



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Modelação morfodinâmica de operações de dragagens
em estuários

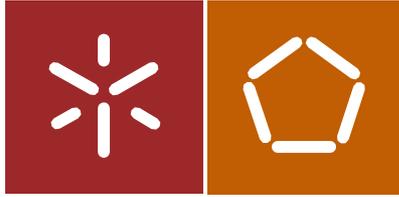
UMinho | 2021

Francisco José Pereira Rebelo

Francisco José Pereira Rebelo

Modelação morfodinâmica de operações de
dragagens em estuários

março de 2021



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisco José Pereira Rebelo

**Modelação morfodinâmica de operações de
dragagens em estuários**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil
Especialização Hidráulica e Ambiente

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Luís da Silva Pinho

março de 2021

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

É com orgulho que redijo as últimas palavras da minha caminhada pela Universidade do Minho.

Ao Professor Doutor José Luís da Silva Pinho, pela confiança que depositou em mim para realizar este projeto, pelo tempo e ferramentas que me deu, e pelos ensinamentos ocultos em cada ação realizada ao longo do último ano, aqui fica o meu muito obrigado.

Aos restantes professores do departamento de Engenharia Civil, em particular aos do perfil de Hidráulica e Ambiente, o meu agradecimento por manterem vivo o meu gosto pela Engenharia, e por me fazerem crescer ao longo de cinco anos.

O meu maior agradecimento é dirigido aos meus pais, Laura e Francisco, e irmão Hugo pelo apoio ao longo do meu percurso, incentivo para continuar e paciência nas alturas mais difíceis. Devolhes uma eterna gratidão por vezes difícil de demonstrar. Sem eles não teria chegado aqui, nem seria a pessoa que sou.

Aos meus colegas de curso, em especial aqueles que mais me acompanharam nas lutas diárias de cinco anos; Gustavo, Jorge e Vanda, um enorme obrigado pelos momentos, pela amizade e que o futuro nos seja risonho.

À Larissa, que tendo cruzado o meu caminho apenas a meio, fez com que os momentos mais adversos se tornassem suportáveis e os objetivos possíveis, por toda a força, inspiração e amor que me deu. Um enorme e grato obrigado pelo passado, presente e futuro.

Cada pessoa que entra na nossa vida deixa a sua marca, e mesmo para aqueles que não estão aqui mencionados, fica um agradecimento.

A todos, um grande obrigado.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Resumo

Modelação morfodinâmica de operações de dragagens em estuários

O crescente aumento do volume de negócios das atividades portuárias incluídas no estuário do rio Lima tem vindo a aumentar as exigências de segurança e navegabilidade do canal de navegação existente. Estas exigências são colmatadas através de obras de proteção e de dragagem, realizadas frequentemente no estuário, implicando gastos significativos. Nesta perspetiva mais económica, a monitorização do estuário é fundamental para simultaneamente diminuir as despesas e garantir as condições exigidas.

Numa vertente ambiental, os estuários são sistemas complexos que ligam dois ambientes aquáticos sujeitos a processos muito distintos, o que dificulta muito a sua monitorização. A dependência económica do bom estado dos estuários, bem como a preservação dos habitats nele existentes, requer a utilização de tecnologias avançadas, como as desenvolvidas em áreas como a hidroinformática, para uma gestão eficiente destes sistemas.

O trabalho desenvolvido nesta dissertação, baseado na aplicação de ferramentas hidroinformáticas, utiliza um programa baseado em métodos numéricos que permite avaliar o impacto de dragagens em estuários, tendo sido aplicado ao estuário do rio Lima. Esse *software*, Delft3D, foi utilizado, inicialmente, para avaliar a evolução batimétrica do estuário e numa segunda fase, para prever a pluma formada por transbordamento, um dos métodos de descarga utilizado pelas dragas auto-transportadoras.

A bacia do rio Lima, não sendo muito ocupada com atividades antropogénicas, situa-se numa região muito pluviosa e as duas barragens que foram construídas alteraram significativamente após a sua construção recente, o modo como o escoamento e o transporte de sedimentos se processa.

Neste trabalho foram simulados cenários de escoamento e transporte sedimentar de modo a avaliarem-se padrões morfodinâmicos no estuário. Entre as variáveis analisadas salienta-se a concentração de sedimentos na fronteira de montante, a dimensão característica do sedimento do leito, o caudal fluvial e o tipo de maré. No estudo da pluma gerada pelas descargas por transbordamento associadas a operações de dragagens, foram consideradas descargas compostas por silte e argila, realizadas em duas localizações diferentes no estuário.

Palavras chave:

Estuário; rio Lima; dragagens; Delft3D; modelação morfodinâmica.

Abstract

Morphodynamic modeling of dredging operations in estuaries

The growing increase in the business port activities at the river Lima harbor has been increasing the safety and navigability requirements of the existing navigation channel. These requirements are met through protection and dredging works, which are often carried out in the estuary, implying significant expenses. In this more economical perspective, monitoring the estuary is essential to simultaneously reduce expenses and guarantee the required conditions.

In an environmental perspective, estuaries are complex systems that link two aquatic environments subject to very different processes, which makes monitoring very difficult. The economic dependence on the good state of the estuaries, as well as the preservation of its habitats, requires the use of advanced technologies, such as those developed in areas such as hydroinformatics, for an efficient management of these systems.

The work developed in this dissertation, based on the application of hydroinformatics tools, uses a program based on numerical methods that allows to evaluate the impact of dredging in estuaries, having been applied to the Lima River estuary. This software, Delft3D, was used, initially, to assess the estuarine morphodynamics and in a second phase, to predict the plume formed by overflow, one of the discharge methods used by self-transporting dredges.

The Lima River basin, not being very occupied with human activities, is located in a very rainy region and the two relatively recent constructed dams have significantly changed the way the river flows and the transport of sediments takes place.

In this work, sediment transport scenarios were simulated in order to evaluate morphodynamic patterns in the estuary. Among the variables analyzed, we highlight the concentration of sediments at the upstream boundary, the characteristic dimension of the bed sediment, the river flow and the type of tide. In the study of the plume generated by overflow discharges associated with dredging operations, discharges composed of silt and clay were considered, occurring in two different areas in the estuary.

Key-words:

Estuary; Lima river; dredging; Delft3D; morphodynamics modeling.

Índice de texto

1- INTRODUÇÃO	2
1.1- ENQUADRAMENTO.....	2
1.2- OBJETIVOS	4
1.3- ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2- ESTADO DA ARTE	7
2.1- ESTUÁRIOS	7
2.1.1- <i>Caracterização dos estuários</i>	8
2.2- DINÂMICA ESTUARINA	11
2.2.1- <i>Marés</i>	11
2.2.2- <i>Correntes</i>	12
2.2.3- <i>Ondas e ventos</i>	13
2.2.4- <i>Salinidade e Temperatura</i>	14
2.2.5- <i>Produção, transporte e deposição de sedimentos</i>	15
2.3- DRAGAGENS	17
2.3.1- <i>Tipos de dragagem</i>	18
2.3.2- <i>Tipos de dragas</i>	19
2.3.3- <i>Dragas mecânicas</i>	19
2.3.4- <i>Dragas hidráulicas</i>	22
2.3.5- <i>Transbordamento</i>	27
2.3.6- <i>Pluma formada pelas descargas por transbordamento</i>	29
2.3.7- <i>Alterações provocadas pelas dragagens</i>	32
2.4- MODELAÇÃO HIDROINFORMÁTICA	34
2.4.1- <i>Tipos de modelos</i>	35
2.4.2- <i>Aplicações</i>	40
2.5- DELFT3D	40
2.5.1- <i>Módulos e domínios de interesse</i>	41
2.5.2- <i>Aplicações</i>	43
2.5.3- <i>Formulação matemática</i>	43
3- CASO DE ESTUDO	46
3.1- BACIA HIDROGRÁFICA DO LIMA.....	46
3.2- ESTUÁRIO DO RIO LIMA	49
3.3- CARACTERIZAÇÃO HIDRO-MORFODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO LIMA	51
3.3.1- <i>Marés</i>	51
3.3.2- <i>Correntes</i>	52
3.3.3- <i>Ondas e ventos</i>	52
3.3.4- <i>Salinidade e temperatura</i>	54
3.3.5- <i>Produção, transporte e deposição de sedimentos</i>	55
3.4- DRAGAGENS NO ESTUÁRIO DO LIMA	56
3.5- INTERVENÇÕES NA ZONA DA EMBOCADURA.....	59
4- MODELO HIDRO-MORFODINÂMICO DO ESTUÁRIO DO RIO LIMA	61
4.1- GRELHA, PROCESSOS FÍSICOS, CONDIÇÕES DE FRONTEIRA E DESCARGAS	61
4.2- CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA MORFODINÂMICA ESTUARINA	66
4.2.1- <i>Características dos cenários</i>	67
4.3- CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA PLUMA DE DRAGAGEM	70
4.3.1- <i>Processo de cálculo das descargas por transbordamento</i>	71
4.3.2- <i>Trajeto da draga</i>	73
4.3.3- <i>Características dos cenários</i>	76
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1- FASE 1- EVOLUÇÃO DA BATIMETRIA.....	80

5.1.1- Valores de erosão/sedimentação em função do caudal fluvial – Embocadura	80
5.1.2- Valores de erosão/sedimentação em função do caudal fluvial – Ponte de Lanheses	82
5.1.3- Valores de erosão/sedimentação em função da dimensão dos sedimentos – Embocadura	83
5.1.4- Valores de erosão/sedimentação em função da dimensão dos sedimentos – Ponte de Lanheses	85
5.1.5- Valores de erosão/sedimentação de sedimentos em função da concentração de sedimentos na entrada de montante – Embocadura	86
5.1.6- Valores de erosão/sedimentação de sedimentos em função da concentração de sedimentos na entrada de montante – Ponte de Lanheses.....	87
5.1.7- Valores de erosão/sedimentação em função do tipo de maré – Embocadura	88
5.1.8- Valores de erosão/sedimentação em função do tipo de maré– Ponte de Lanheses.....	90
5.2- PLUMA DE SEDIMENTOS POR TRANSBORDAMENTO	93
5.2.1- Pluma de sedimento silte para um caudal de 100 m ³ /s e maré enchente- 1º Trajeto	93
5.2.2- Pluma de sedimento silte para um caudal de 100 m ³ /s e maré vazante- 1º Trajeto	95
5.2.3- Pluma de sedimento argila para um caudal de 100 m ³ /s e maré enchente- 1º Trajeto	97
5.2.4- Pluma de sedimento argila para um caudal de 100 m ³ /s e maré vazante- 1º Trajeto	98
5.2.5- Pluma de sedimento silte para um caudal de 100 m ³ /s e maré enchente- 2º Trajeto	100
5.2.6- Pluma de sedimento silte para um caudal de 100 m ³ /s e maré vazante- 2º Trajeto	102
5.2.7- Pluma de sedimento argila para um caudal de 100 m ³ /s e maré enchente- 2º Trajeto	103
5.2.8- Pluma de sedimento argila para um caudal de 100 m ³ /s e maré vazante- 2º Trajeto	104
5.3- DESENVOLVIMENTO DA PLUMA POR TRANSBORDAMENTO.....	107
5.3.1- 1º Trajeto	107
5.3.3- 2º Trajeto	111
6- CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	118
6.1- CONCLUSÕES	118
6.2- SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	120

Índice de Figuras

FIGURA 1- INFLUÊNCIA RELATIVA DO RIO, ONDAS E MARÉ NA EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO AMBIENTE COSTEIRO: A) TRANSGRESSIVO; B) REGRESSIVO. (BODY ET AL., 1992, RETIRADO DE WOODROFFE, 2003).....	10
FIGURA 2- ALINHAMENTO RELATIVO ENTRE A TERRA, O SOL E A LUA. (ADAPTADO DE ARPH, 2007).....	12
FIGURA 3- PARÂMETROS CARACTERIZADORES DAS ONDAS. (PEREZ, 2005, RETIRADO DE CARNEIRO, 2014).....	13
FIGURA 4- TIPOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NUM RIO.....	17
FIGURA 5- DRAGA DE BALDE EM OPERAÇÃO. (RETIRADO DE IADC, 2020A).....	20
FIGURA 6- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA DRAGA COM BALDE DE MAXILAS. (RETIRADO DE BRAY ET AL., 1996).....	21
FIGURA 7- <i>BACKHOE DREDGER</i> . (RETIRADO DE VLASBLOM, 2003).....	21
FIGURA 8- <i>FRONT SHOVEL/DIPPER DREDGER</i> . (RETIRADO DE VLASBLOM, 2003).....	22
FIGURA 9- DRAGA DE RETROESCAVADORA. (RETIRADO DE OFFSHORE INDUSTRY AND TECHNOLOGY JOURNAL, 2017).....	22
FIGURA 10- PLANTA E PERFIL DE UMA DRAGA DE SUÇÃO COM DESAGREGADOR. (ADAPTADO DE BRAY ET AL. 1997 E RETIRADO DE CONCEIÇÃO, 2016).....	24
FIGURA 11- VISTA FRONTAL DE UMA DRAGA DE SUÇÃO COM DESAGREGADOR. (RETIRADO DE MARINE INSIGHT, 2020).....	24
FIGURA 12- OUTRO EXEMPLAR DE UMA DRAGA DE SUÇÃO COM DESAGREGADOR. (RETIRADO DE BOSKALIS, 2020A).....	25
FIGURA 13- DRAGA AUTO-TRANSPORTADORA EM FUNCIONAMENTO, COM OS BRAÇOS DE ASPIRAÇÃO NO LEITO DO MAR. (RETIRADO DE CONFLUENCE, 2020).....	26
FIGURA 14- NA EXTREMIDADE ESQUERDA DA FIGURA PODEMOS VER UM DOS BRAÇOS DE ASPIRAÇÃO DA DRAGA AUTO-TRANSPORTADORA NA SUA POSIÇÃO INICIAL; NA EXTREMIDADE DIREITA PODEMOS VER O LOCAL POR ONDE É REALIZADA A OPERAÇÃO DE <i>RAINBOWING</i> . (RETIRADO DE JAN DE NUL, 2020).....	27
FIGURA 15- DRAGA AUTO-TRANSPORTADORA A DEVOLVER O MATERIAL DRAGADO ATRAVÉS DE <i>RAINBOWING</i> . (RETIRADO DE BOSKALIS, 2020B).....	27
FIGURA 16- DRAGA AUTO-TRANSPORTADORA. (RETIRADO DE KEMPS & MILLS, 2016).....	28
FIGURA 17- DISPOSITIVO RESPONSÁVEL PELA REMOÇÃO DA MISTURA ÁGUA + SEDIMENTO POR TRANSBORDAMENTO. (RETIRADO DE ROYAL IHC, 2020B).....	28
FIGURA 18- ELEMENTOS RESPONSÁVEIS PELA PRODUÇÃO DE PLUMAS EM DRAGAS AUTO-TRANSPORTADORAS: 1- CABEÇA DE ARRASTO/SUÇÃO; 2-TRANSBORDAMENTO; 3-JATO PROPULSOR. (RETIRADO DE BECKER ET AL., 2015).....	30
FIGURA 19- DIVISÃO DA PLUMA FORMADA NAS COMPONENTES DINÂMICA E PASSIVA. (RETIRADO DE TUINHOF, 2014).....	30
FIGURA 20- ESQUEMA CONCEPTUAL DA CONSTRUÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO. (RETIRADO DE DUARTE, 2005).....	36
FIGURA 21- ARQUITETURA DO FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DELFT3D. (RETIRADO DE DELFT FUNCTIONAL, 2014).....	40
FIGURA 22- BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO LIMA. (RETIRADO DE AZEVEDO, 2011).....	46
FIGURA 23- BARRAGEM DO ALTO LINDOSO VISTA DE JUSANTE. (RETIRADO DE GEOCACHING, 2012).....	48
FIGURA 24- BARRAGEM DO TOUVEDO VISTA DE JUSANTE. (RETIRADO DE AZEVEDO, 2011).....	48
FIGURA 25- VISTA AÉREA DA ZONA DA EMBOCADURA DO ESTUÁRIO DO RIO LIMA, COM A REPRESENTAÇÃO DAS DUAS PRINCIPAIS PONTES. (RETIRADO DE GOOGLE, 2020).....	49
FIGURA 26- PONTE SOBRE O RIO LIMA, NA ZONA DE LANHESES. (RETIRADO DE GOOGLE, 2020).....	49
FIGURA 27- ÍNSUAS DO RIO LIMA. (RETIRADO DE GARRANOS.PT, 2020).....	50
FIGURA 28- ROSA-DOS-VENTOS COM A PREDOMINÂNCIA DOS VENTOS NA COSTA PORTUGUESA ENTRE 1961 E 1990. (RETIRADO DE INSTITUTO HIDROGRÁFICO, 2005).....	54
FIGURA 29- ÁREA DE INTERVENÇÃO DAS OBRAS DE DRAGAGENS PREVISTAS PARA O ESTUÁRIO DO LIMA. (RETIRADO DE CONSULMAR, 2017).....	57
FIGURA 30- GRELHA DO MODELO, DESDE O AÇUDE DE PONTE DE LIMA ATÉ À FRONTEIRA OCEÂNICA.....	61
FIGURA 31- VISTA PARCIAL DA GRELHA EM QUE PODEMOS VER A FERRAMENTA <i>THIN DAM</i> REPRESENTAR AS ESTRUTURAS EXISTENTES.....	62
FIGURA 32- DADOS RELATIVOS ÀS PROFUNDIDADES DO ESTUÁRIO QUE SÃO DISPONIBILIZADOS PELA APVC. (ADAPTADO DE ADMINISTRAÇÃO DOS PORTOS DO DOURO, LEIXÕES E VIANA DO CASTELO, 2020).....	62
FIGURA 33- GRELHA DO MODELO COM ELEMENTOS <i>THIN DAM</i> E BATIMETRIA REPRESENTADOS.....	63
FIGURA 34- DEFINIÇÃO DOS SEDIMENTOS INCLUÍDOS NO MODELO.....	64
FIGURA 35- SUBMENU ONDE SÃO DEFINIDAS AS CARACTERÍSTICAS DAS FRONTEIRAS DO MODELO.....	65
FIGURA 36- CARACTERÍSTICAS DE UMA DAS DESCARGAS EFETUADAS NO PROCESSO DE SIMULAÇÃO DA PLUMA POR	

TRANSBORDAMENTO.	66
FIGURA 37 -VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NO DIA 19 DE MARÇO.....	67
FIGURA 38 -VARIAÇÃO DO NÍVEL DO MAR NO DIA 9 DE ABRIL.....	68
FIGURA 39 - LOCALIZAÇÃO DO PRIMEIRO E SEGUNDO PERCURSOS DA DRAGA SIMULADOS, RESPETIVAMENTE.....	74
FIGURA 40 - VISTA APROXIMADA DO 1º PERCURSO.....	74
FIGURA 41 - VISTA APROXIMADA DO 2º PERCURSO.....	75
FIGURA 42 - PROGRESSÃO DA MARÉ MORTA DO DIA 19 DE MARÇO. (RETIRADO DE TÁBUA DE MARÉS, 2020)	77
FIGURA 43 - PROGRESSÃO DA MARÉ VIVA DO DIA 9 DE ABRIL. (RETIRADO DE TÁBUA DE MARÉS, 2020)	78
FIGURA 44 - RESULTADOS DE EROÇÃO/SEDIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DO CAUDAL FLUVIAL NO BAIXO ESTUÁRIO E EMBOCADURA PARA AS SIMULAÇÕES S1, S3, S4, S5, S6 E S7.	81
FIGURA 45 - RESULTADOS DE EROÇÃO/SEDIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DO CAUDAL FLUVIAL EM LANHESES PARA AS SIMULAÇÕES S1, S3, S4, S5, S6 E S7.	82
FIGURA 46 - RESULTADOS DE EROÇÃO/SEDIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DA DIMENSÃO DOS SEDIMENTOS NO BAIXO ESTUÁRIO E EMBOCADURA PARA AS SIMULAÇÕES S2, S2.1, S4, S4.1, S6 E S6.1.....	84
FIGURA 47 - RESULTADOS DE EROÇÃO/SEDIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DA DIMENSÃO DOS SEDIMENTOS EM LANHESES, PARA AS SIMULAÇÕES S2, S2.1, S4, S4.1, S6 E S6.1.....	85
FIGURA 48 - RESULTADOS DE EROÇÃO/SEDIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS NA ENTRADA DE MONTANTE, NA ZONA DA EMBOCADURA, PARA AS SIMULAÇÕES S2, S2.2, S3, S3.2, S5 E S5.2.	87
FIGURA 49 - RESULTADOS DE EROÇÃO/SEDIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS NA ENTRADA DE MONTANTE, EM LANHESES, PARA AS SIMULAÇÕES S2, S2.2, S3, S3.2, S5 E S5.2.....	88
FIGURA 50 - RESULTADOS DE EROÇÃO/SEDIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE MARÉ, NA ZONA DA EMBOCADURA, PARA AS SIMULAÇÕES S2, S2.3, S3, S3.3, S5 E S5.3.....	89
FIGURA 51 - RESULTADOS DE EROÇÃO/SEDIMENTAÇÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE MARÉ, EM LANHESES, PARA AS SIMULAÇÕES S2, S2.3, S3, S3.3, S5 E S5.3.....	91
FIGURA 52 - PLUMA DE SILTE DEVIDO ÀS DESCARGAS POR TRANSBORDAMENTO NOS PONTOS DE COMPARAÇÃO 3 E 4 DAS SIMULAÇÕES 1 E 3.....	94
FIGURA 53 - PLUMA DE SILTE DEVIDO ÀS DESCARGAS POR TRANSBORDAMENTO NOS PONTOS DE COMPARAÇÃO 1 E 2 DAS SIMULAÇÕES 1 E 3.....	96
FIGURA 54 - PLUMA DE ARGILA DEVIDO ÀS DESCARGAS POR TRANSBORDAMENTO NOS PONTOS DE COMPARAÇÃO 3 E 4 DAS SIMULAÇÕES 1 E 3.....	97
FIGURA 55 - PLUMA DE ARGILA DEVIDO ÀS DESCARGAS POR TRANSBORDAMENTO NOS PONTOS DE COMPARAÇÃO 1 E 2 DAS SIMULAÇÕES 1 E 3.....	99
FIGURA 56 - PLUMA DE ARGILA DEVIDO ÀS DESCARGAS POR TRANSBORDAMENTO NOS INSTANTES DE COMPARAÇÃO 3 E 4 DAS SIMULAÇÕES 5 E 6.....	101
FIGURA 57 - PLUMA DE SILTE DEVIDO ÀS DESCARGAS POR TRANSBORDAMENTO NOS INSTANTES DE COMPARAÇÃO 1 E 2 DAS SIMULAÇÕES 5 E 6.....	102
FIGURA 58 - PLUMA DE ARGILA DEVIDO ÀS DESCARGAS POR TRANSBORDAMENTO NOS INSTANTES DE COMPARAÇÃO 3 E 4 DAS SIMULAÇÕES 5 E 6.....	103
FIGURA 59 - PLUMA DE ARGILA DEVIDO ÀS DESCARGAS POR TRANSBORDAMENTO NOS INSTANTES DE COMPARAÇÃO 1 E 2 DAS SIMULAÇÕES 5 E 6.....	105
FIGURA 60 - EVOLUÇÃO DA PLUMA DE SILTE DA SIMULAÇÃO DE DRAGAGEM 2, ATÉ ÀS 14 HORAS DO DIA 9 DE ABRIL.....	108
FIGURA 61 - CONTINUAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA PLUMA DE SILTE DA SIMULAÇÃO DE DRAGAGEM 2, ATÉ AO FINAL DA MESMA.	109
FIGURA 62 - EVOLUÇÃO DA PLUMA DE ARGILA DA SIMULAÇÃO DE DRAGAGEM 6, ATÉ ÀS 14 HORAS DO DIA 19 DE MARÇO.....	112
FIGURA 63 - CONTINUAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA PLUMA DE ARGILA DA SIMULAÇÃO DE DRAGAGEM 6, ATÉ AO FINAL DA MESMA.	113

Índice de Tabelas

TABELA 1- PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE RIOS E ESTUÁRIOS. (ADAPTADO DE DUARTE, 2005)	8
TABELA 2- PREVISÃO DO INSTITUTO HIDROGRÁFICO PARA O COMPORTAMENTO DA MARÉ NO PORTO DE VIANA DO CASTELO. (ADAPTADO DE CONSULMAR, 2017)	51
TABELA 3- CARACTERÍSTICAS DAS DRAGAGENS EFETUADAS NA ZONA DO ESTUÁRIO ENTRE OS ANOS DE 1988 E 2016. (ADAPTADO DE CONSULMAR, 2017)	58
TABELA 4- IDENTIFICAÇÃO DOS LOCAIS E RESPETIVA PROFUNDIDADE.	63
TABELA 5- CAUDAIS FLUVIAIS ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES, DESCARREGADOS PELA BARRAGEM DO TOUVEDO ENTRE 2000 E 2020.	68
TABELA 6- SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO ADOTADOS NO ESTUDO REALIZADO.	70
TABELA 7- DADOS SOBRE OS SEDIMENTOS QUE CONSTITUEM A MISTURA DRAGADA. (RETIRADO DE ENGINEERING TOOLBOX (2010) E YU ET AL., (1993))	71
TABELA 8- DADOS SOBRE A MISTURA DRAGADA COMO UM TODO.	71
TABELA 9- INFORMAÇÕES RELATIVAS À DRAGA UTILIZADA E À SUA PRODUÇÃO.	72
TABELA 10- PARÂMETROS E CARGA REFERENTE À PLUMA DINÂMICA.	72
TABELA 11- DADOS RELATIVOS À TRANSIÇÃO ENTRE PLUMA DINÂMICA E PLUMA PASSIVA.	73
TABELA 12- SIMULAÇÕES E RESPETIVAS CARACTERÍSTICAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO DA PLUMA POR TRANSBORDAMENTO.	76
TABELA 13- DADOS RECOLHIDOS SOBRE AS MARÉS DOS PERÍODOS SELECIONADOS.	77
TABELA 14- IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE COMPARAÇÃO ENTRE AS DUAS MARÉS.	78

Lista de símbolos e abreviaturas

APVC	Administração do Porto de Viana do Castelo
DQA	Diretiva Quadro da Água
EIA	Estudo de impacte ambiental
ENVC	Estaleiros Navais de Viana do Castelo
INAG	Instituto da Água
IST	Instituto Superior Técnico
MARETEC	Associada ao IST, Secção de Ambiente e Energia
NMM	Nível médio do mar
PBH	Plano de bacia hidrográfica
PGRH	Plano de gestão da Região Hidrográfica
POEPVC	Plano de Ordenamento e Expansão do Porto de Viana do Castelo
PROMAN	PROMAN, Centro de estudos e projectos S.A.
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
ZH	Zero hidrográfico

Capítulo 1
Introdução

1- Introdução

1.1- Enquadramento

A faixa do litoral portuguesa assume extrema importância a vários níveis, quer sociais quer económicos. Cerca de 75% da população portuguesa habita nesta zona que é, também, densamente povoada a nível de unidades industriais, devido às funcionalidades disponibilizadas pelo mar, rios, infraestruturas e aglomerados populacionais.

