

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

RELATÓRIO 225/2017 – DHA/NEC





Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

APDL – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo

Lisboa • abril de 2017

**I&D** HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 225/2017 – DHA/NEC

A presente publicação é da exclusiva responsabilidade do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. A União Europeia não se responsabiliza pela eventual utilização das informações nela contidas





Co-financiado pela União Europeia

O Mecanismo Interligar a Europa

Título ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

#### Autoria

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

#### André B. Fortunato

Investigador Principal com Habilitação, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras **Paula Freire** Investigadora Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras **Filipa S. B. F. Oliveira** 

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

#### Alberto Azevedo

Bolseiro de Pós-Doutoramento, Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P. AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA e-mail: lnec@lnec.pt www.lnec.pt

Relatório 225/2017

Proc. 0604/121/ 2069201

Estudo III - Avaliação dos Impactes na Dinâmica Sedimentar

#### Resumo

Analisam-se as alterações à dinâmica sedimentar no Porto de Leixões e na sua envolvente, resultantes do prolongamento do quebra-mar norte. O estudo é realizado com base na recolha e análise de dados e na aplicação de vários modelos numéricos. A situação atual é caracterizada através da análise de dados de campo e de resultados de modelos de agitação marítima, hidrodinâmica, dinâmica sedimentar e evolução da linha de costa. Estes modelos permitem depois avaliar as alterações que resultarão das intervenções em estudo.

Palavras-chave: Porto de Leixões / Dinâmica sedimentar

# PHYSICAL AND NUMERICAL MODEL STUDIES OF THE LENGTHENING OF THE OUTER BREAKWATER AND OF THE MARITIME ACCESSABILITIES OF THE LEIXÕES HARBOR

Study III - Evaluation of the Impacts on the Sediment Dynamics

## Abstract

The changes in the sediment dynamics of the Leixões Harbor and its vicinity associated to the lengthening of its outer breakwater are analyzed, based on the analysis of data and on the application of several numerical models. The present situation is characterized based on the analysis of field data and of results from wave, hydrodynamic, sediment transport and beach evolution models. These models are then used to assess the changes that will result from the interventions.

Keywords: Port of Leixões / Sediment dynamics

## Sumário executivo

As alterações à dinâmica sedimentar no Porto de Leixões e na sua envolvente, resultantes do prolongamento do quebra-mar norte, foram estudadas através da recolha e análise de dados e da aplicação de vários modelos numéricos. A situação atual foi caracterizada através da análise de dados de sedimentologia, de batimetria e de volumes de dragagem. Foram implementados modelos de agitação marítima, hidrodinâmica, transporte sedimentar e evolução da linha de costa. Estes modelos permitiram complementar a compreensão da dinâmica sedimentar atual baseada na análise de dados, e avaliar as alterações que resultarão das intervenções em estudo.

A dinâmica sedimentar no Porto de Leixões e na sua envolvente pode ser decomposta em diferentes componentes.

A montante, o rio Leça constitui uma importante fonte de sedimentos. Estes sedimentos depositam-se maioritariamente na zona de montante do porto, uma das zonas mais sujeitas a assoreamento. Ao melhorarem as condições de abrigo, as intervenções previstas irão favorecer a deposição destes sedimentos de origem fluvial na zona montante do porto, esperando-se consequentemente uma redução da sedimentação na bacia de manobra.

Na zona costeira, os sedimentos superficiais são constituídos por areias médias na praia de Leça e por areias finas na praia de Matosinhos e no anteporto. O abrigo proporcionado pelos quebra-mares cria condições hidrodinâmicas que não permitem mobilizar estas areias e transportá-las para o interior do porto. No entanto, em determinadas condições de agitação marítima, forma-se uma corrente de deriva de sul para norte que é parcialmente capturada pelo porto durante a enchente. Esta corrente poderá transportar as frações mais finas dos sedimentos presentes na praia (areias muito finas) para o interior do porto. Em consequência, os sedimentos superficiais no interior do porto são maioritariamente constituídos por sedimentos finos. Com o prolongamento do quebra-mar norte, a zona em que não existem condições de mobilização de areias irá estender-se para sul e para este, dificultando ainda mais a penetração de areias finas e médias de origem marítima no interior do porto. No entanto, a captura da deriva litoral pelo quebra-mar norte irá aumentar, potenciando assim a penetração de areias muito finas no porto.

O prolongamento do quebra-mar norte irá também ter consequências na praia de Matosinhos. A melhoria das condições de abrigo na zona norte da praia e as diferentes condições de abrigo proporcionadas à praia em função da direção da agitação conduzirão a uma rotação da praia no sentido anti-horário. Esta rotação traduzir-se-á numa acumulação de areia no extremo norte da praia e numa erosão da zona sul. A médio prazo, a acumulação de areia junto ao quebra-mar sul poderá levar a algum assoreamento no canal de acesso ao porto. Por seu lado, a erosão no extremo sul da praia poderá fomentar episódios de galgamento nessa zona.

Finalmente, há indicações de que penetra areia no porto através do quebra-mar norte. Esta penetração tenderá a ocorrer em situações de forte agitação marítima, e afetará principalmente o Posto A TPL. Este fenómeno não foi analisado em detalhe, uma vez que não é previsível que venha a ser afetado pelas intervenções previstas.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

# Índice

1	Introdução1					
	1.1	Âmbite	o e objetivos	1		
	1.2	Zona	de estudo	1		
	1.3	Soluçã	ão analisada	2		
	1.4	Organ	ização do relatório	4		
2	Metodologia					
	2.1	2.1 Abordagem geral				
	2.2	Anális	e de dados de base	6		
		2.2.1	Levantamentos hidrográficos	6		
		2.2.2	Ortofotomapas	9		
		2.2.3	Sedimentos	9		
	2.3	Model	ação numérica acoplada da circulação e da agitação marítima	9		
		2.3.1	Abordagem	9		
		2.3.2	Modelação de larga escala da agitação marítima	10		
		2.3.3	Seleção do período a simular	12		
		2.3.4	Modelação local de níveis, correntes e agitação marítima	14		
	2.4	Model	ação numérica da dinâmica sedimentar na envolvente do Porto de			
		Leixõe	98	18		
	2.5	Model	ação numérica dos sedimentos provenientes do Rio Leça			
	2.6	Model	ação numérica da dinâmica da praia de Matosinhos	20		
		2.6.1	Abordagem	20		
		2.6.2	Agitação marítima e nível do mar	22		
		2.6.3	Geomorfologia	27		
	-	2.6.4	Transporte sedimentar longitudinal potencial	32		
3	Cara	cterizaç	ão da dinâmica sedimentar atual com base na análise de dados			
	3.1	Anális	e dos volumes dragados no porto			
	3.2	Comp	aração de levantamentos e taxas de assoreamento	40		
		3.2.1	Zona interior do porto	40		
		3.2.2	Praia de Matosinhos	44		
	3.3	Sedim	ientos	47		
		3.3.1	Interior do porto e área adjacente	47		
		3.3.2	Praia de Matosinhos	52		
	3.4	Evoluç	ção da praia de Matosinhos	54		
4	Análi	se com	parativa da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões	57		
	4.1	Hidrodinâmica				
	4.2	Sedim	ientos provenientes do rio Leça	61		
	4.3	Trânsi	ito sedimentar e assoreamento	62		
5	Dinä	nâmica da praia de Matosinhos				
	5.1	Efeito da Solução 1 na agitação maritima em frente a praia				
	5.2	Efeito	da Solução 1 na evolução da linha de costa	70		
6	Conc	clusões.	~			
	6.1	Situaç	ao atual	74		
		6.1.1	Porto de Leixões	74		
	• •	6.1.2	Praia de Matosinhos	75		
	6.2	Impac	tes das intervenções no Porto de Leixões e na praia de Matosinhos	76		

6.2.1	Sedimentos provenientes do rio Leça	76
6.2.2	Sedimentos provenientes da zona costeira	76
6.2.3	Alterações ao esforço de dragagem	78
Referências bibliogr	áficas	80
Anexos		83
ANEXO I		85
Informação de base		85
Informação de base		87
Topo-hidrogra	afia	87
Dragagens		87
Sedimentos		87
Caudais fluvia	ais	89
Níveis de mai	ré	89
Dados	de campo	89
Modelo	regional	90
Agitação mari	ítima	91
ANEXO II		93
Descrição, impleme	ntação e calibração do modelo SCHISM	93
Descrição, impleme	ntação e validação do modelo SCHISM	95
Descrição do	modelo	95
Implementaçã	ăo e validação do modelo	96
Malha c	le cálculo	96
Calibra	ção do modelo hidrodinâmico	97
Validaç	ão do modelo hidrodinâmico e do modelo de agitação marítima	104
Aplicaçã	ão do modelo de transporte de sedimentos	108
ANEXO III		111
Descrição, impleme	ntação e validação do modelo de linha de costa	111
Descrição, impleme	ntação e validação do modelo de linha de costa	113
Descriç	ão do modelo	113
Modelo	conceptual	114
Calibra	ção e validação	116
ANEXO IV		123
Descrição do model	lo VELApart	123
Descrição do Model	lo VELApart	125

## Índice de figuras

Figura 1.1 -	<ul> <li>Zona de estudo, compreendendo o Porto de Leixões e a praia de Matosinhos.</li> <li>Fonte: Google Earth</li> </ul>	2
Figura 1.2 -	<ul> <li>Configurações analisadas: a) situação atual; b) Solução 1</li> </ul>	3
Figura 2.1 -	- Modelo conceptual da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões	5
Figura 2.2 -	<ul> <li>- Áreas de comparação dos levantamentos no interior do porto (tracejado azul) e na praia de Matosinhos (a tracejado cinzento e a branco). Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	7
Figura 2.3 -	<ul> <li>Área de comparação dos levantamentos na zona montante do porto. Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	7
Figura 2.4 -	<ul> <li>Linha de base (vermelho), transectos (amarelo), linhas do nível médio do mar e do zero hidrográfico de Leixões (preto) usadas na análise da evolução da linha de costa. Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	8
Figura 2.5 -	<ul> <li>Aspeto das amostras vasosas ricas em matéria orgânica recolhidas na zona interior do porto</li> </ul>	9
Figura 2.6 -	<ul> <li>Malhas e domínios de cálculo do modelo WaveWatch III. O círculo vermelho indica a posição da boia de Leixões</li> </ul>	11
Figura 2.7 -	<ul> <li>Validação do modelo WaveWatch III com dados da boia de Leixões de 2011 a 2015: alturas de onda significativas e direções médias</li> </ul>	11
Figura 2.8 -	<ul> <li>Médias mensais das características da agitação marítima na boia de Leixões: quadrado da altura de onda significativa e direções médias pesadas pelo quadrado da altura de onda significativa</li> </ul>	12
Figura 2.9 -	<ul> <li>Médias anuais das características da agitação marítima na boia de Leixões: quadrado da altura de onda significativa e direções médias pesadas pela altura de onda significativa ao quadrado</li> </ul>	13
Figura 2.10	<ul> <li>– Estatísticas da agitação marítima para todos os meses de janeiro entre 1979 e 2015. As linhas a vermelho indicam as médias de janeiro</li> </ul>	13
Figura 2.11	<ul> <li>Condições de agitação marítima para o período de calibração e validação: a) altura significativa; b) período médio e c) direção. Fonte: simulação com o modelo WW3</li> </ul>	15
Figura 2.12	e – Condições de pressão atmosférica para o período de calibração e validação, extraídas do ECMWF	16
Figura 2.13	a – Condições de vento aos 10 m da superfície para o período de calibração e validação, extraídos do ECMWF. Diagrama vetorial	16
Figura 2.14	<ul> <li>– Condições de vento aos 10 m da superfície para o período de calibração e validação, extraídos do ECMWF</li> </ul>	17
Figura 2.15	<ul> <li>– Caudal do rio Douro com base nos dados do SNIRH na estação de Crestuma (EDP), para o período de calibração e validação</li> </ul>	17
Figura 2.16	<ul> <li>Condições de maré para o período de calibração e validação. Fonte: modelo de Fortunato et al. (2016)</li> </ul>	18
Figura 2.17	′ – Localização inicial das partículas (pontos a vermelho)	19
Figura 2.18	<ul> <li>Praia de Matosinhos. Localização do referencial local, dos pontos de agitação marítima Norte, Central e Sul, e dos perfis transversais Norte, Central e Sul</li> </ul>	21
Figura 2.19	<ul> <li>Série temporal de Hrms, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)</li> </ul>	23
Figura 2.20	9 – Histograma de Hrms, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)	24
Figura 2.21	<ul> <li>Série temporal de Dir, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)</li> </ul>	24
Figura 2.22	e – Histograma de Dir, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)	25

Figura 2	23 – Série temporal de Tz, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)	25
Figura 2	<ul> <li>24 – Histograma de Tz, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)</li> </ul>	26
Figura 2	25 – Série temporal de NM, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)	26
Figura 2	26 – Perfis Norte, Central e Sul da praia de Matosinhos em 2008(a), 2012(b) e 2016(c)	28
Figura 2	27 – Perfis Norte (a), Central (b) e Sul (c) da praia de Matosinhos em 2008, 2012 e 2016	30
Figura 2	28 – Isolinhas de ZHL na praia de Matosinhos em 2008, 2012 e 2016	31
Figura 2	29 – Isolinhas de NMM na praia de Matosinhos em 2008, 2012 e 2016	32
Figura 2	30 – Transporte sedimentar longitudinal potencial acumulado e normalizado induzido pelo clima de agitação no Ponto Norte entre 2008-2016	34
Figura 2	<ul> <li>31 – Distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal potencial induzido pelo clima de agitação no Ponto Norte entre 2008-2016</li> </ul>	35
Figura 2	32 – Transporte sedimentar longitudinal potencial acumulado e normalizado induzido pelo clima de agitação no Ponto Central entre 2008-2016	35
Figura 2	33 – Distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal potencial induzido pelo clima de agitação no Ponto Central entre 2008-2016	36
Figura 2	34 – Transporte sedimentar longitudinal potencial acumulado e normalizado induzido pelo clima de agitação no Ponto Sul entre 2008-2016	36
Figura 2	35 – Distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal potencial induzido pelo clima de agitação no Ponto Sul entre 2008-2016	37
Figura 2	36 – Transporte sedimentar longitudinal potencial no Perfil Central (normal à linha de costa assinalada), discretizado por sectores de Dir de amplitude 10° e classes de Hrms de intervalo 1 m de onda incidente, induzido pelos climas de agitação marítima nos Pontos Norte (a), Central (b) e Sul (c), em frente à praia de Matosinhos, durante o período de estudo (2008-2016)	38
Figura 3	1 – Evolução do volume anual de material dragado no Porto de Leixões	39
Figura 3	2 – Variação da taxa média anual de evolução dos fundos na zona interior do porto. Estes valores não consideram as dragagens efetuadas. Fonte da imagem: ESRI Basemap	44
Figura 3	<ul> <li>3 – Resultados da comparação de levantamentos na zona inferior da praia de Matosinhos. Valores positivos de variação de cota (m) correspondem a acumulação e negativos a erosão. Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	46
Figura 3	<ul> <li>4 – Resultados da comparação de levantamentos na zona inferior e parte da zona subaérea da praia de Matosinhos. Valores positivos de variação de cota (m) correspondem a acumulação e negativos a erosão. Fonte da imagem: ESRI Basemap</li></ul>	47
Figura 3	5 – Percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a 63 µm) nas amostras recolhidas em 23 de fevereiro de 2017. Estão assinaladas as zonas onde foi encontrada rocha. Fonte da imagem: ESRI Basemap	48
Figura 3	6 – Diâmetro mediano (D <sub>50</sub> em mm) dos sedimentos de fundo recolhidos no interior do porto e zona adjacente (23 de fevereiro de 2017). Fonte da imagem: ESRI Basemap	48
Figura 3	7 – Coeficiente de graduação dos sedimentos de fundo recolhidos no interior do porto e zona adjacente (23 de fevereiro de 2017). Fonte da imagem: ESRI Basemap	49
Figura 3	8 – Percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a 63 µm) nas amostras recolhidas em 6 de dezembro de 2016. Fonte da imagem: ESRI Basemap	51
Figura 3	9 – Percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a 63 µm) nas amostras recolhidas em 18 de dezembro de 2015. Fonte da imagem: ESRI Basemap	51

Figura 3.10	<ul> <li>Percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a 63 µm) nas amostras recolhidas em 24 e 26 agosto 2005. A localização das amostras é aproximada. Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	52
Figura 3.11	<ul> <li>Diâmetro mediano (D<sub>50</sub> em mm) dos sedimentos das praias de Leça e de Matosinhos (amostragem 6 de janeiro de 2017). Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	53
Figura 3.12	<ul> <li>Coeficiente de graduação dos sedimentos das praias de Leça e de Matosinhos (amostragem 6 de janeiro de 2017). Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	53
Figura 3.13	<ul> <li>Taxa de evolução (m/ano) da linha de nível médio do mar entre 2008 e 2012 (valores negativos correspondem a recuo e positivos a progradação da linha de costa). Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	55
Figura 3.14	<ul> <li>Taxa de evolução (m/ano) da linha do Zero Hidrográfico de Leixões entre</li> <li>2008 e 2012 (valores negativos correspondem a recuo e positivos a</li> <li>progradação da linha de costa). Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	55
Figura 3.15	<ul> <li>Taxa de evolução (m/ano) da linha do Zero Hidrográfico de Leixões entre</li> <li>2012 e 2016 (valores negativos correspondem a recuo e positivos a</li> <li>progradação da linha de costa). Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	56
Figura 3.16	<ul> <li>Taxa de evolução (m/ano) da linha do Zero Hidrográfico de Leixões entre</li> <li>2008 e 2016 (valores negativos correspondem a recuo e positivos a</li> <li>progradação da linha de costa). Fonte da imagem: ESRI Basemap</li> </ul>	56
Figura 4.1 -	<ul> <li>Níveis máximos atingidos durante a simulação (Janeiro de 1991): situação atual (esquerda) e Solução 1 (direita)</li> </ul>	57
Figura 4.2 -	- Correntes residuais durante a simulação (janeiro de 1991): a) situação atual; b) Solução 1. As velocidades estão interpoladas numa malha com uma resolução de 100 m para maior clareza	58
Figura 4.3 -	<ul> <li>Exemplo de condições hidrodinâmicas na situação atual: a) níveis; b) alturas de onda significativa; c) correntes. As velocidades estão interpoladas numa malha com uma resolução de 100 m para maior clareza</li> </ul>	59
Figura 4.4 -	<ul> <li>Exemplo de condições hidrodinâmicas para a Solução 1: a) níveis; b) alturas de onda significativa; c) correntes. As velocidades estão interpoladas numa malha com uma resolução de 100 m para maior clareza</li> </ul>	60
Figura 4.5 -	<ul> <li>Densidade de partículas depositadas: situação atual (esquerda) e Solução 1 (direita)</li> </ul>	61
Figura 4.6 -	- Simulação da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões para a situação atual: a) evolução morfológica: b) caudais sólidos residuais	63
Figura 4.7 -	<ul> <li>Simulação da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões para a Solução 1: a)</li> <li>evolução morfológica: b) caudais sólidos residuais</li> </ul>	64
Figura 5.1 -	- Histograma de Hrms, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016), com a Solução 1	67
Figura 5.2 -	- Histograma de Dir, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016), com a Solução 1	67
Figura 5.3 -	- Histogramas de a) Hrms e b) Dir, no Ponto Norte, para o período de estudo (2008-2016), para a situação atual e a Solução 1	07
Figura 5.4 -	- Histogramas de a) Hrms e b) Dir, no Ponto Central, para o período de estudo (2008-2016), para a situação atual e a Solução 1	69
Figura 5.5 -	- Histogramas de a) Hrms e b) Dir, no Ponto Sul, para o período de estudo (2008-2016), para a situação atual e a Solução 1	
Figura 5.6 -	- Resultados numéricos da evolução da isolinha do ZHL da praia de Matosinhos, para o período 2008-2016, para a Solução 1	71
Figura 5.7 -	<ul> <li>Posições extremas (máximos e mínimos) da isolinha numérica do ZHL da praia de Matosinhos, para o período 2008-2016, para a situação atual e a Solução 1</li> </ul>	72

Figura I. 1 – Locais de recolha de amostras de sedimentos. Amostragem nas praias em janeiro de 2017 (preto) e no porto e zona adjacente em fevereiro de 2017 (vermelho)	88
Figura I. 2 – Domínio e malha de cálculo do modelo regional de níveis. Fonte: Fortunato et al. (2016)	90
Figura I. 3 – Validação do modelo regional de níveis: erros quadráticos médios nos marégrafos indicados na Figura I. 2. Fonte: Fortunato et al. (2016)	91
Figura I. 4 – Comparação de dados de agitação marítima da boia de Leixões em fevereiro de 2014: a) dados tratados pelo Instituto Hidrográfico (IH, 2014); b) dados tratados pelo LNEC	92
Figura II. 1 – Modelo SCHISM (fonte: http://ccrm.vims.edu/schismweb/)	95
Figura II. 2 – Malha de cálculo e batimetria para o modelo SCHISM-WWM	96
Figura II. 3 – Pormenor da malha de cálculo para a Solução 1	97
Figura II. 4 – Resolução horizontal da malha do modelo SCHISM	97
Figura II. 5 – Zonas de afloramentos rochosos, indicadas a cinzento escuro	99
Figura II. 6 – Distribuição do coeficiente de Manning usado no modelo SCHISM	100
Figura II. 7 – Distribuição do coeficiente de Manning usado no modelo SCHISM (Solução 1 detalhe)	– 100
Figura II. 8 – Comparação dos resultados do modelo SCHISM com os dados do marégrafo do Porto de Leixões, referentes ao período de Janeiro de 2016. Apresentam-se os resultados para diferentes coeficientes de Manning, com e sem agitação marítima	e 101
Figura II. 9 – Comparação dos resultados do modelo SCHISM com os dados do marégrafo do Cais dos Banhos, referentes a janeiro de 2016. Apresentam-se os resultado para diferentes coeficientes de Manning, com e sem agitação marítima	os 102
Figura II. 10 – Comparação dos resultados do modelo SCHISM com os dados do marégrafo do Cais dos Banhos, para os períodos de 9-14 de janeiro de 2016 e 23-27 de janeiro de 2016. Apresentam-se os resultados para diferentes coeficientes de Manning, com e sem agitação marítima	o 103
Figura II. 11 – Validação do modelo hidrodinâmico para fevereiro de 2016, com um coeficiente de Manning de 0.035 m <sup>1/3</sup> /s	105
Figura II. 12 – Alteração do nível do marégrafo de Leixões a partir das 11h00 do dia 14 de Fevereiro de 2016	106
Figura II. 13 – Validação da agitação marítima para o período de Fevereiro de 2016: a) altura significativa; b) período médio e c) direção	107
Figura II. 14 – Comparação da granulometria inicialmente considerada no modelo SED2D (laranja) com as observadas na praia de Leça (preto), praia de Matosinhos (vermelho) e Porto de Leixões (azul). Os locais onde foram colhidas as amostras estão indicados na Figura I. 1, e os dados utilizados estão indicados no Quadro 3.5	108
Figura II. 15 – Zona do domínio onde foi considerada a evolução batimétrica (a preto): a)	
situação atual; b) Solução 1	109

