relação entre a velocidade de correntes longitudinais,  $u$ , e a tensão de arrastamento devida às correntes longitudinais,  $\tau_b$ , a estabelecida pelo modelo de Fredsøe (1984).

$$\tau_b - \frac{d}{dy} \left[ \rho E D \frac{du}{dy} \right] = - \frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur} \quad (\text{Eq. A.14})$$

Em que  $E$  representa o coeficiente de transferência de momento,  $D$  a profundidade,  $y$  a coordenada na direção normal à LC,  $s_{xy}$  a componente tangencial das tensões de radiação, e  $\tau_w$  e  $\tau_{cur}$  as forças geradoras devidas ao vento e às correntes, respetivamente.

As equações são resolvidas através de métodos de diferenças finitas utilizando variáveis espaciais definidas numa malha intercalada horizontal equidistante.

Após a computação das correntes longitudinais, os cálculos de transporte sedimentar são realizados automaticamente pelo módulo computacional *LITSTP* ao longo do perfil, de forma a refletir as condições locais de dissipação de energia, a percentagem de ondas que não rebentam e as alturas quadráticas médias das ondas (Deigaard *et al.*, 1998). Os resultados do transporte longitudinal total em cada ponto são subsequentemente integrados na direção do perfil, obtendo-se uma estimativa do transporte longitudinal no período de estudo em toda a extensão da zona ativa do perfil de praia considerado.

### A.2.2. Input e output

Como *input*, o *LITDRIFT* requer: i) em cada ponto da malha: profundidade, rugosidade do fundo e parâmetros de caracterização sedimentológica (dimensão, densidade, velocidade de queda e distribuição geométrica das partículas de sedimento); ii) à entrada do perfil: nível do mar; velocidade da corrente e parâmetros de caracterização das ondas: altura, período e direção da onda incidente; e iii) definição dos parâmetros de cálculo.

Para a modelação do transporte sedimentar efetuada no Capítulo 5 deste trabalho, a vertente de análise da deriva anual (*annual sediment drift*) do modelo *LITDRIFT* requer a inserção dos vários parâmetros de representação do clima de agitação marítima e das condições geomorfológicas e

topo-hidrográficas características da zona de estudo (ZE), descritos nos respetivos capítulos. Estes parâmetros são inseridos no modelo através dos ficheiros *annual wave climate* e *cross-shore profile*, a definir na Secção A.4. O processo de criação do *setup* para qualquer simulação requer a indicação da direção normal à orientação da LC, 289.5°N, e de parâmetros adicionais relativos às condições de ondas e sedimentos: para a descrição espectral das ondas utilizou-se a distribuição de Rayleigh, com o parâmetro adicional de número de ondas de 50, incluindo o cálculo do *wave setup* e parâmetros de rebentação implícitos, com fator de dissipação 1; na descrição sedimentológica considerou-se uma distribuição uniforme 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 Stokes de 1ª ordem, com 140 passos de cálculo por período, num máximo de 1000 períodos e com uma tolerância de 0.001, incluindo-se os termos convectivos e uma descrição da concentração de fundo determinística; e não se considerou nas simulações a existência de correntes adicionais paralelas à LC nem a ação do vento. Consideraram-se os valores padrão recomendados na ausência de informação relativa à ZE, uma vez que estes valores pré-definidos resultam de testes efetuados pelos modeladores com os vários parâmetros para uma alargada gama de condições de ambiente costeiro.

Como *output*, através do *LITDRIFT* obtém-se a distribuição no perfil transversal das séries temporais dos parâmetros nível do mar, corrente longitudinal, altura e direção de onda, transporte sedimentar de fundo e em suspensão, transporte total e transporte total acumulado.

Os ficheiros que resultam da análise da deriva anual são dois: um ficheiro de balanço sedimentar do transporte anual ao longo do perfil e um ficheiro de série temporal com os principais parâmetros utilizados como *input* e as taxas transporte obtidas para cada evento na série temporal de *input*.