Todos estes fatores fazem com que a procura por espaços nestas regiões tenha aumentado nos últimos anos. Esta procura, que naturalmente se traduz numa sobrecarga de utilização de recursos, exige uma maior e melhor resposta por parte das entidades responsáveis pela sua gestão, que deverá assentar em princípios de prevenção de efeitos indesejáveis e preservação do meio ambiente.

Os estuários são ecossistemas muito dinâmicos, abrangendo a região de ligação entre os meios fluvial e marítimo. Os processos físicos que ocorrem nestes sistemas são, assim, condicionados pela dinâmica intrínseca dos meios fluviais e meios marinhos. Muitos desses processos só podem ser descritos de forma aproximada por leis físicas, assumindo a monitorização, por esta razão, uma especial importância.

Podemos também salientar a sua importância para a fauna e flora, devido às características da água doce transportadas pelo rio, que influencia os comportamentos das espécies marítimas que para ele se deslocam, além da sua relevância como meio recetor de efluentes, devido à capacidade de diluição e características que permitem o transporte desses efluentes até ao mar.

Esta sua importância está bem patente na DQA (Directiva Quadro da Água) (Parlamento Europeu, 2000). Este documento, que tem como objetivo a proteção das águas de superfície e subterrâneas da União Europeia, refere nas considerações prévias: “uma política da água eficaz e coerente deve ter em conta a vulnerabilidade dos ecossistemas localizados perto da costa e de estuários (...), pois o seu equilíbrio é fortemente influenciado pela qualidade das águas interiores que para eles afluem”.

Os estuários são muitas vezes utilizados como canais de navegação. Devido às suas características morfodinâmicas é usual verificar-se o assoreamento desses canais. Este assoreamento é mitigado através da execução de dragagens (Pinho et al., 2018). No entanto, as dragagens alteram bruscamente toda a atividade biológica que se desenvolve nos estuários, sendo por isso determinante prever os impactos antes da sua realização (Duarte & Vieira, 1997).

As obras de dragagem são necessárias para a criação de canais de navegação e também para a sua manutenção através da remoção do material que se vai depositando ao longo do tempo, permitindo manter a profundidade necessária à manutenção das condições de navegabilidade (Bray *et al.*, 1997

citado por Torres, 2000). Existem canais navegáveis que pela importância da respetiva rota em termos de tráfego marítimo, como o canal do Panamá, o canal da Mancha e o canal de Suez, requerem a execução de dragagens frequentes e eficientes em termos ambientais e morfodinâmicos.

Seria expectável uma maior disponibilidade de informação relativamente às operações de dragagem que são efetuadas no nosso país, devido à grande importância dos portos na economia nacional. No entanto, essa informação é ainda escassa. Um estudo realizado por Portela (2011), que incidiu sobre os nove principais portos comerciais do continente, permitiu concluir que o volume de dragagem nos referidos portos foi estimado em de cerca de 4,6 milhões de m³/ano (entre 1998 e 2007), sendo três quartos desse volume referentes a dragagens de manutenção. Sensivelmente 63% da percentagem total de obras de dragagem foram realizadas em canais interiores e bacias, sendo os restantes 37% respeitantes a operações em barras e zonas portuárias exteriores.

A utilização de tecnologias de informação e a necessidade de inovação são, atualmente, transversais a todas as áreas de conhecimento. Na engenharia civil, em particular no domínio da hidráulica e ambiente, a aplicação de ferramentas computacionais para resolver problemas complexos tem acompanhado o crescimento da capacidade de computação. Vários dos problemas que colocam maiores desafios na prática da engenharia civil relacionam-se com intervenções no meio marinho, requerendo análises de soluções que implicam uma avaliação da morfodinâmica estuarina ou costeira (Venâncio et al., 2019).

Acompanhando o ritmo da melhoria das ferramentas tecnológicas, é também notória a crescente importância da modelação e das ferramentas hidroinformáticas na definição e planeamento das obras de dragagem e gestão da orla costeira. As crescentes preocupações ligadas aos fatores ambientais e à escassez de recursos foram impulsionadoras do crescimento destas técnicas.

Um dos impactos associados à realização de obras de dragagem é a criação de uma pluma de sedimentos durante a realização da obra. Os sedimentos dragados, são muitas vezes depositados no próprio mar a alguma distância da zona de onde foram removidos. A pluma de sedimentos verifica-se não só durante a fase de deposição, mas também durante a fase de remoção e no decorrer do processo de transbordamento. Estes processos geram uma transformação do meio marinho, levando a alterações na zona de deposição, que incluem poluição por substâncias tóxicas que possam existir nos sedimentos e alteração da qualidade da água. A pluma formada por esta deposição depende diretamente das condições hidrodinâmicas do local.

O estudo da morfodinâmica estuarina e costeira assume especial importância no nosso país. Podemos referir que os problemas de erosão a sul dos principais portos do norte e centro são agravados pelas operações de dragagens que retiram sedimentos da deriva litoral (Pinho, 2014). Podemos também

recordar outros episódios, como a queda da ponte de Entre-os-Rios e os problemas de assoreamento da Marina do Parque das Nações, em Lisboa.

É assim oportuno e necessário trazer para a prática da engenharia relacionada com obras de dragagens as ferramentas tecnológicas mais avançadas para a simulação dos impactos das dragagens nos estuários.

1.2- Objetivos

Tendo em consideração o que foi referido anteriormente, o principal objetivo desta dissertação é a utilização de ferramentas hidroinformáticas, nomeadamente modelos numéricos, para avaliar a evolução da morfodinâmica em estuários que sejam submetidos a operações de dragagem.

Este objetivo inicial desdobra-se em duas temáticas diferentes, mas complementares. Numa primeira fase, foi analisada a evolução da batimetria do estuário do rio Lima, de acordo com vários cenários, sujeitos a diferentes condições, de modo a caracterizar a forma como este responde às diferentes condicionantes hidrológicas e sedimentares.

Posteriormente foi avaliado, no mesmo estuário, o impacto das dragagens realizadas com dragas auto-transportadoras, que recorrem ao processo de transbordamento para aumentar o seu rendimento, implicando esta metodologia a formação de uma pluma de sedimentos. Os objetivos específicos são:

- Caracterização das ações com maior influência na morfodinâmica dos estuários;
- Estudo das potencialidades das ferramentas hidroinformáticas para a simulação da morfodinâmica em estuários, com ênfase no programa Delft3D;
- Caracterização das operações de dragagens mais utilizadas, incluindo os equipamentos, as fontes sedimentares associadas e as estratégias de deposição;
- Aplicação de ferramentas de simulação para previsão da evolução da batimetria, de modo a monitorizar o assoreamento e necessidade de dragagens, e previsão da pluma de sedimentos formada em função do processo de transbordamento;
- Análise de sensibilidade dos resultados.

1.3- Organização da dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos.

O capítulo 1 diz respeito à introdução, onde é contextualizada a problemática que motivou o desenvolvimento desta dissertação, bem como os seus objetivos e organização.

O capítulo 2 apresenta uma pesquisa sobre os estuários e os processos que lhes conferem as suas características. É também abordada a temática das dragagens e dos processos a elas adjacentes. Por fim, a modelação hidroinformática é também analisada, bem como a apresentação das principais características do programa Delft3D.

O capítulo 3 introduz o caso de estudo, através de uma análise à bacia hidrográfica do rio Lima, ao seu estuário, às ações hidrodinâmicas e às operações de dragagens ali realizadas.

O capítulo 4 apresenta as etapas realizadas com vista a tornar o modelo numérico utilizado operacional e adequado ao caso de estudo e objetivos pretendidos.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos através das simulações efetuadas e a análise aos mesmos.

O capítulo 6 contém as principais conclusões que foram retiradas do trabalho realizado e apresenta sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte

2- Estado da arte

2.1- Estuários

Ao longo das últimas décadas do século passado e início do presente, diferentes autores apresentaram uma definição para o conceito de estuário (Pritchard, 1967; Day, 1980; Miranda et al., 2002).

Podemos referir a definição de Pritchard (1967) como a mais conhecida, que coloca a salinidade como o principal critério para delimitar a área pertencente ao estuário. No entanto, outros estudos e autores comprovaram que esta definição não é aceitável em todas as situações, devido às variações sazonais que o teor de salinidade de um estuário pode apresentar.

Apesar das sucessivas tentativas, as principais definições ainda não incluem parâmetros de qualidade da água dos estuários, no caso químicos e biológicos.

Podemos então, de um modo geral, definir o estuário como sendo o ecossistema que abrange a zona de transição entre os meios fluvial e marítimo. Temos dois meios hídricos distintos, e por isso, com processos físicos também eles diferentes. As dinâmicas dos dois meios intersejam-se, criando um meio único que pode ser descrito através de leis físicas aproximadas.

As várias componentes física, química, biológica e hidromorfológica criam um equilíbrio muito complexo e sensível a qualquer alteração (Comissão Europeia, 2011). Estas zonas são extremamente ricas a nível biológico, devido às características das águas trazidas pelos rios, fazendo com que se verifique uma grande diversidade de fauna e flora. A complexidade desta dinâmica aumenta a importância da sua monitorização.

Se por um lado sofrem alterações devido à sobrecarga introduzida pelos portos comerciais e unidades industriais adjacentes, podemos também referir a grande ocupação populacional das suas margens. Por outro lado, não podemos descurar os fatores naturais, tais como as marés, ondas, nível do mar e a salinidade. Aliados a estes fatores, temos a poluição e as emissões de gases de efeito estufa que provocam importantes alterações climáticas que são cada vez mais visíveis no comportamento estuarino.

De acordo com Comissão Europeia (2011), podemos enumerar uma série de atividades realizadas pelo Homem que colocam em risco a sustentabilidade destes ecossistemas:

- Operações de dragagem, que alteram os regimes de correntes do estuário;
- Descargas de efluentes domésticos, promovendo a eutrofização;
- Descargas de efluentes industriais, com altos teores de metais pesados;
- Contaminação causada por pesticidas usados em atividades agrícolas;

- Construção de infraestruturas ao longo do curso do rio, o que altera o natural transporte sedimentar e as concentrações de salinidade;
- Ocupação de zonas que albergam habitats de diferentes espécies, colocando em risco a diversidade destes ambientes.

2.1.1- Caracterização dos estuários

A DQA designa o estuário como “águas de transição”, fazendo a distinção entre “águas interiores” (rios e lagos) e “águas costeiras”.

É também importante traçar linhas que distingam um estuário de um rio. Na próxima tabela, temos as principais diferenças entre os dois meios.

Tabela 1- Principais diferenças entre rios e estuários. (Adaptado de Duarte, 2005)

Característica	Rio	Estuário
Variação da profundidade	Caudal	Maré
Secção transversal do escoamento	Dinâmica sedimentar	Dinâmica sedimentar, floculação e erosão do litoral
Salinidade da massa hídrica	Água doce	Água salobra e salgada
Entrada de poluentes	Escorrência pluvial	Escorrência pluvial e corrente de maré
Alteração na qualidade da água	A jusante da fonte poluidora	A montante e a jusante da fontes poluidora
Comunidade biológica	Biodiversidade limitada	Grande biodiversidade
Interações ecológicas (complexidade)	Pouco	Muito
Conhecimento dos efeitos ambientais da redução do caudal fluvial	Limitado	Muito limitado
Efeito de ocorrências passadas nas suas características físico-químicas	Moderado	Muito importante

Os estuários são divididos principalmente de acordo com o gradiente de salinidade, sendo naturalmente crescente para jusante. Numa zona mais interior podemos encontrar águas com salinidades muito baixas, em que a presença de água do mar é muito reduzida. Mais para jusante, teremos zonas em que as águas dos dois ambientes se interseam, o que aumenta fortemente o teor de sal da água. Esta variação depende sobretudo das correntes marítimas e da própria forma do estuário (Vieira & Pinho, 2010).

É referido em Delgado (2011) que podemos também classificar os estuários de acordo com a sua formação geomorfológica. Esta divisão foi proposta por Pritchard (1952) e contempla quatro grupos diferentes:

- Planície costeira- muito comuns em todo o mundo. Têm forma irregular e uma secção geralmente triangular. A sua inundação aconteceu mais rapidamente do que a sedimentação, tornando a sua forma muito parecida com a do vale do rio. Apresentam pouco transporte de sedimentos e são pouco profundos, não ultrapassando os 30 m de profundidade. Desenvolvem-se perpendicularmente à linha de costa;

- Fiorde - localizam-se sobretudo em latitudes elevadas, e formaram-se devido à ação do gelo. Caracterizam-se por elevadas profundidades, na ordem das centenas de metros, fundo rochoso sem deposição de sedimentos, forma estreita e taludes verticais. Podem-se criar condições anóxicas nas camadas de água mais profundas;

- Construído por barra - caracterizados por intensos processos sedimentológicos, que formam barras arenosas na sua entrada. Estão bastante suscetíveis à ação de agentes erosivos, libertando grandes quantidades de sedimentos. São sistemas rasos, com profundidades na ordem dos 20-30 m, e podem apresentar lagunas extensas no seu interior;

- Tectónicos - este grupo diz respeito aos restantes estuários que não se enquadram nos grupos anteriores, e geralmente são formados por outras vias, tais como falhas tectónicas, que podem levar a erupções vulcânicas, sismos e deslizamentos de terra. São característicos de zonas muito acidentadas.

Esta classificação encontra-se muito ligada à profundidade que cada estuário apresenta, o que tem influência nos tempos de retenção, na capacidade de mistura de diferentes águas, e consequentemente no tipo de organismos que aqui se desenvolvem.

O desenvolvimento morfodinâmico dos estuários pode também ser um critério diferenciador. Esta foi uma área investigada por Dalrymple et al., (1992), que teve em consideração as influências de fatores como o caudal do rio, as ondas e a maré, e permitiu chegar a uma distinção entre estuários e deltas.

Consoante o processo dominante, cada estuário deverá apresentar uma morfologia característica. No caso de termos uma situação em que a influência das ondas é mais notória, a boca do estuário será mais contraída, com a existência de barreiras formadas por sedimentos, tais como praias, dunas, deltas de marés e cabedelos.

Quando a maré é o fator mais notório, a embocadura apresenta uma forma mais alargada. A maré geralmente apresenta uma amplitude superior a 4 m, além de termos também uma progressão de deltas e extensas plataformas de maré.

Aqui importa ainda perceber se estamos na presença de um litoral transgressivo, em que o mar está a ganhar terreno em relação à costa, ou um litoral regressivo, que se está a desenvolver no sentido do mar (Delgado, 2011).

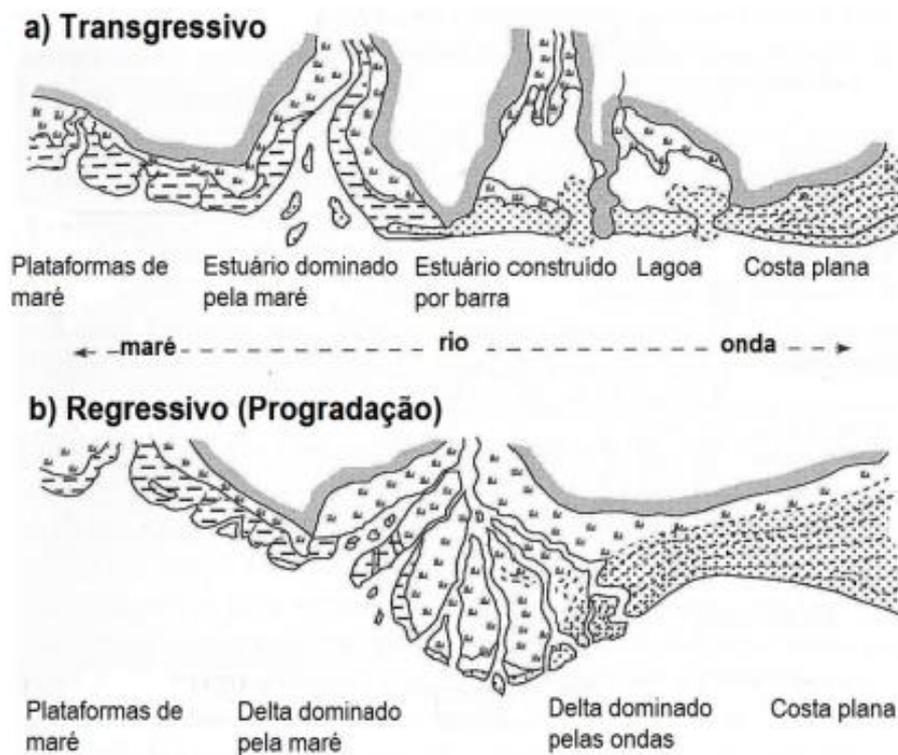


Figura 1- Influência relativa do rio, ondas e maré na evolução morfológica do ambiente costeiro: a) transgressivo; b) regressivo. (Body et al., 1992, retirado de Woodroffe, 2003)

Estas são apenas algumas das classificações existentes para a caracterização dos estuários.

Além da formação geomorfológica e do desenvolvimento morfodinâmico, poderíamos também referir as condições de mistura, a estratificação, a amplitude da maré, o tempo de retenção, e a suscetibilidade à eutrofização, bem como classificações desenvolvidas por alguns autores que apresentam uma mistura de critérios para categorizar os estuários.

Os objetivos presentes na DQA vieram trazer novas preocupações na classificação dos estuários e na caracterização do seu estado. Aqui a modelação numérica assume por isso um papel importante na monitorização e previsão do comportamento do ambiente estuarino.

2.2- Dinâmica estuarina

Os estuários são zonas dinâmicas em constante metamorfose, nesse sentido, importa estudar duas áreas fundamentais, a hidrodinâmica e a morfodinâmica. Serão agora apresentados os fenómenos naturais que conferem aos estuários as suas características.

2.2.1- Marés

As marés traduzem a variação do nível da água nos mares e zonas adjacentes, e são provocadas devido a forças gravitacionais entre as massas de água e os astros, sobretudo a Lua e o Sol.

O alinhamento destes dois elementos, bem como o padrão das marés no oceano e a batimetria são responsáveis pelas variações da amplitude e dos tempos das marés ao longo do tempo. Estas variações são representadas matematicamente por constituintes harmónicas, com amplitude, período e fase.

Apesar de não ser um fenómeno fácil de prever devido à configuração costeira e a fenómenos meteorológicos externos, é possível obter aproximações da relação entre a altitude lunar e o tempo de maré baixa ou alta, assim como os instantes de preia e baixa-mar.

A costa de Portugal é atingida por marés do tipo semidiurno regular ou normal, com duas baixas-mares e preia-mares a cada dia lunar, com uma propagação que apresenta o sentido sul-norte.

As preia-mares acontecem a cada meio-dia lunar, devido ao movimento de rotação da Lua em relação à Terra, que dura cerca de 12 horas e 25 minutos, e é representado pela constituinte lunar semidiurna (M₂). Entre cada preia e baixa-mar temos um espaço temporal de cerca de 6 horas e 13 minutos. No entanto, devido ao atraso do mar a reagir à passagem da Lua, em cada ponto do mar poderão ser verificadas demoras nas preia e baixa-mar.

Aqui entra também o contributo do Sol, que acaba por distorcer as variações das marés, fazendo com que a cada quinze dias tenhamos uma alternância entre maré viva e maré morta. A constituinte matemática que traduz este efeito é designada por solar semidiurna (S₂).

Na prática, quando o Sol e a Lua estão alinhados, o primeiro intensifica o efeito das marés, originando uma situação de maré viva - lua nova ou lua cheia.

Quando estão em posições perpendiculares, o Sol vai diminuir este efeito, provocando uma situação de maré morta, como podemos ver na Figura 2 (Carneiro, 2014).