## Índice de quadros

Quadro 2.2 – Sedimentos utilizados no modelo: condições iniciais       18         Quadro 2.3 – Localização das séries de agitação marítima e nível do mar em frente à praia       22         Quadro 2.4 – Estatística de Hrms (em metros) nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)       23         Quadro 2.5 – Parâmetros associados à caracterização granulométrica da praia de Matosinhos       32         Quadro 3.1 – Volumes anuais do material dragado no Porto de Leixões entre 2007 e 2016 (m³). Os locais estão assinalados na Figura 1.1       40
Quadro 2.3 – Localização das séries de agitação marítima e nível do mar em frente à praia       22         Quadro 2.4 – Estatística de Hrms (em metros) nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)
<ul> <li>Quadro 2.4 – Estatística de Hrms (em metros) nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)</li></ul>
Quadro 2.5 – Parâmetros associados à caracterização granulométrica da praia de Matosinhos
Quadro 3.1 – Volumes anuais do material dragado no Porto de Leixões entre 2007 e 2016 (m <sup>3</sup> ). Os locais estão assinalados na Figura 1.140
Quadro 3.2 – Valores médios de evolução dos fundos na zona interior do porto. Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação. A negrito apresentam-se os valores residuais41
Quadro 3.3 – Valores médios de evolução dos fundos na zona montante do porto. Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação. A negrito apresentam-se os valores residuais42
Quadro 3.4 – Resultados da comparação dos levantamentos topo-hidrográficos da Praia de Matosinhos e zona adjacente, para as áreas de comparação descritas em 3.2.1. Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação45
Quadro 3.5 – Parâmetros granulométricos das areias dos sedimentos de fundo e das praias de Matosinhos e de Leça49
Quadro 3.6 – Classes dimensionais da fração arenosa dos sedimentos de fundo e das praias de Matosinhos e de Leça
Quadro 4.1 – Percentagem de partículas que se mantém no porto para diferentes velocidades de queda (Ws)61
Quadro I. 1 – Coordenadas dos marégrafos utilizados no presente estudo
Quadro II. 1 – Calibração do modelo de circulação (sem agitação marítima): erros quadráticos médios (cm) nos marégrafos para vários coeficientes de Manning, e para o mês de janeiro de 2016
Quadro II. 2 – Validação do modelo de circulação: erros quadráticos médios (cm) nos marégrafos para um coeficiente de Manning de 0.035 m <sup>1/3</sup> /s104
Quadro II. 3 – Validação do modelo de agitação marítima em Leixões106

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

## 1 | Introdução

## 1.1 Âmbito e objetivos

Em 19 de setembro de 2016, a Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo (APDL) solicitou ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) uma proposta de estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões.

Este pedido de proposta surgiu na sequência da necessidade sentida pela APDL de prolongar o quebra-mar exterior do Porto de Leixões, de modo a aumentar as condições de abrigo que permitam a entrada de navios porta-contentores. Além disso, é também pretensão da APDL a construção de um novo terminal no quebra-mar sul, com profundidades de 14.8 m (ZHL<sup>1</sup>).

A proposta do LNEC, *Estudos em Modelo Físico e Numérico do Prolongamento do Quebra-mar Exterior e do Novo Terminal de Contentores do Porto de Leixões,* foi apresentada em 3 de outubro de 2016 e adjudicada em 24 de outubro de 2016.

Nos últimos anos foram desenvolvidos alguns estudos preliminares com vista ao prédimensionamento do quebra-mar exterior, dos terraplenos e do cais, assim como à análise das condições de navegabilidade na entrada do porto. Esses estudos apontaram para a necessidade de prolongamento do quebra-mar exterior (entre 200 e 300 m), com um ângulo de abertura de até 20°.

Os presentes estudos do LNEC têm como objetivo servir de base ao desenvolvimento do Projeto de Execução do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões. Nesse sentido, a proposta contempla os seguintes estudos em modelo físico e modelo numérico:

- Estudo I Otimização da geometria do novo troço do quebra-mar exterior do Porto de Leixões;
- Estudo II Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos;
- Estudo III Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões na dinâmica sedimentar na vizinhança do porto.

O presente relatório apresenta o trabalho realizado no âmbito do terceiro destes estudos.

#### 1.2 Zona de estudo

A zona de estudo é constituída pelo Porto de Leixões e a praia de Matosinhos, tendo dimensões aproximadas de 3x3 km<sup>2</sup> (Figura 1.1). No entanto, para efeitos de simulação de alguns processos físicos, é necessário considerar um domínio significativamente mais vasto, estendendo-se 50 km para norte e para sul da foz do Douro, aproximadamente de Esposende à embocadura da Ria de Aveiro.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> ZHL – Zero Hidrográfico de Leixões.

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

Este domínio mais vasto inclui ainda o estuário do Douro, da sua embocadura até à barragem de Crestuma.



Figura 1.1 – Zona de estudo, compreendendo o Porto de Leixões e a praia de Matosinhos. Fonte: Google Earth

#### 1.3 Solução analisada

As configurações analisadas estão representadas na Figura 1.2. A Solução 1 corresponde ao prolongamento do quebra-mar norte em cerca de 300 m. Para além disso, na Solução 1 foi retirada a extremidade do molhe norte antigo (cerca de 50 m) e considerou-se um novo terrapleno e um novo porto de pesca com uma profundidade de 3.5 m (ZHL). Considerou-se ainda uma nova bacia de rotação, com fundos a 15.5 m (ZHL), e um novo cais, com uma profundidade de 14.8 m (ZHL).



Figura 1.2 – Configurações analisadas: a) situação atual; b) Solução 1

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

#### 1.4 Organização do relatório

O relatório está organizado em cinco capítulos para além desta introdução. A metodologia seguida é descrita no Capítulo 2 |. Os capítulos seguintes descrevem a dinâmica sedimentar na zona de estudo a partir da análise dos dados (Capítulo 3 |) e de modelos numéricos. Uma vez que os modelos utilizados são distintos, descreve-se separadamente a dinâmica sedimentar no interior do Porto de Leixões (Capítulo 4 |) e na praia de Matosinhos (Capítulo 5 |). As principais conclusões são apresentadas no Capítulo 0.

Em anexo apresentam-se os dados de base (Anexo I), assim como os modelos numéricos, a sua implementação e validação (anexos II a IV).

Ao longo do relatório consideram-se as seguintes convenções e referenciais:

- todas as cotas e elevações são referidas ao Zero Hidrográfico de Leixões (ZHL, 1.674 m abaixo do Nivelamento Geral do País), e consideram-se positivas para cima;
- todas as profundidades são também referidas ao ZHL e consideram-se positivas para baixo; •
- todas as coordenadas horizontais estão no sistema Hayford Gauss, Datum 73. •

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

2 | Metodologia

### 2.1 Abordagem geral

Uma avaliação qualitativa dos elementos disponíveis permitiu construir um modelo conceptual da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões. Esta primeira avaliação incidiu sobre os resultados da reunião efetuada entre técnicos da APDL e do LNEC em 6 de janeiro de 2017, sobre os elementos recolhidos no local, e sobre uma primeira interpretação dos dados disponíveis. Esta análise permitiu identificar os possíveis fluxos sedimentares no Porto de Leixões (Figura 2.1):

- 1. Trânsito litoral (a azul na Figura 2.1). O trânsito litoral poderá ser parcialmente capturado pelo porto, levando à deposição de areias no seu interior.
- 2. Dinâmica da praia de Matosinhos (a cor de laranja na Figura 2.1). Embora a praia de Matosinhos esteja confinada a norte pelo quebra-mar sul do Porto de Leixões, uma eventual rotação excessiva desta praia no sentido anti-horário pode conduzir à transposição de areias da praia para o interior do porto.
- 3. Sedimentos provenientes do rio Leça (a verde na Figura 2.1). Estes sedimentos podem incluir areias e sedimentos finos.
- 4. Areias que atravessam o quebra-mar norte (a amarelo na Figura 2.1). De acordo com informações prestadas pelos técnicos da APDL, a permeabilidade do quebra-mar é elevada. Em situações de forte agitação, os fluxos de água através desta estrutura são sentidos nos navios atracados.



Figura 2.1 – Modelo conceptual da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões

Não existindo um modelo de transporte de sedimentos universal, que reproduza todos os processos relevantes, foi escolhido um modelo diferente para cada um destes possíveis fluxos de sedimentos. Assim:

- Foi aplicado um modelo acoplado de circulação, agitação marítima e dinâmica sedimentar (SCHISM, descrito no Anexo II) para simular a dinâmica sedimentar das areias provenientes do trânsito litoral.
- 2. Foi aplicado um modelo de linha de costa (LITLINE, descrito no Anexo III) para simular a dinâmica da praia de Matosinhos e os seus eventuais impactes no porto.
- 3. Foi aplicado um modelo lagrangeano para sedimentos finos (VELApart, descrito no Anexo IV) para determinar o destino dos sedimentos finos provenientes do rio Leça.
- 4. Finalmente, considerou-se que os fluxos de areia através do quebra-mar norte não serão afetados pelas intervenções previstas, pelo que não foram explicitamente simulados.

A aplicação de modelos foi precedida de uma análise aos dados de base. Esta análise permitiu por um lado contribuir para a compreensão da dinâmica sedimentar, e por outro lado fornecer os dados necessários para implementar, calibrar e validar os modelos.

### 2.2 Análise de dados de base

#### 2.2.1 Levantamentos hidrográficos

#### 2.2.1.1 Comparação de modelos digitais de terreno e cálculo de volumes

Os levantamentos hidrográficos da zona interior do porto e topo-hidrográficos da praia de Matosinhos e zona adjacente a sul, referidos no Anexo I, foram armazenados numa *geodatabase* do software ArcGIS (Desktop 10 Service Pack 2, ESRI), no qual toda a informação foi processada. Para cada levantamento criaram-se modelos digitais de terreno (MDT) em formato TIN (*Triangulated Irregular Network*) que foram comparados entre si através da ferramenta *surface difference (3D analyst)* para a maior área comum.

Na zona interior do porto foram comparados os levantamentos de 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2014, 2015 e 2016, para a área de comparação representada na Figura 2.2. Para cada período de comparação obteve-se os volumes de diferença (residuais) entre os MDT, relativos a erosão e acumulação, tendo sido calculadas as respetivas taxas anuais de evolução. No caso das comparações na zona do porto, as taxas calculadas tiveram em conta a soma dos volumes de dragagem em cada período, quer para a totalidade do porto, quer para a zona montante da bacia de rotação (que inclui as docas 1, 2 e 4) delimitada a jusante pelo Terminal de Granéis Sólidos e Líquidos (Figura 2.3). Uma vez que não havia informação sobre a delimitação das diferentes áreas dragadas, a distribuição espacial das taxas de evolução não tem em conta os volumes de dragagem, sendo apenas útil para uma análise qualitativa.

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 2.2 – Áreas de comparação dos levantamentos no interior do porto (tracejado azul) e na praia de Matosinhos (a tracejado cinzento e a branco). Fonte da imagem: ESRI Basemap



Figura 2.3 – Área de comparação dos levantamentos na zona montante do porto. Fonte da imagem: ESRI Basemap

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

No caso da praia de Matosinhos e zona costeira adjacente, e uma vez que dos três levantamentos disponíveis só dois abrangiam parte da zona subaérea da praia, fizeram-se duas comparações considerando áreas distintas: na zona inferior da praia (a tracejado cinzento na Figura 2.2), aproximadamente entre as profundidades 10.5 e -0.07 m (ZHL), entre os levantamentos 2008, 2012 e 2016, e na zona inferior e parte da praia subaérea (a branco na mesma figura), até aproximadamente 5.0 m acima do ZHL, entre os levantamentos de 2008 e 2012.

#### 2.2.1.2 Evolução da linha de costa

Uma vez que dos 3 levantamentos disponíveis para a praia de Matosinhos só dois abrangem parte da zona subaérea da praia (ver ponto 2.2.1.1), a evolução da forma plana da praia foi analisada através da comparação das linhas do nível médio do mar (NMM) e do ZHL, respetivamente, de 2008 e 2012, e de 2008, 2012 e 2016. A comparação das linhas de diferentes datas foi efetuada através da ferramenta *DSAS - Digital Shoreline Analysis System* (versão 4.3) (Thieler *et al.*, 2009), funcional em ambiente ArcGIS. Esta ferramenta automatiza o cálculo da variação da linha de costa, tendo como referência uma linha de base dividida em transectos, neste caso distanciados de 5 m entre si, onde se referenciam os pontos de interseção das linhas de referência de diferentes datas (Figura 2.4). A taxa de evolução é calculada com base na distância entre duas linhas de referência, medida em cada transecto, e o intervalo de tempo decorrido entre as duas posições. Quanto mais afastadas no tempo forem as linhas de referência, de modo a englobar apenas as variações a longo prazo, menor será o erro associado à estimativa das taxas de evolução.



Figura 2.4 – Linha de base (vermelho), transectos (amarelo), linhas do nível médio do mar e do zero hidrográfico de Leixões (preto) usadas na análise da evolução da linha de costa. Fonte da imagem: ESRI Basemap

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

#### 2.2.2 Ortofotomapas

A Linha de Máxima Preia-Mar de Águas Vivas Equinociais (LMPMAVE) (Teixeira, 2009), considerada neste trabalho como o limite da ação direta do forçamento oceânico, foi extraída dos ortofotomapas de 2014 para toda a região envolvente ao local do estudo.

#### 2.2.3 Sedimentos

As amostras recolhidas foram tratadas em laboratório com vista à determinação da curva granulométrica e cálculo de percentis. Os sedimentos foram lavados para determinação da percentagem de fração grosseira (dimensão superior a 63 µm), e sujeitos à análise granulométrica por crivagem a seco, segundo as metodologias apresentadas em Freire (2002a e 2002b). Com base na distribuição granulométrica calcularam-se os parâmetros diâmetro mediano (D<sub>50</sub>) e o coeficiente de graduação  $\sigma$ , ou dispersão geométrica, definido como  $\sigma$ =(D<sub>84</sub>/D<sub>16</sub>)<sup>0.5</sup>, em que D<sub>16</sub> e D<sub>84</sub> são os valores de diâmetro abaixo dos quais 16% e 84% da distribuição têm, respetivamente, diâmetros inferiores. Este coeficiente traduz o grau de seleção do sedimento: quanto mais próximo da unidade, mais uniforme do ponto de vista granulométrico será o sedimento.

Uma vez que as amostras #1, #2, #3, #4, #5 e #6, recolhidas na zona do porto (Figura I. 1), são vasas negras ricas em matéria orgânica (Figura 2.5), constituídas essencialmente por fração silto-argilosa, optou-se por não se fazer a sua lavagem considerando que a percentagem da fração grosseira é inferior a 5%.



Figura 2.5 – Aspeto das amostras vasosas ricas em matéria orgânica recolhidas na zona interior do porto

## 2.3 Modelação numérica acoplada da circulação e da agitação marítima

#### 2.3.1 Abordagem

A hidrodinâmica costeira é determinada por fenómenos de larga escala, como a geração e propagação da agitação marítima e as marés. Junto à costa, a variação significativa da batimetria e

da linha de costa em curtas distâncias implicam fortes gradientes nas características da agitação marítima e das correntes. Assim, a simulação da hidrodinâmica costeira implica a consideração de escalas espaciais muito grandes, mas simultaneamente com uma resolução espacial muito fina junto à costa. Assim, optou-se por trabalhar a duas escalas distintas. Em primeiro lugar simula-se a agitação marítima e os níveis devidos à maré a larga escala. Estes resultados são depois usados para forçar um modelo de pequena escala, com resoluções da ordem das dezenas de metros na zona de estudo. No caso particular do Porto de Leixões, a proximidade da embocadura do estuário do Douro sugere que as correntes possam ser afetadas pelo estuário. Assim, o modelo local cobre não só a zona costeira, mas também o próprio estuário.

#### 2.3.2 Modelação de larga escala da agitação marítima

A geração e propagação da agitação marítima no Atlântico Norte foram simuladas através da aplicação do modelo WaveWatch III<sup>®</sup> (Tolman, 2009). O modelo WAVEWATCH III<sup>®</sup> (WW3) é um modelo de ondas de terceira geração desenvolvido na NOAA/NCEP. Resolve a equação de conservação da densidade espetral de ação da onda para espectros de número de onda – direção. Esta equação assume que as propriedades do meio (profundidade e corrente) e dos próprios campos de onda variam em escalas espaciais e temporais muito superiores às escalas de variação de uma única onda. A versão 3.14 do modelo, aqui utilizada, inclui termos de fonte para águas pouco profundas.

As simulações são forçadas por ventos da base de dados ERA-INTERIN, desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasst* (ECMWF). Esta base de dados de vento tem uma resolução espacial de 0.75° e temporal de 6 horas. É utilizada uma primeira malha que cobre todo o Atlântico Norte com uma resolução de 0.5°, e uma malha encaixada sobre a costa Portuguesa com uma resolução de 0.05° (Figura 2.6). Esta aplicação é usada em modo operacional no LNEC desde 2011 (http://ariel.lnec.pt), estando descrita e validada em detalhe em Fortunato et al. (2017).

No presente trabalho, uma vez que o campo de ventos utilizado para forçar o modelo é diferente do que é usado em modo operacional, validaram-se os resultados por comparação com dados da boia de Leixões. Os resultados (Figura 2.7) mostram uma boa concordância entre as alturas de onda simuladas e medidas. O modelo tende a subestimar ligeiramente as ondas de maior energia, e a sobrestimar as de menor energia. Este comportamento é atribuído aos ventos utilizados para forçar o modelo, que têm um comportamento semelhante (Campos e Guedes Soares, 2017). A dispersão é superior para as direções, em parte devido à baixa resolução direcional dos dados (22.5 graus).

Os erros (Quadro 2.1) são semelhantes aos apresentados em modelos do mesmo tipo (e.g., Dodet et al., 2010, Almeida et al., 2016, Fortunato et al., 2017). Almeida et al. (2016) obtém erros ligeiramente inferiores usando um modelo com assimilação de dados.



Figura 2.6 – Malhas e domínios de cálculo do modelo WaveWatch III. O círculo vermelho indica a posição da boia de Leixões



Figura 2.7 – Validação do modelo WaveWatch III com dados da boia de Leixões de 2011 a 2015: alturas de onda significativas e direções médias

C	)uadro 21 –	Validação do	modelo de	aditação	marítima e	m l	eixões
•		vanuação ac	moució ac	, agnaçao	manuna c		LCINOCO

Erro quadrático médio das alturas de onda significativas (m)	Erro quadrático médio normalizado das alturas de onda significativas (%)	Viés das alturas de onda significativas (m)	Erro quadrático médio das direções (graus)
0.35	16	-0.11	15

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

2.3.3 Seleção do período a simular

Uma vez o modelo validado, foram efetuadas simulações para 37 anos (de 1979 a 2015). Os resultados na boia de Leixões foram usados para caracterizar a agitação marítima do ponto de vista do transporte litoral. Este transporte é proporcional ao quadrado da altura de onda significativa. Determinaram-se por isso médias mensais desta variável ao longo dos anos disponíveis. Por outro lado, a direção da onda tem também um papel essencial na determinação da direção e magnitude do transporte. Determinaram-se por isso também médias mensais da direção média, pesadas pelo quadrado da altura de onda significativa.

Os resultados mostram a forte sazonalidade da agitação marítima (Figura 2.8 e Figura 2.9), sendo janeiro, fevereiro e dezembro os meses mais energéticos. Em termos de direção, a agitação vem tendencialmente mais de norte no verão marítimo e mais de sul no inverno marítimo.

Para efeitos da análise do transporte sedimentar convém analisar um período simultaneamente energético, e com uma direção representativa. Com base na análise estatística selecionou-se o mês de janeiro de 1991 como período representativo para analisar a dinâmica sedimentar na zona de estudo. Como se viu, janeiro é o mês mais energético do ano, pelo que será também o mais gravoso em termos de assoreamento e dinâmica sedimentar. Simultaneamente, 1991 teve um mês de janeiro representativo em termos de agitação marítima, já que quer a energia média da onda quer a sua direção estão próximas da média dos meses de janeiro (Figura 2.10).



Figura 2.8 – Médias mensais das características da agitação marítima na boia de Leixões: quadrado da altura de onda significativa e direções médias pesadas pelo quadrado da altura de onda significativa



Figura 2.9 – Médias anuais das características da agitação marítima na boia de Leixões: quadrado da altura de onda significativa e direções médias pesadas pela altura de onda significativa ao quadrado



Figura 2.10 – Estatísticas da agitação marítima para todos os meses de janeiro entre 1979 e 2015. As linhas a vermelho indicam as médias de janeiro

#### 2.3.4 Modelação local de níveis, correntes e agitação marítima

A circulação e a agitação marítimas foram simuladas com o modelo SCHISM (Zhang et al., 2016, Anexo I), que inclui o módulo de agitação marítima WWM (Roland et al., 2012). O domínio simulado inclui uma zona costeira, aproximadamente semi-circular e centrada na embocadura do estuário do Douro, com um raio de 50 km. Inclui ainda o estuário do Douro, da barragem de Crestuma até à embocadura. A malha tem uma resolução da ordem de 10 m na zona de estudo (Porto de Leixões e praia de Matosinhos), 50 m no estuário do Douro, e 1500 m na fronteira marítima. O passo de cálculo é de 60 s.