O ficheiro de balanço sedimentar do transporte anual ao longo do perfil é composto pelos seguintes 7 itens: 0) Batimetria [m]; 1) Deriva sedimentar líquida ou resultante (*net sediment drift*) [ $m^3/ano/m$ ]; 2) Deriva sedimentar bruta ou total (*gross sediment drift*) [ $m^3/ano/m$ ]; 3) Deriva sedimentar na direção norte (positiva), +ve [ $m^3/ano/m$ ]; 4) Deriva sedimentar na direção sul (negativa), -ve [ $m^3/ano/m$ ]; 5) Deriva sedimentar líquida acumulada (*accumulated net drift*) [ $m^3/ano$ ]; e 6) Deriva sedimentar bruta acumulada (*accumulated gross drift*) [ $m^3/ano$ ].

Note-se que a duração dos eventos é expressa em % de um ano porque o período de simulação é, por omissão, um ano. O termo [ $m^3/ano/m$ ] deve na realidade ser interpretado como [ $m^3/$ "período de simulação"/m]. É também apresentada alguma terminologia relevante em inglês para um melhor entendimento das figuras que resultam da aplicação dos módulos computacionais, integralmente em inglês.

A série temporal que constitui o segundo ficheiro de *output* é composta pelos seguintes itens: 1) Duração do evento de onda [% do ano]; 2) Altura de onda,  $H_{rms}$  [m]; 3) Direção de onda [°N]; 4) Nível do mar [m]; 5) Velocidade da corrente [m/s]; 6) Deriva sedimentar (*sediment drift*)  $Q_s$  [ $m^3/s$ ]; e



7) Deriva sedimentar normalizada (*normalized Qs*) [ $\text{m}^3$ ]; e 8) Deriva sedimentar acumulada (*Accumulated Qs*) [ $\text{m}^3$ ].

É também possível obter um output mais extenso, incluindo um ficheiro denominado *sediment budget rose*, uma pseudo-série temporal que tem como finalidade o traçado de gráfico de tipo histograma circular (*rose*), o diagrama de balanço sedimentar, ilustrativo da taxa de transporte sedimentar anual. Este ficheiro consiste nos seguintes itens: 1) Altura de onda,  $H_{rms}$  [m]; 2) Direção de onda [ $^{\circ}\text{N}$ ]; 3) Período de onda,  $T_z$  [s]; 4) Nível do mar [m]; 5) Velocidade da corrente [m/s].

O esquema apresentado na Figura A.1 ilustra os principais processos e parâmetros do módulo computacional *LITDRIFT*.

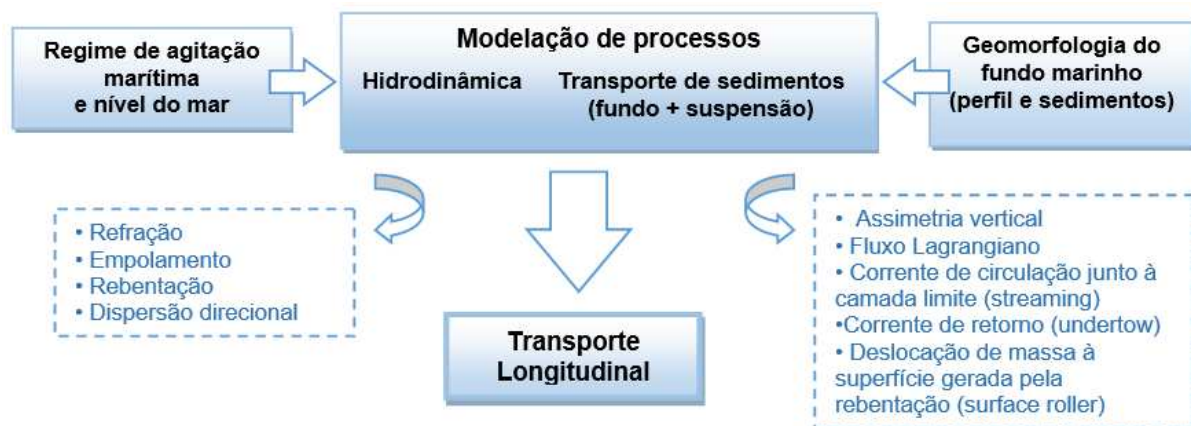


Figura A.1 – Representação do *algoritmo* do módulo computacional *LITDRIFT*.