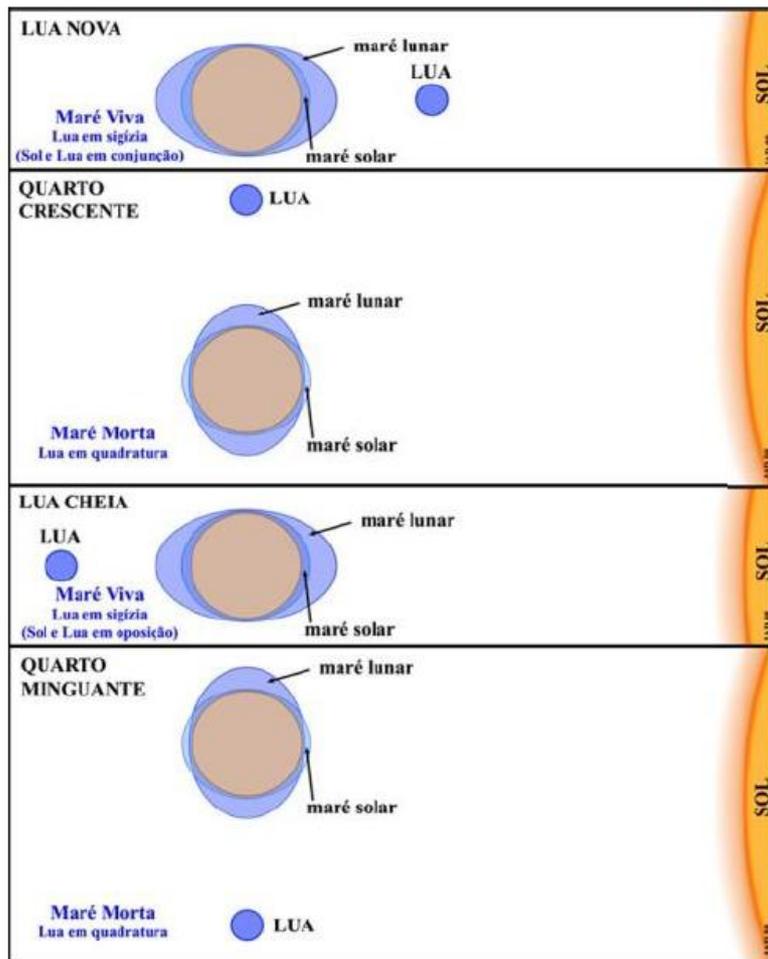


Figura 2- Alinhamento relativo entre a Terra, o Sol e a Lua. (Adaptado de ARPH, 2007)

2.2.2- Correntes

Se por um lado podemos definir a maré como o movimento vertical das partículas, podemos por outro definir como corrente de maré o movimento horizontal das mesmas.

Em alto mar, podemos considerar que a maré é constituída por movimentos circulares. Em estuários, devido à sua profundidade mais reduzida, podemos simplificar dizendo que a corrente de maré tem duas direções: enchente ou vazante; sendo que no instante em que há inversão do sentido da maré, a corrente é praticamente nula. Este fenómeno é conhecido como estofo de maré.

Alguns autores, como Stewart (2008), referem que a corrente de maré pode atingir velocidades na ordem dos 5 m/s em zonas costeiras, o que torna difícil a navegação e pode ainda ter inferência na batimetria do local, uma vez que velocidades deste nível têm a capacidade de colocar em suspensão os sedimentos depositados no fundo, mesmo em lugares com maior profundidade de água.

2.2.3- Ondas e ventos

As ondas são um dos elementos mais importantes no estudo do comportamento do mar, e podem ser interpretadas como as deformações ocorridas na superfície da água ou em profundidade, por conta do contacto das interfaces entre fluídos com massas volúmicas diferentes.

À superfície (ondas externas), as ondas são criadas devido às forças geradas pelo contacto entre o vento e a água, que se desenvolvem ao longo de quilómetros.

Tal como é referido em Pinho (2016), em profundidade teremos ondas internas, que são provocadas devido ao choque entre massas de água com diferentes propriedades, nomeadamente a sua massa volúmica.

Os períodos associados às ondas internas são significativamente superiores aos períodos das ondas externas.

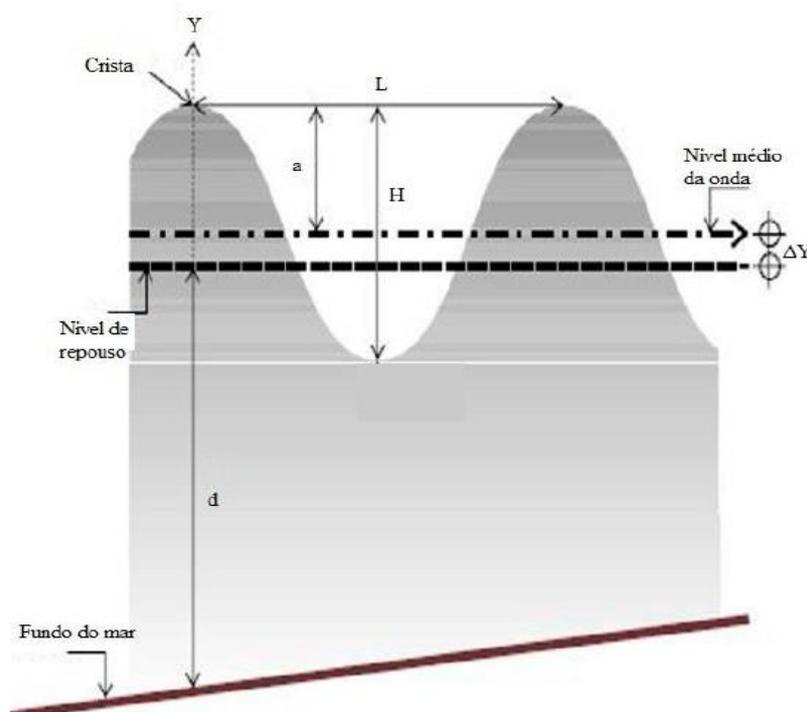


Figura 3- Parâmetros caracterizadores das ondas. (Perez, 2005, retirado de Carneiro, 2014)

Em primeiro lugar, necessitamos de três grandezas físicas elementares para descrever o meio onde se desenvolvem. A partir da altura (H), comprimento (L) e da profundidade de água (d), podemos calcular as relações H/L (declividade da onda); H/d (altura relativa) e d/L (profundidade relativa), que nos dizem se estamos na presença de águas profundas, águas de transição ou águas pouco profundas.

O tipo de águas em que as ondas se propagam determina os movimentos das partículas na coluna de água.

Em Carneiro (2014) podemos encontrar outros parâmetros que são fundamentais para podermos caracterizar as ondas, nomeadamente a amplitude de onda (A), o seu período (T), a frequência (f), a altura significativa (H_s) e a altura máxima (H_{max}).

A amplitude de onda é descrita como metade da sua altura.

O período representa o tempo entre uma sucessão de duas cristas, e tem uma frequência angular de 2π radianos. A frequência é o inverso do período de onda.

A altura significativa pode ser interpretada como a leitura visual da altura das ondas, e é calculada através da média do terço mais elevado das alturas de onda registadas.

A altura máxima, tal como o nome indica, corresponde à máxima altura de onda registada.

Os ventos são um dos principais intervenientes em vários processos que proporcionam à zona costeira a sua dinâmica, através da sua ação na formação das ondas e também das correntes. Nos estuários, os ventos têm o papel de gerar ondas que são responsáveis pelos processos de mistura. Caso estas ondas sejam de dimensão considerável, poderão gerar correntes dentro do próprio estuário, sendo este fenómeno chamado de maré meteorológica.

Caso não se verifiquem ventos com grande intensidade, a sua principal função passa pelo trabalho realizado na água, ou seja, uma tensão superficial. Esta tensão pode ser lida como a transferência de energia vertical para o plano horizontal.

Esta força é quantificada através da equação seguinte, que depende da massa volúmica do ar (ρ_a), da velocidade do vento medida a 10 m de altura (U_{10}) e também do coeficiente de atrito (C_D).

$$T = \rho_a * C_D * U_{10}^2 \quad (1)$$

2.2.4- Salinidade e Temperatura

Os oceanos apresentam uma salinidade que oscila entre os 30 e 35‰ (g/kg para condições específicas de temperatura e pressão), dependendo das condições meteorológicas do local, sobretudo as respeitantes à evaporação. Estes fatores, juntamente com as características hidrodinâmicas do local, fazem variar muito a salinidade dos estuários.

Na zona onde se faz a ligação das águas de ambos os meios, o valor pode chegar aos 35‰, passando para entre 4 a 8‰ na zona de máxima turvação, 1‰ na zona onde há um equilíbrio entre os dois meios (isoalina), e diminuindo naturalmente para valores <1‰ nas zonas em que apenas se verifica a presença de água do rio (Intituto de Biologia da Universidade Federal da Bahia, 2020).

De uma forma geral, todos os estudos referentes à temperatura das águas, tanto em oceanos como rios, afirmam que esta vai diminuindo quase uniformemente com a profundidade. Nesta “equação” entra uma outra variável, a latitude. Em locais que apresentam menor latitude, a variação da temperatura é mais elevada comparativamente a locais com maiores latitudes.

Para latitudes intermédias podemos também referir que, em baixas profundidades a variação da temperatura é mais reduzida. Este facto pode-se dever ao efeito do vento, criando uma denominada zona de mistura. A variação de temperatura aumenta bruscamente quando são atingidas profundidades consideráveis, sendo esta zona é considerada termoclina. Para profundidades na ordem do quilómetro, temos uma quase repetição do que acontecia em baixa profundidade, onde a variação da temperatura é muito lenta, estando em condições isotérmicas (Pinho, 2000).

Juntamente com a temperatura e a salinidade, a pressão hidrostática tem também influência na variação da massa volúmica da água. À medida que a profundidade aumenta, aumenta também a pressão e a massa volúmica. O aumento da salinidade faz também aumentar a massa volúmica da água, ao contrário da temperatura, que se comporta de forma inversa.

Por cada 10 m de profundidade, estima-se que a pressão hidrostática aumente 10^5 Pa. Esta variação dos níveis de pressão tornam o oceano estratificado. Além disto, a conjugação dos três fatores mencionados anteriormente cria as chamadas correntes termohalinas, que fazem que com que as águas menos densas ascendam para perto da superfície, ao contrário das águas mais densas, que se aproximam do fundo.

2.2.5- Produção, transporte e deposição de sedimentos

Duarte (2005) escreve no seu trabalho que o desgaste das rochas, que pode ser compreendido através do seu ciclo, é o maior fornecedor dos sedimentos presentes nas bacias hidrográficas. Através da chuva, vento, variações de temperatura e também da gravidade, os maciços rochosos vão sofrendo erosão e libertando sedimentos.

Por outro lado, as restantes componentes dos sedimentos presentes nas bacias hidrográficas são devido à erosão das margens e do fundo dos cursos de água, sedimentos provenientes do oceano, crescimento do fitoplâncton e excreção de microrganismos.

Estimar a produção deste material é um processo muito complexo, mas sabe-se que é durante o período de inverno que se acentuam estes fenómenos, sobretudo devido à ação das chuvas, que tanto provocam maior erosão nas rochas, como aumentam a intensidade das correntes que se verificam nos rios.

No entanto, a produção de sedimentos não se explica apenas através de fatores naturais. As crescentes demandas da população, através da massiva exploração agrícola e desflorestação, levam ao desaparecimento da vegetação que cobria os terrenos e albergava uma fonte de sedimentos. Esta vegetação não só tem o papel de fixar os sedimentos e evitar que cheguem aos cursos de água, como também de reduzir a velocidade de arrastamento dos mesmos.

Os principais tipos de sedimentos presentes em estuários são:

- Areia, em canais de navegação em contacto permanente com o mar;
- Argila/silte, em áreas urbanas e geralmente pouco profundas;
- Lodo (composta por argila), junto a encostas íngremes, ETARs, e em zonas de grande turvação associadas à intrusão da cunha salina.

Após haver o desprendimento do material, o principal responsável pelo seu transporte é a inclinação do terreno, a ação das chuvas e da gravidade. Aqui, a vegetação, caso exista, terá o efeito de retardar a chegada deste material ao curso de água.

Quando os sedimentos atingem o rio, estes podem ser transportados ao longo do mesmo em suspensão ou por rolamento. As partículas transportadas por suspensão são as de menor dimensão, e a capacidade de transporte do rio depende da intensidade da corrente e da turbulência.

Por outro lado, as partículas de maiores dimensões, como areias e seixos, são transportados por rolamento e arrastamento, e vão sofrendo erosão à medida que fazem a sua viagem pelo leito do rio. Estes materiais apresentam propriedades físicas que impedem a sua suspensão, sendo por isso encontrados com mais frequência a montante, uma vez que o rio não tem capacidade de arrastar estas partículas mais pesadas ao longo de todo o seu curso.

A jusante teremos então transporte maioritariamente em suspensão, que representa uma grande fatia do total da carga sólida presente nos rios. Esta grande percentagem ajuda também a explicar a elevada turvação que existe nos rios e estuários.

De realçar que, o modo de transporte depende das características da partícula e do escoamento, por isso a mesma partícula pode ser transportada de diferentes formas (Coelho, 2016).

A deposição dos sedimentos vai depender das características físicas e geométricas das partículas, bem como das características da corrente do rio e da maré. Como foi já referido, os sedimentos de maiores dimensões, por norma, depositam-se nas zonas mais a montante, ao contrário dos sedimentos considerados finos, que vão sofrer sedimentação em zonas mais próximas do estuário, podendo até ser arrastados para o oceano, caso a corrente tenha intensidade suficiente.

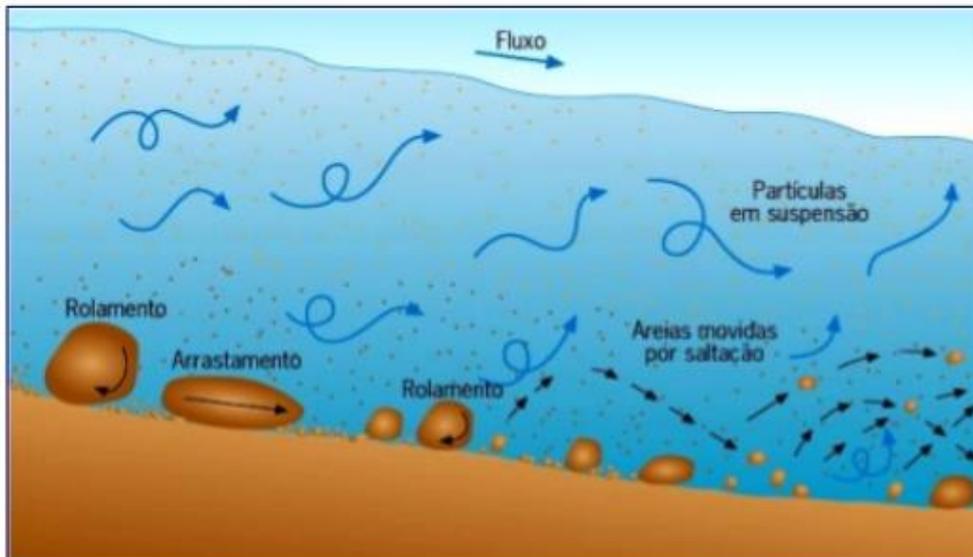


Figura 4- Tipos de transporte de sedimentos num rio.

Quando se verificam episódios meteorológicos extremos e a intensidade da corrente se torna elevada, é usual surgirem depósitos de sedimentos. Para a formação destes depósitos, é necessário que a corrente baixe consideravelmente e crie condições para a deposição dos materiais.

Estes depósitos de sedimentos, chamados aluviões, podem surgir nas zonas mais baixas e com menor inclinação dos rios, ou seja, nos estuários. Da mesma forma que se depositam materiais rochosos, em rios muito poluídos, pode também ocorrer a deposição de outro tipo de materiais, como lixo, proveniente da ação humana. Estes fenómenos, que diminuem a profundidade de água, são de vital importância para os estuários, uma vez que, tal como o estuário de Viana do Castelo, muitos servem como canal de navegação, e a passagem de embarcações fica condicionada por esta diminuição de profundidade.

2.3- Dragagens

Bray & Cohen (2010) definem dragagem como sendo o processo de extração de solo ou rocha, realizado debaixo de água, que decorre em três etapas: escavação, transporte e deposição ou reutilização do material removido. Para a realização das dragagens, é necessário conhecer a batimetria do local e a natureza dos materiais. A batimetria pode ser conhecida através de sondas acústicas, já os materiais que constituem o fundo são conhecidos através de métodos geológicos.

Este tipo de obras tem uma grande influência nas condições do meio aquático, por isso todos os seus parâmetros devem ser bem calculados, de modo a minimizar os seus efeitos nocivos, nomeadamente a nível da poluição e riscos para a vida marítima.

De acordo com Canelas (2012), as principais finalidades das dragagens são:

- Aumentar a profundidade de rios e canais, através da escavação de material submerso;
- Utilizar os materiais removidos para criação de aterros, alimentação de zonas balneares ou para fins de construção;
- Melhorar as condições do meio aquático.

Geralmente as dragagens são realizadas em barras, bacias de manobra e canais de acesso, pois são as zonas que necessitam de maiores profundidades e mais sujeitas a sofrerem de assoreamento. Qualquer dragagem é obrigatoriamente precedida de uma análise granulométrica dos sedimentos a ser dragados, bem como uma análise à sua qualidade.

2.3.1- Tipos de dragagem

Conceição (2016) refere que as dragagens podem ser divididas em três grupos: primeiro estabelecimento, manutenção, e recuperação ambiental.

As dragagens de primeiro estabelecimento são consideradas as dragagens mais complexas, uma vez que geralmente envolvem os maiores volumes de material a ser dragado. Podem ser necessárias na abertura de canais de navegação, criação de portos ou áreas destinadas a lazer ou comércio, alimentação de praias e mineração. Este tipo de dragagens é caracterizado por:

- Grandes volumes de material;
- Solos compactos;
- Camadas de solo intactas e com grande espessura.

As dragagens de manutenção são utilizadas para a manutenção das condições de navegabilidade dos canais de navegação e portos. A sua realização é periódica, devido aos constantes assoreamentos que se verificam nestas zonas. São caracterizadas por:

- Volumes variáveis de material;
- Solos com resistências variadas;
- Possível presença de contaminantes;
- Camadas com espessura mais reduzida;
- Pode ocorrer sedimentação durante a dragagem.

Já as dragagens de recuperação ambiental, partilham algumas características com as dragagens de manutenção, no entanto, o seu principal objetivo é o melhoramento ambiental de zonas contaminadas devido à ação humana. Com as crescentes preocupações da sociedade com a manutenção dos habitats, estas dragagens têm sido realizadas com mais frequência. As suas principais características são:

- Zonas de dragagem bem definidas, com volumes de material reduzido;
- Sedimentos muito contaminados;
- Requerem um planeamento mais cuidado devido à natureza do material dragado.

2.3.2- Tipos de dragas

As dragas existentes agrupam-se em dois tipos: mecânica e hidráulica. Cada um destes tem características diferentes, e por isso são utilizados em diferentes cenários.

A escolha entre dragagem mecânica ou hidráulica depende das características do local e do objetivo pretendido. A primeira opção requer um maior número de equipamentos, uma vez que as embarcações geralmente não são autónomas e precisam de uma plataforma adjacente, bem como uma outra embarcação para servir como depósito do material dragado, enquanto na dragagem hidráulica este material pode ser imediatamente despejado ou encaminhado através de tubagens para a zona de despejo.

No que diz respeito ao material, a dragagem mecânica é recomendada para a remoção de materiais de maiores dimensões, porque não possui uma capacidade seletiva. Já a dragagem hidráulica, através do poder de sucção, consegue definir com alguma exatidão quais os sedimentos a remover, nomeadamente sedimentos mais finos.

Por fim, ambos os tipos de dragagens apresentam também diferenças nos efeitos que produzem no escoamento, ao nível da suspensão de sedimentos. A dragagem hidráulica tem um impacto mais reduzido, devido à natureza do processo de remoção dos sedimentos, enquanto que a dragagem mecânica provoca grandes concentrações de sólidos em suspensão, o que pode acarretar problemas ambientais devido à presença de substâncias nocivas (Vlasblom, 2003).

2.3.3- Dragas mecânicas

As dragas mecânicas são:

- Draga de baldes- *Bucket dredger*;
- Draga com balde de maxilas- *Clamshell dredger*;
- Draga de retroescavadora- *Backhoe dredger*.

Este tipo de dragagem é utilizado para a remoção de cascalho, areia, ou outro tipo de materiais muito coesivos, como argila e silte com elevado grau de coesividade.

O material é escavado diretamente através da aplicação de uma força mecânica, independentemente do tipo de sedimento.

As dragas de baldes (*Bucket dredger*) possuem uma corrente fechada com uma série de baldes numa esteira, que se enchem de sedimento que é depois elevado e depositado na própria embarcação ou numa adjacente.

No entanto, este tipo de dragagem tem vindo a perder utilização, devido à sua baixa taxa de rendimento, bem como a problemas ligados à sua manutenção, por ser necessária a utilização de âncoras.



Figura 5- Draga de balde em operação. (Retirado de IADC, 2020a)

As dragas com balde de maxilas (*Clamshell dredger*) são muito utilizadas na América do Norte. Este é um equipamento geralmente estacionário, que pode ou não possuir propulsores. O processo de dragagem é realizado através de uma grua giratória, que tem na sua extremidade um recipiente em forma de maxila, que é introduzido no fundo do mar, e ao fechar, traz consigo os sedimentos a ser dragados.

Estas embarcações necessitam também de ser atracadas para garantir a sua estabilidade, seja através de estacas ou de âncoras. A sua capacidade de remoção é medida através do volume do recipiente que se encontra na extremidade, que é manobrado por cilindros hidráulicos ou por cabos.

A maior draga deste tipo possui um balde com uma capacidade de 200 m³ e uma profundidade de dragagem na ordem dos 48 m.

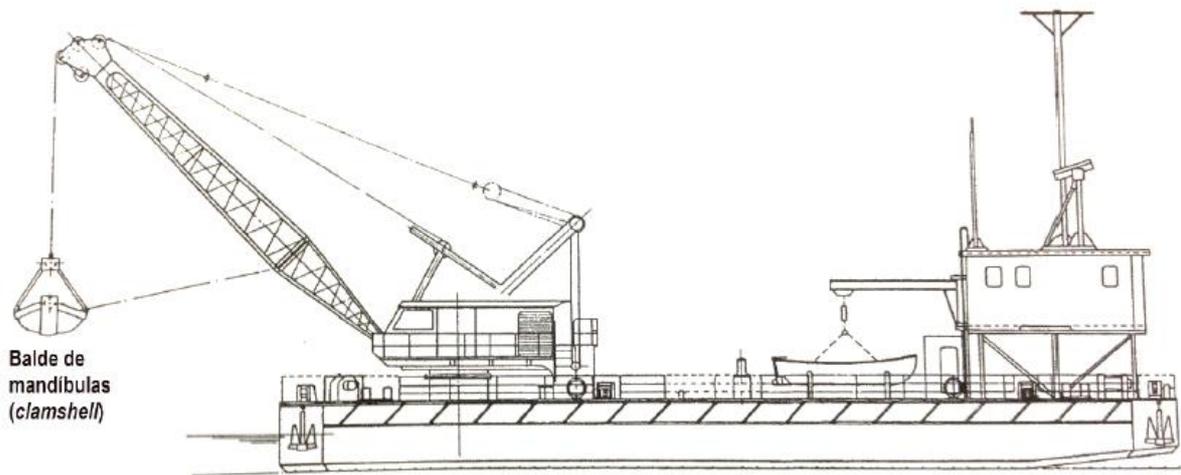


Figura 6- Representação esquemática de uma draga com balde de maxilas. (Retirado de Bray et al., 1996)

As dragas de retroescavadora (*Backhoe dredger*), tal como o nome indica, possuem um braço articulado com uma escavadora hidráulica na extremidade, que fica apoiada num pontão. Caso o movimento de remoção seja feito no sentido da plataforma, teremos uma “*backhoe dredger*”, apresentada na Figura 7; no caso contrário, a draga terá o nome de “*front shovel/ dripper dredger*”, como está apresentado na Figura 8.

Necessitam de ser ancoradas por um sistema composto por três estacas, como pode ser visto na Figura 9, e também de uma outra embarcação que armazena e transporta o material dragado para o local destinado à sua deposição.