Foram efetuadas simulações só de circulação (forçadas pela maré, o vento, a pressão atmosférica e os caudais fluviais), e de circulação e agitação marítima acopladas. O modelo é forçado na fronteira marítima pela maré e a pressão atmosférica (método do barómetro inverso), nas fronteiras fluviais pelo caudal, e à superfície pela pressão atmosférica e pelo vento. Nas simulações acopladas circulação / agitação marítima, o modelo foi ainda forçado pelos espectros de agitação marítima provenientes do modelo WAVEWATCH III descrito na secção 2.3.2.

O modelo de circulação foi calibrado e validado para o período de janeiro a fevereiro de 2016. A escolha deste período deveu-se a:

- 1. Estarem disponíveis dados para o forçamento do modelo (caudais no Douro, ventos e pressão atmosférica provenientes da base de dados ERA-INTERIN);
- Estarem disponíveis dados para validação nos dois marégrafos utilizados (Porto de Leixões e Cais dos Banhos);
- 3. Estarem disponíveis dados para validação da agitação marítima na boia de Leixões, ainda que apenas para o mês de fevereiro;
- 4. Terem ocorrido condições muito energéticas de agitação marítima (Figura 2.11), de pressão atmosférica (Figura 2.12), de ventos (Figura 2.13 e Figura 2.14), conjugadas com caudais fluviais muito elevados (Figura 2.15). As marés variaram entre vivas e mortas (Figura 2.16). Assim, o modelo foi calibrado e validado para condições variadas e particularmente exigentes.



Figura 2.11 – Condições de agitação marítima para o período de calibração e validação: a) altura significativa; b) período médio e c) direção. Fonte: simulação com o modelo WW3



Figura 2.12 - Condições de pressão atmosférica para o período de calibração e validação, extraídas do ECMWF



Figura 2.13 – Condições de vento aos 10 m da superfície para o período de calibração e validação, extraídos do ECMWF. Diagrama vetorial



Figura 2.14 – Condições de vento aos 10 m da superfície para o período de calibração e validação, extraídos do ECMWF



Figura 2.15 – Caudal do rio Douro com base nos dados do SNIRH na estação de Crestuma (EDP), para o período de calibração e validação

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 2.16 - Condições de maré para o período de calibração e validação. Fonte: modelo de Fortunato et al. (2016)

## 2.4 Modelação numérica da dinâmica sedimentar na envolvente do Porto de Leixões

A dinâmica sedimentar na envolvente do Porto de Leixões foi simulada com o modelo SED2D (Guerrin et al, 2016) acoplado ao modelo hidrodinâmico (SCHISM-WWM) referido na secção 2.3.4. O conjunto de modelos foi corrido em modo morfodinâmico (i.e., tendo em consideração a evolução da batimetria nas ondas e nas correntes). Nas zonas em que os fundos são rochosos (incluindo o manto de tetrápodes do quebra-mar) considerou-se que não poderia haver erosão. Foram consideradas 5 classes de sedimento com diferentes percentagens de ocorrência (Quadro 2.2). A aplicação é descrita em detalhe no Anexo II.

Diâmetro representativo (mm)	0.1	0.2	0.5	0.8	1.0
Fração	0.12	0.23	0.40	0.20	0.05

Quadro 2.2 – Sedimentos utilizados no modelo: condições iniciais

Os resultados do modelo permitem analisar as alterações à sedimentação e aos fluxos sedimentares residuais causadas pela extensão do quebra-mar.

#### 2.5 Modelação numérica dos sedimentos provenientes do Rio Leça

A análise dos dados de campo (Capítulo 3 |) sugere que existe uma afluência de sedimentos proveniente do rio Leça que contribui para o assoreamento do Porto de Leixões. Por um lado, as comparações de levantamentos indicam taxas de assoreamento elevadas na zona montante do porto, onde desagua o Leça (secção 3.2.1). Uma vez que é improvável que as areias costeiras atinjam esta zona, infere-se que esta sedimentação tem origem no rio Leça. Por outro lado, as

amostras de sedimentos mais recentes indicam que os sedimentos na bacia portuária podem ser maioritariamente lodosos em determinadas situações (secção 3.3.1). Também esta constatação indica que pelo menos parte do assoreamento da bacia portuária tem origem em sedimentos vindos do Rio Leça.

Por forma a analisar qualitativamente a dinâmica destes sedimentos, e a perceber os efeitos das intervenções em análise nesta dinâmica, aplicou-se um modelo lagrangeano de transporte de sedimentos em suspensão. O modelo VELApart (Oliveira e Fortunato, 2002, Anexo IV) simula a trajetória de partículas de sedimento, sujeitas ao transporte horizontal por advecção, à deposição e à ressuspensão. É forçado pelo campo de correntes provenientes das simulações do modelo SCHISM-WWM descritas acima.

As simulações foram realizadas da seguinte forma:

- Partículas lançadas: 6127 partículas, lançadas na foz do rio Leça (Figura 2.17), a 1/4, 2/4 e 3/4 da coluna de água;
- Instantes de lançamento: preia-mar, máxima vazante, baixa-mar e máxima enchente;
- Velocidades de queda: 0.1 mm/s e 0.5 mm/s;
- Duração das simulações: 1 mês (janeiro de 1991).



Figura 2.17 – Localização inicial das partículas (pontos a vermelho)

Para cada configuração do porto são simuladas as trajetórias de cerca de 150 mil partículas (6127 x 3 x 4 x 2). A análise dos resultados é feita determinando a densidade de partículas depositadas.

A deposição dos sedimentos é muito sensível à velocidade de queda, pelo que a escolha deste parâmetro influencia muito os resultados. Uma análise de sensibilidade preliminar mostrou que partículas com velocidades de 1 mm/s ou superiores (correspondentes a areias) se depositam na zona montante do porto. Com efeito, as condições hidrodinâmicas que ocorrem nessa zona não são suficientes para ressuspender os sedimentos e permitir a sua saída da bacia portuária. Uma vez que se espera que as condições hidrodinâmicas se alterem no sentido de um menor hidrodinamismo nesta zona com as intervenções previstas, não deverão ocorrer alterações no que se refere à deposição de areias provenientes do rio Leça. Para velocidades de sedimentação muito pequenas, i.e., com velocidades de queda de 0.01 mm/s ou inferiores, os resultados são muito pouco sensíveis a esta velocidade. Assim, optou-se por analisar o comportamento de sedimentos com velocidades de queda intermédias, 0.1 e 0.5 mm/s.

Finalmente, os resultados mostraram-se algo sensíveis à difusão horizontal: o aumento deste parâmetro conduz a uma maior mistura e diminui a variabilidade espacial das taxas de deposição. Na impossibilidade de validar os resultados do modelo, optou-se por um coeficiente de difusão baixo, de 0.01 m<sup>2</sup>/s. Fisicamente, este valor significa que a deslocação horizontal de uma partícula por efeito da difusão, aleatória, é de cerca de 1 m/minuto (Anexo IV).

#### 2.6 Modelação numérica da dinâmica da praia de Matosinhos

#### 2.6.1 Abordagem

A dinâmica sedimentar da praia de Matosinhos é determinada com base em modelação numérica para o período 11/junho/2008 - 21/março/2016 (doravante designado como período de estudo no âmbito da modelação da dinâmica da praia). A sua modelação é baseada nos seguintes elementos: i) levantamentos topo-hidrográficos de 2008, 2010 e 2016, que abrangem a totalidade da zona ativa da praia submersa e parte da zona ativa emersa, localizada entre o quebra-mar sul do Porto de Leixões e o Forte de São Francisco Xavier também conhecido como Castelo do Queijo, ao longo de uma extensão longitudinal de cerca de 1150 m (Figura 2.18); ii) séries temporais sinóticas de parâmetros de caracterização da agitação marítima e do nível do mar à entrada da zona ativa da praia; e iii) dados sedimentológicos da praia. A metodologia desenvolveu-se em três fases.

Na primeira fase da metodologia: i) determinou-se a agitação marítima em três posições em frente à praia durante o período de estudo com base na aplicação de um modelo de propagação de ondas marítimas do largo para a costa que tem em conta, entre outros processos costeiros fundamentais, a difração causada pelo quebra-mar norte do Porto de Leixões e a variação do nível do mar devida à maré astronómica; ii) elaboraram-se modelos digitais de terreno (MDT) para cada um dos três levantamentos (de 2008, 2012 e 2016) de onde se extraíram perfis de praia em três transectos normais ao alinhamento médio da linha de costa e as isolinhas do ZHL e do NMM; e iii) definiu-se a
distribuição transversal da granulometria das areias da praia com base nos resultados das análises granulométricas das amostras de sedimentos das partes emersa e submersa da praia de Matosinhos.

Na segunda fase da metodologia: i) avaliou-se a distribuição do transporte sedimentar longitudinal potencial na direção normal à linha de costa na zona ativa da praia de Matosinhos durante o período de estudo, com recurso a um modelo de transporte sedimentar longitudinal do tipo perfil (designação usada para modelos 2D-Vertical deste tipo) baseados nos processos de transporte sedimentar na zona de rebentação da praia; e ii) parametrizou-se o perfil da praia ativa com vista à aplicação do modelo de evolução da linha de costa.



Figura 2.18 – Praia de Matosinhos. Localização do referencial local, dos pontos de agitação marítima Norte, Central e Sul, e dos perfis transversais Norte, Central e Sul

Na terceira fase da metodologia: i) elaborou-se o modelo conceptual de dinâmica sedimentar no domínio de cálculo para implementação do modelo de linha de costa; ii) no âmbito da sua implementação, definiram-se as condições de fronteira lateral, as condições de hidrodinâmica forçadoras ao longo da fronteira de entrada (lado mar), as características das estruturas transversais e longitudinais, e os parâmetros físicos e numéricos necessários para a resolução da equação da continuidade aplicada à parametrização do perfil da praia ativa previamente definido; e iii) calibrou-se e validou-se o modelo de evolução de linha de costa.

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

### 2.6.2 Agitação marítima e nível do mar

Utilizou-se o modelo numérico DREAMS (Fortes, 1993) para a propagação dos dados de agitação marítima do ECMWF obtidos com o modelo de hindcast WAM (Hasselmann et al., 1988) na posição da boia ao largo de Leixões (ponto de coordenadas planas Datum 73 M=-71187.7 m e P=183397.8 m; e profundidade 83 m ZHL) para a costa, considerando a variação do nível do mar sinótica correspondente aos dados de hindcast obtidos com modelo regional de maré descrito no Anexo I, e o levantamento topo-hidrográfico de 2016 fornecido pela APDL para a batimetria junto à costa. Esta metodologia encontra-se descrita detalhadamente no relatório da componente "Estudo II - Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos" (Pinheiro et al., 2017).

Determinaram-se as séries temporais dos parâmetros estatísticos de agitação marítima altura de onda média quadrática (Hrms), período médio de zero ascendente (Tz) e direção média (Dir), e a série temporal de nível do mar (NM) para o período de estudo em três posições em frente à praia de Matosinhos que se encontravam à profundidade aproximada de 10 m ZHL à data do levantamento topo-hidrográfico de 2016 (18-21/março). As coordenadas planas e vertical (no sistema de projeção Datum 73 e referida ao Datum vertical ZHL, respetivamente) desses pontos encontram-se no Quadro 2.3.

Ponto	M (distância à Meridiana) [m]	P (distância à Perpendicular) [m]	Profundidade* [m ZHL]
Ponto Norte	-47714.3	167391.9	10.0
Ponto Central	-47374.0	167094.5	10.0
Ponto Sul	-47151.2	166702.7	10.0

Quadro 2.3 – Localização das séries de agitação marítima e nível do mar em frente à praia de Matosinhos

\*Levantamento topo-hidrográfico de 2016

A análise comparativa das três séries temporais de Hrms para o período de estudo (Figura 2.19) e dos parâmetros estatísticos apresentados no Quadro 2.4 revela que, tal como esperado, o Porto de Leixões tem um efeito de abrigo da agitação marítima incidente na praia de Matosinhos, causando um decréscimo do parâmetro Hrms do Ponto Sul para o Ponto Norte. O histograma de frequência de ocorrência por classes de intervalo 0.5 m (Figura 2.20) mostra que cerca de 70% das ondas incidentes no Ponto Norte têm Hrms inferior a 0.5 m e que esta classe de valores é a predominante nos três pontos em frente à praia, com cerca de 49 e 37% de frequência de ocorrência inverte-se e a frequência de ocorrência aumenta do Ponto Norte para o Ponto Sul. Note-se contudo que cerca 77 e 71% das ondas incidentes no Ponto Central e Sul, respetivamente, têm Hrms inferior a 1.5 m. Os valores máximos de Hrms alcançados em cada um dos Pontos Norte, Central e Sul são 3.8, 4.1 e 5.1 m, respetivamente (Quadro 2.4).

A análise comparativa das três séries temporais de Dir para o período de estudo (Figura 2.21) evidencia, tal como esperado, que a praia de Matosinhos se encontra exposta a uma elevada variação da direção das ondas incidentes: do Ponto Norte para o Ponto Sul diminui o abrigo às ondas provenientes dos sectores direcionais mais rodados a norte. Os histogramas de frequência de

#### ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

ocorrência das ondas incidentes por classes direcionais de intervalo 10° (Figura 2.22) mostram que os limites inferior e superior das classes extremas abrangidas assim como o centro de gravidade de cada histograma se deslocam para norte com o afastamento do quebra-mar sul do Porto de Leixões, ou seja, do Ponto Norte para o Ponto Sul. Observa-se que as classes com maior frequência de ocorrência nos Pontos Norte, Central e Sul, com 34, 40 e 24%, são [250-260[, [260-270[ e [270-280[ e que, nestes mesmos Pontos, 49, 63 e 58% das incidências provêm das classes [240-260[, [260-280[ e [250-290[.



Figura 2.19 – Série temporal de Hrms, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)

Quadro 2.4 – Estatística de Hrms (em metros) nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)

Parâmetro	Ponto Norte	Ponto Central	Ponto Sul
Média	0.441	0.662	0.801
Mediana	0.321	0.514	0.651
Desvio Padrão	0.404	0.584	0.660
Máximo	3.770	4.077	5.111



Figura 2.20 – Histograma de Hrms, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)



Figura 2.21 – Série temporal de Dir, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 2.22 – Histograma de Dir, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)



Figura 2.23 – Série temporal de Tz, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)

As séries temporais do parâmetro Tz são iguais nos três Pontos, Norte, Central e Sul (Figura 2.23). Tal como os parâmetros Hrms e Dir, a variação temporal de Tz evidencia a sazonalidade da agitação marítima, já descrita noutros estudos realizados a norte e sul do presente trecho da costa oeste portuguesa (Oliveira e Freire, 2011; Oliveira *et al.*, 2016). Os histogramas de classes de Tz com intervalos de 1 s (Figura 2.24) mostram que a classe com maior frequência de ocorrência é a classe

[7-8[ e que a maioria das ondas incidentes, 87%, tem Tz entre 5 e 11 s. O valor máximo de Tz verificado foi 16.2 s.

As séries temporais do NM são iguais para os três Pontos Norte, Central e Sul (Figura 2.25). O NM varia entre os valores 0.53 e 3.57 m ZHL.



Figura 2.24 – Histograma de Tz, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)



Figura 2.25 – Série temporal de NM, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016)

# 2.6.3 Geomorfologia

Compararam-se os perfis de praia extraídos dos três transectos, normais ao alinhamento médio da linha de costa, considerado 321.19°N, ou seja, transectos com orientação 231.19°N, dos MDTs elaborados a partir dos levantamentos topo-hidrográficos de 2008, 2012 e 2016 (Figura 2.18). Da comparação dos Perfis Norte, Central e Sul para cada levantamento (Figura 2.26) salienta-se:

- Todos os perfis apresentam irregularidades na parte mais profunda que deverão ser causadas pela presença de afloramentos rochosos. Estas irregularidades são evidenciadas desde a elevação (z) aproximada -8 m ZHL no Perfil Sul e -10 m ZHL nos Perfis Central e Norte.
- Em junho/2008 os perfis Norte, Central e Sul eram bastante semelhantes entre a elevação 2 e -5 m ZHL, notando-se no entanto um rebaixamento do Perfil Central à elevação -1 m ZHL, denunciando uma eventual pequena concavidade da morfologia na zona central da praia. Na zona abaixo da elevação -5 m ZHL o Perfil Norte evidencia ser o mais elevado enquanto o Perfil Central o mais rebaixado dos três abaixo da elevação -8 m ZHL.
- Em maio/2012 os perfis Norte, Central e Sul eram bastante semelhantes entre a elevação 2 e -1 m ZHL. O Perfil Central apresentava um declive relativamente uniforme até à elevação -8 m ZHL enquanto os perfis Norte e Sul evidenciavam uma pequena plataforma à elevação -1m ZHL, abaixo da qual, o declive, sendo também uniforme até à zona rochosa, era ligeiramente superior no caso do Perfil Sul.
- Em março/2016 apenas é possível comparar os três perfis abaixo do ZHL. Foi neste levantamento que os perfis se mostraram mais distintos entre si, eventualmente por ser o final do inverno marítimo, período mais energético que poderá causar maiores gradientes morfológicos, quer longitudinalmente quer transversalmente, na praia de Matosinhos. O Perfil Norte é o mais rebaixado dos três perfis até à elevação -4 m ZHL e o único que apresenta declive uniforme até à zona dos afloramentos. O Perfil Sul apresenta uma plataforma com cerca de 60 m à elevação -1 m ZHL e é o mais elevado dos três. O Perfil Central apresenta uma ligeira barra submersa cuja crista atinge uma profundidade intermédia entre as profundidades dos perfis Norte e Sul à mesma distância do ZHL.



Figura 2.26 - Perfis Norte, Central e Sul da praia de Matosinhos em 2008(a), 2012(b) e 2016(c)

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

A comparação de cada um dos Perfis Norte, Central e Sul entre levantamentos mostra a seguinte evolução (Figura 2.27):

- A geometria dos Perfis Norte é bastante semelhante nos três levantamentos. As pequenas diferenças existentes localizam-se acima da elevação -3 m ZHL e provavelmente são devidas ao mês do levantamento, que em 2008, ano em que o Perfil Norte se encontrava mais elevado, tem correspondência com o maior período de recuperação da praia pós-inverno marítimo. O Perfil Norte é o mais estável dos três perfis na zona submersa.
- O Perfil Central apresenta uma geometria bastante semelhante em 2008 e 2016 na parte submersa (não é possível averiguar sobre a semelhança acima do ZHL uma vez que não existem dados topográficos no levantamento de 2016). Em 2012 o perfil apresentava-se rebaixado entre a elevação -1 e -5 m ZHL, sendo este rebaixamento máximo, cerca de 1.5 m, a cerca de 120 m do ZHL.
- O Perfil Sul apresenta uma geometria bastante semelhante entre a elevação -8 e 2 m ZHL nos levantamentos de 2008 e 2012. Em 2016 este perfil encontrava-se significativamente mais elevado do que nos outros dois levantamentos (alcançando ganhos verticais máximos de aproximadamente 1.5 m) ao longo de uma extensão submersa de cerca de 300 m, correspondente à elevação entre -6.5 e 0 m ZHL.

As isolinhas de ZHL extraídas dos MDTs elaborados a partir dos levantamentos topo-hidrográficos de 2008, 2012 e 2016 foram comparadas num referencial (sistema de coordenadas no plano cartesiano) local, criado para a modelação numérica da evolução da linha de costa. Este referencial local tem origem (0; 0) no ponto de coordenadas (-46207.2; 167096.8) do sistema de projeção Datum 73 e o seu eixo-x (designado por *baseline* no modelo de evolução da linha de costa) faz um ângulo de 321.19° no sentido horário com o Norte Geográfico. Em síntese, os resultados da evolução da isolinha de ZHL (como descrito com mais detalhe na secção 3.4) indicam (Figura 2.28):

- no setor da praia a norte do ponto que dista 900 m da origem da baseline: uma tendência de recuo entre 2008 e 2012 seguida de uma tendência de avanço entre 2012 e 2016.
- no setor central da praia localizado entre os pontos que distam 700 e 900 m da origem da baseline: uma tendência para estabilidade entre 2008-2012-2016.
- no setor sul da praia localizado entre os pontos que distam 180 e 700 m da origem da baseline: tendência para avanço, recuo e avanço em três trechos consecutivos de sul para norte entre 2008 e 2012; seguida de tendência de recuo, avanço e estabilidade nos mesmos três trechos consecutivos entre 2012 e 2016.



Figura 2.27 - Perfis Norte (a), Central (b) e Sul (c) da praia de Matosinhos em 2008, 2012 e 2016

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 2.28 – Isolinhas de ZHL na praia de Matosinhos em 2008, 2012 e 2016

Também se extraíram as isolinhas de NMM dos MDTs elaborados a partir dos levantamentos topohidrográficos de 2008 e 2012, uma vez que esta isolinha não foi abrangida no levantamento topohidrográfico de 2016. Em síntese, os resultados da evolução da isolinha de NMM entre os levantamentos de 2012 e 2016 (como descrito com mais detalhe na secção 3.4) indicam (Figura 2.29):

- no setor da praia a norte do ponto que dista 860 m da origem da baseline: um recuo de cerca de 20 m.
- no setor central da praia localizado entre os pontos que distam 560 e 860 m da origem da baseline: um recuo de cerca de 10 m.
- no setor sul da praia localizado entre os pontos que distam 320 e 560 m da origem da baseline: uma tendência geral de estabilidade com um foco pontual de recuo de cerca 10 m aproximadamente a 400 m da origem da baseline.
- no extremo da praia a sul do ponto que dista cerca de 320 m da origem da baseline: uma tendência de acreção.

Com base na caracterização granulométrica de amostras superficiais da praia de Matosinhos, seis amostras da parte emersa da praia, designadas por Mi (i=1,...,6), recolhidas em 6/janeiro/2017, e duas amostras da parte submersa da praia (as únicas diferentes de rocha), designadas por 8 e 13, recolhidas em fevereiro/2017, descrita detalhadamente na secção 3.4, definiu-se a distribuição da granulometria dos sedimentos da praia na direção normal ao alinhamento médio da linha de costa (a mesma da *baseline*), ou seja, ao longo dos Perfis Norte, Central e Sul, com uma resolução espacial de 1 m. Consideraram-se os parâmetros associados à distribuição granulométrica na direção normal

à praia que constam no Quadro 2.5, tendo sido os parâmetros diâmetro mediano, D50, e dispersão geométrica,  $\sqrt{D84/D16}$ , calculados como sendo a média dos valores das amostras disponíveis (acima mencionadas).