### A.3. Conversão dos principais dados coligidos em ficheiros de *input*

#### A.3.1. *Cross-shore Profile*

O ficheiro que fornece a informação geomorfológica ao longo do perfil transversal de praia considerado como representativo do trecho de costa em estudo para os módulos *LITPACK* é denominado por ficheiro *cross-shore profile*.

O perfil transversal de praia tem a sua origem à profundidade em que se dispõe do clima de agitação marítima e deve estar contido num transepto perpendicular à LC. O ficheiro *cross-shore profile* é composto por um conjunto de 5 itens:

- 1) Topo-hidrografia [m]; 2) Rugosidade de fundo [m]; 3) Diâmetro mediano do grão,  $d_{50}$  [mm];
- 4) Velocidade de queda,  $w_s$  [m/s]; 5) Dispersão geométrica ( $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ ).

A topo-hidrografia é a correspondente ao perfil representativo do trecho de costa em estudo, apresentado na Secção 4.1, onde se apresenta também o diâmetro médio do grão,  $d_{50}=0.3$  mm. O valor da rugosidade de fundo utilizado é o valor padrão recomendado pelos modeladores,  $k=0.004$  m, pois trata-se de um parâmetro que será definido através da calibração do modelo de evolução da LC ao qual se faz referência na Secção 6.3. A velocidade de queda,  $w_s=0.3856$  m/s, obteve-se através da calculadora integrada no módulo computacional *LITSTP*, a partir dos valores de  $d_{50}=0.3$  mm, da

temperatura anual média da água,  $T = 15^{\circ}\text{C}$ , e da densidade relativa dos sedimentos, i.e. a densidade dos sedimentos relativamente à água, de valor 2.65, correspondendo à areia de quartzo. O valor de 1.3 considerado para a dispersão geométrica é também o valor padrão recomendado, pois a experiência mostra que valores de dispersão arbitrados, quando não se dispõe de informação ou de medições de amostras de campo quanto ao  $d_{16}$  e ao  $d_{84}$ , podem resultar em valores muito irrealistas no cálculo do valor da capacidade de transporte sedimentar. No entanto, com base nos valores de diâmetros representativos ilustrados anteriormente na Secção 4.1, constata-se que, para os valores de  $d_{16}=0.30$  mm e  $d_{84}=0.65$  mm, o valor da dispersão geométrica resultante não difere muito do valor adotado, sendo  $\sqrt{d_{84}/d_{16}}=1.47$ .

### A.3.2. *Annual Wave Climate*

Os parâmetros de caracterização das ondas, correntes e vento, atuantes durante o período de tempo em análise, são descritos no ficheiro denominado *annual wave climate*, constituindo o *input* de condições de hidrodinâmica indispensável aos módulos computacionais *LITDRIFT* e *LITLINE*.

A série temporal de condições de hidrodinâmica é descrita neste ficheiro através de 15 itens:

- 1) Duração do evento de onda [% do ano]; 2) Altura de onda,  $H_{rms}$  [m]; 3) Direção de onda [°N]; 4) Número do perfil; 5) Período de onda,  $T_z$  [s]; 6) Profundidade de referência para a altura de onda [m]; 7) Profundidade de referência para a direção de onda [m]; 8) Nível médio do mar [m]; 9) Descrição espectral das ondas; 10) Fator de dispersão; 11) Velocidade da corrente [m/s]; 12) Ponto de referência para a corrente; 13) Velocidade do vento [m/s]; 14) Direção do vento [°N]; 15) Coeficiente de atrito do vento.

Como dados de base para a construção do ficheiro tipo *annual wave climate*, utilizaram-se os parâmetros descritos anteriormente na caracterização da agitação marítima, na Secção 3.1.

Dispondo-se de leituras a cada 6 horas, o passo temporal que o modelo utiliza é definido para cada evento através a duração anual a colocar na primeira coluna, que tem o valor  $6/8760 \times 100 = 0.0684932$  [% h/ano], sempre especificada em termos de percentagem anual.

Na coluna referente à altura de onda, foi inserida a série de altura média quadrática,  $H_{rms}$ . Considerou-se a seguinte relação com o parâmetro altura significativa (Equação A.18) (CEM, 2002).

$$H_{rms} = \frac{H_s}{\sqrt{2}} \quad (\text{Eq. A.15})$$

Para a direção de onda utilizaram-se os valores de direção média incidente, após a correção dos dados limitando a obliquidade das ondas ao intervalo ]200, 19[°N. Fez-se a transferência do clima de agitação marítima do largo para a batimétrica -14 m ZH, com recurso ao módulo *Transfer Wave Climate* presente no *LITDRIFT*.