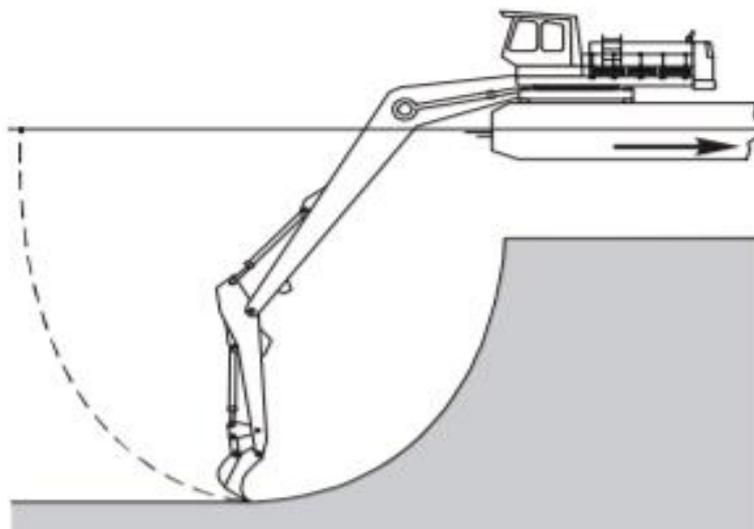


Figura 7- *Backhoe dredger*. (Retirado de Vlasblom, 2003)

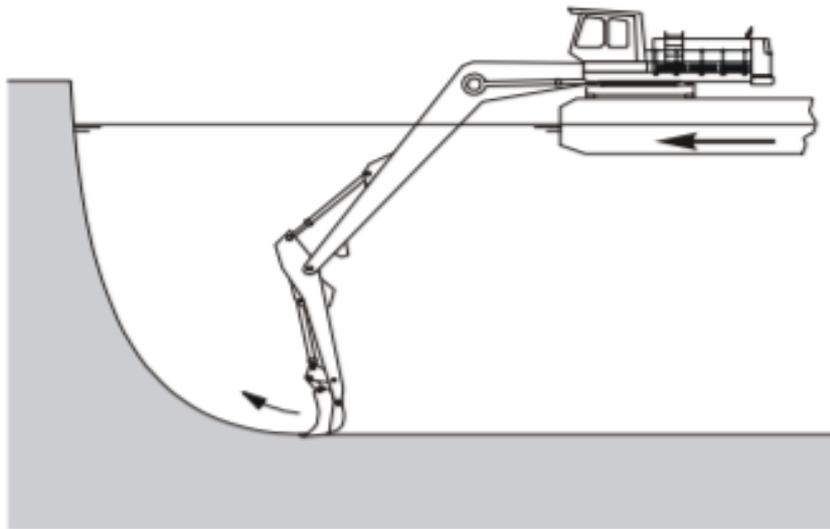


Figura 8- *Front shovel/dipper dredger.* (Retirado de Vlasblom, 2003)



Figura 9- *Draga de retroescavadora.* (Retirado de Offshore Industry and Technology Journal, 2017)

2.3.4- Dragas hidráulicas

As dragas hidráulicas são:

- Dragas de sucção com desagregadores- *Cutter suction dredger*,
- Dragas auto-transportadoras- *Trailing suction hopper dredger*.

Estes tipos de dragagens são mais recomendados para remoção de materiais pouco consolidados, sendo constituídos maioritariamente por areia e silte e é atualmente o tipo de dragagens mais utilizado à escala global.

A sua operação é feita por bombas hidráulicas que através da sucção removem a mistura de água e sedimentos. Esta remoção pode ser feita diretamente, ou auxiliada por jatos de água incluídos nas extremidades dos tubos, que desagregam o material depositado no fundo para ser removido na fase seguinte.

A desagregação do material pode ser também feita através de corte. Os mesmos tubos que vão extrair a mistura, por vezes estão também equipados com lâminas que libertam material com um grau de consolidação mais elevado, para ser em seguida recolhido.

As dragas hidráulicas podem operar em linha reta ou em arco, dependendo do tipo de dragagem utilizado. Qualquer que seja o processo, arrasta consigo grandes quantidades de água juntamente com o sedimento, o que compromete a eficácia do trabalho. Por este motivo, tiveram de ser adotadas soluções para melhorar a produtividade da dragagem hidráulica (Torres, 2000). Uma dessas soluções foi o transbordamento, que será abordado mais à frente.

As dragas de sucção com desagregadores (*Cutter suction dredger*) são embarcações que podem ser autónomas ou não e possuem uma cabeça rotativa que desagrega o material. Esta cabeça descreve uma trajetória em arco, sendo controlada por um sistema de cabos e âncoras.

O avanço horizontal é controlado pelas estacas que a embarcação possui na traseira, que fornecem também estabilidade a toda a embarcação. Após o material ser desassociado, o tubo de aspiração adjacente à ferramenta de corte vai conduzir os sedimentos por tubagens flutuantes até à zona de deposição.

Estas dragas apresentam a versatilidade de poderem também ser utilizadas em solos rochosos, devido à capacidade da cabeça rotativa que possuem, e são por isso um dos tipos de dragagem hidráulica mais utilizado.

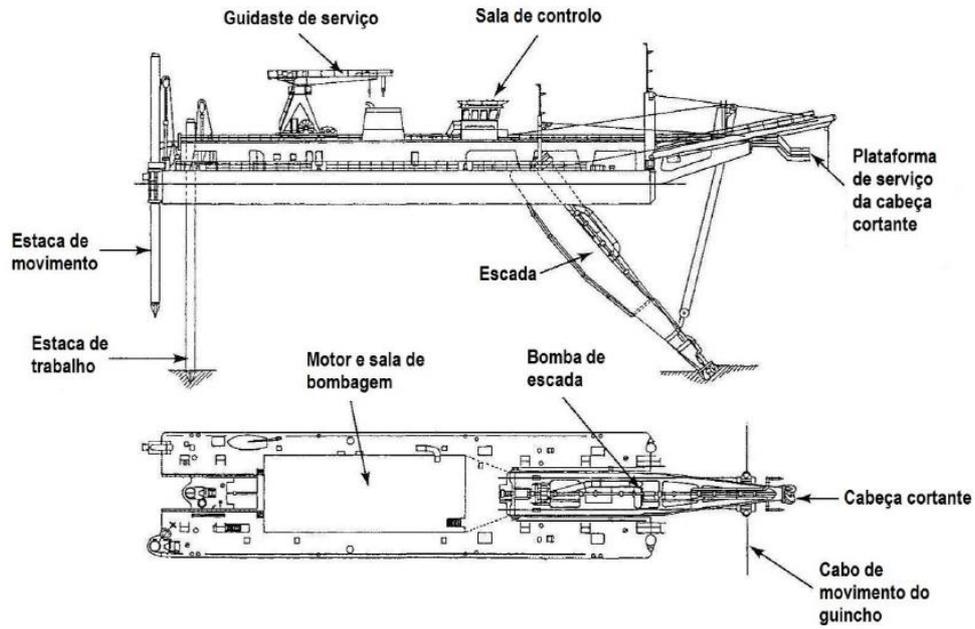


Figura 10- Planta e perfil de uma draga de sucção com desagregador. (Adaptado de Bray et al. 1997 e retirado de Conceição, 2016)



Figura 11- Vista frontal de uma draga de sucção com desagregador. (Retirado de Marine Insight, 2020)

As dragas de sucção podem não possuir desagregadores. O seu processo de funcionamento mantém-se, apenas com a exceção de que na extremidade apenas se encontra o tubo de sucção, não tendo a embarcação a capacidade de fragmentar o solo, o que pode ser favorável em leitos mais instáveis. São usados jatos de água para facilitar o processo de remoção.



Figura 12- Outro exemplar de uma draga de sucção com desagregador. (Retirado de Boskalis, 2020a)

No que diz respeito às dragas auto-transportadoras (*TSHD-Trailing Suction Hopper Dredger*), são embarcações totalmente autónomas, que por isso dispõem de plataformas adicionais. Estas estão equipadas com um ou dois braços articulados que possuem na extremidade aspiradores que são colocados junto ao leito, e removem os sedimentos, juntamente com água. Esta mistura percorre a tubagem e é encaminhada para um reservatório que existe na própria embarcação.

Este tipo de embarcação está entre os mais versáteis, visto que consegue abranger um grande leque de materiais e a sua autonomia dispensa o uso de equipamentos adicionais, uma vez que conseguem dragar e em seguida armazenar os sedimentos dragados. Estas qualidades tornam as dragas auto-transportadoras uma solução atrativa para a alimentação artificial de praias.



Figura 13- Draga auto-transportadora em funcionamento, com os braços de aspiração no leito do mar. (Retirado de Confluence, 2020)

Naturalmente, a capacidade de dragagem está condicionada pelo volume disponível no reservatório. Uma vez que a capacidade máxima é atingida, a draga tem a possibilidade de se deslocar até ao local do depósito dos sedimentos e devolvê-los ao meio aquático, através de uma técnica chamada “*rainbowing*”, que consiste no lançamento da mistura diretamente para o ar, como podemos ver na Figura 15.

Adicionalmente, este tipo de draga possui outras alternativas para rejeitar o material que recolheu:

- Pode ser acoplado um tubo, pelo qual é bombeada a mistura dragada até ao local desejado, sendo esta prática usada sobretudo para alimentação de praias;
- O depósito onde é armazenada a mistura possui comportas na zona inferior, que podem ser abertas, libertando o seu conteúdo diretamente no local.



Figura 14- Na extremidade esquerda da figura podemos ver um dos braços de aspiração da draga auto-transportadora na sua posição inicial; na extremidade direita podemos ver o local por onde é realizada a operação de *rainbowing*. (Retirado de Jan de Nul, 2020)



Figura 15- Dragagem auto-transportadora a devolver o material dragado através de *rainbowing*. (Retirado de Boskalis, 2020b)

2.3.5- Transbordamento

No seu processo de funcionamento, as dragas auto-transportadoras recolhem água juntamente com o sedimento. Isto faz com que os reservatórios fiquem rapidamente preenchidos com grandes quantidades de água, o que diminui o rendimento do processo. Por este motivo, a indústria procurou soluções para aumentar o rendimento das dragagens. A solução foi o sistema de transbordamento.

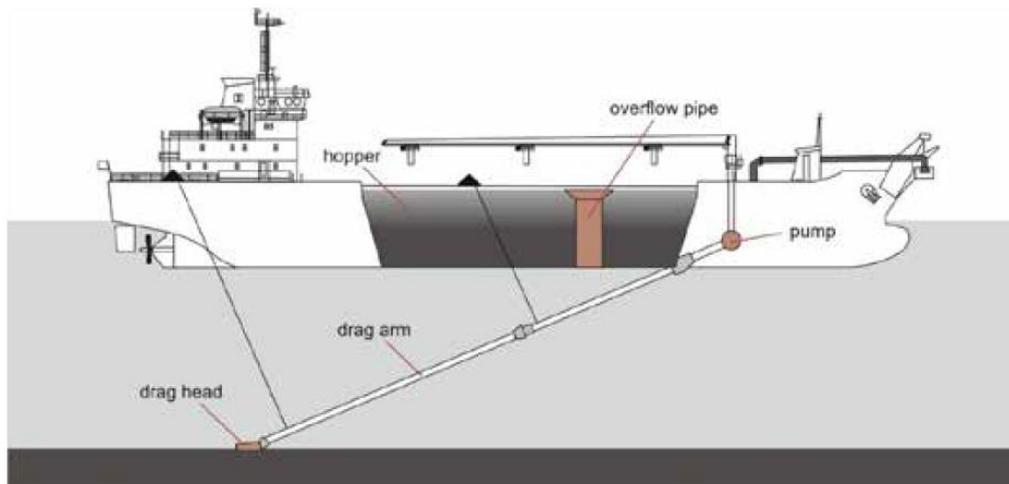


Figura 16- Draga auto-transportadora. (Retirado de Kemps & Mills, 2016)

A partir do momento em que a capacidade máxima do reservatório é atingida, o transbordamento inicia-se. Este processo consiste na remoção maioritariamente de água que se encontra no reservatório, sendo libertada de volta para o meio hídrico. Juntamente com a água em excesso, são rejeitados sedimentos finos e bolhas de ar, formadas devido às grandes velocidades do fluido. A deposição dos sedimentos finos que estão presentes nas massas de água libertadas por transbordamento é impedida de se realizar devido à turbulência que existe no local, provocada pelas bolhas de ar que ascendem à superfície.

Caso não seja utilizada esta técnica, o reservatório transporta geralmente 10% de sedimentos mais densos e 90% de água, o que aumenta consideravelmente o custo da operação.



Figura 17- Dispositivo responsável pela remoção da mistura água + sedimento por transbordamento. (Retirado de Royal IHC, 2020b)

No entanto, devido ao facto do transbordamento arrastar consigo uma grande quantidade de sedimentos finos, pode também ter algumas desvantagens nas zonas adjacentes à embarcação, tais como a diminuição do oxigénio dissolvido, o aumento da turvação através da formação de plumas, e o aumento da quantidade de nutrientes (Civil engineering portal, 2020).

Neste sentido, foram desenvolvidas melhorias nos sistemas de transbordamento, como refere Parijs (2009). De modo a otimizar o processo, a estratégia seria evitar a formação de bolhas de ar, através da manutenção de um nível de água ótimo.

Com esta melhoria, a menor turbulência faz com que os sedimentos finos tenham condições mais favoráveis para o seu processo de deposição, e quando os propulsores entram em contacto com a massa de água que foi libertada, a maior parte dos sedimentos já se encontra longe do seu campo de ação, diminuindo assim a área atingida pela pluma.

Esta melhoria é controlada por válvulas operadas por softwares especializados, dispensando a monitorização manual por parte dos trabalhadores.

2.3.6- Pluma formada pelas descargas por transbordamento

As dragas auto-transportadoras produzem plumas através de várias formas, estando representadas na Figura 18. Podemos enumerar a pluma formada pela cabeça de arrasto/sucção que se encontra em contacto com o fundo do mar (1), a pluma provocada pelas descargas por transbordamento (2) e a pluma formada no fundo do mar pela turbulência do jato propulsor da embarcação (3).

A pluma provocada pelas descargas por transbordamento é sem dúvida uma das principais responsáveis pelas plumas de sedimentos suspensos que se criam nas atividades de dragagem.

Para quantificar as dimensões desta pluma são necessárias uma série de informações acerca da embarcação em si, bem como dos sedimentos a dragar e das condições hidrodinâmicas do local.

A draga inicia o processo de remoção de sedimentos, até ao momento em que o nível de transbordamento do seu reservatório é atingido. Neste instante entra em funcionamento o mecanismo de descarga, libertando a mistura de água com sedimento, e conseqüentemente diminuindo o volume ocupado no reservatório.

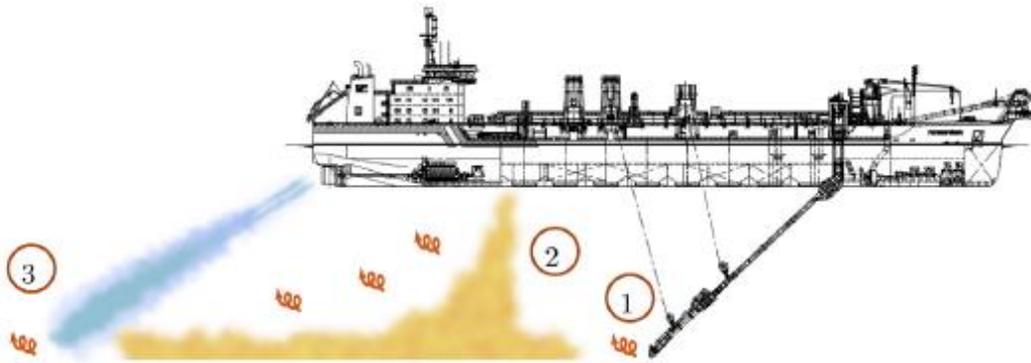


Figura 18- Elementos responsáveis pela produção de plumas em dragas auto-transportadoras: 1- cabeça de arrasto/sucção; 2-transbordamento; 3-jato propulsor. (Retirado de Becker et al., 2015)

Esta mistura tem características diferentes daquela que é retirada do leito do mar. O tempo necessário para encher o reservatório permite que ocorra deposição dos sedimentos mais grosseiros, geralmente areias. Deste modo, a mistura libertada por transbordamento é constituída sobretudo por sedimentos finos, como siltes e argilas (Tuinhof, 2014).

Por regra, quanto menor a dimensão do sedimento, maior será a turvação. Isto significa que misturas formadas maioritariamente por compostos siltosos darão origem a plumas maiores e mais visíveis.

A pluma formada pode ser dividida em pluma dinâmica e pluma passiva. A pluma dinâmica refere-se à massa de água e sedimento que é descarregada por transbordamento e vai depositar no fundo do mar. As condições em que é feita a descarga tornam o processo de simulação mais complexo.

Os principais fatores que limitam esta simulação são o arrastamento da água corrente na pluma, a interação entre a pluma e a corrente, a presença de ar na mistura, o papel do jato propulsor, e a interferência da forma da embarcação no desenvolvimento da corrente (Becker, 2011).

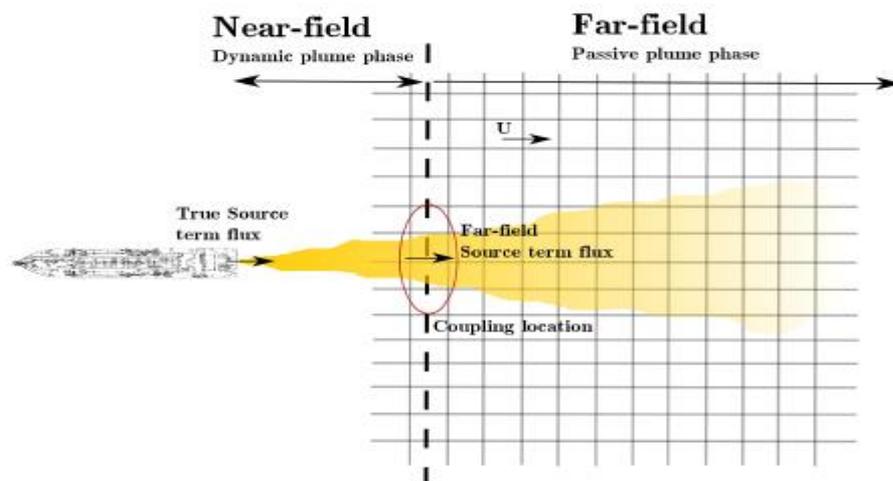


Figura 19- Divisão da pluma formada nas componentes dinâmica e passiva. (Retirado de Tuinhof, 2014)

A pluma passiva resulta da interação entre a pluma dinâmica e o meio ambiente onde se desenvolve. Uma parte dos sedimentos existentes na pluma dinâmica vão entrar em contacto com a massa de água adjacente, criando a pluma passiva. Esta ligação vai se processar em função de aspetos como a densidade da mistura libertada e do meio recetor, e também do efeito da corrente.

Adicionalmente, é também criada uma pluma de superfície, menos significativa, que diz respeito aos sedimentos que não se depositam imediatamente, e está diretamente ligada à quantidade de bolhas de ar envolvidas no processo de transbordamento.

Com o passar do tempo, os efeitos da corrente e a sedimentação farão com que a pluma perca expressão.

Esta divisão facilita a monitorização das plumas, mas na realidade são dois fenómenos que não podem ser observados independentemente. Os principais processos físicos envolvidos na pluma passiva são a advecção e difusão, propriedades do meio aquático. A pluma dinâmica será regida por estes processos, bem como pelas características do sedimento (Becker, 2011).

Spearman et al. (2011) desenvolveram um *software* focado nas plumas geradas por dragas auto-transportadoras. Este *software*, designado TASS (*Turbidity Assessment Software*) inclui um modelo para o transbordamento, para a pluma dinâmica e para a pluma passiva, bem como as relações entre si.

O modelo da pluma passiva é composto pela pluma de superfície, a porção da pluma dinâmica que se transforma em pluma passiva, e a pluma formada pela erosão no fundo devido à turbulência provocada pelo jato propulsor. Nesta dissertação apenas será levado em consideração a porção da pluma dinâmica que se transforma em pluma passiva.

Os resultados da aplicação do *software* permitiram retirar conclusões satisfatórias, tais como de que a pluma passiva representa entre 5 e 15% da pluma dinâmica. Esta conclusão foi obtida a partir da relação entre a quantidade de sedimentos finos libertados e a quantidade dos mesmos sedimentos depositados nas imediações da embarcação, representativos da pluma dinâmica.

A pluma dinâmica é assim limitada à zona adjacente da embarcação (*near-field*) e a pluma passiva pode ser observada numa zona mais afastada (*far-field*).

O programa Delft3D apenas pode ser utilizado para simular plumas de sedimentos em *far-field*, através da fundamentação numérica das equações de movimento e continuidade, e dos fenómenos de advecção e difusão.

Devido à complexidade associada ao comportamento das plumas dinâmicas, foram desenvolvidos métodos para estimar os impactos da pluma passiva no meio a dragar, uma vez que os processos que a caracterizam são menos complexos, e os fenómenos associados à mesma são já mais conhecidos na comunidade científica.

No local, o processo mais comum passa por retirar amostras de água perto do descarregador de transbordamento, e conhecendo-se o caudal descarregado, é possível determinar a carga de sedimento que é libertada para o meio recetor. Este método parte do princípio de que o caudal de descarga é igual ao caudal das bombas que removem os sedimentos.

Na secção 4.3.1 será apresentada a metodologia de cálculo das descargas por transbordamento.

2.3.7- Alterações provocadas pelas dragagens

Idealmente, a entidade que realiza dragagens, tem como finalidade que as operações produzam um efeito positivo, no entanto, estas podem trazer efeitos nefastos para o equilíbrio do meio onde decorrem. Por este motivo, o seu estudo prévio assume especial importância.

Para ser possível determinar os efeitos da operação, temos de ter em atenção o tipo de escavação, a forma de transporte do material dragado e se esse material vai ser recolocado num ambiente *on-shore* ou *off-shore*.

Numa perspetiva mais ecológica, os efeitos também podem ter diferentes durações, podendo ser dissipados a curto prazo, ou deixando marcas por longos períodos.

Os principais efeitos negativos das obras de dragagem estão relacionados com: interferência com o tráfego marítimo; ruído da operação; suspensão de sedimentos e turvação; erosão costeira; alteração das condições hidrológicas do local de dragagem e de despejo; poluição devido a substâncias nocivas existentes no material dragado e alteração dos habitats:

- Interferência com o tráfego marítimo- no caso de termos dragas estacionárias e também tubagens flutuantes, o tráfego marítimo pode ficar obstruído, levando a congestionamentos no bom funcionamento dos portos. Este problema, apesar de ser de curta duração, pode ser ultrapassado optando por outro tipo de draga, assim como outro tipo de transporte do material dragado.

- Ruído da operação- aqui podemos referir as dragas de baldes, que são o equipamento mais ruidoso de todos. O tipo de material dragado também tem um papel importante nesta vertente, assim como o período do dia em que a escavação é realizada.

- Suspensão de sedimentos e turvação- esta é sem dúvida a alteração mais preocupante associada às dragagens. É sabido que nos locais em que são realizadas dragagens, verifica-se um exponencial aumento da concentração de sólidos em suspensão, o que pode potencialmente acarretar uma série de impactos ambientais. Não só porque podemos ter substâncias perigosas no leito do mar/rio, bem como a turvação impede a passagem da luz solar, o que tem uma influência direta sobre

os seres vivos que habitam neste meio. Por outro lado, isto provoca também alterações nos níveis de oxigénio dissolvido, algo que pode ser fatal para os ecossistemas.