Figura 2.29 - Isolinhas de NMM na praia de Matosinhos em 2008, 2012 e 2016

Parâmetro dos sedimentos	Abaixo ZHL	Acima ZHL
Diâmetro mediano (D50) [mm]	0.22	0.25
Velocidade de queda [m.s <sup>-1</sup> ]	0.02677	0.03141
Dispersão geométrica $\sqrt{D84/D16}$ [-]	1.45	1.27
Densidade [-]	2.65	2.65

Quadro 2.5 – Parâmetros associados à caracterização granulométrica da praia de Matosinhos

# 2.6.4 Transporte sedimentar longitudinal potencial

Tendo como objetivo a parametrização da zona ativa da praia para posterior calibração e validação do modelo de evolução da linha de costa, aplicou-se o modelo Litdrift (DHI, 2016) para determinação da série temporal de transporte sedimentar longitudinal potencial (6 em 6 horas, consentânea com a periodicidade das séries dos dados forçadores de hidrodinâmica) ao longo do perfil de praia (normal à linha de costa e simultaneamente à *baseline*) no período de estudo (11/junho/2008 a 21/março/2016).

Uma vez que o levantamento topo-hidrográfico mais recente, de 2016, não inclui o topo de praia, optou-se por avaliar a distribuição transversal do transporte longitudinal no Perfil Central de 2012, por ser o mais recente que inclui toda a zona ativa da praia e pelo facto de ser o mais representativo da

praia de Matosinhos, dada a sua localização e geometria (Figura 2.26 e Figura 2.27). Usou-se um espaçamento  $\Delta y=1$  m na resolução dos processos costeiros, incluindo o transporte sedimentar longitudinal.

Avaliou-se o transporte longitudinal potencial durante o período de estudo induzido pelas três séries de agitação marítima e nível do mar, calculadas nos Pontos Norte, Central e Sul, cuja localização se identificou no Quadro 2.3 e Figura 2.18. Com este procedimento, que permite parametrizar a zona ativa da praia para implementar o modelo de evolução da linha de costa, assume-se que o transporte sedimentar induzido pelas condições de hidrodinâmica que estão a atuar se encontra em equilíbrio com a morfologia da zona ativa da praia, o que é equivalente a assumir que o volume de areia transportado é ilimitado. Assim, ocorrerá erosão da linha de costa quando o volume de areia que aceda a esse perfil for inferior ao transporte sedimentar longitudinal potencial desse mesmo perfil. Em oposição, ocorrerá acreção da linha de costa quando o volume de areia que aceda a esse perfil for inferior ao transporte sedimentar longitudinal potencial desse mesmo perfil for superior ao transporte sedimentar potencial que nele se verifica.

Seguidamente apresentam-se três tipos de resultados que permitem compreender as tendências de transporte sedimentar de cada um dos três sectores da praia durante o período de estudo antes de se modelar a interação entre eles e a influência das estruturas laterais que condicionam não só o volume de sedimentos que entra na zona ativa da praia como também os processos que governam a dinâmica na mesma zona:

i) a evolução do transporte sedimentar potencial normalizado e acumulado quando o perfil é forçado por cada um dos climas de agitação (climas Ponto Norte, Ponto Central e Ponto Sul) no seu ponto inicial (Figura 2.30, Figura 2.32 e Figura 2.34, respetivamente);

ii) a distribuição transversal das componentes do transporte longitudinal potencial (em ambos os sentidos e, consequentemente, também o transporte resultante e total). Note-se que na convenção aplicada o transporte longitudinal é positivo quando se dirige para a direita de um observador em terra, logo neste estudo, quando se dirige para NO (Figura 2.31, Figura 2.33 e Figura 2.35); e

iii) a discretização do transporte longitudinal potencial por sectores de Dir de amplitude 10° e classes de Hrms de intervalo 1 m de onda incidente (Figura 2.36).

Da análise dos resultados obtidos para os aproximadamente 8 anos do período de estudo extraem-se as seguintes principais conclusões:

- o sector norte da praia está predominantemente submetido a condições de hidrodinâmica que favorecem o transporte para NO, sendo o transporte sedimentar potencial acumulado neste sentido cerca de 1252x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>, aproximadamente 80% do transporte sedimentar longitudinal potencial total, para o qual tiveram elevada contribuição os invernos marítimos out/2009 março/2010 e dez/2013 março/2014 (Figura 2.30). Neste sector a extensão da zona ativa máxima foi cerca de 350 m (Figura 2.31).
- no setor central predomina o transporte sedimentar longitudinal potencial para SE, cerca de 88% do transporte sedimentar longitudinal potencial total, 4565x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>. À semelhança do setor norte, foi particularmente relevante a contribuição dos invernos marítimos out/2009 -

março/2010 e dez/2013 – março/2014 para o transporte sedimentar longitudinal potencial (Figura 2.32). A extensão da zona ativa máxima é superior à do setor norte, sendo a profundidade limite correspondente (definida como sendo a profundidade à qual ocorre 99% do transporte total acumulado no perfil) aproximadamente 6.5 m ZHL (Figura 2.33).

- no setor sul, durante os aproximadamente 8 anos do período de estudo, o transporte resultante acumulado para SE (Figura 2.34) foi cerca de 14% do transporte total. Note-se que em geral, com exceção da estação de 2011-2012, o inverno marítimo causa um elevado transporte sedimentar potencial neste setor da praia (Figura 2.34). É este setor que apresenta um balanço de transporte sedimentar longitudinal mais equilibrado entre os dois sentidos, NO e SE (Figura 2.35), sendo também o setor onde o transporte sedimentar potencial total é o mais elevado dos três setores da praia, cerca de 10193x10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>. Consentaneamente, também é neste setor que se verificam as ondas incidentes com Hrms mais elevada e que a extensão da zona ativa é maior.
- o aumento do transporte sedimentar longitudinal potencial total que se verifica de norte para sul (especificamente nos setores norte, central e sul na praia de Matosinhos) deve-se à diminuição do abrigo proporcionado pelo Porto de Leixões relativamente à direção das ondas que incidem de NO e ao aumento das ondas com Hrms superior a 3.5 m, em particular no setor sul (Figura 2.36).



Figura 2.30 – Transporte sedimentar longitudinal potencial acumulado e normalizado induzido pelo clima de agitação no Ponto Norte entre 2008-2016



Figura 2.31 – Distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal potencial induzido pelo clima de agitação no Ponto Norte entre 2008-2016



Figura 2.32 – Transporte sedimentar longitudinal potencial acumulado e normalizado induzido pelo clima de agitação no Ponto Central entre 2008-2016



Figura 2.33 – Distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal potencial induzido pelo clima de agitação no Ponto Central entre 2008-2016



Figura 2.34 – Transporte sedimentar longitudinal potencial acumulado e normalizado induzido pelo clima de agitação no Ponto Sul entre 2008-2016



Figura 2.35 – Distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal potencial induzido pelo clima de agitação no Ponto Sul entre 2008-2016

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 2.36 – Transporte sedimentar longitudinal potencial no Perfil Central (normal à linha de costa assinalada), discretizado por sectores de Dir de amplitude 10° e classes de Hrms de intervalo 1 m de onda incidente, induzido pelos climas de agitação marítima nos Pontos Norte (a), Central (b) e Sul (c), em frente à praia de Matosinhos, durante o período de estudo (2008-2016)

# 3 | Caracterização da dinâmica sedimentar atual com base na análise de dados

# 3.1 Análise dos volumes dragados no porto

A análise dos dados sobre dragagens no porto entre 1993 e 2016 (Figura 3.1) mostra que os anos em que houve maior volume de dragagem foram 1994 (878 mil m<sup>3</sup>), 2003 (622 mil m<sup>3</sup>) e 2014 (604 mil m<sup>3</sup>). No período entre 2004 e 2012 os volumes dragados não ultrapassaram os 200 mil m<sup>3</sup>. A componente de material dragado no Posto A TPL (ver localização na Figura 1.1) é geralmente a que mais contribui para o volume total, com exceção dos anos 2000 e 2003 em que a zona interior (aqui considerada como a soma dos volumes das docas 1, 2 e 4) contribuiu, respetivamente, com 41 e 47% do material dragado.



Figura 3.1 – Evolução do volume anual de material dragado no Porto de Leixões

No Quadro 3.1 apresenta-se o volume anual de material dragado durante o período em que estão disponíveis levantamentos hidrográficos (entre 2007 e 2016) que possibilitaram a análise da evolução dos fundos. Em todos os anos a fração do volume dragado anualmente no Posto A TPL é superior a 59% do volume total, e em média é de 84%. Quando somada ao volume dragado na zona montante é sempre superior a 92%. É exceção o ano de 2008 em que o volume dragado no anteporto correspondeu a 14% do volume total. É de referir que os volumes analisados corresponderam a dragagens de estabelecimento e de manutenção.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

Ano	Posto A TPL	Posto B-C	Anteporto	TCN	Zona montante	Total
2007	108672	0	0	450	74209	183331
2008	106303	0	37711	0	15115	159129
2009	188588	88	0	0	1117	189793
2010	127753	596	0	38	36485	164872
2011	125685	829	0	0	10038	136552
2012	69811	0	6977	0	12183	88971
2013	249151	0	0	0	23936	273087
2014	529334	0	0	0	74980	604314
2015	105524	0	0	0	0	105524
2016	166295	0	0	0	48348	214643

Quadro 3.1 – Volumes anuais do material dragado no Porto de Leixões entre 2007 e 2016 (m<sup>3</sup>). Os locais estão assinalados na Figura 1.1

#### 3.2 Comparação de levantamentos e taxas de assoreamento

#### 3.2.1 Zona interior do porto

No Quadro 3.2 apresentam-se os resultados da comparação dos levantamentos hidrográficos da zona interior do porto, considerando no cálculo da taxa média de evolução o volume total de material dragado no período entre as datas dos levantamentos. Verifica-se que em todos os períodos a taxa média de evolução é no sentido do assoreamento com valores da ordem de 0.20-0.30 m/ano, com exceção do período entre 2010 e 2011 em que a taxa é superior, cerca de 1 m/ano. Este valor poderá estar relacionado com movimentação de material de fundo durante a construção do Terminal de Cruzeiros (ver localização na Figura 1.1) que terminou em 2011.

Os valores de evolução dos fundos para a zona montante do porto, corrigidos com o volume de material dragado, são apresentados no Quadro 3.3. Entre 2008 e 2010 a taxa de assoreamento desta zona é mais elevada do que considerando a área total do porto, respetivamente, 0.42 e 0.31 m/ano. Entre 2010 e 2015 a tendência de evolução do fundo nesta zona é no sentido do aprofundamento, com taxas médias entre 0.06 e 0.61 m/ano.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

Quadro 3.2 – Valores médios de evolução dos fundos na zona interior do porto. Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação. A negrito apresentam-se os valores residuais

Datas	Volume médio (m³)	Volume total dragado (m <sup>3</sup> )	Taxa média de evolução (m/ano)
	-79 739		
2007/08	231 709		
	151 970	173 516	0.31
	-92 684		
2008/09	111 056		
	18 372	126 300	0.19
	-110 030		
2009/10	160 674		
	50 645	181 863	0.17
	-99 616		
2010/11	468 601		
	368 984	158 887	0.98
	179 841		
2011/14	113 010		
	-66 831	1 048 460	0.27
	-177 247		
2014/15	47 915		
	-129 331	323 160	0.23
	-59 146		
2015/16	74 650		
	15 503	320 167	0.23

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

Quadro 3.3 – Valores médios de evolução dos fundos na zona montante do porto. Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação. A negrito apresentam-se os valores residuais

Datas	Volume médio (m³)	Volume total dragado (m³)	Taxa média de evolução (m/ano)
	-11 749		
2007/08	70 012		
	58 263	25 767	0.30
	-26 873		
2008/09	103 234		
	76 362	5 649	0.42
	-27 052		
2009/10	103 711		
	76 659	35 242	0.31
	-88 217		
2010/11	30 403		
	-57 814	1 243	-0.40
	-173 078		
2011/14	15 702		
	-157 376	98 054	-0.06
	-174 998		
2014/15	18 157		
	-156 841	23 083	-0.61
	-15 806		
2015/16	47 971		
	32 165	48 348	0.21

Apresenta-se na Figura 3.2 a variação espacial da taxa de sedimentação na zona do porto obtida através da comparação dos levantamentos. Embora estes resultados não tenham em conta os volumes das dragagens, a distribuição espacial das tendências evolutivas pode dar indicações quanto à proveniência do material que é acumulado no interior do porto:

- Em alguns períodos (2009-2010, 2014-2015 e 2015-2016) os valores de taxa de assoreamento na zona montante do Porto, onde desagua o rio Leça, são superiores aos observados imediatamente a jusante e na generalidade da zona interior do porto, o que sugere sedimentação associada a afluências fluviais.
- Nos períodos 2010-2011 e 2011-2014 é evidente maior assoreamento no canal de entrada do porto, sugerindo a sedimentação de material oceânico. Nos períodos 2014-2015 e 2015-2016 é clara a sedimentação ao longo do quebra-mar norte, na sua parte interior.
- No período 2010-2011 a distribuição espacial dos valores de taxa de assoreamento mostra duas zonas preferenciais de acumulação de material, designadamente entre o Posto C e o TCN e na zona adjacente ao Terminal de Cruzeiros (ver localização na Figura 1.1). Estas manchas poderão estar associadas aos trabalhos de construção do Terminal de Cruzeiros que, como já referido, terminaram em 2011.



Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 3.2 – Variação da taxa média anual de evolução dos fundos na zona interior do porto. Estes valores não consideram as dragagens efetuadas. Fonte da imagem: ESRI Basemap

# 3.2.2 Praia de Matosinhos

Os resultados das comparações dos levantamentos topo-hidrográficos da praia de Matosinhos e zona adjacente encontram-se no Quadro 3.4, Figura 3.3 e Figura 3.4. Verifica-se que nos dois períodos

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

analisados a tendência evolutiva é distinta. Entre 2008 e 2012, a evolução faz-se no sentido de acumulação com taxa média de 6 700 m<sup>3</sup>/ano, que ocorrerá particularmente no setor central da praia. De referir que neste período houve rejeição de material dragado que, segundo informação disponibilizada pela APDL, ocorre em frente ao terco sul da praia (até 4 m abaixo do ZHL), a norte do Castelo do Queijo. O volume total de rejeição nesse período é de 87 518 m<sup>3</sup>, o que terá certamente influência na taxa de evolução obtida. Entre 2012 e 2016, os resultados da comparação dos levantamentos apontam para uma tendência erosiva com taxa média de 32 700 m<sup>3</sup>/ano, onde a erosão parece localizada no setor central estendendo-se para Sul. Regista-se que neste período ocorreu pelo menos a descarga de 26 633 m<sup>3</sup> de material (em 2013). Em 2016 houve uma descarga mas desconhece-se se a data foi anterior ao levantamento utilizado nas comparações. A estimativa de evolução para a totalidade do período analisado é de uma taxa erosiva de 12 600 m<sup>3</sup>/ano.

A análise da evolução da praia incluindo parte da área subaérea (até 5.0 m acima do ZHL), entre 2008 e 2012, mostra uma tendência acumulativa com taxa média anual superior em 18 700 m<sup>3</sup>/ano à obtida para a zona inferior da praia (entre aproximadamente o ZHL e 10.5 m abaixo) (Quadro 3.4). A distribuição espacial da variação da cota média (Figura 3.4) aponta para o trecho norte da praia subaérea como zona preferencial de acumulação no período analisado.

Área de comparação	Datas	Volume (m <sup>3</sup> )	Variação média de cota (m)	Taxa média anual (m <sup>3</sup> /ano)
		-219 265		
	2008/12	245 984		
		26 719	0.02	6 791
_		-363 639		
Zona inferior	2012/16	238 207		
		-125 433	-0.10	-32 698
		-347 197		
	2008/16	249 339		
		-97 858	-0.08	-12 611
Zona inferior e		-227 586		
parte da praia	2008/12	304 664		
subaérea		77 078	0.06	25 412

Quadro 3.4 – Resultados da comparação dos levantamentos topo-hidrográficos da Praia de Matosinhos e zona adjacente, para as áreas de comparação descritas em 3.2.1. Valores negativos correspondem a erosão e positivos a acumulação



Figura 3.3 – Resultados da comparação de levantamentos na zona inferior da praia de Matosinhos. Valores positivos de variação de cota (m) correspondem a acumulação e negativos a erosão. Fonte da imagem: ESRI Basemap

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar





## 3.3 Sedimentos

#### 3.3.1 Interior do porto e área adjacente

Na Figura 3.5 apresenta-se a distribuição da percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a 63 µm) nos sedimentos superficiais no interior do porto e zona adjacente recolhidos no âmbito deste trabalho, em 23 de fevereiro de 2017. No interior do porto os sedimentos são vasas ricas em matéria orgânica, compostas essencialmente por partículas silto-argilosas. Na zona adjacente ao porto, em frente à praia de Matosinhos, o teor da fração grosseira é dominante nos sedimentos correspondendo a areias não se encontrando partículas com dimensão superior a 2 mm. Na entrada do porto (amostra #30 - Figura I. 1) o sedimento pode ser classificado como uma vasa arenosa, segundo Freire (2002a), em que a fração grosseira é 30% da amostra total.

Os sedimentos arenosos de fundo apresentam um diâmetro mediano ( $D_{50}$ ) constante, da ordem de 0.20 mm, o que corresponde à classe dimensional de areias de grão fino (Quadro 3.5 e Figura 3.6). O coeficiente de graduação mostra que as areias na embocadura do porto (amostra #7) apresentam uma maior mistura de frações granulométricas (Figura 3.7), o que está de acordo com a importância da fração fina nesta amostra (da ordem de 70%).

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 3.5 – Percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a 63 μm) nas amostras recolhidas em 23 de fevereiro de 2017. Estão assinaladas as zonas onde foi encontrada rocha. Fonte da imagem: ESRI Basemap



Figura 3.6 – Diâmetro mediano (D<sub>50</sub> em mm) dos sedimentos de fundo recolhidos no interior do porto e zona adjacente (23 de fevereiro de 2017). Fonte da imagem: ESRI Basemap

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 3.7 – Coeficiente de graduação dos sedimentos de fundo recolhidos no interior do porto e zona adjacente (23 de fevereiro de 2017). Fonte da imagem: ESRI Basemap

Quadro 3.5 – Parâmetros granulométricos das areias dos sedimentos de fundo e das praias de Matosinhos e de
Leça

		coordenada	s (Datum 73)		perc	entis		Coef. Grad.
	Amostras	Х	Y	P50	P16	P84	P90	
	7	-48078.429	167453.517	0.150	0.080	0.240	0.287	1.732
	8	-47262.456	167485.638	0.221	0.163	0.309	0.335	1.377
amostras de	10	-47762.917	167165.362	0.202	0.144	0.278	0.317	1.389
Turido	11	-48013.727	167095.913	0.218	0.158	0.315	0.354	1.412
	13	-47242.261	166964.552	0.211	0.139	0.321	0.351	1.520
	M1	-46919.866	167712.664	0.264	0.204	0.338	0.364	1.287
	M2	-46992.505	167673.912	0.255	0.201	0.321	0.344	1.264
praia de Matosinhos	М3	-47086.331	167604.288	0.231	0.184	0.286	0.303	1.244
	M4	-46904.092	167353.201	0.256	0.202	0.318	0.338	1.253
	M5	-46808.347	167377.191	0.192	0.163	0.226	0.237	1.180
	M6	-46746.853	167395.397	0.291	0.213	0.418	0.472	1.400
	L1	-48164.226	168891.006	0.640	0.449	0.826	0.881	1.356
praia de	L2	-48110.030	168902.239	0.401	0.295	0.550	0.604	1.366
Leça	L3	-47982.604	168914.889	0.475	0.350	0.635	0.690	1.347
	L4	-48066.963	169147.932	0.461	0.342	0.612	0.663	1.338

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

		diâmetro médio da classe em mm (% de material passado)				
	Amostras	0.075	0.195	0.400	0.750	
	7	66.5	93.0	96.0	99.5	
	8	26.0	87.5	98.0	100.0	
amostras de fundo	10	40.0	91.5	98.5	100.0	
lando	11	29.0	85.5	95.5	100.0	
	13	36.5	84.0	94.5	100.0	
	M1	6.5	75.5	94.5	100.0	
	M2	5.0	81.0	97.0	100.0	
praia de	М3	12.0	89.5	100.0	100.0	
Matosinhos	M4	6.0	81.0	97.5	100.0	
	M5	33.0	99.0	100.0	100.0	
	M6	5.0	61.0	81.5	99.5	
	L1	0.0	3.5	10.5	100.0	
praia do Loca	L2	1.0	23.0	48.5	100.0	
praia de Leça	L3	0.5	9.5	28.5	100.0	
	L4	0.5	11.5	33.0	100.0	

#### Quadro 3.6 – Classes dimensionais da fração arenosa dos sedimentos de fundo e das praias de Matosinhos e de Leça

A distribuição sedimentar atual apresenta diferenças significativas quando comparada com os resultados de campanhas anteriores, respetivamente de dezembro de 2016 (Figura 3.8), dezembro de 2015 (Figura 3.9) e agosto de 2005 (Figura 3.10). Verifica-se que nas campanhas anteriores o sedimento no interior do porto e embocadura apresentava uma componente grosseira mais importante: em 2016, superior a 50%, e em 2015 e 2005 acima de 70%. Convém referir que em fevereiro de 2017 os sedimentos analisados foram recolhidos com uma draga, correspondendo à camada superficial do fundo, enquanto nas campanhas anteriores foram usadas outras técnicas de amostragem, designadamente em profundidade, o que poderá justificar, pelo menos em parte, as diferenças observadas.