O número do perfil identifica o ficheiro *cross-shore profile* que contém o perfil representativo selecionado de acordo com a análise efetuada na Secção 4.1.

O parâmetro período de onda, representado no modelo pelo período médio de zero ascendente  $T_z$ , obteve-se a partir do período de pico  $T_p$ , pela relação apresentada na Equação A.19, utilizada tipicamente apesar de existir uma grande variabilidade para o fator que relaciona  $T_z$  e  $T_p$ , dependendo do espectro de onda considerado, e.g. Pierson-Moskowitz utiliza o fator 1.41 e JONSWAP (com parâmetro de elevação do pico:  $\gamma=3.3$ ) utiliza 1.286.

$$T_p = 1.408 T_z \quad (\text{Eq. A.16})$$

As profundidades de referência para todos os parâmetros correspondem à profundidade à qual se inicia o perfil e para a qual se transferiu o clima de agitação, a batimétrica -14 m ZH.

A série de valores para o nível do mar obteve-se como explicado na Secção 3.2.

A descrição espectral das ondas adotada é do tipo 2: ondas irregulares com distribuição de Rayleigh, em que as ondas são descritas como uma série de grupos de ondas regulares, cada um caracterizado pela sua altura de onda e frequência de ocorrência. O facto de o período utilizado ser  $T_z$  deriva da escolha da distribuição espectral de Rayleigh.

Para o fator de dispersão, que representa o decréscimo nas tensões de radiação devido à dispersão direcional das ondas, utilizou-se o valor de 0.5 aconselhado pelos manuais do *LITPACK* (DHI, 2014c), sendo que 0.8 representa um mar unidirecional e 0.35 representa um mar direccionalmente complexo.

Não se considerou a ação do vento ou outras correntes marítimas, que não as induzidas pelas ondas na rebentação. No entanto, é interessante constatar que no *annual wave climate file* transferido para -14 m ZH já se encontram valores não nulos na coluna referente à velocidade da corrente, pois de -37 m ZH até esta profundidade verifica-se a rebentação de algumas ondas de altura mais elevada e as correntes por ela induzidas.



## Anexo B - Elementos adicionais

---



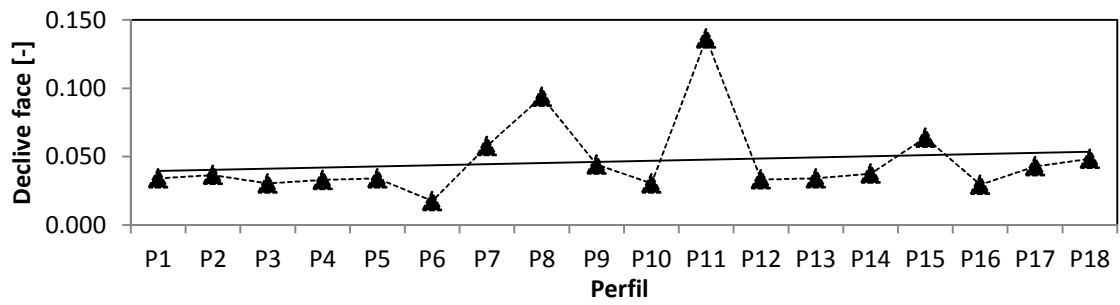


Figura B. 1 – Declive da face de praia dos perfis P1 a P18, localizados na zona costeira delimitada pelas embocaduras dos rios Lis e Mondego, zona de estudo, adaptado de Oliveira (2014).