- Erosão costeira- a alteração da batimetria dos locais onde são realizadas as dragagens produz também efeitos no regime hidrodinâmico, o que pode levar ao aumento da erosão costeira. Geralmente, as zonas dragadas tendem a sofrer assoreamento a curto ou médio prazo, surgindo a necessidade de serem realizadas novas dragagens. Os sedimentos fluviais são muitas vezes responsáveis pelo preenchimento das zonas dragadas, impedindo o seu curso natural até ao litoral, e contribuindo para o recuo da linha da costa (de Castro & de Almeida, 2012).

- Alteração das condições hidrológicas do local de dragagem e de despejo- a alteração da batimetria provoca necessariamente mudanças ao nível do escoamento e dos processos sedimentológicos. Consequentemente, também os padrões de circulação e mistura da água vão sofrer alterações, tendo também interferência na salinidade da massa hídrica, tornando o meio mais fluvial ou mais marítimo.

- Poluição devido a substâncias nocivas existentes no material dragado- devido à maquinaria utilizada e à passagem de navios, as zonas adjacentes aos portos são geralmente locais muito poluídos. Devido a estes e outros fatores, os sedimentos que vão ser dragados, podem conter substâncias potencialmente nocivas. A sua movimentação acaba por colocar muitas dessas substâncias em suspensão, o que altera a qualidade da água e pode colocar em risco os habitats da fauna e flora aquática existentes.

Os efeitos provenientes das substâncias nocivas presentes no material dragado devem ser tratados de forma distinta. No caso de termos zonas estagnadas, com pouca renovação hídrica, os efeitos são praticamente imediatos. No caso de as dragagens serem realizadas em zonas com correntes elevadas e ondulações fortes, o seu efeito não é localizado, e por isso requer uma atenção especial, pois pode-se cair no erro de julgar a intervenção inócua (Conceição, 2016).

- Alteração dos habitats- caso as dragagens sejam realizadas em ecossistemas sensíveis, estas podem ter efeitos irreversíveis nas condições dos habitats, tal como é o caso dos corais, que são espécies muito frágeis e de crescimento lento.

No entanto, mais recentemente, as dragagens têm vindo também a ser utilizadas como forma de melhorar as condições do meio marítimo, nomeadamente dos habitats da fauna e flora, e na crescente preocupação com o estado de conservação das praias.

Podemos assim enumerar alguns efeitos benéficos ligados às dragagens, tais como a limpeza de zonas contaminadas e alimentação de praias:

- Limpeza de zonas contaminadas- quando as autoridades responsáveis localizam uma zona particularmente contaminada, algumas medidas podem ser tomadas. Os sedimentos podem ser limpos através de dragagens cuidadosas com pouco impacto no meio marinho, e serem depois libertados para o meio. Caso esta opção não seja possível, estes podem ser “cobertos” com materiais que impeçam o seu efeito nefasto de se manifestar (Simões, 2009).

- Alimentação de praias- tendo em conta os crescentes avanços da linha do mar em relação à costa, as dragagens são um meio muito utilizado para atrasar um pouco este avanço. Mesmo quando temos dragados que não apresentam as melhores condições, estes podem ser libertados a distâncias consideradas seguras das zonas com presença humana. Esta acaba por ser uma alternativa que complementa a utilização de esporões, e por isso ambas devem ser planeadas em conjunto.

Esta prática pode ser realizada de várias formas, com vários transportes e com diferentes tipos de dragagem. Tornou-se muito comum nas últimas décadas no nosso país, especialmente na zona do Algarve. De entre as várias intervenções que podemos encontrar em Pinto et al. (2018), salienta-se uma obra de destaque, realizada entre os anos de 2007 e 2014 nas praias da Costa da Caparica, onde foram movimentados cerca de 3,5 milhões de m³ de areia, provenientes de dragagens realizadas no canal da barra sul do Tejo.

Todos estes efeitos, sejam eles benéficos ou perversos para o meio ambiente, dependem de uma capacidade de planeamento que as autarquias e a gestão dos portos devem apresentar. O crescente aumento das zonas urbanas provoca uma pressão cada vez maior sobre o litoral, sendo por isso fundamental que as entidades responsáveis estejam à altura do desafio e consigam minimizar ao máximo os impactos da ação humana.

Neste sentido, as dragagens, quando bem planeadas, podem ser uma ferramenta importante não só para atingir os interesses económicos da indústria marítima, como para aumentar a qualidade de vida da população através do melhoramento das condições do litoral.

2.4- Modelação hidroinformática

De acordo com Duarte & Vieira (1997), 60% das grandes cidades existentes no nosso planeta estão localizadas em zonas próximas a estuários, fazendo com que estas sejam as mais valiosas e apetecíveis para a população.

Por outro lado, tanto o ambiente costeiro como o ambiente fluvial são caracterizados por uma série de processos complexos e de difícil previsão, conferindo à monitorização dos estuários um papel relevante.

A modelação física dos estuários tem vindo a cair em desuso, visto que apesar de conseguir bons resultados ao nível da morfologia, não consegue replicar outro tipo de processos ligados à qualidade da água, uma temática cada vez mais importante. Por outro lado, esta estratégia é morosa e apresenta elevados custos (Duarte, 2005).

Simultaneamente, nas últimas décadas as ferramentas tecnológicas registaram melhorias significativas, e o ramo da hidráulica teve naturalmente de acompanhar esta evolução. Surgiu assim o domínio da hidroinformática. Esta é uma ferramenta integradora que permite analisar, simular e prever o complexo comportamento dos ambientes costeiros, tendo como benefício ganhos significativos ao nível do tempo, custo e fiabilidade dos resultados.

A hidroinformática abrange uma série de áreas, tais como a modelação hidráulica, hidrológica e de engenharia ambiental. Este estudo multidisciplinar proporciona uma melhor gestão dos sistemas aquáticos, cada vez mais ameaçados pelas emergentes pressões antropogénicas (Delgado, 2011).

No ambiente estuarino intervêm uma série de sistemas, como o caudal dos rios, as correntes de maré, a batimetria, a salinidade, ventos, e uma série de outros. A hidroinformática tem como estratégia desenvolver modelos individuais de cada um dos sistemas referidos, e ter a capacidade de os interligar como um todo, de modo que o conjunto se aproxime o mais possível da realidade.

As novas metodologias permitem aplicar uma série de soluções inovadoras. No caso da deposição de sedimentos, em vez de se recorrer às tradicionais dragagens sempre que existe assoreamento, os modelos computacionais permitem estudar formas de o evitar, através dos sistemas que simulam as descargas fluviais, as correntes de maré e as fórmulas físicas que regem o transporte de sedimentos (Pinho et al., 2018).

2.4.1- Tipos de modelos

A hidroinformática apresenta uma série de modelos numéricos que abrangem o estudo dos diferentes processos que têm lugar nos meios hídricos. Esses processos podem ser físicos, químicos e biológicos, e ao longo dos anos têm-se feito esforços no sentido de os reproduzir os mais realisticamente possível.

Esta alternativa, apesar de ser uma evolução em relação aos modelos físicos, não resolve todos os problemas, como refere Duarte (2005), uma vez que ainda é necessário simplificar as equações

matemáticas que descrevem os processos, e muitos desses processos são complexos e encontram-se ainda sem uma solução numérica adequada.

Aqui assume também especial importância o senso crítico que se deve ter na análise dos resultados dos modelos numéricos, através da sua validação.

O modelo numérico é composto por uma série de módulos que desempenham funções distintas e se interligam para chegar ao objetivo final. Com a evolução das ferramentas e dos recursos informáticos, torna-se mais acessível chegar a um modelo aproximado da realidade. O trabalho prévio de pesquisa e seleção dos elementos mais adequados é indispensável para a construção de um modelo mais eficaz (Pinho, 2000).

A construção de um modelo numérico assenta numa sequência de etapas que devem ser seguidas de modo a obter resultados fiáveis. Essa metodologia está representada na Figura 20.

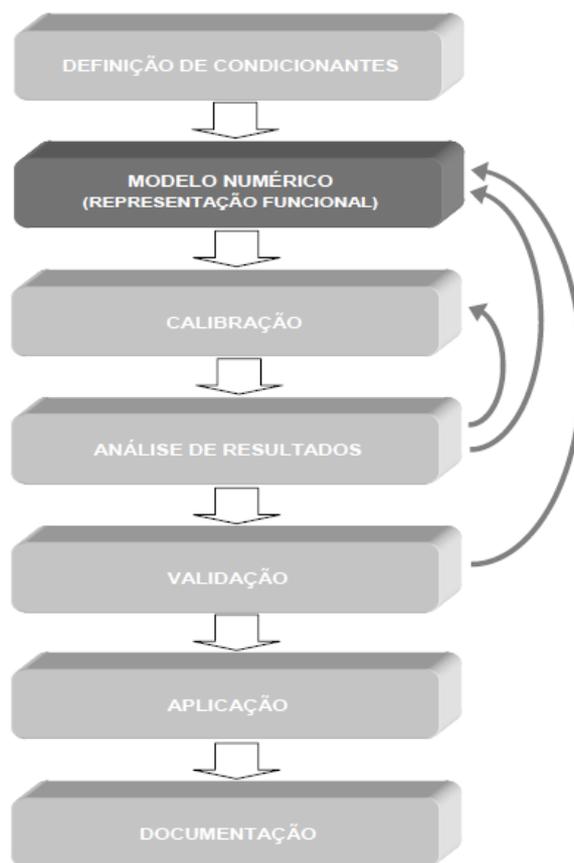


Figura 20- Esquema conceptual da construção de um modelo matemático. (Retirado de Duarte, 2005)

A primeira etapa passa por definir o problema, e de seguida identificar as condicionantes que terão impacto na sua resolução. Aqui terão de ser abordadas questões como a disponibilidade de recursos e informações, e os principais objetivos do problema.

O modelo numérico em si é formado pela descrição dos fenômenos que ocorrem no ambiente selecionado e a interação entre os mesmos, mas também uma representação funcional do comportamento das variáveis do sistema, sendo este um processo iterativo, devido à inclusão de dados relativos ao ambiente.

Esta fase é caracterizada por uma multidisciplinariedade entre três campos fundamentais: i) a formulação matemática, através das equações que replicam os processos; ii) a parte numérica, responsável pela resolução dessas equações; iii) a parte gráfica, que é responsável por conceber uma interface capaz de obter e apresentar as soluções ao utilizador de forma clara e simples (Anderson, 1995).

Importa também referir que o método mais comum para a resolução das fórmulas matemáticas é o numérico, em que as equações não são lineares, sendo por isso necessário um cálculo automático para chegar aos resultados. Neste aspeto tem também influência a dimensão que definimos para o nosso modelo, de acordo com os objetivos que pretendemos alcançar.

A calibração não é mais do que o ajuste dos parâmetros previamente definidos, de modo a conseguir uma maior aproximação entre os dados obtidos no modelo e os dados obtidos em campo. Apesar de ser um processo simples, aqui concentram-se bastantes dificuldades devido à falta de dados de campo e à sua fiabilidade.

A validação é também um processo simples, em que é testada a capacidade do modelo de continuar a fornecer dados fiáveis. O modelo deve ser colocado à prova através da definição de novas situações, e é posteriormente feita uma análise à capacidade do modelo se adaptar aos novos cenários, de modo a perceber até que ponto este é adequado e válido.

A aplicação do modelo acarreta consigo restrições inerentes, e mediante a dinâmica do sistema modelado, poderá exigir no futuro uma nova calibração (Duarte, 2005).

Podemos agora introduzir o conceito de modelo morfodinâmico como sendo o conjunto de modelos matemáticos que se interligam e cooperam, com vista a atingir uma solução mais integradora e aproximada da realidade. Estes modelos matemáticos podem ser hidrodinâmicos, morfológicos, hidrológicos, de agitação marítima, de transporte de sedimentos, de qualidade da água, ecológicos, entre outros, de acordo com aquilo que se pretende atingir.

Os modelos morfodinâmicos têm assim a capacidade de incluir dentro de si uma série de submodelos matemáticos diferentes que trabalham em conjunto, sem prejudicar os custos e sem a ocorrência de incompatibilidades entre si.

Vamos agora focar o estudo nos modelos hidrodinâmicos. Estes modelos são compostos por equações de balanço de massa dos constituintes do meio hídrico, resolvidas através de métodos

numéricos, e são sensíveis a variáveis como as correntes de maré, a agitação marítima, os ventos e os caudais fluviais.

São classificados de acordo com as dimensões espaciais das equações utilizadas. Assim, podemos ter modelos unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Os modelos unidimensionais podem ser horizontais (1DH) ou verticais (1DV). Os modelos 1DH não levam em consideração a estratificação do escoamento e a sua velocidade na direção perpendicular, sendo os modelos 1DV o oposto. A primeira alternativa é usada sobretudo em rios e a segunda é aplicada mais em albufeiras.

Os modelos bidimensionais podem também ser horizontais (2DH) ou verticais (2DV). No caso de termos um escoamento uniforme na direção lateral, mas com uma variação assinalável na densidade vertical, devemos optar pelo 2DV. Se o escoamento na vertical se mantiver constante e homogêneo, o modelo mais adequado é o 2DH.

Os modelos tridimensionais, mais complexos, são usados quando temos uma situação em que o escoamento tem variações relevantes na direção vertical e horizontal. A resolução das equações de Navier-Stokes em três dimensões ainda pode ser um desafio computacional. Este tipo de solução é adotado na intrusão salina em estuários, a descarga de água doce em baías e na circulação induzida pelo vento em lagos (Lima, 2012).

Serão abordadas as características de alguns dos submodelos que compõe o modelo morfodinâmico. Os modelos hidrológicos permitem, através da simulação das linhas de água, quantidades transportadas, infiltradas e escoadas, quantificar as contribuições de recursos hídricos, tendo como fim a avaliação da qualidade das águas recetoras. Exigem uma grande quantidade de dados hidrometeorológicos, e a escassez de informação pode impossibilitar a utilização de modelos mais complexos.

No caso de estarmos na presença de um sistema em que o tempo de retenção das águas tem um papel fulcral para a previsão do efeito trópico devido aos nutrientes arrastados, deve ser utilizado um modelo hidrodinâmico, devido à inclusão da distribuição das velocidades no interior do sistema, visto que estas têm um papel fundamental no desenrolar dos processos biológicos que ocorrem.

Os modelos de agitação marítima descrevem a geração, propagação e dissipação de ondas nas zonas costeiras. Cada modelo tem características e potencialidades diferentes, e a sua escolha carece de um estudo prévio, de acordo com os objetivos e particularidades do sistema em análise. Por vezes, devido às características próprias de cada estuário, torna-se mais complexo o estudo das ondas nestes locais do que numa zona de praia sem obstáculos.

A batimetria por vezes irregular, com a existência de bancos de areia e ilhas, pode criar correntes não esperadas e padrões de circulação das partículas complexos. Isto confere um destaque especial ao módulo de agitação marítima que compõe o modelo hidrodinâmico.

Os modelos de transporte de sedimentos têm também um papel cada vez mais importante no estudo das zonas costeiras. Os sedimentos podem ser transportados pelas correntes de maré ou induzidas pelo vento, pela ondulação, ou pela sua ação conjunta (Pinto, 2010).

Estes modelos levam em conta uma série de fatores, tais com as características físicas dos sedimentos, o seu caráter coesivo ou não coesivo, as forças mobilizadoras e estabilizadoras das partículas, os tipos de transporte e taxas de deposição.

Alguns autores classificam este tipo de modelos em: integrados no tempo, modelos quase estacionários e modelos não estacionários.

Podemos classificar estes modelos como empíricos, semi-empíricos e baseados na equação de transporte. O grupo de modelos empíricos e semi-empíricos fazem uso de formulações empíricas ou semi-empíricas para relacionar o caudal sólido com as características do escoamento, sedimento, e do fluido em que se encontra. Estes podem ser utilizados em sistemas estacionários, semi-estacionários, com a influência de ondas, correntes, ou a junção de ambos. Há também variantes que permitem distinguir o tipo de transporte entre arrastamento, em suspensão, ou a quantidade total.

Apesar de serem modelos simples e que não exigem grande capacidade computacional, são muito utilizados. No entanto, apresentam problemas no que diz respeito à sua precisão, devendo ser sempre acompanhados por comparações com ensaios de campo.

Os modelos baseados na equação de transporte são uma alternativa aos empíricos e semi-empíricos, que deve ser utilizada quando não se verifica um equilíbrio dinâmico entre a deposição de sedimentos e a sua ressuspensão. São explicados através de processos mais complexos, relacionados com o transporte de partículas em suspensão, e requerem maior capacidade computacional.

Os estuários, por serem ambientes sensíveis e que podem sofrer alterações batimétricas repentinas, requerem a utilização de modelos baseados na equação de transporte para prevenir as grandes velocidades que se verificam e que levam ao desequilíbrio do caudal sólido (Pinto, 2010).

Como principais *softwares* de modelos hidrodinâmicos mais abrangentes utilizados em sistemas estuarinos temos o Cormix, o Mike 3, o Delft3D, o TELEMAC2D/3D e o MORSELFE.

No que diz respeito aos modelos de agitação marítima, temos o SWAN.

Para modelos de simulação de correntes podemos referir o HAMSOM, o POM, o ECOM-si e o FVCOM.

2.4.2- Aplicações

Com as crescentes preocupações ambientais e avanços tecnológicos, a hidroinformática alargou a sua área de estudo a novas problemáticas. Os modelos morfodinâmicos são assim aplicados em diversas situações: i) previsão das mudanças morfológicas que ocorrem no ambiente natural devido à realização de obras (molhes, outras estruturas); ii) identificação dos impactos ambientais negativos associados a obras executadas em ambientes adjacentes aos meios hídricos; iii) previsão da evolução batimétrica de canais de navegação, com vista a apurar a necessidade de dragagens de manutenção; iv) impactos relacionados com a atividade de dragagem; v) análise das condições marítimas, nomeadamente ondas, ventos e correntes, de modo a verificar a segurança das estruturas costeiras existentes e a possível necessidade de proteções futuras; vi) projetos de qualidade da água, incluindo a modelação ecológica; vii) estudos hidrossedimentares.

2.5- Delft3D

O *software* Delft3D, desenvolvido pela Deltares, é um dos modelos mais avançados a nível mundial, e conseqüentemente um dos mais utilizados em projetos de engenharia hidráulica. O programa é constituído por uma série de módulos, cada um dizendo respeito a uma área específica.

Tem como grande vantagem a sua vertente integradora, através da constante partilha dinâmica de informação ao longo do processo de simulação.

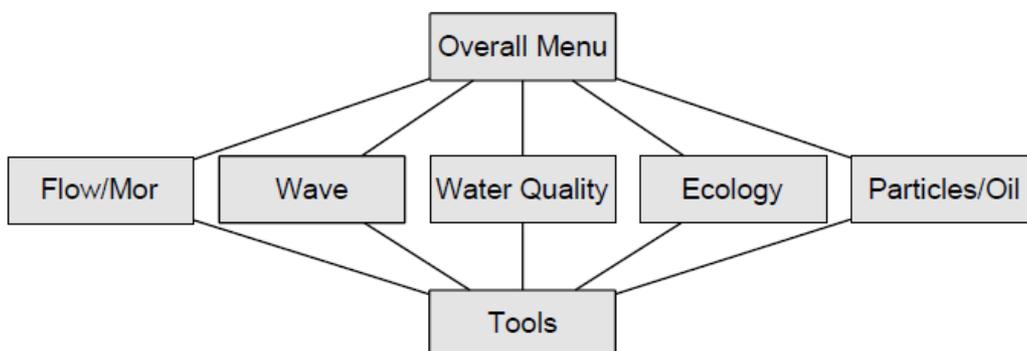


Figura 21- Arquitetura do funcionamento do sistema Delft3D. (Retirado de Delft funcional, 2014)

Os processos envolvidos no programa são de alguma complexidade, nesse sentido o mesmo apresenta uma interface gráfica amigável, de modo que o utilizador não necessite de possuir elevados conhecimentos a nível computacional para conseguir obter os resultados que pretende.

2.5.1- Módulos e domínios de interesse

O *software* é composto por vários módulos, sendo o mais importante o hidrodinâmico - Delft3D-FLOW.

O módulo hidrodinâmico foca-se na simulação de escoamentos não permanentes com a inclusão de equações que regem as leis do movimento em águas pouco profundas, quer para problemas com abordagens dimensionais 2DH ou 3D. Tem em conta os efeitos da maré, vento, pressão atmosférica, massa volúmica do fluido, salinidade, ondas e turbulência.

Sendo um modelo numérico, o seu método de resolução é o das diferenças finitas. A formulação matemática baseia-se nas equações de Navier-Stokes simplificadas, tornando o programa indicado para fluxos de água com pouca profundidade, como estuários, rios e zonas costeiras.

As suas principais características são:

- Um sistema de duas coordenadas cartesianas (regulares) ou esféricas, nas direções horizontais. Posteriormente foram também introduzidas coordenadas esféricas;
- O domínio é discretizado na direção vertical e horizontal;
- Permite a geração de marés, no caso de utilizarmos uma grelha esférica;
- Gradientes de densidade do fluido, através da possibilidade da alteração da massa volúmica e da temperatura;
- Simulação do movimento das marés;
- Acopla um modelo de turbulência de acordo com os coeficientes de difusividade e viscosidade;
- Efeito das ondas provocado nas tensões de fundo;
- Tensões provocadas na superfície do fluido devido à ação do vento;
- Recurso ao módulo de advecção-difusão para descargas;
- Inclusão de taxas de decaimento nos sedimentos;
- Percurso de embarcações de dragagem;
- Simulação do transporte de sedimentos, com formulação matemática respeitante à erosão e deposição e uma série de ferramentas relacionadas com alterações batimétricas.

O *software* permite ainda uma série de personalizações para tornar o modelo mais aproximado à realidade. Entre elas, podemos referir as condições de fronteira, podendo ser definidas através do nível da água, velocidade do fluido, descargas efetuadas, séries de tempo, e até mesmo pelos constituintes astronómicos da maré.

Apesar do módulo hidrodinâmico ser extremamente abrangente e incluir elementos de vários setores, o *software* incorpora ainda o módulo de qualidade da água (Delft3D-WAQ), de transporte de

sedimentos (Delft3D-SED), morfológico (Delft3D-MOR), ecológico (Delft3D-ECO), de rastreio de partículas (Delft3D-WAQ PART) e de ondulação (Delft3D-WAVE) (Deltares, 2014).

O módulo de qualidade da água (Delft3D-WAQ) simula a qualidade da água resultante dos processos de transporte de sedimentos e das reações bioquímicas.

O módulo de transporte de sedimentos (Delft3D-SED) é um complemento daquele que foi apresentado anteriormente. Aqui são introduzidos sedimentos coesivos e não coesivos (podendo os últimos ser inseridos no transporte de fundo ou transporte em suspensão) com o objetivo de estudar plumas de materiais dragados, alterações batimétricas por erosão/sedimentação, e como referido anteriormente, tem influência no estudo da qualidade da água.

O *software* consegue relacionar fatores hidrodinâmicos como o caudal e a velocidade do escoamento com as características físicas de cada fração de sedimento e a ação da gravidade.

As constantes alterações que se verificam na batimetria têm imediatamente efeito na simulação dos processos hidrodinâmicos (Lima, 2012).

O módulo morfológico (Delft3D-MOR) é responsável por simular as alterações morfológicas, através da relação entre os processos relacionados com as ondas, correntes, transporte de sedimentos e batimetria. Processa-se em conexão com os módulos FLOW e WAVE.

O módulo ecológico (Delft3D-ECO) foca-se nas alterações provocadas por processos associados a algas, comportamento dos nutrientes, e fatores limitantes como a luz, oxigénio e matéria orgânica. É muito importante no estudo de ambientes eutrofizados, um tema relevante no panorama atual.

O programa apresenta também o módulo de rastreio de partículas (Delft3D-WAQ PART), que é uma ferramenta que permite ao utilizador analisar a concentração de partículas individuais, através das suas trajetórias, numa escala temporal.