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 3.8 – Percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a 63 µm) nas amostras recolhidas em 6 de dezembro de 2016. Fonte da imagem: ESRI Basemap



Figura 3.9 – Percentagem da fração grosseira (partículas com dimensão superior a 63 µm) nas amostras recolhidas em 18 de dezembro de 2015. Fonte da imagem: ESRI Basemap

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar





#### 3.3.2 Praia de Matosinhos

Os sedimentos recolhidos na zona subaérea das praias de Leça e Matosinhos, em 6 de janeiro de 2017, são areias lavadas na sua maioria de grão médio. O diâmetro mediano ( $D_{50}$ ) varia entre 0.19-0.29 mm na praia de Matosinhos, sendo ligeiramente mais grosseiro que na zona submersa (Figura 3.6). Na praia de Leça as areias são mais grosseiras, com  $D_{50}$  entre 0.46-0.64 mm (Quadro 3.5 e Figura 3.11). As areias da praia de Matosinhos, com exceção de uma amostra, apresentam uma distribuição granulométrica melhor selecionada do que as da praia de Leça e as recolhidas na zona submersa (Figura 3.12).

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 3.11 – Diâmetro mediano (D<sub>50</sub> em mm) dos sedimentos das praias de Leça e de Matosinhos (amostragem 6 de janeiro de 2017). Fonte da imagem: ESRI Basemap



Figura 3.12 – Coeficiente de graduação dos sedimentos das praias de Leça e de Matosinhos (amostragem 6 de janeiro de 2017). Fonte da imagem: ESRI Basemap

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

# 3.4 Evolução da praia de Matosinhos

Considerando como referência a linha correspondente ao NMM, a evolução da praia de Matosinhos entre 2008 e 2012 é caracterizada por recuo em praticamente toda a sua extensão, com taxa de evolução máxima de 7.3 m/ano no seu terço norte, e progradação localizada no setor mais a Sul, com taxa máxima de 6.0 m/ano. (Figura 3.13). A taxa média de evolução considerando toda a extensão da praia é de -2.6 m/ano.

Embora apresentando uma variabilidade espacial maior, a tendência evolutiva da linha correspondente ao ZHL no mesmo período é idêntica (Figura 3.14). A evolução desta linha mostra um recuo mais evidente no terço norte, com taxa máxima de 9.8 m/ano, e progradação localizada a Sul com taxa máxima de 15 m/ano. Considerando toda a extensão da praia, a taxa média de evolução é de -0.6 m/ano.

No período 2012-2016 (Figura 3.15) há uma alteração significativa da tendência evolutiva da linha do ZHL, com o maior recuo localizado a Sul e progradação clara nos terços Norte e Central da praia que apresentam também algumas zonas de recuo mas menos acentuado (e.g. no extremo Norte junto ao quebra-mar). As taxas máximas de progradação e de recuo são, respetivamente, de 11.0 m/ano e de 22.8 m/ano. A taxa média de evolução considerando toda a extensão da praia é de 1.1 m/ano.

Considerando o período entre 2008 e 2016, a evolução da linha do ZHL mostra que há persistência dos maiores valores de recuo no extremo Sul da praia (taxa máxima de 9.1 m/ano) e recuo menos acentuado no extremo Norte (entre 2 e 4 m/ano), junto ao quebra-mar (Figura 3.16). Neste período, a taxa máxima de progradação é de 3 m/ano e a taxa média de evolução considerando toda a extensão da praia é de 0.3 m/ano.

Em termos globais pode-se concluir que entre 2008 e 2012 há rotação da forma plana da praia no sentido dextrogiro, havendo concordância entre a tendência evolutiva das linhas relativas ao NMM e ZHL. Entre 2012 e 2016, e não havendo informação quando à evolução da zona superior do perfil de praia, pode-se apenas concluir que a tendência evolutiva foi alterada no sentido de maior recuo localizado no extremo sul e progradação nos outros setores.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 3.13 – Taxa de evolução (m/ano) da linha de nível médio do mar entre 2008 e 2012 (valores negativos correspondem a recuo e positivos a progradação da linha de costa). Fonte da imagem: ESRI Basemap



Figura 3.14 – Taxa de evolução (m/ano) da linha do Zero Hidrográfico de Leixões entre 2008 e 2012 (valores negativos correspondem a recuo e positivos a progradação da linha de costa). Fonte da imagem: ESRI Basemap

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 3.15 – Taxa de evolução (m/ano) da linha do Zero Hidrográfico de Leixões entre 2012 e 2016 (valores negativos correspondem a recuo e positivos a progradação da linha de costa). Fonte da imagem: ESRI Basemap



Figura 3.16 – Taxa de evolução (m/ano) da linha do Zero Hidrográfico de Leixões entre 2008 e 2016 (valores negativos correspondem a recuo e positivos a progradação da linha de costa). Fonte da imagem: ESRI Basemap
## 4 | Análise comparativa da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões

## 4.1 Hidrodinâmica

A hidrodinâmica foi analisada com base nas simulações do modelo SCHISM-WWM, efetuadas para janeiro de 1991.

A análise dos níveis extremos observados durante a simulação (Figura 4.1) mostra ocorrer na praia de Leça um *setup* da ordem de meio metro devido à agitação marítima. Também na face externa do quebra-mar norte se observa um *setup* da mesma ordem de grandeza, embora numa faixa mais estreita. O mesmo não acontece na praia de Matosinhos, provavelmente por ser menos encaixada do que a de Leça e por ter fundos menos inclinados (logo uma zona de rebentação mais extensa e menores tensões de radiação). No interior do porto também não se observa nenhum *setup* significativo devido às condições de abrigo. Estes resultados não se alteram significativamente com a implementação da Solução 1.



Figura 4.1 – Níveis máximos atingidos durante a simulação (Janeiro de 1991): situação atual (esquerda) e Solução 1 (direita)

As velocidades residuais durante o período em análise são globalmente de sul para norte (Figura 4.2). As linhas de corrente são fortemente influenciadas pela presença dos quebra-mares de Leixões, que as obrigam a desviar para sul antes de prosseguirem para norte. Com o prolongamento do quebra-mar norte, este desvio aumenta e a intensidade das correntes residuais diminui. Na praia de Leça observam-se fortes vórtices, resultado dos agueiros simulados pelo modelo.

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 4.2 – Correntes residuais durante a simulação (janeiro de 1991): a) situação atual; b) Solução 1. As velocidades estão interpoladas numa malha com uma resolução de 100 m para maior clareza

A Figura 4.3 e a Figura 4.4 ilustram as condições hidrodinâmicas para a configuração atual e para a Solução 1, respetivamente, no instante em que as condições de agitação ao largo são mais severas.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

A altura de onda significativa ao largo é de cerca de 7 m. A melhoria das condições de abrigo no porto e na praia de Matosinhos são significativas (Figura 4.3b e Figura 4.4b).



Figura 4.3 – Exemplo de condições hidrodinâmicas na situação atual: a) níveis; b) alturas de onda significativa; c) correntes. As velocidades estão interpoladas numa malha com uma resolução de 100 m para maior clareza

Ao longo da simulação forma-se frequentemente uma corrente de deriva litoral de sul para norte ao longo da praia de Matosinhos, com velocidades da ordem de 20-30 cm/s. Durante a enchente, essa corrente é capturada pelo porto, podendo por isso transportar sedimentos para o interior do porto. Esta situação está ilustrada na Figura 4.3c e na Figura 4.4c. Esta captura é superior para a Solução 1 do que para a situação atual, uma vez que a extensão adicional do quebra-mar dificulta a deflexão da corrente em direção ao oceano. No entanto, não se pode inferir que haverá uma maior entrada de

sedimentos no porto para a Solução 1. Com efeito, apesar de a corrente litoral ser mais defletida para o interior do porto para a nova configuração, as melhores condições de abrigo também tenderão a reduzir a concentração de sedimentos em suspensão. Durante a vazante, e para ambas as configurações, a corrente é defletida pelo jato de vazante proveniente do porto.



Figura 4.4 – Exemplo de condições hidrodinâmicas para a Solução 1: a) níveis; b) alturas de onda significativa; c) correntes. As velocidades estão interpoladas numa malha com uma resolução de 100 m para maior clareza

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

## 4.2 Sedimentos provenientes do rio Leça

A dinâmica dos sedimentos provenientes do rio Leça foi analisada com base nos resultados do modelo VELApart. Conforme descrito na secção 2.5, foram simuladas as trajetórias de cerca de 150 mil partículas de sedimento desde o limite de montante do modelo, onde desagua o rio Leça, até à sua deposição no fundo ou até saírem do porto. Assim, uma parte destas partículas deposita-se no fundo, e outra parte sai da bacia portuária e é arrastada para o largo pelas correntes.

Os resultados (Quadro 4.1) indicam que atualmente uma fração significativa dos sedimentos provenientes do rio Leça se depositam no interior do porto, o que é consistente com a análise dos dados (secção 3.2.1). Esta deposição, que aumenta com a velocidade de queda das partículas sedimentares, ocorre sobretudo na zona de montante do porto e junto às margens (Figura 4.5). Com o prolongamento do quebra-mar norte, tenderá a haver um aumento da percentagem de sedimentos depositados, em particular no que se refere aos sedimentos mais finos (i.e., com menor velocidade de queda). Os resultados sugerem ainda que as taxas de sedimentação poderão baixar na zona da bacia de rotação. A interpretação para este comportamento é que o aumento da deposição a montante deixará uma menor percentagem de sedimentos disponíveis para sedimentar na bacia de rotação.

	Ws = 0.05 mm/s	Ws = 0.1 mm/s	Total
Situação atual	43	66	55
Solução 1	80	90	85

Quadro 4.1 - Percentagem de partículas que se mantém no porto para diferentes velocidades de queda (Ws)



Figura 4.5 - Densidade de partículas depositadas: situação atual (esquerda) e Solução 1 (direita)

Salienta-se que esta análise é em larga medida qualitativa, uma vez que os processos de transporte estão reproduzidos de forma simplificada. Por exemplo, espera-se que a capacidade de exportação

dos sedimentos para o exterior do porto aumente significativamente com o caudal fluvial, que aqui foi mantido constante. Com efeito, a maiores caudais fluviais corresponderão velocidades mais elevadas na zona montante do porto, e logo um maior transporte para a zona costeira. No entanto, o assoreamento não será necessariamente menor para maiores caudais fluviais, dado que as afluências de sedimentos ao porto tenderão também a ser superiores para maiores caudais. Assim, uma análise quantitativa do assoreamento do Porto de Leixões por sedimentos de origem fluvial exigirá dados detalhados sobre as afluências líquidas e sólidas ao porto através da rede hidrográfica.

## 4.3 Trânsito sedimentar e assoreamento

A dinâmica dos sedimentos não coesivos no Porto de Leixões e na sua envolvente durante o mês de janeiro de 1991 foi simulada para a configuração atual e para a Solução 1, conforme descrito na secção 2.4. Os resultados são analisados em termos da acreção e do assoreamento no final das simulações, e dos caudais sólidos residuais (Figura 4.6 e Figura 4.7). Como descrito no Anexo II, considerou-se uma distribuição espacialmente uniforme de sedimentos. Isto significa que o modelo tende a sobrestimar o transporte sedimentar em zonas em que os sedimentos são mais grosseiros (Praia de Leça), e a subestimar esse transporte nas zonas em que os sedimentos são mais finos (praia de Matosinhos e Porto de Leixões). Note-se que os caudais sólidos são particularmente sensíveis ao diâmetro dos sedimentos (Pinto et al., 2006).

A maior dinâmica sedimentar é observada na praia de Leça. Aqui observa-se o comportamento típico de uma praia sob a ação de uma tempestade, com erosão do topo da praia e o transporte destes sedimentos para maiores profundidades. Esta praia é particularmente dinâmica por estar muito exposta. No entanto, e como referido, a dinâmica sedimentar nesta praia estará provavelmente empolada.

Na praia de Matosinhos ocorre também uma movimentação significativa de areias, embora menor do que na praia de Leça. Esta diferença tem várias explicações: 1) a praia de Matosinhos está mais protegida do que a de Leça; 2) a batimetria usada na praia de Matosinhos foi medida no fim do inverno (março de 2016) estando por isso provavelmente próxima de um perfil típico de inverno; 3) o modelo tende a sobrestimar o transporte sedimentar na praia de Leça e a subestimá-lo na praia de Matosinhos.

Os caudais sólidos residuais na praia de Matosinhos são dirigidos para norte, provocando uma acumulação de sedimentos perto do quebra-mar sul. De acordo com o modelo, existe uma extensa zona, incluindo todo o interior do porto e uma zona protegida pelo quebra-mar norte, em que as condições hidrodinâmicas não são suficientes para mobilizar os sedimentos considerados (i.e., com diâmetros superiores ou iguais a 0.1 mm – ver Quadro 2.2). Este resultado é consistente com os dados sedimentológicos mais recentes, que apontam para uma quase ausência de areias nos sedimentos superficiais do porto (Figura 3.5). Assim, os sedimentos não tenderão em geral a penetrar no interior do porto, embora se admita que alguns sedimentos mais finos possam ser transportados em suspensão e depositar-se no anteporto. Observam-se algumas zonas de assoreamento no interior do porto, nomeadamente junto às margens, mas com pouca expressão. Junto à cabeça do molhe

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinamica sedimentar



norte, os caudais sólidos residuais são dirigidos para o exterior do porto. Este comportamento contribui para que o trânsito litoral não seja capturado pelo porto, reduzindo assim o assoreamento.

Figura 4.6 – Simulação da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões para a situação atual: a) evolução morfológica; b) caudais sólidos residuais

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 4.7 – Simulação da dinâmica sedimentar no Porto de Leixões para a Solução 1: a) evolução morfológica; b) caudais sólidos residuais

Com o prolongamento do molhe norte, observam-se algumas alterações nos padrões de dinâmica sedimentar (Figura 4.7). A zona em que as condições hidrodinâmicas não permitem a mobilização

dos sedimentos à entrada do porto estende-se centenas de metros para sul e, sobretudo, para este. O anteporto fica assim mais protegido e a extensão da zona sujeita a assoreamento diminui.

Na praia de Matosinhos o padrão de erosão e assoreamento torna-se mais estruturado, com uma maior erosão da zona sul da praia e uma deposição na zona norte. Este comportamento decorre provavelmente do maior grau de proteção do topo norte da praia, que dificulta o transporte de norte para sul. Em resultado deste padrão, tenderá a acumular-se mais areia junto ao molhe sul. Na simulação efetuada, com a duração de 1 mês, a zona de acumulação é ligeiramente menos extensa para a Solução 1 do que na situação atual. Esta menor extensão sugere que a quantidade de sedimentos que porventura contornará o molhe sul para se depositar no porto é menor. No entanto, o assoreamento progressivo da zona norte da praia de Matosinhos com a Solução 1 poderá, a longo prazo, causar a transposição de sedimentos à volta da cabeça do molhe sul, em particular se a zona sul da praia de Matosinhos for sendo alimentada artificialmente para compensar a erosão. Este aspeto será analisado com mais pormenor no capítulo 5 |.

No interior do porto mantêm-se pequenos assoreamentos junto às margens. Ocorre uma erosão mais significativa junto ao antigo quebra-mar. No entanto, aparenta tratar-se de um pequeno reajustamento associado ao desmantelamento de cerca de 50 m desta estrutura, que foi considerado na Solução 1.

Em contraste com o comportamento revelado pela análise dos dados, o modelo não evidencia um assoreamento significativo no interior do porto, e em particular no Posto A TPL. Este contraste sugere que o assoreamento que se verifica no Posto A TPL se deve a um mecanismo não considerado no modelo, concretamente no atravessamento do quebra-mar norte pelos sedimentos (Figura 2.1).

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

# 5 | Dinâmica da praia de Matosinhos

## 5.1 Efeito da Solução 1 na agitação marítima em frente à praia

Aplicou-se a metodologia descrita na secção 2.6.2 considerando o prolongamento do quebra-mar norte correspondente à Solução 1 (Figura 1.2). O objetivo foi determinar o efeito da Solução 1 nas séries temporais dos parâmetros estatísticos de agitação marítima altura de onda média quadrática (Hrms) e direção média (Dir), correspondentes ao período de estudo considerado no âmbito da modelação da dinâmica da praia (11/junho/2008 - 21/março/2016), nas mesmas três posições em frente à praia de Matosinhos (Pontos Norte, Central e Sul). Relativamente à determinação das séries temporais dos parâmetros Tz e NM nestes três pontos, remetem-se os resultados para a secção 2.6.2, uma vez que são iguais aos obtidos para a situação atual.

Na Figura 5.1 apresentam-se os histogramas de frequência de ocorrência de Hrms por classes de intervalo 0.5 m para os Pontos Norte, Central e Sul. Os resultados indicam que mais do que 80% das ondas incidentes no Ponto Norte têm Hrms inferior a 0.5 m e que esta classe de valores é a predominante nos três pontos em frente à praia, com cerca de 77 e 63% de frequência de ocorrência nos Pontos Central e Sul, respetivamente. Para a classe de Hrms seguinte, [0.5-1.0[, a frequência de ocorrência nos pontos, Norte, Central e Sul é semelhante, 14, 13 e 14%, respetivamente. Para todas as classes de Hrms ≥ 1.0 m a tendência inverte-se e a frequência de ocorrência aumenta do Ponto Norte para o Ponto Sul. Note-se contudo, que a frequência de ocorrência destas classes é apenas cerca de 4, 11 e 23% do total das ondas incidentes nos Ponto Norte Central e Sul, respetivamente, e que os valores máximos de Hrms alcançados em cada um dos Pontos Norte, Central e Sul são semelhantes aos da situação atual.

Na Figura 5.2 apresentam-se os histogramas de frequência de ocorrência das ondas incidentes por classes direcionais de intervalo 10°. Os resultados indicam que a praia de Matosinhos se encontra exposta a uma elevada variação da direção das ondas incidentes e que, como esperado, do Ponto Norte para o Ponto Sul diminui o abrigo às ondas provenientes dos sectores direcionais mais rodados a norte.

Apreciada a distribuição dos parâmetros Hrms e Dir ao longo da praia para a Solução 1, analisa-se seguidamente o impacte desta solução em ambos os parâmetros, através da comparação dos histogramas obtidos para a Solução 1 a situação atual, em cada um dos Pontos Norte, Central e Sul (Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5, respetivamente):

 Conclui-se que a Solução 1 faz aumentar o efeito de abrigo da agitação marítima incidente na praia de Matosinhos relativamente à situação atual, uma vez que causa um aumento da frequência de ocorrência das ondas com Hrms inferior a 0.5 m nos Pontos Norte, Central e Sul e um decréscimo da frequência de ocorrência das restantes classes de Hrms nos Pontos Norte e Central. No Ponto Sul este decréscimo verifica-se apenas para ondas incidentes com  $0.5 \leq$  Hrms < 2.0 m, pois para ondas com Hrms  $\geq$  2.0 m, que correspondem a cerca de 7% do total, a frequência de ocorrência das respetivas classes é semelhante ou ligeiramente superior no caso da Solução 1.

Conclui-se que a Solução 1 tem um impacte relevante na direção das ondas incidentes em frente à praia, uma vez que se verifica um deslocamento do centro de gravidade do histograma do parâmetro Dir no sentido das classes de onda incidente mais rodadas a sul nos Pontos Norte, Central e Sul. Este impacte deve-se a dois fatores: i) a Solução 1 confere um maior efeito de abrigo das ondas mais rodadas a norte, em particular nos Pontos Norte e Central; e ii) a Solução 1 confere uma maior exposição da praia aos rumos incidentes mais rodados a Sul, sendo este efeito, que é mais notável nos Pontos Central e Sul, devido ao processo de difração causado pelo prolongamento do quebra-mar norte.



Figura 5.1 – Histograma de Hrms, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016), com a Solução 1



Figura 5.2 – Histograma de Dir, nos Pontos Norte, Central e Sul, em frente à praia de Matosinhos, para o período de estudo (2008-2016), com a Solução 1

a) 100 **Ponto Norte** Solução 1 90 Situação atual 80 Frequência ocorrência [%] 70 60 50 40 30 20 10 0 0-0.5 1-1.52-2.5 3-3.5 0.5 - 11.5 - 22.5-3 3.5-4 Hrms [m] b) 100 **Ponto Norte** Solução 1 90 Situação atual Frequência ocorrência [%] 80 70 60 50 40 30 20 10 0 190-200 140-150 200-210 250-260 260-270 270-280 280-290 180-190 210-220 220-230 230-240 240-250 130-140 150-160 160-170 170-180 300-310 120-130 290-300 Dir [°]

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

Figura 5.3 – Histogramas de a) Hrms e b) Dir, no Ponto Norte, para o período de estudo (2008-2016), para a situação atual e a Solução 1

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 5.4 – Histogramas de a) Hrms e b) Dir, no Ponto Central, para o período de estudo (2008-2016), para a situação atual e a Solução 1

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar





## 5.2 Efeito da Solução 1 na evolução da linha de costa

Aplicou-se o modelo numérico LITLINE (DHI, 2016) descrito no Anexo III para calcular a evolução da linha de costa da praia de Matosinhos tendo em consideração o efeito do prolongamento do quebra-mar norte correspondente à Solução 1.

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 5.6 – Resultados numéricos da evolução da isolinha do ZHL da praia de Matosinhos, para o período 2008-2016, para a Solução 1

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura 5.7 – Posições extremas (máximos e mínimos) da isolinha numérica do ZHL da praia de Matosinhos, para o período 2008-2016, para a situação atual e a Solução 1

Considerou-se exatamente o mesmo modelo conceptual descrito no Anexo III com exceção da condição de fronteira marítima (lado mar), que agora inclui o efeito da Solução 1 sobre o regime de agitação marítima correspondente ao período de estudo considerado no âmbito da modelação da dinâmica da praia (11/junho/2008 - 21/março/2016), ou seja, os resultados da secção 5.1.