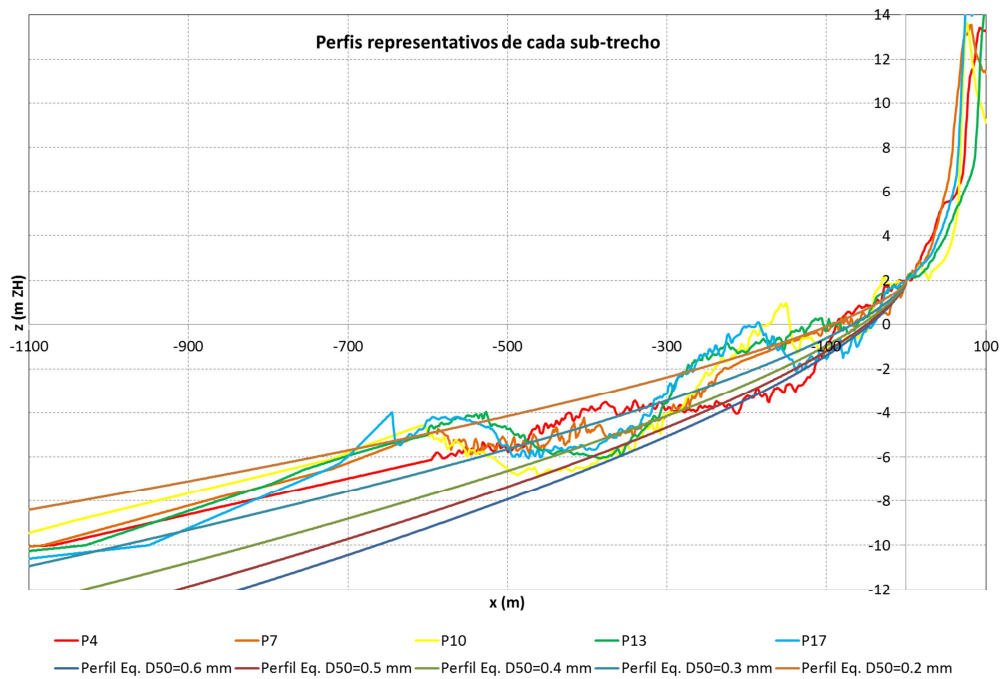


Figura B. 2 – Perfis de praia representativos de cada sub-trecho da zona de estudo e perfis de equilíbrio para vários  $d_{50}$ , adaptado de Oliveira (2014).

Quadro B.1 – Parâmetros de caracterização dos casos em estudo para análise de sensibilidade ao transporte sedimentar induzido por eventos com duração de 6h.

Parâmetro testado	Caso	$H_{rms}$ [m]	Dir [°N]	$T_z$ [s]	$k \times 10^{-3}$ [m]	$d_{50}$ [mm]	Perfil	$Q_s$ [m <sup>3</sup> ]
-	Referência	1.5	299	9	4.00	0.3	P7	- 1 168
Altura de onda	H05	0.5	299	9	4.00	0.3	P7	- 154
	H1	1						- 522
	REF	1.5						-1 168
	H2	2						- 2 262
	H3	3						- 6 542
	H4	4						- 13 634
	H5	5						- 23 481
	H6	6						- 35 093
Direção - obliquidade em relação à normal à LC ( $\alpha_0$ )	D1	1.5	0.5	9	4.00	0.3	P7	- 142
	D2		5					- 650
	D3		10					- 1 235
	D4		15					- 1 920
	D5		20					- 2 576
	D6		25					- 3 283
	D7		30					- 3 948
	D8		40					- 4 860
	D9		50					- 5 174
	D10		60					- 4 764
Período de onda	T5	1.5	299	5	4.00	0.3	P7	- 707
	T7			7				- 976
	REF			9				-1 168
	T11			11				- 1 529
	T13			13				- 1 449
	T15			15				- 1 168
Rugosidade de fundo	R1	1.5	299	9	0.50	0.3	P7	- 1 887
	R2				0.75			- 1 740
	R3				1.00			- 1 634
	R4				1.50			- 1 479
	REF				4.00			-1 168
	R5				5.00			- 1 116
	R6				10.00			- 944
	R7				15.00			- 846
Diâmetro mediano dos sedimentos	D02	1.5	299	9	4.00	0.2	P7	- 765
	REF					0.3		-1 168
	D04					0.4		- 1 525
	D05					0.5		- 2 010
	D06					0.6		- 2 304
Morfologia - Perfil transversal	P4	1.5	299	9	4.00	0.3	P4	- 1 233
	REF						P7	-1 168
	P10						P10	- 1 352
	P13						P13	- 1 121
	P17						P17	- 1 209