No caso de existirem informações relativas ao vento, o módulo de ondulação (Delft3D-WAVE) consegue incorporar esses dados e calcular a sua interferência na formação de ondas de pequena amplitude em áreas pouco profundas. Inclui também os fenómenos de refração e rebentação (Duarte, 2005).

Um outro recurso muito útil que o programa apresenta é o *morfac* - coeficiente de aceleração morfológica.

Esta é uma ferramenta que permite aumentar o tempo de simulação, de modo a obter alterações morfológicas em escalas temporais mais avançadas. O fluxo de erosão/sedimentação dos sedimentos em suspensão e as componentes do transporte por fundo são multiplicados pelo *morfac*, permitindo assim reduzir drasticamente os tempos de simulação, sem prescindir da eficiência e da simplicidade da sua aplicação (Lesser et al., 2004).

2.5.2- Aplicações

A panóplia de potencialidades do Delft3D faz com que seja vastamente utilizado por todo o mundo, nos mais variados cenários.

O ‘The Battery Park’, em Manhattan, foi modelado com este *software* para a avaliação de risco de inundações da zona costeira (Gomes et al., 2015).

Van Maren et al., (2015) estudaram o impacto do aprofundamento do canal do estuário do rio Ems, que atravessa a Alemanha e os Países Baixos, bem como o efeito das dragagens ao nível da concentração de sedimentos.

Também a capacidade do programa prever resultados a longo prazo foi testada num modelo de Elhakeem & Elshorbagy (2015), que avaliaram os efeitos das alterações climáticas para o ano de 2080 no Golfo Pérsico.

Inúmeros projetos foram levados a cabo com a ajuda do Delft3D, e a sua maioria reporta resultados satisfatórios ao nível da velocidade da água, salinidade e alterações na erosão/deposição de sedimentos.

2.5.3- Formulação matemática

Em seguida serão apresentadas as equações matemáticas resolvidas numericamente pelo *software*, no que diz respeito à hidrodinâmica.

As três seguintes equações de Navier-Stokes têm como função caracterizar o movimento do volume elementar de um fluido incompressível e isotérmico, caso este seja expresso através de termos de valores instantâneos das componentes de velocidade u , v , w , e da pressão p (Pinho, 2000).

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Em que,

F_x, F_y e F_z são as componentes das forças de volume por unidade de massa [N/kg];

p é a pressão do fluido [Pa];

μ é o coeficiente de viscosidade dinâmico [kg/s/m].

As equações de Reynolds podem ser obtidas transformando as equações apresentadas anteriormente. Para isso, o valor instantâneo da velocidade tem de ser substituído pela soma de um valor médio com uma função aleatória, tendo como principal objetivo caracterizar o movimento médio de uma partícula de fluido (Pinho, 2000).

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{u}\hat{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\hat{u}\hat{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\hat{u}\hat{w})}{\partial z} \right) \\ = & \rho F_x - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{u'u'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{u'w'} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \hat{v}}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{v}\hat{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\hat{v}\hat{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\hat{v}\hat{w})}{\partial z} \right) \\ = & \rho F_y - \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{v'u'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{v'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{v'w'} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial \hat{w}}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{w}\hat{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\hat{w}\hat{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\hat{w}\hat{w})}{\partial z} \right) \\ = & \rho F_z - \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{w'u'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{w'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{w'w'} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Em que,

\hat{u} , \hat{v} , \hat{w} são médias temporais das componentes da velocidade [m/s];

\hat{p} é a media temporal da pressão [Pa];

u' , v' , w' são flutuações das componentes da velocidade [m/s].

A equação da continuidade, juntamente com as equações tridimensionais de Reynolds, desenvolvidas com valores médios de u' , v' , w' , são o início do estudo de escoamentos reais. Contudo, estas têm sempre de ser ajustadas para ter em conta as características de cada caso em particular, como fundos poucos profundos, variações de pressão, atrito de superfície ou a existência de substâncias poluentes (Pinho, 2000).

Capítulo 3
Caso de estudo

3- Caso de estudo

3.1- Bacia hidrográfica do Lima

O rio Lima tem a sua nascente em Espanha, na região de Ourense, já próxima da fronteira com Portugal, a cerca de 975 metros de altitude e desagua em Viana do Castelo.

Antes de chegar a território português percorre cerca de 41 quilómetros, sendo a sua entrada feita na zona do Lindoso. Os restantes 67 quilómetros são percorridos já dentro do nosso país, fazendo o total de 108 quilómetros de extensão.

Ao longo do seu percurso passa integralmente por dez concelhos da região do Minho em Portugal.

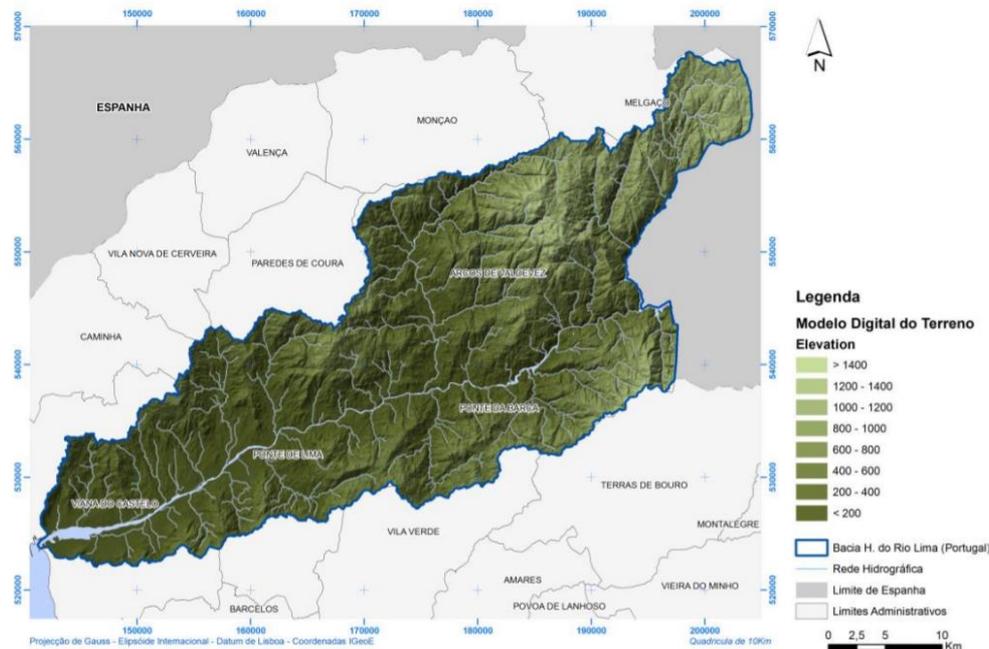


Figura 22- Bacia hidrográfica do rio Lima. (Retirado de Azevedo, 2011)

A bacia do rio Lima abrange uma superfície de cerca de 2518 km², e apresenta uma forma alongada. Faz fronteira a norte com a bacia do rio Minho, a sul com as bacias dos rios Cávado e Âncora, e a Este com a maior de todas, a bacia do rio Douro.

A altitude média da bacia situa-se nos 447 m, tendo como pontos importantes a Serra da Peneda, com 1416 m e a Serra Amarela com 1361 m de altitude.

O PBH (Plano de Bacia Hidrográfica) do Minho e Lima de 2015 (Lacasta et al., 2015) estabeleceu que o seu setor jusante, entre Ponta da Barca e a foz, é composto por 35 quilómetros de extensão e um

declive médio de 0,1%, com um vale largo e de vertentes suaves. Após a ponte de Lanheses, o declive baixa significativa para 0,024%.

Também neste plano é referido o clima da região como sendo o resultado de um conjunto de fatores: a sua posição geográfica, a proximidade do oceano Atlântico e a localização relativa às principais montanhas do Norte de Portugal.

Tudo isto faz com que a zona onde o rio Lima está inserido seja a mais pluviosa em Portugal, com uma precipitação anual entre os 1300 e 4200 mm, sendo que este valor aumenta para valores de 3000 mm na zona do seu principal afluente, o rio Vez. Na zona litoral, os valores médios ficam abaixo dos 1900 mm.

A estação meteorológica de Meadela é aquela que se situa mais próxima ao estuário, e registou entre 1971 e 2000 valores de precipitação média anual de 1470 mm, sendo que mesmo nos meses de verão, se verificaram valores considerados elevados.

Tecnicamente, o clima é assim referido como marítimo e de fachada atlântica (Lacasta et al., 2015). De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a área do estuário pode ser caracterizada como um clima temperado húmido de verão pouco quente, tipo Csb- clima mediterrânico de verão fresco.

A bacia do rio Lima é uma daquelas que apresenta maior disponibilidade hídrica do país. Os aquíferos não possuem elevada capacidade de armazenamento, o que faz com que grande parte do que chove seja rapidamente escoado.

Devido a este facto e à elevada pluviosidade, o escoamento anual médio à entrada de Portugal é de 1598 hm³ e na foz é de 3304 hm³.

Em relação ao armazenamento de água, a elevada pluviosidade que se verifica sobretudo no inverno garante um excesso nas reservas de massa hídrica, contrastando com o ligeiro défice que se verifica no verão.

As barragens do Alto Lindoso (o maior produtor hidroelétrico do país) e Touvedo gerem os caudais do Rio Lima. O caudal médio anual do rio Lima é de cerca de 64 m³/s. O maior valor de caudal instantâneo registado fixou-se nos 2391 m³/s.



Figura 23- Barragem do Alto Lindoso vista de jusante. (Retirado de Geocaching, 2012)



Figura 24- Barragem do Touvedo vista de jusante. (Retirado de Azevedo, 2011)

3.2- Estuário do Rio Lima

O estuário do Rio Lima é um dos maiores estuários do Norte de Portugal, assim como um dos mais importantes. Para isto muito contribui o porto de Viana do Castelo, bem como os Estaleiros Navais de Viana do Castelo. Estes situam-se na margem norte, bem como o porto de pesca, e uma série de infraestruturas de apoio a atividades marítimas. Na margem sul podemos encontrar o porto comercial.

A largura do estuário na zona da embocadura varia entre os 800 m na zona da ponte Eiffel, com os 150 m que se verificam perto do porto comercial.



Figura 25-Vista aérea da zona da embocadura do estuário do rio Lima, com a representação das duas principais pontes. (Retirado de Google, 2020)

Além das duas pontes identificadas na figura anterior, o rio Lima possui uma série de outras pontes, nomeadamente uma que está localizada na zona de Lanheses, representada na Figura 26. A batimetria do rio na zona adjacente a esta ponte será também analisada na secção 5.1.



Figura 26-Ponte sobre o rio Lima, na zona de Lanheses. (Retirado de Google, 2020)

A entrada no porto é feita por uma barra com orientação no sentido norte-sul, sendo a embocadura protegida por dois molhes. O molhe exterior possui 2170 m de comprimento, protegendo a zona onde se localizam os ENVC (Estaleiros Navais de Viana do Castelo) da ondulação proveniente dos quadrantes norte e oeste. Já o molhe interior possui 700 m de extensão. O canal de entrada do porto está ligado a uma bacia de manobra com um diâmetro aproximado de 300 m e uma profundidade de 10 m (NMM) (Nível médio do mar), que permite a circulação de navios com grandes dimensões. É neste local que as dragagens são realizadas com maior frequência, devido às condições propícias à deposição de sedimentos, e à constante exigência por grandes profundidades que permitam a navegação de navios com calados elevados. O porto comercial possui como acessos um canal com 2100m de comprimento e uma largura nunca inferior a 150 m. O cais é composto por dois lanços com desenvolvimento ligeiramente inferior a 500 m. Na margem norte, o porte de pesca possui uma doca de flutuação de grandes dimensões, de modo a receber em segurança as embarcações de pesca.

O porto de recreio fica localizado ligeiramente a montante, na zona da ponte Eiffel, e possui duas docas, uma a jusante e outra a montante desta. Para montante verifica-se uma diminuição da profundidade, sendo interrompida por alguns fundões formados pela atividade de extração de inertes.

Passando agora para uma vertente mais morfológica, o estuário do rio Lima apresenta na sua zona terminal uma maior largura e baixa inclinação, o que potencia a formação de depósitos de sedimentos. Ao longo dos anos, ilhas temporárias foram-se formando a montante da ponte Eiffel, até se tornarem permanentes, como são hoje. Estas ilhas, assim como as margens extensas, foram ocupadas por vegetação herbácea, levando assim à formação de um conjunto de praias fluviais nestas zonas. As margens com grande desenvolvimento fazem com que quando se verificam elevados caudais, o rio rapidamente avance sobre as mesmas, aumentando significativamente a sua largura.



Figura 27- Ínsuas do rio Lima. (Retirado de Garranos.pt, 2020)

3.3- Caracterização hidro-morfodinâmica do estuário do Lima

3.3.1- Marés

No estudo feito por Consulmar (2017) está incluída a análise levada a cabo pelo Instituto Hidrográfico aos dados recolhidos pelo marégrafo existente na zona de Viana do Castelo entre os anos de 1979 e 2006, e uma previsão para os níveis da maré astronómica. Os resultados estão expressos na tabela seguinte.

Tabela 2-Previsão do Instituto Hidrográfico para o comportamento da maré no Porto de Viana do Castelo. (Adaptado de Consulmar, 2017)

	Nível da maré (ZH) (m)
Preia-mar máxima (PM máx)	4,11
Preia-mar com águas vivas (PM AV)	3,46
Preia-mar com águas mortas (PM AM)	2,67
Nível médio do mar (NMM)	2
Baixa-mar com águas mortas (BM AM)	1,35
Baixa-mar com águas vivas (BM AV)	0,52
Baixa-mar mínima (BM mín)	0,08
Preia-mar média (PM méd)	3,07
Baixa-mar média (BM méd)	0,94

Importa referir que o ZH (Zero hidrográfico) se situa 2,0 m abaixo do NMM em Cascais, bem como que os valores expostos no quadro se referem a uma situação com condições meteorológicas normais, sendo que os valores poderão ser diferentes caso se verifiquem fenómenos meteorológicos excecionais.

Apesar de tudo, os valores apresentados estão de acordo com o que seria de esperar, uma vez que o Instituto Hidrográfico nos diz que, para o nosso país, as amplitudes das marés vivas são de cerca de 1,5 m, e de 0,7 m para as marés mortas.

Apesar de existirem marés diurnas, semidiurnas ou mistas, outros fatores são muito importantes para prever a propagação das marés, como foi já referido.

Segundo Delgado (2011), nenhum lugar terá marés que se comportam da mesma forma, daí a relevância em perceber a morfologia da zona costeira para se conhecer a influência das marés nos estuários.

3.3.2- Correntes

No estudo realizado pela PROMAN (2004), constatou-se que os principais intervenientes nas correntes de maré na zona costeira do rio Lima eram o efeito das marés e o vento. Já numa zona mais interior, perto do cais comercial, tanto as correntes de enchente como de vazante apresentam velocidades inferiores a 1 m/s.

Quando o vento se faz sentir nas direções N-NO com pouca intensidade, a corrente tem velocidades na ordem de 1 nó. No mesmo estudo é ainda referido que em condições médias de vazante, verificam-se velocidades máximas de cerca de 0,8 m/s na embocadura do estuário.

A corrente máxima de vazante no estuário tem uma velocidade de 1.3 m/s, já a de enchente é ligeiramente menor e situa-se nos 0,9 m/s.

Já o POEPVC (Plano de Ordenamento e Expansão do Porto de Viana do Castelo) (FBO, 2002) refere que as correntes de enchente seguem sobretudo as linhas de maior profundidade e orientam-se para norte, ao contrário das correntes de vazante que seguem a linha da margem e se orientam para sul, principalmente após a ponte Eiffel.

Quando temos correntes de maré com uma velocidade considerável, para além de alterações na batimetria do estuário, verificam-se também correntes verticais turbulentas, provocadas pela resistência por atrito no fundo do canal. Este processo contribui para a mistura na coluna de água (Duarte, 2005).

3.3.3- Ondas e ventos

O estudo apresentado pela PROMAN (2004) refere que as ondas do quadrante NO representam cerca de 80% das ocorrências. No verão as alturas de onda significativa estão entre os 1 e 1,5 m, com períodos de 7 e 8 segundos. No inverno, os valores da altura de onda significativa são superiores, entre 2 e 3 m, e períodos que se fixam nos 8 segundos.

As ondas provenientes do quadrante oeste verificam-se sobretudo no inverno, durante temporais, e apresentam por isso alturas de onda significativa que podem ultrapassar 8 m, e períodos entre os 8 e 16 segundos.

Além disto, o POEPVC (FBO, 2002) afirma que as principais ondas que se sentem na bacia da manobra dos ENVC são provenientes de SO, sendo que se propagam até à doca de pesca. Apesar do cais comercial estar protegido desta ondulação, as intempéries com origem no quadrante SO podem causar a interdição do porto, o que acontece em cerca de 10 dias a cada ano, entre os meses de novembro e março.

É referido no EIA (Estudo de impacte ambiental) da Consulmar (2017) que perto da embocadura do estuário, as ondas com uma altura inferior a 1 m têm uma ocorrência média de cerca de 22%. A maior fatia, 48%, diz respeito a ondas entre 1 e 2 m, e por fim, 10% para ondas superiores a 3 m e 1% para ondas superiores a 5 m.

De modo a conhecer os efeitos da agitação no interior do estuário, este estudo realizou uma série de simulações para que fosse possível prever o seu comportamento. Foi definida uma altura de maré média de 2,0m (ZH), uma altura significativa de onda (Hs) igual a 1m, vários períodos de pico, assim como uma série de direções da agitação (O, OSO e SO).

As principais conclusões dizem que:

- A zona do anteporto apresenta maiores índices de agitação para as direções a SO e para maiores períodos de picos, o que seria expectável devido à orientação da embocadura;
- O estreitamento da secção na zona do anteporto faz com que os índices de agitação sejam reduzidos consideravelmente.

No que diz respeito aos ventos registados em Viana do Castelo, é dito no EIA apresentado pela Consulmar (2017) que apesar de serem registados ventos em todos os rumos, o octante NO é sem dúvida o principal, sendo predominante em cerca de metade dos meses do ano, com especial destaque para os meses de verão. O octante NE merece também destaque, sendo os seus ventos predominantes em 25% dos meses do ano.

Em relação às velocidades médias anuais, os principais octantes são os de S e de SO, com velocidades na ordem dos 12 km/h, sobretudo nos meses de inverno.

A intensidade dos ventos não pode ser considerada forte, uma vez que apenas 3,8 dias por ano são registadas velocidades superiores a 36 km/h, e 0,1 dias em que a velocidade de 55 km/h é igualada ou superada. O período de novembro a abril é aquele em que a intensidade média do vento é mais forte.

O 'Roteiro da Costa Portuguesa', disponibilizado pelo Instituto Hidrográfico, apresenta os dados recolhidos entre os anos de 1961 e 1990 através de uma rosa-dos-ventos, representada na Figura 27.

Como podemos verificar na Figura 28, os rumos mais importantes são os de N, NE e SO, todos com frequência superior a 15%. Já os rumos NO e S apresentam velocidades médias superiores a 11 km/h, e frequências também assinaláveis.

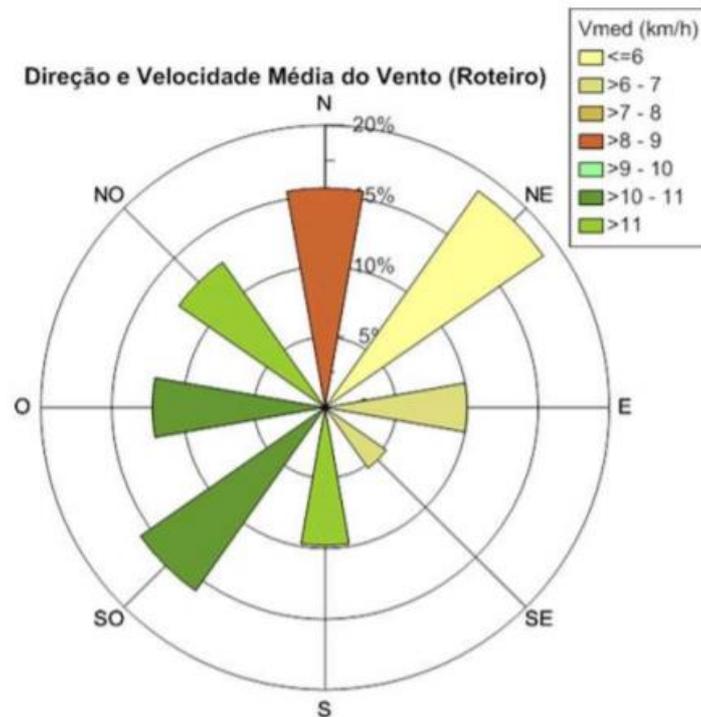


Figura 28- Rosa-dos-ventos com a predominância dos ventos na costa portuguesa entre 1961 e 1990. (Retirado de Instituto Hidrográfico, 2005)

3.3.4- Salinidade e temperatura

De acordo com PROMAN (2004), entre 1990 e 2003 a batimetria do rio sofreu grandes alterações. Apesar destas alterações não produzirem impactos relevantes na hidrodinâmica a jusante da ponte Eiffel, têm um efeito contrário a montante desta.

Nesta zona, a profundidade aumentou, o que fez com que as ondas de maré se propagassem com mais facilidade para o rio Lima, aumentando o avanço da cunha salina.

Foi realizado um estudo por MARETEC/IST & INAG (2001) baseado numa série de simulações, que afirma que para um caudal médio de 62 m³/s e uma maré média, o estuário tem uma salinidade baixa. Em baixa mar, a água salobra, que pode ser considerada uma água de transição entre os dois meios, está restrita à zona da embocadura. Em preia-mar, esta mesma zona apresenta uma salinidade de cerca de 25‰

No mesmo estudo é descrito que na bacia dos ENVC, que está a ser em parte intervencionada, a variação da salinidade é baixa. Em baixa-mar é visível o jato de saída; já em preia-mar é visível o efeito da entrada de água sobretudo pelo lado norte.

Dados recentes indicam que na zona da embocadura do Rio Lima, a temperatura da água atinge o seu máximo entre meados de junho e outubro, com um valor de cerca de 17°C. Por outro lado, os

valores mais baixos registam-se entre janeiro e abril, em que a água apresenta uma temperatura média de 13°C.

Em relação à temperatura atmosférica, dados recolhidos pelo Instituto de Meteorologia entre 1971 e 2000 mostram que, neste período, a temperatura média mensal se situou perto dos 15°C.

3.3.5- Produção, transporte e deposição de sedimentos

Em Lacasta et al. (2015), podemos encontrar a estimativa apresentada no PGRH (Plano de Gestão da Região Hidrográfica) de 2012, que conclui que o valor médio de produção de sedimentos para a bacia do Lima era de cerca de 2t/(km².ano).

Este relatório refere também a elevada erosão que se verifica a jusante da ponte de Lanheses, bem como as várias extrações ilegais de inertes que se verificaram até 1990.

A maioria dos sedimentos existentes na embocadura são provenientes de montante, uma vez que os quebra-mares existentes, principalmente o quebra-mar norte, impede que as areias que seguem para o oceano sejam arrastadas pela corrente e voltem ao estuário.

No caso concreto de Viana do Castelo, a consultora PROMAN (2004) refere que as ondas provenientes de SO estão ligadas ao transporte de sedimentos de sul para norte, sendo que estas ondas estão associadas a uma elevada capacidade de transporte litoral.

Importa também referir a importância do sistema de barragens Alto Lindoso-Touvedo, que fez aumentar significativamente a retenção sedimentar e contribuiu para a acentuada diminuição da quantidade de sedimentos fornecidos para o setor terminal do estuário.

O relatório apresentado pela PROMAN (2004) refere que quando se verificam caudais elevados, surgem fenómenos de erosão a montante da ponte Eiffel, que é uma zona claramente menos profunda. Este grande transporte de sólidos tende a terminar a jusante, ocorrendo deposições na zona mais profunda, onde se inicia o canal de navegação.