Na Figura 5.6 apresentam-se resultados instantâneos e sistemáticos da isolinha do ZHL da praia de Matosinhos para ilustrar a evolução da forma plana da praia sob efeito da Solução 1 no período de estudo (aproximadamente 8 anos). Na Figura 5.7 apresentam-se as posições extremas (máximos e mínimos valores de y) alcançadas pela isolinha do ZHL em cada ponto ao longo da *baseline* (que tem uma resolução  $\Delta x=5$  m) no total do período de estudo. Os resultados indicam o seguinte:

- A Solução 1 causa a rotação da forma plana da praia no sentido anti-horário em torno do setor central da praia. Este fenómeno resulta da transferência de volume sedimentar do setor sul para o setor norte da praia ao longo do perfil ativo e tem como consequência a variação da largura da praia emersa na direção longitudinal: ocorre um aumento no sector norte, com valor máximo no extremo norte da praia; e ocorre uma diminuição no sector sul, com valor mínimo no extremo sul da praia. Este fenómeno deve-se ao facto da Solução 1 ter maior efeito de abrigo relativamente às ondas incidentes mais rodadas a norte em frente à praia, em particular nos Pontos Norte e Central, e conferir uma maior exposição da praia aos rumos incidentes mais rodados a sul, em particular nos Pontos Central e Sul, conforme se conclui da análise do efeito da Solução 1 na agitação marítima em frente à praia (secção 5.1).
- A Solução 1 causa um aumento da amplitude da variação da isolinha do ZHL ao longo da praia de Matosinhos, o qual é maior nos extremos da praia, em particular no extremo norte. Note-se que estes resultados estarão influenciados (majorados) pelo facto da isolinha do ZHL inicial da simulação (observada em 2008) ter uma configuração divergente da tendência da forma plana da praia conferida pela Solução 1. Contudo, constata-se que no final da simulação ainda se verificam variações significativas da isolinha do ZHL ao longo da praia, como é o caso da isolinha do ZHL nas datas 1/julh/2014 e 1/jan/2016.

Destas conclusões baseadas nos resultados da modelação numérica, salientam-se duas consequências relevantes: i) a Solução 1 promove a fuga de sedimentos para o canal de acesso ao porto no extremo norte da praia de Matosinhos, uma vez que a zona ativa da praia adjacente ao quebra-mar sul progride em direção ao mar; e ii) a Solução 1 promove o aumento da vulnerabilidade à erosão e galgamento do setor sul da praia em condições extremas de tempestade marítima, uma vez que é o setor onde se verifica o maior recuo da zona ativa da praia e simultaneamente o muro que limita a praia se encontra mais avançado em direção ao mar. Contudo, a existência de afloramentos rochosos em frente e na zona ativa da praia de Matosinhos, nomeadamente, imediatamente abaixo da profundidade ativa (D<sub>act</sub>) no caso do Perfil Norte e na face de praia no extremo sul, poderão atenuar os dois efeitos apontados.

6 | Conclusões

## 6.1 Situação atual

## 6.1.1 Porto de Leixões

#### 6.1.1.1 Sedimentos

A análise dos sedimentos superficiais de fundo no interior do porto e zona adjacente recolhidos no âmbito deste trabalho (em fevereiro 2017) mostra que:

- a distribuição sedimentar no interior do porto apresenta diferenças significativas quando comparada com os resultados de campanhas anteriores, o que poderá estar relacionado com diferentes métodos de amostragem;
- no interior do porto os sedimentos são vasas ricas em matéria orgânica, compostas essencialmente por partículas silto-argilosas sendo a percentagem de fração grosseira inferior a 5%. É exceção a entrada do porto, em que os sedimentos apresentam uma fração grosseira correspondente a 30% da amostra total;
- à entrada do porto, em frente à praia de Matosinhos, o teor da fração grosseira é dominante nos sedimentos, não se encontrando no entanto partículas com dimensão superior a 2 mm. As areias apresentam um diâmetro mediano entre 0.15 e 0.22 mm.

## 6.1.1.2 Volumes dragados no porto

Entre 2007 e 2016, o volume de dragagem mais elevado corresponde ao ano 2014 (604 mil m<sup>3</sup>). A componente de material dragado no Posto A TPL é geralmente a que mais contribui para o volume total, sendo a fração do volume dragado anualmente nessa zona superior a 59% do volume total dragado. Em média, essa fração é de 84%. Em média, são dragados anualmente no Porto de Leixões cerca de 200 mil m<sup>3</sup> de sedimentos.

#### 6.1.1.3 Comparação de levantamentos e taxas de assoreamento no porto

A taxa média de evolução dos fundos na zona interior do porto entre 2007 e 2016 foi no sentido do assoreamento com taxas da ordem de 0.2-0.3 m/ano, com exceção do período entre 2010 e 2011 em que o valor foi superior (cerca de 1 m/ano), o que poderá estar relacionado com os trabalhos de construção do Terminal de Cruzeiros.

A zona a montante da bacia de rotação, onde desagua o rio Leça, apresenta uma taxa de assoreamento superior à generalidade do porto (da ordem de 0.4 m/ano no período analisado), o que sugere sedimentação associada a afluências fluviais. No entanto entre 2010 e 2015 a tendência de evolução do fundo desta zona foi no sentido do aprofundamento, com taxas médias entre 0.06 e 0.61 m/ano.

Em alguns períodos analisados é evidente um maior assoreamento no canal de entrada do porto, sugerindo a sedimentação de material com origem na zona costeira exterior.

## 6.1.1.4 Sedimentos provenientes do Rio Leça

Simulações numéricas mostram que, para caudais médios, os sedimentos provenientes do rio Leça tendem em larga medida a depositar-se na zona de montante do porto. As percentagens de sedimentos que se estima depositarem são particularmente elevadas para os sedimentos mais grosseiros, com maiores velocidades de queda.

## 6.1.2 Praia de Matosinhos

## 6.1.2.1 Sedimentos

Os sedimentos de fundo superficiais no interior do porto e zona adjacente recolhidos no âmbito deste trabalho (em fevereiro 2017) mostram que em frente à praia de Matosinhos o teor da fração grosseira é dominante, não se encontrando no entanto partículas com dimensão superior a 2 mm. As areias apresentam um diâmetro mediano entre 0.15 e 0.22 mm.

Os sedimentos recolhidos na zona subaérea das praias de Leça e Matosinhos (em janeiro de 2017) mostram que:

- as praias são constituídas por areias lavadas de grão médio;
- o diâmetro mediano das areias varia entre 0.19-0.29 mm na praia de Matosinhos, sendo as areias mais grosseiras na praia de Leça (0.46-0.64 mm).

# 6.1.2.2 Comparação de levantamentos e taxas de evolução na Praia de Matosinhos

A evolução da praia de Matosinhos é distinta nos dois períodos analisados:

- entre 2008 e 2012 a evolução faz-se no sentido de acumulação com taxa média de 6 700 m<sup>3</sup>/ano. A análise da evolução da praia neste período, incluindo parte da área subaérea (até à cota de 5.0 m ZHL), mostra uma tendência idêntica com taxa média anual superior em 18 700 m<sup>3</sup>/ano à obtida para a zona inferior.
- entre 2012 e 2016, observa-se tendência erosiva com taxa média de 32 700 m<sup>3</sup>/ano, em que a erosão parece localizada no setor central estendendo-se para Sul.

Na totalidade do período analisado a evolução faz-se no sentido da erosão com taxa média de 12 600 m<sup>3</sup>/ano. Refira-se que no período de análise houve rejeição de material dragado em frente ao terço sul da praia (até cotas de -4 m ZHL), a norte do Castelo do Queijo, que terá certamente influenciado a evolução da praia e a taxa associada. Refira-se também que a APDL procede anualmente à modelação do areal, tendo em conta que na extremidade norte da praia (junto do quebra-mar sul do porto) há uma acumulação crónica de areia, formando-se uma rampa que tende a transpor o molhe e a "projetar" sedimentos para o interior do porto por transporte eólico. Assim, para

melhoria das condições balneares e para evitar que essas areias sejam canalizadas para o interior da área portuária, é feita a modelação do areal antes do início da época balnear.

## 6.1.2.3 Evolução da forma plana da praia de Matosinhos

Entre 2008 e 2012, a evolução da praia de Matosinhos é caracterizada por uma rotação da forma plana da praia no sentido dextrogiro, havendo concordância entre a tendência evolutiva das linhas relativas ao NMM e ZHL. O valor de máximo recuo no terço norte é de 7.3 m/ano, tendo como linha de referência o NMM, e de 9.8 m/ano para a linha do ZHL. A taxa de progradação máxima a Sul varia entre 6.0 m/ano (NMM) e 15 m/ano (ZHL). A taxa média de evolução de toda a extensão da praia para a linha ZHL é de -0.6 m/ano.

Entre 2012 e 2016 deu-se uma alteração significativa da tendência evolutiva da linha do ZHL, com o maior recuo localizado a Sul (máximo 22.8 m/ano) e progradação nos terços Norte e Central (máximo de 11.0 m/ano). A taxa média de evolução para toda a extensão da praia foi de 1.1 m/ano.

# 6.2 Impactes das intervenções no Porto de Leixões e na praia de Matosinhos

## 6.2.1 Sedimentos provenientes do rio Leça

Parte dos sedimentos provenientes do rio Leça deposita-se no Porto de Leixões. A percentagem de sedimentos depositada depende da granulometria dos sedimentos afluentes: quanto maior é o diâmetro do sedimento, logo a sua velocidade de queda, mais rapidamente este se deposita, e menor é a percentagem transportada para o exterior do porto. Assim, os sedimentos mais grosseiros deverão depositar-se na sua quase totalidade, pelo que não serão afetados pelas intervenções em análise. Pelo contrário, uma percentagem dos sedimentos mais finos é transportada para o exterior do porto, não contribuindo assim para o assoreamento.

As intervenções em análise irão conduzir a condições hidrodinâmicas mais calmas, mais favoráveis à deposição destas frações finas. Assim, a percentagem de sedimentos finos provenientes do rio Leça que se deposita no porto de Leixões irá aumentar. As simulações efetuadas, embora qualitativas e limitadas pela ausência de informação sobre a distribuição granulométrica dos sedimentos afluentes, indicam que o aumento será significativo (entre 30 e 90% para o caudal médio e as velocidades de queda ensaiadas). Em condições de caudal médio, o aumento da sedimentação concentrar-se-á na zona de montante do porto.

## 6.2.2 Sedimentos provenientes da zona costeira

O prolongamento do quebra-mar norte segundo a configuração da Solução 1 altera as condições de agitação marítima incidentes em frente à praia. A solução aumenta o efeito de abrigo relativamente à energia das ondas incidentes na quase totalidade da praia. Para além disso, a solução tem um efeito importante relativamente à direção das ondas em frente à praia: confere um maior efeito de abrigo

das ondas incidentes mais rodadas a norte, em particular nos sectores norte e central da praia, e confere uma maior exposição relativa da praia aos rumos incidentes mais rodados a sul, em particular nos sectores central e sul da praia.

Estas alterações nas condições de agitação marítima têm consequências nas correntes geradas pelas ondas. Em situações típicas de inverno (representadas por janeiro de 1991) forma-se uma corrente litoral de sul para norte na praia de Matosinhos. Durante a enchente, esta corrente é parcialmente capturada pelo porto, o que poderá transportar sedimentos da zona costeira para o interior do porto. O prolongamento do quebra-mar norte vai potenciar esta captura, ao dificultar a saída da corrente de retorno para o mar.

Para a configuração batimétrica atual, as condições de abrigo potenciadas pelos quebra-mares não permitem a mobilização da maioria dos sedimentos disponíveis em frente à praia de Matosinhos e o seu transporte para o interior do porto. Mesmo para as condições energéticas simuladas, com alturas de onda significativas ao largo a atingir 7 m, as condições no interior do porto não permitem mobilizar os sedimentos mais finos considerados (diâmetro de 0.1 mm). Assim, é expectável que apenas areias muito finas e siltes possam ser transportadas para o interior do porto. Este resultado é consistente com as amostras de sedimentos recolhidos no início de 2017, cuja percentagem de areia é geralmente inferior a 5%. Nestas condições, espera-se que o aumento da captura da deriva litoral pelo porto, revelada nas simulações hidrodinâmicas, não tenha consequências significativas em termos de assoreamento a breve prazo.

No entanto, as alterações nas condições hidrodinâmicas em frente à praia associadas ao prolongamento do quebra-mar vão causar a rotação da forma plana da praia no sentido anti-horário em torno do setor central da praia, com a consequente acumulação de areia junto ao quebra-mar sul e erosão da zona sul da praia. No extremo norte da praia de Matosinhos, a progressiva acumulação de areia poderá promover a fuga de sedimentos para o canal de acesso ao porto. Simultaneamente, a erosão no extremo sul da praia irá favorecer o galgamento do setor sul da praia em condições extremas de tempestade marítima. Contudo, a existência de afloramentos rochosos na zona submersa e na face de praia no extremo sul poderá atenuar estes dois impactes da solução proposta.

Relativamente a possíveis alterações do tipo de perfil na praia de Matosinhos resultantes do prolongamento do quebra-mar, que não foram objeto específico de análise, não se espera que ocorram alterações relevantes. Com efeito, a comparação de perfis passados (de 2008, 2012 e 2016), normais ao atual alinhamento médio da linha de costa, dos setores Norte, Central e Sul da praia, evidenciou grandes semelhanças quer ao longo da praia em cada levantamento, quer no mesmo setor entre diferentes levantamentos.

Finalmente, nota-se que não foram analisados especificamente os fluxos de sedimentos que atravessam o quebra-mar norte, uma vez que se considerou que estes fluxos não serão afetados pelo prolongamento desta estrutura. Estima-se que os fluxos de sedimentos através do quebra-mar norte constituam uma fonte significativa de sedimentação. Esta interpretação é consistente com a comparação dos levantamentos hidrográficos de 2015 e 2016, que mostra um assoreamento significativo junto à parte interior do quebra-mar norte. É também consistente com o facto, indicado

pela APDL, de o esforço de dragagem no posto A-TPL se concentrar na vizinhança do quebra-mar norte: caso se tratasse de areias provenientes de este, da praia de Matosinhos, as dragagens no canal de acesso teriam mais expressão junto ao quebra-mar sul.

## 6.2.3 Alterações ao esforço de dragagem

O esforço de dragagem no Porto de Leixões é atualmente de cerca de 200 mil m<sup>3</sup>/ano, correspondendo mais de 80% desse valor a dragagens no posto A-TPL. Admite-se que as dragagens no posto A-TPL correspondem fundamentalmente a areias que atravessam o quebra-mar norte, pelo que não deverão ser afetadas pelas intervenções previstas. Estima-se que o volume restante, cerca de 40 mil m<sup>3</sup>/ano, provenha essencialmente do rio Leça. Relativamente a estes sedimentos, espera-se um aumento de sedimentação da ordem de 10 a 100%, i.e., 4 a 40 mil m<sup>3</sup>/ano.

De acordo com informações prestadas pela APDL, esta instituição já tem atualmente por prática retirar areia da zona norte da praia de Matosinhos e colocá-la na zona sul da mesma praia. Admitindo que se manterá esta prática (que terá de ser intensificada, como se viu acima), não se espera passe a ocorrer no porto uma sedimentação de areias provenientes da praia de Matosinhos.

Eventuais efeitos das intervenções no afluxo de sedimentos ao porto contornando o quebra-mar norte deverão ser no sentido de uma redução. No entanto, a análise efetuada não evidenciou a sedimentação do porto por areias que contornam o quebra-mar norte, pelo que quaisquer efeitos das intervenções nestes fluxos não deverão ser muito significativos.

Lisboa, LNEC, abril de 2017

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Luís Portela

A Diretora do Departamento de Hidráulica e Ambiente

Shin F

Helena Alegre

Ander Forter nat

AUTORIA

André Fortunato Investigador Principal com Habilitação

Paula Freire Investigadora Auxiliar

Filipa Simi de Bitote d'Ori

Filipa S. B. F. Oliveira Investigadora Auxiliar

Aberto

Alberto Azevedo Bolseiro de Pós-doutoramento

Referências bibliográficas

- ALMEIDA, S.; RUSU, L.; GUEDES SOARES, C., 2016 Data assimilation with the ensemble Kalman filter in a high-resolution wave forecasting model for coastal areas. Journal of Operational Oceanography, 9/2: 103-114.
- BERTIN, X.; FORTUNATO, A.B.; DODET, G., 2015 Processes controlling the seasonal cycle of wave-dominated inlets. Revista de Gestão Costeira Integrada, 15: 9 19.
- CAMPOS, R.M.; GUEDES SOARES, C., 2017 Assessment of three wind reanalyses in the North Atlantic Ocean. Journal of Operational Oceanography, 10/1: 30-44, DOI: 10.1080/1755876X.2016.1253328
- DHI, 2016 Litpack. Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves. User Guide. Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- DIMOU, K., 1992 3-D Hybrid Eulerian-Lagrangian/ Particle Tracking Model for Simulating Mass Transport in Coastal Water Bodies. Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- DODET, G.; BERTIN, X.; TABORDA, R., 2010 Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. Ocean Modelling, 31/3-4: 120-131.
- FORTES, C.J.E.M., 1993 Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Lisboa, Portugal.
- FORTUNATO, A.B.; LI, K.; BERTIN, X.; RODRIGUES, M.; MIGUEZ, B.M., 2016 Determination of extreme sea levels along the Iberian Atlantic Coast. Ocean Engineering, 111: 471-482.
- FORTUNATO A.B.; OLIVEIRA A.; ROGEIRO J.; TAVARES DA COSTA R.; GOMES J.L.; LI K.; JESUS G.; FREIRE P.; RILO A.; MENDES A.; RODRIGUES M.; AZEVEDO A., 2017 – Operational forecast framework applied to extreme sea levels at regional and local scales. Journal of Operational Oceanography, 10/1: 1-15, DOI: 10.1080/1755876X.2016.1255471
- FREIRE, P., 2002a Estação Experimental de Sedimentos Coesivos. Classificação de sedimentos baseada no teor da fracção silto-argilosa. Nota Técnica – NET/DH.
- FREIRE, P., 2002b Estação Experimental de Sedimentos Coesivos. Análise granulométrica de Sedimentos Arenosos por peneiração. Nota Técnica NET/DH.
- GUERIN, T.; BERTIN, X.; DODET, G., 2016a A numerical scheme for coastal morphodynamic modelling on unstructured grids. Ocean Modelling, 104: 45–53.
- GUERIN, T.; BERTIN, X.; CHAUMILLON, E., 2016b Wave control on the rhythmic development of a wide estuary mouth sandbank: a process-based modelling study. Marine Geology, 380: 79–89.

- HASSELMAN, S.; HASSELMAN, K.; BAUER, E.; EWING, J.A., 1988 The WAM Model A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. Journal of Physical Oceanography, 18, 1775-1810.
- INSTITUTO HIDRGRÁFICO, 2014 Tratamento de dados de agitação marítima. Leixões. Janeiro a março de 2014. Rel. PT OC 07/14.
- MOELLER, J.C., 1993 Comparison of Eulerian-Lagrangian, Random Walk, and Hybrid Methods of Modeling Pollution Transport. M. Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA.
- OLIVEIRA, A., 1997 Eulerian-Lagrangian Analysis of Transport and Residence Times in Estuaries and Coasts. Ph.D. Dissertation, Oregon Graduate Institute of Science and Technology.
- OLIVEIRA, J.N.C., 2016 Modelação do impacte do prolongamento do molhe norte da embocadura do rio Mondego nas praias adjacentes a sul. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil submetida no Instituto Superior Técnico, Lisboa, 84 p.
- OLIVEIRA, A.; BAPTISTA, A.M., 1997 Diagnostic Analysis of Estuarine Residence Times. Water Resources Research, 33/8: 1935-1946.
- OLIVEIRA, A.; BAPTISTA, A.M., 1998 On the Role of Tracking on Eulerian-Lagrangian Solutions of the Transport Equation. Advances in Water Resources, 21/7: 539-554.
- OLIVEIRA, A.; FORTUNATO, A.B., 2002 Velapart user's manual: a quasi-3D particle tracking model for shallow water simulations, Relatório LNEC, 37 pp.
- OLIVEIRA, F.S.B.F.; FREIRE, P.M.S., 2011 Coupling monitoring and mathematical modelling of beaches to analyse a problem of harbour sedimentation: case study. Journal of Coastal Research, Vol. 27, No. 6A, pp. 104-115.
- OLIVEIRA, J.N.C.; OLIVEIRA, F.S.B.F.; TEIXEIRA, A.T., 2016 Agitação marítima e potencial de transporte sedimentar longitudinal a sul da embocadura do rio Mondego. 4as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, IH, Lisboa, Portugal, pp 242-245.
- PINHEIRO, L.; FORTES, C.; NEVES, M.G., 2017 Estudos em modelo físico e numérico do prolongamento do quebra-mar exterior e das acessibilidades marítimas do Porto de Leixões. Estudo II – Avaliação dos impactes do prolongamento do quebra-mar exterior do Porto de Leixões nas condições de agitação da praia de Matosinhos. Relatório LNEC, em preparação.
- PINTO, L.; FORTUNATO, A.B.; FREIRE, P., 2006 Sensitivity analysis of non-cohesive sediment transport formulae. Continental Shelf Research, 26/15: 1826 1839.
- PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, W. T.; VETTERLING; FLANNERY, B.P., 1992 Numerical recipes in Fortran. Cambridge University Press, New York, 704-716.
- TEIXEIRA, S., 2009. Demarcação do leito e da margem das águas do mar no litoral sul do Algarve. ARH Algarve, Departamento de Recursos Hídricos do Litoral, 207p.
- THIELER, E.R., HIMMELSTOSS, E.A., ZICHICHI, J.L., ERGUL, A., 2009 Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2009, 2008-1278.

- TOLMAN, H.L., 2009 User manual and system documentation of WAVEWATCH III, version **3.14**. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 p.
- VAN RIJN, L.C., 1984 Sediment Transport Part 2: Suspended Load Transport. Journal of Hydraulic Engineering, 110/11: 1613-1641.
- VAN RIJN, L.C., 2007a Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. Journal of Hydraulic Engineering, 133/6: 649-667.
- VAN RIJN, L.C., 2007b Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Suspended transport. Journal of Hydraulic Engineering, 133/6: 668-689.
- VENÂNCIO, S.; PINHO, J.L., VIEIRA, J.M.; IGLESIAS, I., AVILEZ-VALENTE, P., 2017 –
  Simulação numérica dos níveis de cheia no estuário do Rio Douro. 7º Seminário
  APRH Núcleo Regional Norte Cheias e Inundações na Região Norte, 29-32.
- ZHANG, Y.J.; YE F.; STANEV, E.V.; GRASHORN, S., 2016 Seamless cross-scale modeling with SCHISM. Ocean Modelling, 102: 64-81.