Durante o verão, as correntes de enchente e as correntes de vazante apresentam velocidades semelhantes, o que faz com que os sedimentos de maior dimensão se depositem mais a montante, ficando sujeitos às variações das marés. Durante o inverno, com o aumentar da pluviosidade, o principal fator condicionante do transporte de sedimentos é o caudal proveniente do rio, que faz com que estes sedimentos mais grosseiros se depositem a jusante da ponte Eiffel.

Em relação ao transporte de materiais mais finos, é sobretudo da responsabilidade das cheias, quando temos maior concentração de sólidos suspensos. Estas condições levam a um assoreamento notório sobretudo nas margens.

3.4- Dragagens no estuário do Lima

A administração do porto de Viana do Castelo lançou em 2019 um concurso público para a realização de, entre outras obras, a dragagem do canal de acesso aos ENVC.

Esta obra, que está já em curso, tem como objetivo aumentar a profundidade de uma zona do canal de acesso adjacente ao anteporto, assim como da bacia de flutuação do cais de Bugio, pertencente aos ENVC.

O anteporto irá ter uma cota de 6,0 m (ZH), já o cais do Bugio ficará nos 7,5 m (ZH). Esta escavação de cerca de 2,5 m fará com que navios com 7 m de calado e 200 m de comprimento possam navegar nas águas próximas aos estaleiros navais.

A área de dragagem situa-se nos 190.000 m², o que resulta num volume total de dragagem de 472.247 m³, sendo sensivelmente metade respeitante a sedimentos, um terço de rocha sã, e o restante sob a forma de rocha alterada.

Esta obra, não estando unicamente inserida no estuário do rio Lima, trará também consequências para o bom funcionamento desta zona. A dragagem a ser realizada na área compreendida entre os dois molhes irá produzir alterações nos regimes estabelecidos na área de transição entre o oceano e o rio, e que acabam por se repercutir nas ações que as massas de águas marítimas exercem nas zonas mais altas do estuário.



Figura 29- Área de intervenção das obras de dragagens previstas para o estuário do Lima. (Retirado de Consulmar, 2017)

Terá uma duração de cerca de oito meses e o seu custo rondará os dezoito milhões de €, aumentando a importância do seu planeamento não só a nível funcional como económico.

Naturalmente, o crescimento que os estaleiros navais têm verificado nos últimos anos, tornam necessário que se efetuem dragagens constantes, fundamentalmente na zona mais baixa do estuário. Estas dragagens visam garantir a navegabilidade do canal que foi criado.

Na Tabela 3 estão presentes os dados relativos às dragagens efetuadas nas zonas terminais do estuário do rio Lima, entre os anos de 1988 e 2016.

Tabela 3- Características das dragagens efetuadas na zona do estuário entre os anos de 1988 e 2016. (Adaptado de Consulmar, 2017)

Ano	Porto Comercial		Doca de recreio Areia (m³)	Montante da ponte Areia (m³)	Custo (€)	Observações
	Areia (m³)	Rocha (m³)				
1988	500.000					
1989	?					
1990			75.000	120.000		
1991			125.000	250.000		
1992	150.000		80.000	350.000		
1993	350.000		70.000	350.000		
1994	500.000		70.000	325.000		
1995			35.000	280.000		Areias comercializadas
1996	1.550.000		55.000			Aprofundamento [de -6,5m(ZH) para -8m(ZH)] da barra, canal de acesso e bacias do P. Comercial. Dragados imersos.
1997	50.000					Areias comercializadas
1998	160.358 74.907	18.358				Alargamento da bacia de rotação. Rocha lançada ao mar. Canal de acesso. Areias depositadas na margem.
1999	378.948					
2000	471.846					
2001	909.449					Elevado volume de dragagem resultante de precipitação excepcional neste ano, tendo o rio carreado muitos sedimentos.
2002	552.279					
2003	469.289					
2004	198.497					
2005	203.780					
2006	117.023					
2007	132.964					
2008	37.917					
2009	100.000 200.000				410.000 824.400	Dragagem de emergência na barra, 1.º trimestre do ano Dragagem de emergência na barra, reposição de -8,00m(ZH)
2010	360.000				Realizado: 1.287.000	Dragagem na barra, canal de acesso e bacias (final de 2010).
2011	?				? Realizado: 112.000	Dragagem da bacia da Doca da Lota à cota -3,00m(ZH) (previsto)
2012	45.000 (previsto)				Realizado: 219.000	Dragagens no canal de acesso e no cais do Bugio, atingindo fundos de -5,50m(ZH).
2013	100.000 (previsto)		?		? 325.900 (previsto) Realizado: 463.000	Dragagem de emergência na marina de jusante, em maio. Dragagens de manutenção na barra e canal de acesso
2014	140.000 (previsto)				400.000 (previsto) Realizado: 639.000	Dragagens para manutenção das condições de navegabilidade e segurança na barra e canal de acesso ao porto comercial.
2015	800.000 (previsto)				Realizado: 1.900.000	Dragagens de manutenção de fundos.
2016	?				Realizado: 770.000	Dragagens de manutenção de fundos.

3.5- Intervenções na zona da embocadura

No que diz respeito às zonas mais afastadas do estuário, as margens deste continuam sensivelmente preservadas, não sendo considerada relevante a presença humana, uma vez que não se afigura muito elevada nestes locais. Foram apenas realizadas ao longo do tempo, algumas operações de dragagem de pequena dimensão, para garantir a passagem de pequenas embarcações.

A obra mais marcante a ter sido realizada no estuário foi sem dúvida a construção da ponte Eiffel, em 1878. Também o porto comercial assume grande importância, sendo estes os principais responsáveis pela ocupação das margens, que provocaram um estreitamento do canal original.

Com o desenvolvimento da cidade e do porto, as infraestruturas tiveram também de ser atualizadas.

Procedeu-se não só a dragagens regulares para manter a navegabilidade, tanto a montante como a jusante da ponte; como também à construção de dois quebra-mares. O quebra-mar norte tem como função impedir a entrada dos sedimentos vindos do norte e abrigar o porto da ondulação. Já o quebra-mar sul, com a orientação S-SO, serve como suporte à alimentação da praia do Cabedelo, que lhe está adjacente. A sua orientação permite guiar a deposição dos sedimentos de modo a sua passagem para o canal de acesso ao porto (Mendes, 2009).

Durante muitos anos, o estuário de Viana do Castelo, e nomeadamente a zona adjacente à ponte Eiffel, verificou uma forte extração de inertes com o pretexto de as mesmas serem para a regularização do leito do rio e manutenção dos canais de navegação. Estes acontecimentos levaram a alterações no leito do rio, o que fez com que a autarquia e associações ecológicas conseguissem impedir a realização destas extrações.

Estas alterações foram notórias através da erosão que se verificava nos pilares da referida ponte, motivo pelo qual as dragagens estão suspensas, sendo apenas realizadas dragagens e manutenção pela administração do porto de Viana do Castelo.

Capítulo 4

Modelo hidro-morfodinâmico do estuário do rio Lima

4- Modelo hidro-morfodinâmico do estuário do rio Lima

4.1- Grelha, processos físicos, condições de fronteira e descargas

Para desenvolver o estudo do estuário do rio Lima nas duas vertentes definidas, foi adotado um modelo tridimensional elaborado no programa Delft3D, criado por Costa (2015), constituído por uma grelha ortogonal com 7515 células, estendendo-se desde o açude de Ponte de Lima até ao oceano. Na Figura 30 está apresentada a grelha do modelo.

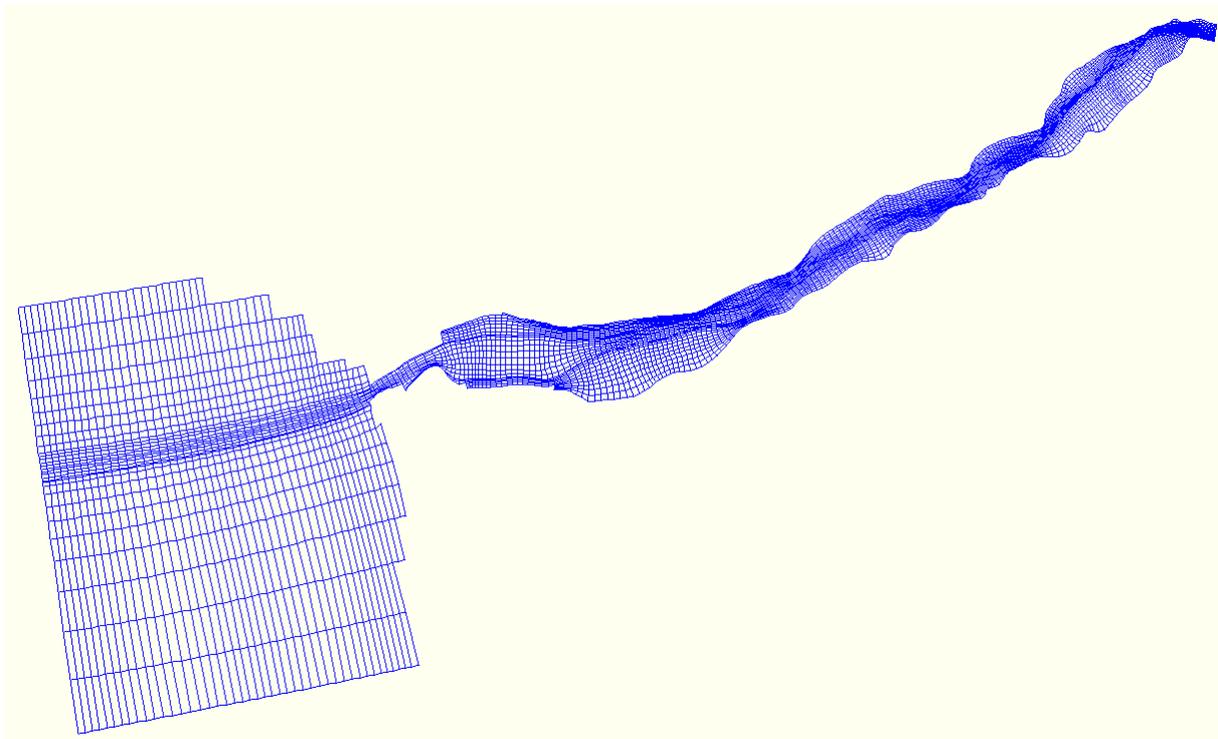


Figura 30- Grelha do modelo, desde o Açude de Ponte de Lima até à fronteira oceânica.

A esta grelha, foi necessário adicionar os elementos que simulam as obras marítimas que se encontram na embocadura do estuário, tal como os molhes norte e sul, bem como as estruturas que fazem parte dos ENVC. Para isto, foram utilizados elementos *Thin Dam*.

Na Figura 31 podemos ver os *Thin Dam* aplicados à grelha escolhida.

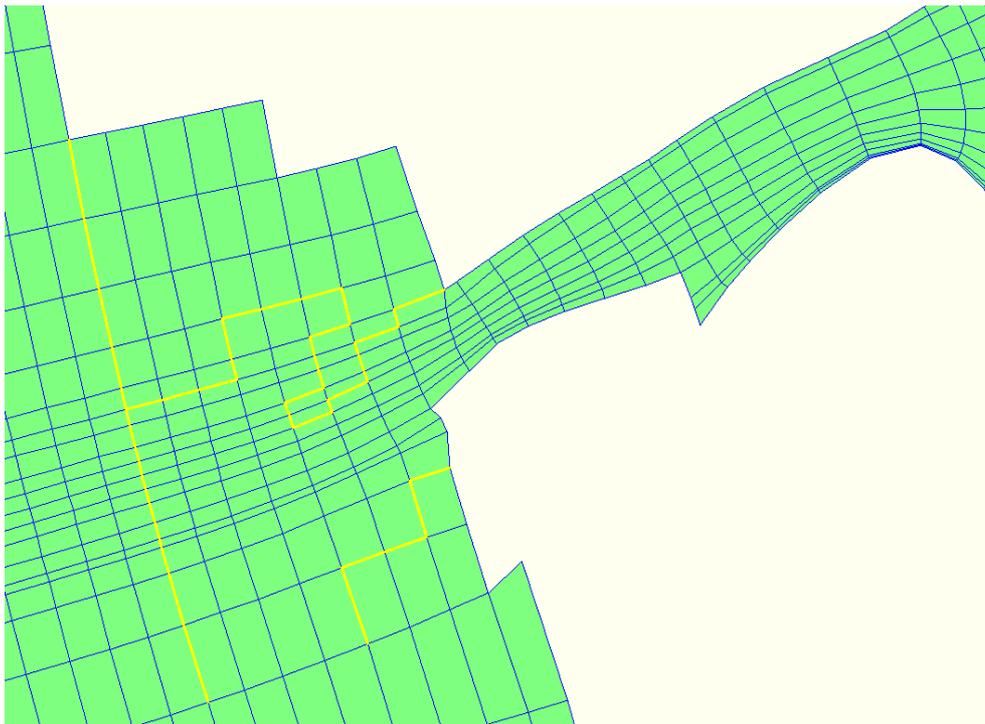


Figura 31- Vista parcial da grelha em que podemos ver a ferramenta *Thin Dam* a representar as estruturas existentes.

A batimetria utilizada foi também fornecida pelo autor do modelo, tendo sido atualizada na zona do estuário com os dados disponibilizados pela APVC (Administração do Porto de Viana do Castelo)

Na Figura 32 podemos ver a divisão das várias zonas do estuário.



Figura 32- Dados relativos às profundidades do estuário que são disponibilizados pela APVC. (Adaptado de Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, 2020)

A Tabela 4 contém a identificação das zonas apresentadas anteriormente e as profundidades que se verificam no estuário.

Tabela 4- Identificação dos locais e respetiva profundidade.

Zona	Informação
1	Porto comercial
2	Estaleiros navais
3	Doca de recreio a jusante da ponte rodoferroviária
4	Doca de recreio a montante da ponte rodoferroviária
5	Marina atlântica
6	Porto de pesca
7	Doca de pesca
8	Estação de pilotos
9	Enercon
A	Dragada a -8,0 ZH / -10 NMM
B	Dragada a -3,5 ZH / -5,5 NMM
C	Dragada a -8,0 ZH / -10 NMM
D	Dragada a -9,0 ZH / -11 NMM
E	Dragada a -8,0 ZH / -10 NMM
F	Dragada a -3,0 ZH / -5 NMM

Introduzindo os dados recolhidos, a batimetria do modelo computacional na zona do estuário é a que se apresenta na Figura 33.

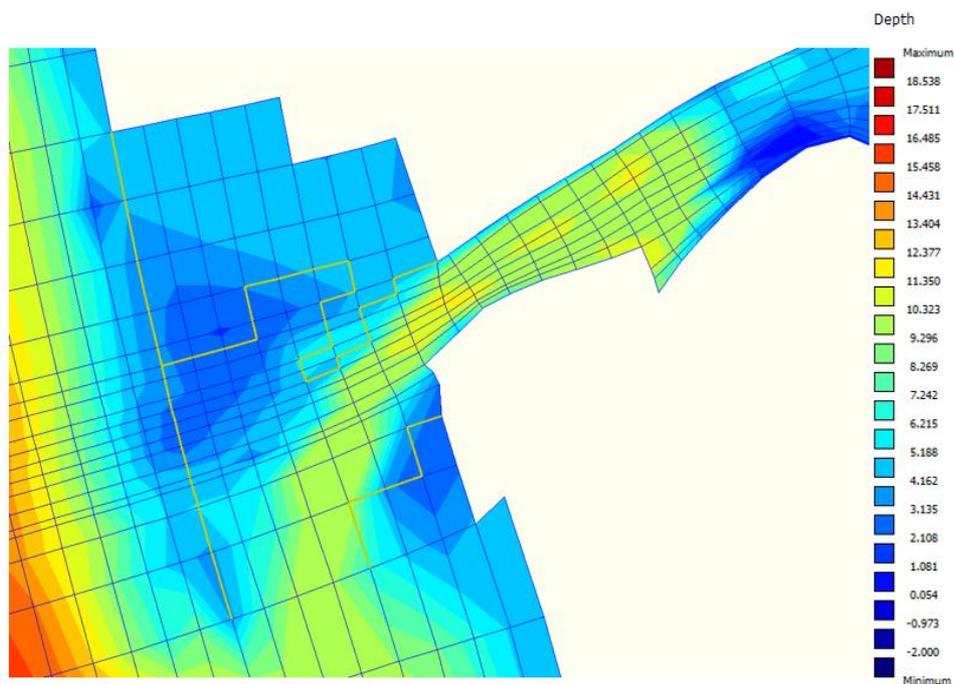


Figura 33- Grelha do modelo com elementos *Thin Dam* e batimetria representados.

Para além da batimetria, uma série de outros dados tiveram de ser adicionados ao modelo, de modo que este se ajustasse às condições que pretendíamos simular. Entre os principais encontram-se os sedimentos presentes no modelo, as condições iniciais, as condições das fronteiras do modelo, e as operações a realizar dentro do modelo. Em seguida, será abordado o processo de introdução de alguns desses elementos.

Na Figura 34 apresenta-se o menu onde o utilizador define os sedimentos que pretende colocar no modelo, e a sua tipologia, coesivo ou não coesivo. Além dos sedimentos, o programa permite incluir uma série de outros elementos, como a salinidade, temperatura e vento.

No submenu das condições iniciais são indicadas as características do nível da água no instante inicial, sendo definido em função dos elementos escolhidos no submenu anterior. Foi definido um nível da água inicial de 4 m, e considerado um intervalo de doze horas de simulação de modo a permitir efetuar a transição da situação inicial estática para as condições hidrodinâmicas normais. Neste período de doze horas não são efetuadas quaisquer simulações batimétricas.

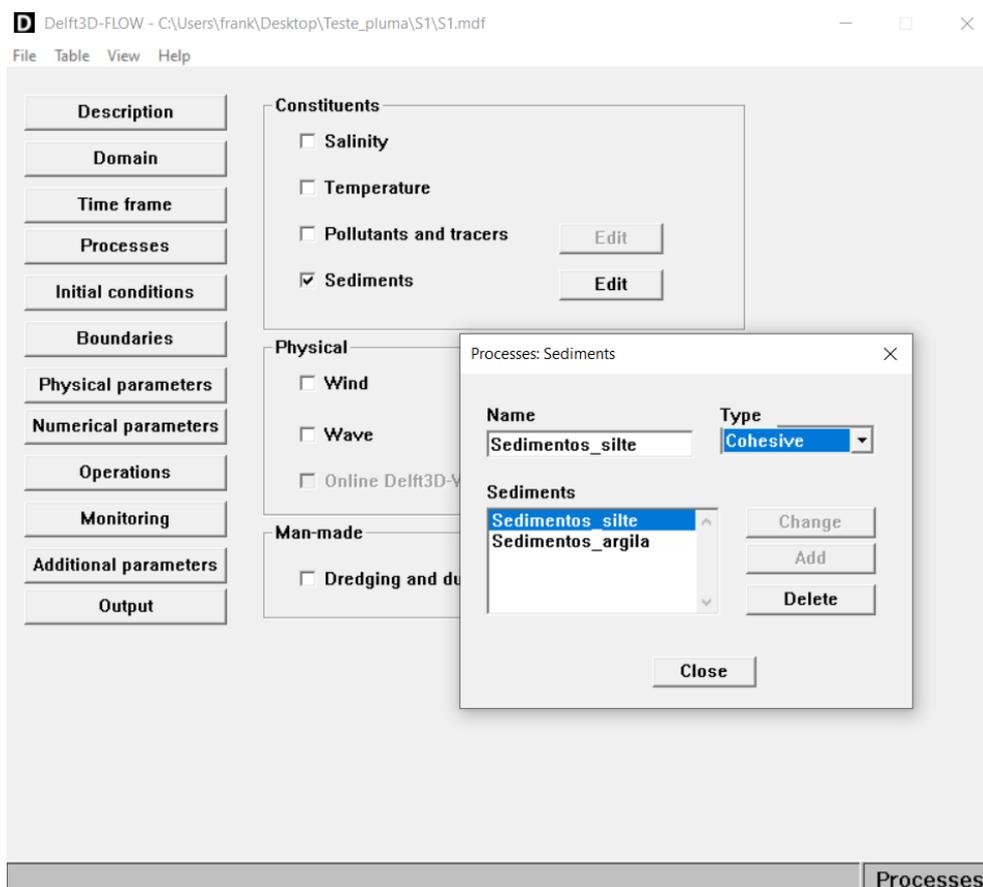


Figura 34- Definição dos sedimentos incluídos no modelo.

Na Figura 35 é apresentada a interface onde o utilizador define as características das fronteiras do modelo. Neste caso, temos a fronteira montante, representada pelo açude de Ponte de Lima, em que

foi imposto o caudal fluvial proveniente das barragens do Alto Lindoso e do Touvedo; a fronteira de jusante localiza-se no oceano, numa zona frontal à embocadura do estuário, e foi definida através das componentes astronómicas da maré estimadas para Viana do Castelo. Estas componentes foram obtidas no programa Delft Dashboard, um programa de apoio à definição de modelos para simulação com o programa Delft3D.

O programa exige também que sejam definidos parâmetros relativos ao comportamento físico e numérico da simulação. Entre os parâmetros físicos mais importantes estão as características da água, a rugosidade do fundo, as características físicas dos sedimentos e outros relativos à morfologia do modelo, onde se inclui o parâmetro *morfac*.

Em relação às operações que se podem incluir dentro do modelo, foram utilizadas as descargas, de modo a simular o processo de transbordamento e prever o comportamento da pluma formada.

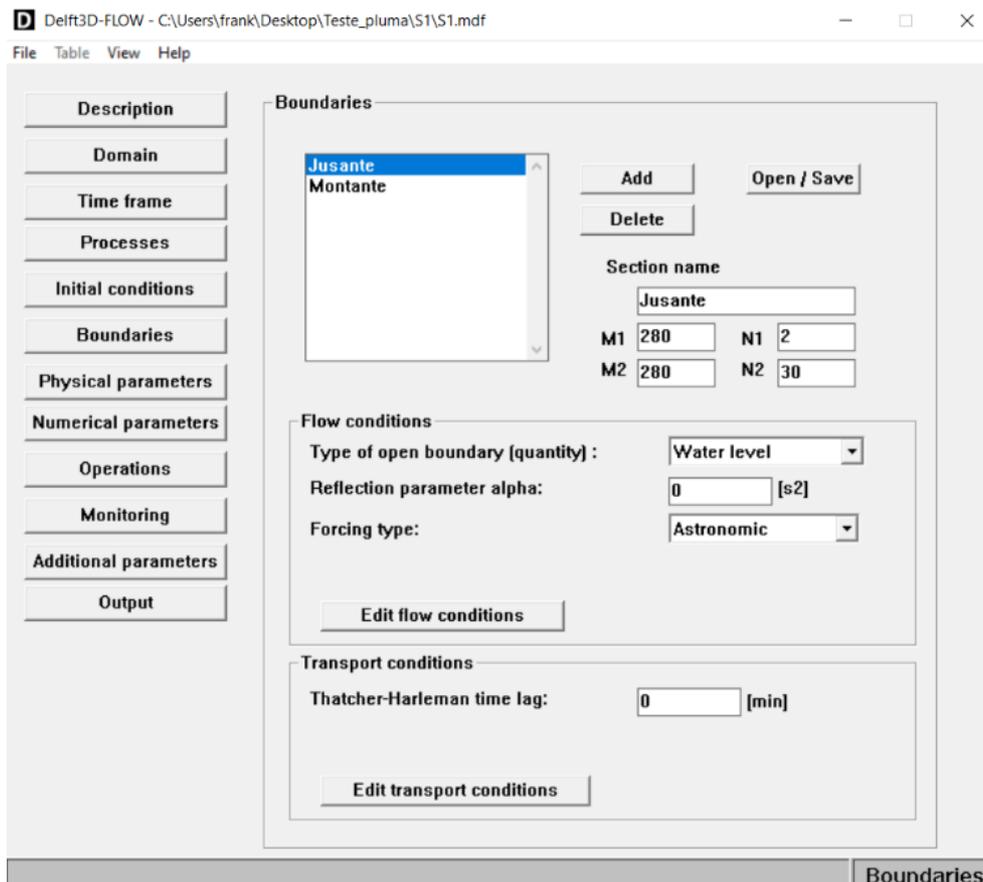


Figura 35- Submenu onde são definidas as características das fronteiras do modelo.