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

Anexos

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

ANEXO I

Informação de base

# Informação de base

## Topo-hidrografia

Os dados de levantamentos hidrográficos usados para a análise da evolução dos fundos da zona interior do porto foram enviados pela ADPL e são os seguintes:

- Plano\_Hidrografico\_02\_2007\_08AGO, realizado em 30/11/2006, 02-04/01/2007, 13 e 26/07/2007;
- Plano\_Hidrografico\_07A\_2008\_05JUL, realizado em 30 e 31/01/2008, 24-31/07/2008;
- Plano\_Hidrografico\_09\_2009\_04ABR, realizado de 02/10/2008 a 20/04/2009;
- Plano\_Hidrografico\_11A\_2010\_09SET, realizado em 09/08/2010;
- Plano\_Hidrografico\_13\_2011\_10OUT, realizado em fevereiro 2011;
- Plano\_Hidrografico\_17\_2014\_08AGO, realizado de 07/07/2014 a 25/07/2014;
- Plano\_Hidrografico\_18\_2015\_06JUN, realizado em janeiro e maio de 2015;
- Plano\_Hidrografico\_20\_2016\_09SET, realizado em outubro de 2016.

A evolução da topo-hidrografia da praia de Matosinhos e zona costeira adjacente a sul foi analisada com base nos seguintes levantamentos enviados pela ADPL:

- EXT\_Sul\_Molhe\_Sul\_2008\_06\_11\_LHT\_GEO\_MILITAR, realizado em 11/06/2008;
- EXT\_Sul\_Molhe\_Sul\_2012\_05\_17\_LHT\_GEO\_MILITAR, realizado em 16 e 17/05/2012;
- 2016\_03\_21\_LHT\_Praia\_Matosinhos, realizado em 18 e 21/03/2016.

## Dragagens

Foram disponibilizados pela APDL dados sobre as dragagens efetuadas no porto, sob a forma de 4 quadros:

- *Registo dos Volumes Dragados no Porto de Leixões* com informação de 1993 a 2000, incluindo data, volumes, local de dragagem e de vazadouro;
- *Registo dos Volumes Dragados no Porto de Leixões* com informação de 2001 a 2016, incluindo data, volumes, local de dragagem e de vazadouro;
- Volumes Anuais de Areias Dragadas para Alimentação das Praias a Sul de Leixões com informação de 1993 a 2016, incluindo ano, volumes e locais de descarga;
- Volumes Anuais de Areias Dragadas para Alimentação das Praias a Sul de Viana do Castelo com informação referente a 2016, incluindo ano, volumes e locais de descarga.

## Sedimentos

Foram recolhidas amostras de sedimento superficial nas praias de Leça e Matosinhos no dia 6 de janeiro de 2017 por técnicos do LNEC (Figura I. 1). No interior do porto e zona costeira adjacente

foram recolhidas com uma draga amostras do fundo em 23 de fevereiro de 2017, pela empresa LHT -Levantamentos Hidrográficos e Topográficos Unipessoal Lda., estando assinalados na Figura I. 1 os locais de amostragem. Nos pontos #9, #12 e #14 não foi possível recolher amostra por o fundo ser de rocha.



Figura I. 1 – Locais de recolha de amostras de sedimentos. Amostragem nas praias em janeiro de 2017 (preto) e no porto e zona adjacente em fevereiro de 2017 (vermelho)

Foram, ainda, analisados os documentos enviados pela APDL sobre a caracterização de sedimentos na zona do porto:

- Recolha e caracterização de amostras de sedimentos no canal de acesso ao Porto de Leixões. Relatório de monitorização ambiental. ISQ. 18 janeiro 2017. Resultados de 5 cores verticais contínuos recolhidos no interior do porto, em frente à Doca1 Sul, em 6 de dezembro de 2016;
- Empreitada de dragagens de manutenção de fundos nos portos de Leixões. Análise de sedimentos. FEUP, janeiro 2016. Resultados de 20 amostras recolhidas no interior do porto em 18 de dezembro de 2015; no documento não é referida a metodologia de amostragem e as curvas granulométricas das areias não são disponibilizadas;
- Plano de monitorização ambiental do Porto de Leixões. Fase anterior ao início da construção.
  Qualidade da água e dos sedimentos. FEUP, outubro 2005. Resultados de 31 amostras recolhidas no interior do porto em 24 e 26 de agosto de 2005, com amostrador de sução e em alguns casos, não identificados, diretamente por mergulhador; as curvas granulométricas das areias e as coordenadas dos locais de amostragem não são disponibilizadas no documento.

Foram também enviados pela APDL dois ficheiros designados *Caracterização Granulométrica 1995-2004 LX.pdf* e *Caracterização Granulométrica 2009-2016 LX.pdf* com elementos sobre a "Caracterização Granulométrica das Areias Dragadas para Alimentação das praias a sul de Leixões".

Esta informação tem utilidade limitada uma vez que não são referidos os locais de amostragem, e também não se conhece o método usado.

Existem numerosos afloramentos rochosos ao longo da zona de estudo. Estes afloramentos são relevantes por dois motivos. Por um lado, afetam o atrito. Com efeito, o coeficiente de atrito numa zona rochosa é significativamente superior ao que ocorre sobre um fundo de areia. Por outro lado, em zonas rochosas o transporte sólido depende não apenas das condições hidrodinâmicas, mas também da disponibilidade de sedimento. Assim, determinaram-se as zonas de afloramentos rochosos utilizando três fontes de informação. Primeiro, digitalizou-se a informação disponível na carta hidrográfica 26402 do Instituto Hidrográfico. Em segundo lugar, analisaram-se os levantamentos hidrográficos de alta resolução fornecidos pela APDL. Considerou-se que as zonas com gradientes muito fortes e variados do fundo corresponderiam também a zonas de fundos rochosos. Finalmente, e quando possível, utilizaram-se imagens de satélite (Google Earth) para tirar dúvidas. Os resultados são apresentados no Anexo II.

## **Caudais fluviais**

Afluem ao domínio de estudo dois rios: o Douro e o Leça. Os caudais do Douro estão disponíveis em séries temporais de caudais junto à barragem de Crestuma, com o código 07G/01A e localizada a 41.074 °N e -8.488 °W, em www.shirh.pt. No caso do rio Leça, na ausência de séries temporais de caudais, considerou-se sempre um caudal constante e igual ao caudal médio anual: 3.4 m<sup>3</sup>/s (http://www.maretec.mohid.com/Estuarios/MenusEstuarios/Descrição/descricao\_Leca.htm).

## Níveis de maré

## Dados de campo

Para validar o modelo de circulação, foram utilizados dados de dois marégrafos: um localizado no Porto de Leixões e o outro no estuário do Douro (Quadro I. 1). Os dados do marégrafo de Leixões são disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico através do portal EMODNET (http://www.emodnet-physics.eu/Portal); os do marégrafo de Cais dos Banhos são disponibilizados pela Agência Portuguesa do Ambiente através do portal do SNIRH (http://snirh.pt).

Quadro I. 1 – Coordenadas	dos marégrafos utilizados	s no presente estudo
---------------------------	---------------------------	----------------------

Nome da estação	Código	Latitude	Longitude
Cais dos Banhos	07F/05H	41.139º N	-8.617º W
Porto de Leixões	LeixoesTG	41.1867º N	-8.7045º W

#### Modelo regional

Os níveis de maré na fronteira oceânica do modelo hidrodinâmico, necessários para impor as condições de fronteira do modelo, foram determinados com base no modelo regional de Fortunato et al. (2016). Esta aplicação utiliza o modelo SCHISM (Zhang et al., 2016), que será utilizado também para simular a hidrodinâmica na zona de estudo. Este modelo cobre a costa NE Atlântica Europeia, com uma resolução particularmente fina (cerca de 250 m) na costa Portuguesa (Figura I. 2). Este modelo foi amplamente validado com dados de vários marégrafos da costa Ibérica Atlântica e tem uma precisão da ordem de 5 cm na costa Portuguesa (Figura I. 3).



Figura I. 2 – Domínio e malha de cálculo do modelo regional de níveis. Fonte: Fortunato et al. (2016)

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura I. 3 – Validação do modelo regional de níveis: erros quadráticos médios nos marégrafos indicados na Figura I. 2. Fonte: Fortunato et al. (2016)

#### Agitação marítima

Os dados de agitação marítima foram inicialmente fornecidos ao LNEC pela APDL sob a forma de relatórios trimestrais do Instituto Hidrográfico (IH). Estes relatórios contêm os parâmetros médios da agitação marítima sob a forma de gráficos e de tabelas. Perante a dificuldade de digitalizar o grande volume de dados envolvido, optou-se por utilizar medições provenientes da mesma boia disponibilizadas em formato digital através do seu portal (http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php). Estas medições são disponibilizadas pelo IH em tempo quase real, com um tratamento padrão. No caso das direções médias, a discretização direcional é de 22.5°. Tem por isso uma resolução inferior aos dados, tratados, fornecidos pela APDL. As medições foram filtradas com um filtro de Butterworth por forma a reduzir o ruído e as variações de pequena escala. Os resultados dos dados tratados pelo LNEC diferem pouco daqueles fornecidos pela APDL pelo que se opta pela sua utilização. A título de exemplo, apresenta-se na Figura I. 4 uma comparação entre os dados tratados pelo LNEC para o mês de fevereiro de 2014.

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura I. 4 – Comparação de dados de agitação marítima da boia de Leixões em fevereiro de 2014: a) dados tratados pelo Instituto Hidrográfico (IH, 2014); b) dados tratados pelo LNEC
Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

ANEXO II

Descrição, implementação e calibração do modelo SCHISM

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

## Descrição, implementação e validação do modelo SCHISM

#### Descrição do modelo

O sistema de modelos SCHISM (Zhang et al., 2016) permite simular um vasto conjunto de processos em sistemas aquáticos (Figura II. 1). Trata-se de um modelo comunitário, baseado em malhas não estruturadas e totalmente paralelizado. Os módulos utilizados neste trabalho são os seguintes:

- Modelo de circulação (Zhang et al., 2016). O modelo de circulação resolve as equações de águas pouco profundas, em modo 2D (integrado na vertical) ou 3D. Simula assim os níveis e velocidades devidos à maré, vento, pressão atmosférica, caudal e agitação marítima.
- Modelo de agitação marítima (Roland et al., 2012). O modelo de agitação WWM é um modelo espectral que simula a geração e propagação da agitação marítima. Está acoplado ao modelo SCHISM, de forma a fornecer as tensões de radiação que afectam a circulação, e a receber deste os níveis e as velocidades que afectam a propagação da agitação marítima.
- Modelo de transporte de sedimentos (Guérin et al., 2016). O modelo de transporte de sedimentos e evolução dos fundos SED2D calcula os fluxos sedimentares devidos às ondas e às correntes, e a evolução dos fundos que deles resulta.



### SCHISM modeling system

Open-released Ready-to-be-released In-development Free-from-web

Figura II. 1 – Modelo SCHISM (fonte: http://ccrm.vims.edu/schismweb/)

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

#### Implementação e validação do modelo

#### Malha de cálculo

A malha de cálculo desenvolvida, com cerca de 60 000 nós, inclui uma zona costeira, aproximadamente centrada na embocadura do Douro e com um raio de 50 km, e o estuário do Douro até Crestuma (Figura II. 2). A implementação das soluções alternativas conduziu a pequenas alterações locais na malha (Figura II. 3). A resolução varia entre cerca de 10 m na zona do Porto de Leixões e cerca de 1 km na fronteira oceânica. No estuário do Douro, a resolução é da ordem dos 50 m (Figura II. 4).



Figura II. 2 – Malha de cálculo e batimetria para o modelo SCHISM-WWM

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura II. 3 – Pormenor da malha de cálculo para a Solução 1



Figura II. 4 – Resolução horizontal da malha do modelo SCHISM

#### Calibração do modelo hidrodinâmico

A calibração do modelo de circulação é feita fundamentalmente ajustando o coeficiente de atrito de Manning. No entanto, simulações preliminares para janeiro de 2016 mostraram que o modelo subestimava o nível médio em cerca de 15 cm no marégrafo de Leixões. Este valor não é explicado pela subida do nível médio do mar (que é tida em conta) nem pelo setup devido à agitação marítima (que é uma ordem de grandeza inferior). Assim, considerou-se que, embora elevada, esta discrepância poderia estar relacionada com efeitos estéricos que não são tidos em conta pelo modelo (Bertin et al., 2015). Assim, adicionaram-se 15 cm aos níveis na fronteira do modelo por forma a eliminar o enviesamento dos resultados.

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

O coeficiente de Manning (Figura II. 6, Figura II. 7) foi definido da seguinte forma:

- Junto à fronteira marítima foi utilizado um valor artificialmente elevado (0,15 m<sup>1/3</sup>/s), por forma a controlar alguns problemas numéricos. Estes problemas ocorrem em situações muito energéticas, tal como as que se verificam no período de validação. Decorrem da inconsistência entre as condições de fronteira dos níveis, que apenas têm em conta a maré e a pressão atmosférica, e os forçamentos impostos, que incluem também o vento e a agitação marítima. Em resultado desta inconsistência, o modelo tende a gerar velocidades excessivas junto à fronteira, que são controladas aumentando o coeficiente de fricção nessa zona.
- Em zonas com afloramentos rochosos (incluindo o manto de tetrápodes do quebra-mar norte do Porto de Leixões), considerou-se um coeficiente de atrito elevado, de acordo com a literatura (0,07 m<sup>1/3</sup>/s). As zonas com afloramentos rochosos (Figura II. 5) foram determinadas com base na informação constante da carta do Instituto Hidrográfico n.º 26402, 2ª Edição de junho de 2007, à escala 1:10 000, e também analisando a irregularidade da batimetria nos levantamentos de elevada resolução disponíveis.
- Em toda a zona costeira não incluída nos pontos anteriores considerou-se um coeficiente de Manning de 0,025 m<sup>1/3</sup>/s. Análises de sensibilidade mostraram que que os níveis no marégrafo de Leixões são insensíveis a este parâmetro (Figura II. 6), pelo que não pode ser calibrado com os dados disponíveis. Este facto pode ser observado na Figura II. 8 onde não se observam diferenças significativas nos resultados do modelo para diferentes valores de coeficientes de Manning.
- No estuário, pelo contrário, os resultados são muito sensíveis a este coeficiente. Assim, o coeficiente de Manning no estuário foi calibrado com base nos dados do marégrafo do Cais dos Banhos. Testaram-se coeficientes de Manning no estuário de 0,025 m<sup>1/3</sup>/s, 0,030 m<sup>1/3</sup>/s e 0,035 m<sup>1/3</sup>/s. Os resultados mostram que os erros no marégrafo de Cais dos Banhos diminuem quando se aumenta este coeficiente (Figura II. 9). É expectável por isso que fosse possível reduzir ainda mais o erro aumentando o coeficiente de Manning para além do valor utilizado. Por exemplo, Venâncio et al. (2017) utiliza um coeficiente de Manning de 0,039 m<sup>1/3</sup>/s para simular as cheias no Douro no mesmo período com um modelo semelhante. No entanto, seriam valores fisicamente pouco realistas, pelo que se optou por usar um coeficiente de Manning de n=0,035 m<sup>1/3</sup>/s no estuário. Em geral, os erros são mais elevados durante o período de maior caudal, em que o sinal de maré é fortemente limitado pelo caudal. É possível que os erros sejam em parte devidos à batimetria usada na parte superior do estuário, que pode estar desatualizada. Finalmente, a resolução da malha no estuário é relativamente grosseira, o que também condiciona a qualidade dos resultados nessa zona.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura II. 5 – Zonas de afloramentos rochosos, indicadas a cinzento escuro

# Quadro II. 1 – Calibração do modelo de circulação (sem agitação marítima): erros quadráticos médios (cm) nos marégrafos para vários coeficientes de Manning, e para o mês de janeiro de 2016

	n=0.025 m <sup>1/3</sup> /s	n=0.030 m <sup>1/3</sup> /s	n=0.035 m <sup>1/3</sup> /s
Leixões	7	7	7
Cais dos banhos	35	30	27

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura II. 6 – Distribuição do coeficiente de Manning usado no modelo SCHISM



Figura II. 7 – Distribuição do coeficiente de Manning usado no modelo SCHISM (Solução 1 – detalhe)

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura II. 8 – Comparação dos resultados do modelo SCHISM com os dados do marégrafo do Porto de Leixões, referentes ao período de Janeiro de 2016. Apresentam-se os resultados para diferentes coeficientes de Manning, com e sem agitação marítima

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura II. 9 – Comparação dos resultados do modelo SCHISM com os dados do marégrafo do Cais dos Banhos, referentes a janeiro de 2016. Apresentam-se os resultados para diferentes coeficientes de Manning, com e sem agitação marítima

Para todos os outros parâmetros físicos, nomeadamente os relativos à agitação marítima, foram utilizados os valores por defeito do modelo.

O modelo SCHISM foi forçado com dados de caudal retirados do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hidricos (SNIRH - http://snirh.apambiente.pt/), para o período de janeiro-fevereiro de 2016, na estação de CRESTUMA (EDP), com o código 07G/01A. Os forçamentos atmosféricos foram adquiridos da base de dados ERA-INTERIM, do ECMWF, com uma resolução espacial de 0.125º e uma resolução temporal de 6h.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura II. 10 – Comparação dos resultados do modelo SCHISM com os dados do marégrafo do Cais dos Banhos, para os períodos de 9-14 de janeiro de 2016 e 23-27 de janeiro de 2016. Apresentam-se os resultados para diferentes coeficientes de Manning, com e sem agitação marítima

#### Validação do modelo hidrodinâmico e do modelo de agitação marítima

O modelo foi validado para fevereiro de 2016. Compararam-se os dados medidos com resultados de uma simulação só de circulação e de uma simulação com o modelo acoplado de circulação e de agitação marítima. Os resultados (Figura II. 11) mostram um aumento dos erros no marégrafo de Leixões e uma ligeira diminuição no marégrafo do Cais dos Banhos. Globalmente, considera-se que o modelo reproduz adequadamente os níveis em ambos os marégrafos (Figura II. 11), sobretudo tendo em atenção que se trata de um período muito energético. Verifica-se também que o erro quadrático médio para o Cais dos Banhos diminuiu de 27 cm para 21 cm, reforçando a teoria de que os erros dos níveis no Douro estão fortemente influenciados pelo caudal. Com efeito, o mês de fevereiro apresenta um pico de caudal ligeiramente inferior ao registado durante o período de janeiro de 2016, o que pode explicar a maior facilidade em reproduzir os níveis no estuário.

Marégrafo	Modelo de circulação	Modelo acoplado de circulação e agitação marítima
Leixões	14	15
Cais dos banhos	21	21

Quadro II. 2 – Validação do modelo de circulação: erros quadráticos médios (cm) nos marégrafos para um coeficiente de Manning de 0.035 m<sup>1/3</sup>/s

O aumento dos erros de 7 cm (Quadro II. 1) para 14 cm (Quadro II. 2) no marégrafo de Leixões é inesperada, dado que: 1) as simulações de calibração mostraram que o modelo é insensível ao atrito nessa estação, e 2) as condições atmosféricas e oceanográficas não diferem substancialmente em janeiro e em fevereiro de 2016. Este aumento merece por isso uma análise cuidada.

A análise dos dados do marégrafo de Leixões revela uma variação anómala do nível da superfície livre, da ordem dos 15 cm (Figura II. 12). Esta variação ocorre a partir das 11h00 do dia 14 de Fevereiro de 2016 e estende-se até ao final do período de simulação. Salienta-se ainda que os metadados da estação, disponíveis em http://www.emodnet-physics.eu/Map/, não apresentam nenhuma indicação que expliquem esta variação. Admite-se que a essa hora o sensor de pressão tenha sido reposicionado a uma cota ligeiramente diferente após uma operação de manutenção. No entanto, não é possível determinar se o posicionamento correto é o que ocorreu até 14 de fevereiro de 2016 ou o que ocorreu após essa data.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura I.

Figura II. 11 – Validação do modelo hidrodinâmico para fevereiro de 2016, com um coeficiente de Manning de 0.035 m<sup>1/3</sup>/s

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

Esta anomalia no nível da superfície livre de Leixões pode ajudar a explicar o aumento, de 7 cm para 14 cm, do erro quadrático médio nesta estação, durante os períodos de calibração (janeiro) e validação (fevereiro) do modelo de circulação. Sugere também que o aparente enviesamento do modelo, que levou ao aumento do nível na fronteira em 15 cm, foi necessário devido a um problema nos dados no marégrafo durante o mês de janeiro de 2016. A ser o caso, seriam os dados a partir de 14 de fevereiro que estariam corretos. Dada esta incerteza, as simulações efetuadas mais à frente não têm em conta o aumento de 15 cm dos níveis introduzidos na fase de calibração.



Figura II. 12 – Alteração do nível do marégrafo de Leixões a partir das 11h00 do dia 14 de Fevereiro de 2016

A capacidade do modelo em reproduzir a de agitação marítima foi também verificada com a mesma simulação. Os resultados são excelentes (Figura II. 13, Quadro II. 3), mostrando que o modelo reproduz a agitação marítima com grande precisão.

Variável	Erro quadrático médio	Erro quadrático médio normalizado	Viés
Alturas de onda significativas	0,48 m	13%	0,32
Período médio	0,74 s	0.09	-0,17 s
Direção média	14º	-	-

Quadro II. 3 - Valio	dação do mo	odelo de ag	gitação mar	rítima em l	eixões
----------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura II. 13 – Validação da agitação marítima para o período de Fevereiro de 2016: a) altura significativa; b) período médio e c) direção

#### Aplicação do modelo de transporte de sedimentos

A dinâmica sedimentar foi analisada com o modelo de transporte de sedimentos SED2D (Guerin et al., 2016a). Este modelo funciona como uma rotina do SCHISM, sendo forçado pelas correntes e agitação determinados pelo SCHISM-WWM. Determina os fluxos sedimentares a partir de fórmulas de transporte semi-empíricas e calcula a evolução batimétrica associada.

Foram consideradas 5 classes de sedimentos. Uma vez que o modelo não permite variações espaciais dos sedimentos de fundo no início da simulação, considerou-se uma distribuição granulométrica que permitisse representar os sedimentos das diferentes zonas do domínio (Figura II. 14).



Figura II. 14 – Comparação da granulometria inicialmente considerada no modelo SED2D (laranja) com as observadas na praia de Leça (preto), praia de Matosinhos (vermelho) e Porto de Leixões (azul). Os locais onde foram colhidas as amostras estão indicados na Figura I. 1, e os dados utilizados estão indicados no Quadro 3.5

A fórmula de transporte selecionada foi a de van Rijn (2007a, b). Na avaliação dos resultados ter-se-á em conta que:

- uma comparação entre fluxos sedimentares medidos e calculados por esta fórmula indica que esta tende a sobrestimar os caudais sólidos para condições muito energéticas por um fator de 2 a 10 (Guerin et al., 2016b);
- a utilização de uma distribuição granulométrica inicial uniforme no espaço tenderá a sobrestimar os fluxos sedimentares nas zonas onde os sedimentos são mais grosseiros (Praia de Leça) e subestimar esses fluxos onde os sedimentos são mais finos (Porto de Leixões e praia de Matosinhos). Note-se que os caudais sólidos são muito sensíveis ao diâmetro dos sedimentos (Pinto et al., 2006).

A evolução morfológica foi desligada em grande parte do domínio. Desta forma evita-se a erosão de fundos rochosos (incluindo o manto do quebra-mar), e a evolução de locais afastados da zona de estudo, onde a resolução da malha é grosseira (e.g., nas partes norte e sul do domínio de cálculo) e onde os sedimentos poderão ser muito diferentes dos considerados (e.g., estuário do Douro). A parte do domínio onde a evolução morfológica foi permitida está representada na Figura II. 15.



Figura II. 15 – Zona do domínio onde foi considerada a evolução batimétrica (a preto): a) situação atual; b) Solução 1

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

ANEXO III

Descrição, implementação e validação do modelo de linha de costa

# Descrição, implementação e validação do modelo de linha de costa

#### Descrição do modelo

O modelo LITLINE v.2016 é parte do sistema de modelos "LITPACK – Sistema de modelos integrados para processos de dinâmica litoral" (DHI, 2016) e permite calcular a evolução da linha de costa em resposta ao regime de agitação marítima incidente na presença de estruturas marítimas tais como molhes, esporões, quebra-mares destacados emersos e defesas longitudinais aderentes (também conhecidas por paredões) e também na presença de fontes ou sumidouros de sedimento (casos de alimentação artificial de praia, contínua ou pontual, ou presença de canhões submarinos, respetivamente).

O modelo basea-se no conceito de modelo de 1-linha (modelo unidimensional de evolução de linha de costa), ou seja, assume que o perfil transversal de praia, normal à linha de costa, avança e recua (simulando assim, acreção e erosão, respetivamente) paralelamente ao perfil transversal que existia no passo temporal imediatamente anterior. Contudo, o modelo permite i) a variação longitudinal das características geomorfológicas do perfil transversal de praia (geometria e distribuição granulométrica dos sedimentos ao longo do perfil) e, para cada perfil, permite também ii) a variação das características geomorfológicas do perfil transversal de praia no tempo. Estas duas valências do modelo permitem-lhe: no caso i), considerar a variabilidade longitudinal das características geomorfológicas do perfil transversal de praia, e assim, a consequente variabilidade na capacidade de transporte sedimentar e no caso ii), considerar a variabilidade sazonal das características geomorfológicas do perfil transversal de praia, e assim, a consequente variabilidade na capacidade de transporte sedimentar e no caso ii), considerar a variabilidade sazonal das características geomorfológicas do perfil transversal de praia, e assim, a consequente variabilidade na capacidade de transporte sedimentar e no caso ii), considerar a variabilidade sazonal das características geomorfológicas do perfil transversal de praia no tempo.

O modelo deve ser aplicado para casos em que os processos hidrodinâmicos variem predominantemente na direção normal à linha de costa. Zonas costeiras em que as linhas batimétricas (isolinhas de profundidade) próximo da linha de costa sejam irregulares, isto é, não sejam predominantemente paralelas, não devem considerar-se como domínio de aplicação do modelo uma vez que os processos bidimensionais são negligenciados e, por isso, a física do sistema costeiro não seria corretamente simulada. Contudo, apesar de não ser legítima a aplicação do modelo para simular a evolução da linha de costa em áreas de estudo em que o processo de difração das ondas é um fenómeno dominante, o modelo inclui uma simplificação fenómeno de difração causado pela presença de molhes, esporões e quebra-mares destacados emersos.

Os diferentes modelos que constituem o sistema de modelos LITPACK requerem condições de aplicação que satisfaçam as hipóteses de validade das formulações matemáticas estabelecidas para legitimar as suas aplicações. A aplicação do modelo LITLINE é válida nas seguintes condições:

• O perfil transversal de praia deve ser normal às linhas batimétricas (isolinhas de profundidade), que por sua vez devem ser paralelas à linha de costa;

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

- A extensão do perfil transversal de praia deve ser tal que as correntes longitudinais induzidas pelas ondas devem ser insignificantes no primeiro ponto do perfil transversal de praia (primeiro ponto do lado do mar);
- O perfil transversal de praia pode ser constituído por sedimentos de granulometria variável ao longo do perfil;
- O perfil transversal de praia pode incluir zonas dentro e fora da rebentação. A zona de rebentação deve ser constituída por um número suficiente de pontos que permita a resolução dos processos em causa, um mínimo de 10 pontos de cálculo da malha do plano horizontal;
- O perfil transversal de praia pode incluir barras longitudinais. Na presença destas, pelo menos entre 5 a 10 pontos de cálculo por barra devem ser considerados na malha de cálculo do plano horizontal;
- O perfil transversal de praia pode incluir estruturas como quebra-mares destacados emersos e/ou defesas longitudinais aderentes. Na presença destas estruturas, a zona adjacente submetida à sua influência deve ser descrita por pelo menos 5 pontos de cálculo da malha do plano horizontal;
- O regime de agitação marítima incidente pode ser considerado variável ao longo da direção longitudinal;
- Na presença de fontes e/ou sumidouros de sedimento, concentradas e/ou distribuídas ao longo do trecho litoral;
- Na presença de estruturas transversais à linha de costa, tais como molhes e esporões;
- Pode ser considerada a variabilidade sazonal do perfil transversal de praia.

O modelo LITLINE trata-se de um modelo numérico no domínio do tempo, que simula a evolução da linha de costa a médio e longo prazo. O transporte sedimentar, que consiste no principal parâmetro de calibração, é calculado através do recurso a tabelas geradas por um outro modelo, LINTABL, de apoio, também pertencente ao sistema de modelos LITPACK.

#### Modelo conceptual

O gradiente do transporte longitudinal que induz a evolução da linha de costa tem origem na conjugação de vários fatores, como a variação do clima de agitação marítima na fronteira do lado mar da zona ativa da praia, a variação do perfil transversal, o efeito induzido pela proximidade a estruturas e a disponibilidade sedimentar nas fronteiras do sistema em estudo.

Aplicou-se o modelo conceptual sintetizado na Figura III. 1 no qual a evolução da linha de costa é governada pela equação da continuidade no interior do domínio de cálculo, especificamente na zona ativa da praia parametrizada com base na avaliação do transporte sedimentar longitudinal potencial, e condicionada pelas condições de fronteira laterais, norte e sul, e pela condição de fronteira marítima (lado mar). Como condição de fronteira norte considerou-se a taxa de transporte sedimentar nula, ou seja, admitiu-se o bloqueio total do transporte sedimentar longitudinal pelo quebra-mar sul do Porto de Leixões. Como condição de fronteira sul considerou-se o bloqueio parcial do transporte longitudinal de sedimentos pelo promontório a sul da praia, desde a linha de água (cuja cota varia,

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

uma vez que na modelação se considerou a variação do nível do mar devido à maré astronómica em vez do NMM constante) até à elevação -5 m ZHL (elevação aproximada à qual tem inicio o perfil arenoso nos levantamentos topo-hidrográficos de 2008, 2012 e 2016). Como condição de fronteira marítima admitiram-se as condições de hidrodinâmica definidas pelas séries temporais nos Pontos Norte, Central e Sul, sendo que o modelo executa a interpolação destas condições para os restantes pontos ao longo da fronteira. A resolução da linha de costa é feita para um espaçamento  $\Delta x=5$  m ao longo da baseline e a resolução dos processos de hidrodinâmica e transporte sedimentar ao longo dos perfis normais à baseline é feita para um espaçamento ∆y=1 m. Foram consideradas duas estruturas transversais: um esporão localizado a norte da praia para simular o quebra-mar sul do Porto de Leixões e um esporão fictício, com comprimento até à elevação -5 m ZHL, localizado a sul da praia para simular o promontório onde está localizado o Forte de São Francisco Xavier também conhecido como Castelo do Queijo. Para além destas, também se considerou uma estrutura longitudinal continua (defesa aderente) para simular o paredão e as infraestruturas fixas que limitam o topo da praia de Matosinhos.



Figura III. 1 – Modelo conceptual adotado para evolução da linha de costa

Na Figura III. 2 apresenta-se os parâmetros do perfil transversal de praia fundamentais na definição do volume sedimentar envolvido nas variações morfológicas induzidas pelo gradiente de transporte longitudinal, utilizados no modelo de evolução de linha de costa aplicado, o modelo Litline (DHI, 2016). A quantificação destes parâmetros, que se apresenta no Quadro III. 1, foi feita com recurso à análise do transporte sedimentar longitudinal potencial obtido com o modelo Litdrift para o período de

estudo na seção 2.6.4. Para a definição da profundidade ativa (D<sub>act</sub>) admitiu-se que corresponde à posição onde ocorre 99% do transporte longitudinal total acumulado nos 8 anos (11/junho/2008 a 21/março/2016) e para a definição da altura da berma (h<sub>berma</sub>) admitiu-se que corresponde ao nível máximo do mar alcançado no mesmo período temporal.



Figura III. 2 – Parametrização da zona ativa do perfil transversal utilizada pelo modelo LITLINE, adaptado de Oliveira (2016)

Parâmetro	Magnitude [m]	
Altura da berma (h <sub>berma</sub> )	1.90	
Altura da duna (h <sub>duna</sub> )	1.75	
Profundidade ativa (D <sub>act</sub> )	8.11	
Largura da zona ativa (L <sub>act</sub> )	332.00	
Altura ativa (h <sub>act</sub> )	10.01	

Quadro III. 1- Parametrização da zona ativa da praia de Matosinhos

#### Calibração e validação

Utilizou-se um sistema de coordenadas no plano cartesiano local, abreviado por referencial local, já mencionado na secção 2.6.3, cuja origem (0; 0) se localiza no ponto de coordenadas (-46207.2; 167096.8) do sistema de projeção Datum 73. O eixo-x (baseline) faz um ângulo de 321.19° no sentido dos ponteiros do relógio com o Norte Geográfico.

Procedeu-se à calibração (no período de 11/junho/2008 a 17/maio/2012) e validação (no período de 11/junho/2008 a 21/março/2016) do modelo aplicado à isolinha do ZHL (Figura III. 3), uma vez que, como já descrito na secção 2.6.3, o levantamento topo-hidrográfico de 2016 não abrangeu a isolinha do NMM. Contudo, também se verificou o modelo para a isolinha do NMM (no período de 11/junho/2008 a 17/maio/2012), uma vez que é mais adequada para representar a evolução da linha de costa em estudos de modelação numérica (Figura III. 4). Relativamente a estes procedimentos fazem-se os seguintes comentários:

 em resposta à agitação marítima e variação do nível do mar que ocorreram durante o período de estudo a isolinha numérica do ZHL apresentou uma oscilação de amplitude variável ao longo da praia, sendo o seu valor mínimo 25 m (verificado no ponto do setor central da praia de coordenada x=780 m), o seu valor máximo 97 m (verificado no ponto extremo norte da praia), e o seu valor médio 42 m. Estes resultados são consentâneos com a variação da isolinha do ZHL observada em 11/junho/2008, 17/maio/2012 e 21/março/2016 (abreviadamente designadas por isolinha do ZHL em 2008, 2012 e 2016), que mostrou maior estabilidade no sector central da praia.

- as isolinhas do ZHL observadas em 2012 e 2016 estão maioritariamente contidas dentro dos limites de oscilação da isolinha numérica do ZHL durante o período de estudo. No entanto, o modelo não reproduz as oscilações observadas no sector sul da praia, que provavelmente ocorrem devido à presença dos afloramentos rochosos aí existentes (e que não foram considerados na simulação), nem reproduz a tendência de avanço verificada no sector norte no período 2012-2016. Apresentam-se no Quadro III. 3os parâmetros estatísticos de avaliação do erro BIAS, RMS e RBIAS da isolinha numérica do ZHL final para ambos os períodos 2008-2012 e 2008-2016.
- a isolinha numérica do NMM em 2012 apresentou boa concordância com a observada nos sectores norte e central da praia e um avanço excessivo no sector sul.
- os modelos de evolução de linha de costa não simulam o efeito bidimensional no plano horizontal da corrente de circulação, com sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, que é gerada por efeito do gradiente do setup, por sua vez causado pela diminuição da dissipação de energia por rebentação, a sotamar do quebra-mar sul do Porto de Leixões. Este fenómeno local deverá causar uma corrente de retorno adjacente ao quebra-mar sul que induzirá um acréscimo de volume de areia no extremo norte da praia, e um correspondente decréscimo de volume de areia no extremo sul da praia, relativamente aos resultados obtidos com o modelo de linha de costa.

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura III. 3 – Calibração e validação da isolinha do ZHL da praia de Matosinhos para os períodos 2008-2012 e 2008-2016, respetivamente

Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura III. 4 – Validação da isolinha do NMM da praia de Matosinhos para o período 2008-2012

No âmbito da calibração e validação do modelo de linha de costa introduziu-se a alimentação sedimentar equivalente ao depósito de areias (dragadas do Porto de Leixões) efetuado a "Norte do Castelo do Queijo", conforme informação fornecida pela ADPL. Uma vez que são apenas conhecidos os anos das operações e os correspondentes volumes de areia, admitiu-se: i) que cada uma das operações teve duração 15 dias; ii) que durante cada operação a taxa de depósito de areia foi constante; e iii) que todos os depósitos foram realizados num trecho com 200 m localizado no setor sul da praia (com início e fim a 20 e 220 m, respetivamente, do extremo sul da praia). Nas condições descritas, considerou-se a data de realização das alimentações e correspondentes volumes que constam no Quadro III. 2.

Data (inicio – fim) [dd/mm/aa]	Volume [m <sup>3</sup> ]
11 - 26/06/2008	15 117
15 - 30/05/2009	72 401
15 - 30/05/2013	26 633

Quadro III. 2 – Operações de alimentação artificial consideradas na modelação da evolução da linha de costa da praia de Matosinhos entre 11/junho/2008 e 21/março/2016

Relativamente ao efeito da alimentação sedimentar na evolução da isolinha do ZHL, que se avalia recorrendo à comparação com os resultados anteriores (sem alimentação), fazem-se os seguintes comentários:

- no período de estudo, a amplitude das oscilações da isolinha numérica do ZHL diminui no setor norte da praia à custa do avanço da linha dos seus valores mínimos e aumenta no setor sul da praia à custa do avanço da linha dos seus valores máximos (Figura III. 5).
- a alimentação sedimentar causa o avanço das isolinhas numéricas do ZHL de 2012 e 2016 em toda a extensão da praia (Figura III. 6 e Figura III. 7). Apresentam-se no Quadro III. 3 os parâmetros estatísticos de avaliação do erro BIAS, RMS e RBIAS das isolinhas numéricas do ZHL finais para os períodos de simulação 2008-2012 e 2008-2016, os quais indicam menor concordância com as isolinhas observadas do ZHL com a alimentação sedimentar.

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura III. 5 – Linhas das posições extremas (máximos e mínimos) da isolinha numérica do ZHL da praia de Matosinhos para o período 2008-2016 sem e com alimentação sedimentar



Figura III. 6 – Simulação da evolução da isolinha do ZHL da praia de Matosinhos para o período 2008-2012 sem e com alimentação sedimentar

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar



Figura III. 7 – Simulação da evolução da isolinha do ZHL da praia de Matosinhos para o período 2008-2016 sem e com alimentação sedimentar

Quadro III. 3 – Parâmetros estatísticos de avaliação do erro BIAS, RMS e RBIAS das isolinhas numéricas do ZHL finais para os períodos de simulação 2008-2012 e 2008-2016

	Isolinha do ZHL de 2012		Isolinha do ZHL 2016	
	Sem alimentação Com alimentação		Sem alimentação	Com alimentação
BIAS	0.588	2.099	-0.313	1.665
RMS	8.691	10.206	15.540	16.304
RBIAS	0.006	0.022	-0.003	0.017

Estudo III - Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

ANEXO IV

Descrição do modelo VELApart

Descrição do Modelo VELApart

O modelo VELApart (Oliveira, 1997; Oliveira e Baptista, 1997) resolve a equação de advecçãodifusão para partículas individuais não-reactivas, em coordenadas sigma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + \theta \frac{\partial c}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{D_{zz}}{H^2} \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right)$$
(AIV-1)

onde *c* representa a concentração, (*x*,*y*,*z*) as coordenadas cartesianas, (*u*,*v*,*w*) as componentes da velocidade correspondentes,  $D_{zz}$  o coeficiente de viscosidade turbulenta na vertical, e *H* a altura da coluna de água. A coordenada vertical  $\sigma$  é dada por:

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H} \tag{AIV-2}$$

onde  $\eta$  representa a elevação relativa ao nível médio.

Os termos de difusão horizontal são tratados com um método de *ramdom walk*. É usada uma distribuição logarítmica na vertical da velocidade horizontal:

$$\vec{u}(\sigma) = U \frac{\ln(H(\sigma+1)/z_0)}{\ln(H/z_0) - 1}$$
(AIV-3)

onde *U* é a velocidade integrada na vertical e  $z_0$  é o comprimento de rugosidade, aqui tomado como 1 cm.

A velocidade vertical em coordenadas  $\sigma,\,\theta,\,\acute{e}$  dada por:

$$\theta = \frac{1}{H} (w + w_s - (\sigma + 1)\frac{\partial \eta}{\partial t} - u(\frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial H}{\partial x}) - v(\frac{\partial \eta}{\partial y} + \sigma \frac{\partial H}{\partial y}))$$
(AIV-4)

onde  $w_s$  é a velocidade de queda. Assumindo que a velocidade horizontal é constante na vertical, a equação (AIV-4) simplifica-se para:

$$\theta = \frac{w_s}{H} \tag{AIV-5}$$

Esta simplificação equivale a assumir que, na ausência de velocidade de queda, as partículas mantêm uma coordenada  $\sigma$  constante ao longo da sua trajetória, i.e., que a sua posição relativa na coluna de água não se altera. Neste modelo, a velocidade de queda  $w_s$  pode ser especificada pelo utilizador ou calculada através da fórmula apresentada em van Rijn (1984).

Finalmente, o termo de difusão vertical é separado em dois termos para facilitar o tratamento numérico, permitindo deste modo usar a teoria de *random walk* para a equação de advecção-difusão:

$$\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\frac{D_{zz}}{H^2}\frac{\partial c}{\partial\sigma}\right) = \frac{\partial^2}{\partial\sigma^2}\left(\frac{D_{zz}}{H^2}c\right) - \frac{\partial}{\partial\sigma}(W'c) \tag{AIV-6}$$

em que W', que representa a ressuspensão do sedimento por difusão turbulenta, é dado por:

$$W' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{D_{zz}}{H^2} \right) \tag{AIV-7}$$

A equação AII-1 é dividida em duas equações que são resolvidas em sequência, usando métodos distintos:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = 0$$
 (AIV-8)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial \left( \left( \frac{W_s}{H} + W' \right) c \right)}{\partial \sigma} = \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} \left( \frac{D_{zz}}{H^2} \right)$$
(AIV-9)

A equação AII-8 é resolvida por um método Runge-Kutta adaptativo, embebido, de 4ª ordem (Press *et al.*, 1992). Este método permite elevada precisão, que é controlada pelo utilizador (Oliveira e Baptista, 1997, Oliveira e Baptista, 1998). O modelo VELApart permite ainda compensar imprecisões do modelo de escoamento junto das fronteiras fechadas, usando apenas a componente tangencial da velocidade horizontal.

Uma vez calculada a trajetória da partícula na horizontal, resolve-se a equação AII-9, usando a teoria de *random walk* (Dimou, 1992, Moeller, 1993). O deslocamento da partícula na vertical,  $\Delta\sigma$ , (em coordenadas  $\sigma$ ) é dado por:

$$\Delta \sigma = \left( \frac{W_s}{H} + W' \right) \Delta t + \frac{1}{H} z_n \sqrt{2D_{zz} \Delta t}$$
 (AIV-10)

onde  $z_n$  é uma variável aleatória de média zero e desvio padrão unitário.

O coeficiente de difusão vertical, Dzz, é calculado segundo van Rijn (1984):

$$\begin{split} D_{zz} = D_{zz}^{\max} & se \ \overline{z/_H} > 0.5 \\ D_{zz} = -4D_{zz}^{\max}\sigma(\sigma+1) & se \ \overline{z/_H} \le 0.5 \end{split} \tag{AIV-10}$$

onde  $D_{zz}^{\max}$  é dado por:

ESTUDOS EM MODELO FÍSICO E NUMÉRICO DO PROLONGAMENTO DO QUEBRA-MAR EXTERIOR E DAS ACESSIBILIDADES MARÍTIMAS DO PORTO DE LEIXÕES Estudo III – Avaliação dos impactes na dinâmica sedimentar

 $D_{zz}^{\max} = 0.25 K u_* H$  (AIV-10)

em que *K* é a constante de van Karman (= 0.4) e  $u_*$  é a velocidade de atrito:

$$u_* = \sqrt{c_D} \left| U \right| \tag{AIV-10}$$

onde  $c_D$  é o coeficiente de atrito, e |U| é o módulo da velocidade média na vertical.

Divisão de Divulgação Científica e Técnica - LNEC
AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA • PORTUGAL tel. (+351) 21 844 30 00 • fax (+351) 21 844 30 11 lnec@lnec.pt • www.lnec.pt