Na Figura 36 podemos ver as características atribuídas a uma das descargas efetuadas, composta pelos dois sedimentos silte e argila.

O programa apresenta ainda outros recursos adicionais ao nível da monitorização, através da inserção de pontos de observação nas células que o utilizador pretender, de modo a obter mais informação em locais específicos.

Por fim, é necessário indicar as definições para escrita de resultados, para que o programa consiga terminar a simulação e apresentar os resultados corretamente.

Importa referir que uma série de outros elementos tiveram de ser definidos e corrigidos para que o modelo funcionasse de acordo com o pretendido.

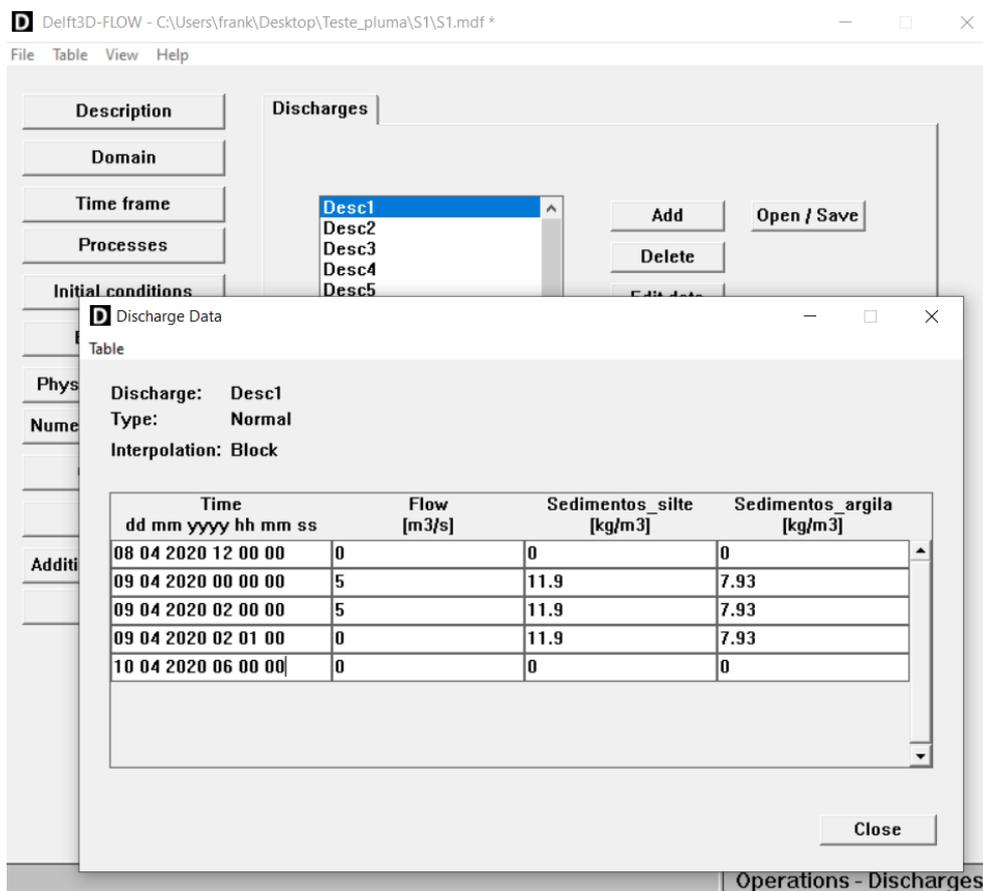


Figura 36- Características de uma das descargas efetuadas no processo de simulação da pluma por transbordamento.

4.2- Cenários de simulação para análise da morfodinâmica estuarina

Numa primeira fase, partindo-se da batimetria ótima que garante as condições de navegação em segurança, foram definidas diferentes simulações com o objetivo de prever, de acordo com diferentes fatores condicionantes, a evolução morfológica do estuário.

4.2.1- Características dos cenários

Após compilação de toda a informação, seguiu-se a definição dos cenários a simular considerando os objetivos do trabalho e os principais fatores com influência na morfodinâmica do estuário. Foram selecionadas as variáveis relativas às condições sedimentares e hidrodinâmicas mais importantes. Valores específicos destas variáveis permitem definir as várias simulações consideradas. Os resultados obtidos são analisados e comparados, permitindo retirar conclusões sobre os aspetos mais importantes do comportamento morfodinâmico em estudo.

As variáveis estudadas foram: tipo de maré, caudal fluvial, dimensão dos sedimentos, concentração de sedimentos na fronteira aberta de montante e a duração da simulação, incluindo o fator morfológico.

Foram considerados dois tipos de maré distintos, maré viva e maré morta. Os constituintes da maré foram obtidos com o auxílio do programa Deflt Dashboard. O período de maré viva selecionado está compreendido entre 7 e 12 de abril, sendo o nível do mar mais elevado registado no dia 9, e o período de maré morta entre os dias 16 e 21 de março, sendo o nível do mar mais reduzido registado no dia 19.

A análise foi realizada preferencialmente, considerando o período de maré viva, sendo adotado o período maré morta em apenas em alguns dos cenários considerados.

Na Figura 37 podemos observar a variação do nível do mar para o período de maré morta selecionado, dia 19 de março

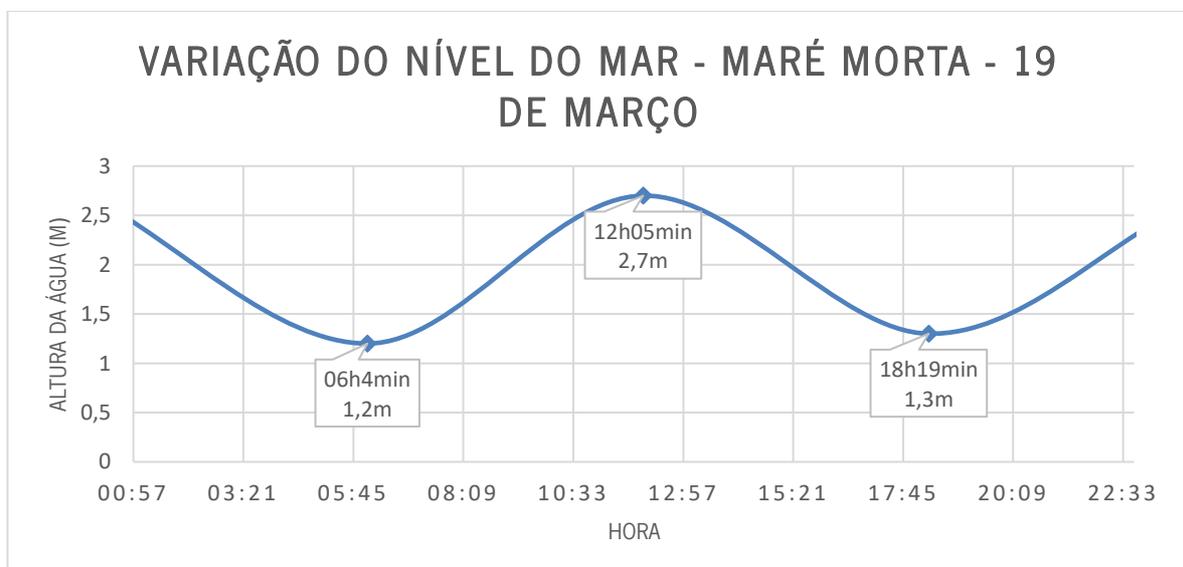


Figura 37-Variação do nível do mar no dia 19 de março.

Na Figura 38 podemos observar a variação do nível do mar para o período de maré viva selecionado, dia 9 de abril.

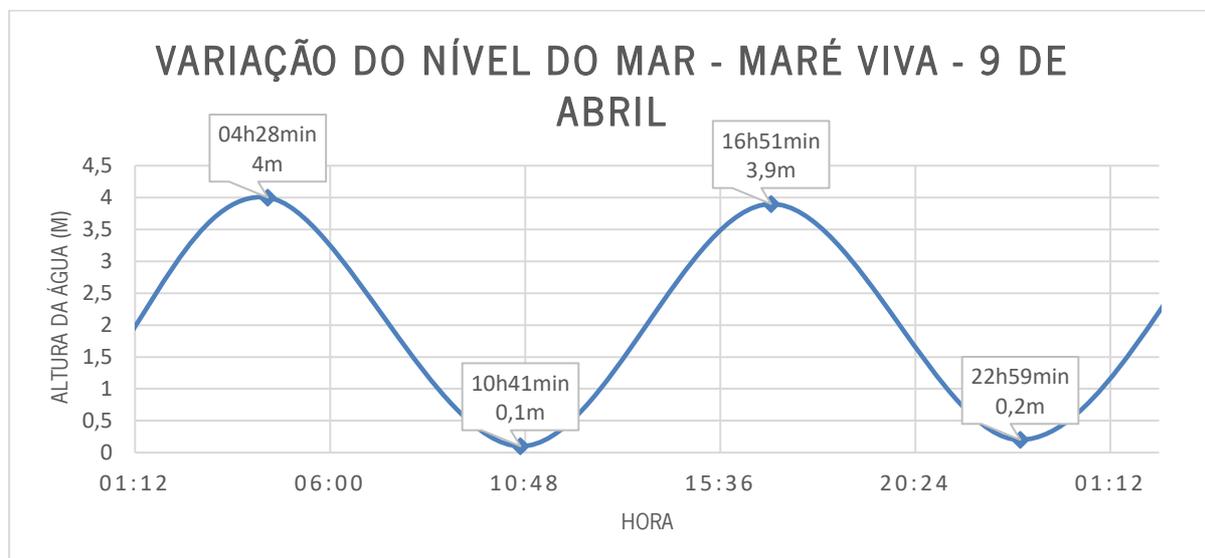


Figura 38-Variação do nível do mar no dia 9 de abril.

Em relação ao caudal fluvial, sabe-se que o principal contributo no estuário é o do rio Lima, sendo as respetivas descargas controladas pela barragem do Alto Lindoso e uns quilómetros mais a jusante, pela barragem do Touvedo. Para isso, foi feita uma análise aos dados disponíveis no SNIRH (Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos) relativos ao caudal efluente da barragem que se situa mais a jusante, durante os últimos 20 anos. Destes registos foram selecionados alguns períodos específicos, incluindo períodos de cheia (Tabela 5).

Tabela 5- Caudais fluviais adotados nas simulações, descarregados pela barragem do Touvedo entre 2000 e 2020.

Ano	Período	Duração (dias)	Caudal máximo registado (m³/s)	Caudal médio (m³/s)
2000	6/12 a 11/12	6	905,62	452,07
2000	29/12 a 01/01	3,5	671,52	460,08
2001(S4)	01/01 a 04/01	4	740,25	496,43
2001	05/01 a 06/01	1	1946,46	1047,7
2001	23/01 a 29/01	6,5	671,85	417,54
2001	06/02 a 10/02	5	612,83	414,32
2001(S3)	06/03 a 11/03	6	608,17	461,65
2001(S6)	21/03 a 22/03	1,5	1638,03	1511,96
2001(S5)	21/03 a 25/03	4,5	1638,03	766,85
2002	27/12 a 29/12	3	819,09	721,38
2016	12/02 a 14/02	2,5	854,02	754,75

Desta análise resultou para o caudal médio diário descarregado pela barragem do Touvedo em situações de cheia moderada o valor de 450 m³/s, sendo por isso utilizado na definição de cenários de cheia históricos, uma vez que para valores inferiores as alterações morfodinâmicas no estuário são pouco significativas.

Os dados obtidos a partir de registos disponíveis no SNIRH foram complementados com valores que resultaram de uma pesquisa bibliográfica de dados históricos relativos ao caudal do Rio Lima.

Optou-se por esta estratégia devido à escassez de dados hidrométricos a montante do estuário.

Foi definido um caudal de base de 100 m³/s com base no trabalho de PROMAN (2004). É importante referir que o caudal médio descarregado pela barragem do Touvedo é menor, no entanto este valor foi definido de modo a ter em consideração contribuições de outros afluentes, principalmente o rio Vez. Este caudal fluvial foi adotado na simulação 1 (S1).

Para a simulação 2 (S2), foi mantido o caudal de 100 m³/s, mas o fator morfológico foi considerado com um valor de 5. Desta forma, a duração da simulação no que se refere aos cálculos morfodinâmicos corresponde a uma duração que é o quádruplo da duração da simulação hidrodinâmica, permitindo, assim, acelerar o tempo de cálculo computacional. A simulação 2 apresenta uma duração de 5 dias, que é transformada numa simulação morfodinâmica de 25 dias com a aplicação do fator morfológico, admitindo-se linearidade dos resultados associados ao transporte sedimentar.

Num período de 25 dias o tipo de maré varia entre viva e morta. No entanto, assume-se esta simplificação de forma a termos resultados de morfodinâmica correspondentes a eventos de durações da ordem de grandeza do período acima indicado.

As simulações 3 a 6 correspondem a cenários de cheia definidos com valores de cheias históricas (Tabela 5, cenários S3 a S6). A simulação 7 (S7) faz referência ao caudal de cheia máximo que a barragem do Touvedo tem capacidade de debitar, tendo o valor de 3200 m³/s.

Nesta fase foi arbitrado que o leito do estuário era constituído apenas por areia. A dimensão característica dos sedimentos (D50) foi definida com o valor de 0,2 mm (referência), tendo sido também simulados cenários para todos os caudais com uma dimensão inferior de 0,1 mm. Tratam-se de duas areias finas.

Uma outra variável que tem interferência na morfologia sedimentar dos estuários e foi objeto de análise, é o fluxo de sedimentos que é considerado na entrada de montante do modelo (Açude de Ponte de Lima), ou seja, a sua concentração. O valor base foi definido como 0,5 kg/m³, sendo que se testaram também noutros cenários os valores de 1 kg/m³ e 2 kg/m³.

Na Tabela 6 apresenta-se as características adotadas em cada uma das simulações.

Tabela 6- Síntese das características dos cenários de simulação adotados no estudo realizado.

Simulação	Tipo de Maré	Caudal (m³/s)	D50 (µm)	Concentração sedimentos(kg/m³)	Duração (dias)	Fator morfológico
S1	Viva	100	200	0.5	5	1
S1.1	Viva	100	100	0.5	5	1
S2	Viva	100	200	0.5	5	5
S2.1	Viva	100	100	0.5	5	5
S2.2	Viva	100	200	1	5	5
S2.3	Morta	100	200	0.5	5	5
S3	Viva	450	200	0.5	6	1
S3.1	Viva	450	100	0.5	6	1
S3.2	Viva	450	200	2	6	1
S3.3	Morta	450	200	0.5	6	1
S4	Viva	500	200	0.5	4	1
S4.1	Viva	500	100	0.5	4	1
S5	Viva	800	200	0.5	4.5	1
S5.1	Viva	800	100	0.5	4.5	1
S5.2	Viva	800	200	2	4.5	1
S5.3	Morta	800	200	0.5	4.5	1
S6	Viva	1500	200	0.5	1.5	1
S6.1	Viva	1500	100	0.5	1.5	1
S7	Viva	3200	200	0.5	1	1
S7.1	Viva	3200	100	0.5	1	1

A duração em dias de cada simulação foi definida de acordo com os períodos de cheia observados no SNIRH (Tabela 5) a partir do qual foram definidos os caudais, de modo a aproximar o mais possível as simulações de situações já observadas no passado.

Neste trabalho, foi dada maior atenção ao baixo estuário, na proximidade da zona portuária. A par desta zona, foi também alvo de análise uma área localizada na envolvente da ponte de Lanheses, devido às grandes alterações batimétricas verificadas neste local.

4.3- Cenários de simulação para análise da pluma de dragagem

A pluma formada pelas descargas por transbordamento depende de outras características que não haviam sido necessárias nas simulações posteriores. Em seguida serão apresentados o processo de cálculo das descargas por transbordamento, o trajeto das dragas e as características dos cenários simulados.

4.3.1- Processo de cálculo das descargas por transbordamento

A seguinte metodologia de cálculo que será aqui apresentada é da autoria de Becker (2011), tendo sido adaptada para o presente caso de estudo.

Uma vez que para a execução deste trabalho não dispúnhamos de informação acerca dos sedimentos que constituem o leito do estuário do rio Lima, foi assumido que os mesmos seriam compostos por 50% de areia, 30% de argila e 20% de silte. Para estes sedimentos foi necessário quantificar propriedades e parâmetros relacionados com as suas características sedimentares (Tabela 7), entre eles a massa volúmica in situ do material (ρ_s), a massa volúmica do sedimento (ρ_k), a massa volúmica da mistura dragada (ρ_m) e a massa volúmica da água (ρ_w). A massa volúmica da água (ρ_w) tomou o valor de 1025 kg/m³ e a massa volúmica da mistura dragada (ρ_m) foi inicialmente definida como 1600 kg/m³.

$$c_{situ} = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (8)$$

$$\rho_{m,dry} = \rho_k * \left(1 - \frac{\rho_k - \rho_m}{\rho_k - \rho_w}\right) \quad (9)$$

Tabela 7- Dados sobre os sedimentos que constituem a mistura dragada. (Retirado de Engineering ToolBox (2010) e Yu et al., (1993))

Elemento	Massa volúmica in situ do material (ρ_s) (kg/m ³)	Massa volúmica do sedimento (ρ_k) (kg/m ³)	Concentração in situ (c_{situ})	Massa volúmica do material seco ($\rho_{m,dry}$) (kg/m ³)
Areia	1500	2000	1,21	1179,49
Silte	1200	1400	3,29	2146,67
Argila	1100	1700	7,67	1448,15

Com as características individuais de cada sedimento e as suas frações, podemos definir as características da mistura como um todo (Tabela 8).

Tabela 8- Dados sobre a mistura dragada como um todo.

Sedimento	Massa volúmica da mistura dragada (ρ_m) (kg/m ³)	Concentração in situ (c_{situ})	Massa volúmica da mistura seca ($\rho_{m,dry}$) (kg/m ³)
Mistura	1600	3,12	1523,4

Com os dados obtidos, podemos estimar a produção de sedimentos pela atividade de dragagem (Tabela 9).

$$Q_m = \frac{1}{4} * \pi * D^2 * V_m * n \quad (10)$$

$$P_s = Q_m * c_{situ} \quad (11)$$

$$P = p_{m,dry} * P_s \quad (12)$$

Tabela 9- Informações relativas à draga utilizada e à sua produção.

Elemento	Designação	Valor	Unidade
Q_m	Caudal de entrada da mistura	2500	m ³ /h
V_m	Velocidade de sucção da bomba	Não calculado	m/s
n	Número de tubos	2	—
P_s	Taxa de produção in situ	4,34	m ³ /s
P	Carga libertada pela draga	6610,40	kg/s

Uma vez que o cenário de dragagem em estudo é hipotético, por não se dispor de informações técnicas sobre as dragagens normalmente realizadas no estuário do rio Lima, como as características da embarcação que realizaria a dragagem, o caudal não foi calculado da forma acima apresentada. Foi assumido um caudal de entrada da mistura de 2500 m³/h, com duas bombas, o que preconiza um total de 5000 m³/h.

Nem todo o material dragado é libertado por transbordamento, por esse motivo é necessário reduzir a produção total da draga.

$$B = P * f_{finos} * f_{overflow} \quad (13)$$

Tabela 10- Parâmetros e carga referente à pluma dinâmica.

Elemento	Designação	Valor	Unidade
f_{finos}	Fração de finos	50	%
$f_{overflow}$	Mistura libertada por transbordamento	20	%
B	Pluma dinâmica	661,04	kg/s

O coeficiente $f_{overflow}$ representa a percentagem da mistura dragada que é libertada por transbordamento, assumindo, de acordo com Becker et al., (2015), um valor de 20%.

A mistura libertada por transbordamento gera inicialmente uma pluma dinâmica, que depois se transforma em pluma passiva. Apenas será considerada a última, por isso é necessário o coeficiente f_{din} para realizar essa transformação. Este coeficiente situa-se entre os 5 e 15%, tendo sido assumido o valor de 15%.

$$x_1 = B * f_{din} \tag{14}$$

$$X = \sum_{i=1}^4 x_i \tag{15}$$

Tabela 11- Dados relativos à transição entre pluma dinâmica e pluma passiva.

Elemento	Designação	Valor	Unidade
x_1	Tradução da pluma dinâmica em pluma passiva	99,16	kg/s
f_{din}	Fator que representa a fração de sedimentos finos que se traduzem numa pluma de superfície	15	%
X	Somatório das várias componentes da pluma passiva	Não calculado	kg/s

O processo de cálculo diz-nos que, devido à sedimentação que ocorre no reservatório, apenas os sedimentos finos são libertados no processo de transbordamento. A produção da draga, convertida em pluma passiva, será assim constituída por água, silte e argila. Foi arbitrada uma divisão de 60% de silte e 40% de argila.

Esta produção será considerada como uma descarga no *software* Delft3D, quando se simular um possível trajeto para a draga.

4.3.2- Trajeto da draga

O percurso da draga, e conseqüentemente o processo de transbordamento, é simulado através de doze descargas individuais, espaçadas duas horas entre si, o que leva a que a operação total tenha levado um dia a ser realizada.

Foram definidos dois trajetos, tendo como referência a ponte Eiffel.

O primeiro situa-se a jusante desta e o segundo a montante. Foi definida esta estratégia de modo a ser possível recolher resultados em duas localizações diferentes, em zonas que o estuário apresenta uma largura e batimetria completamente distintas.

Deste modo, podemos prever a influência dos vários fatores envolvidos na formação da pluma, sejam eles hidrodinâmicos ou morfodinâmicos.

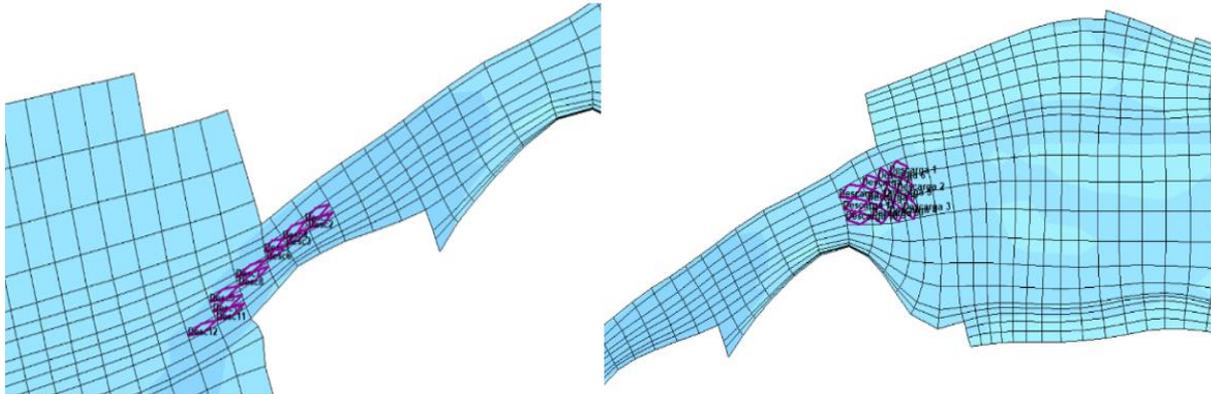


Figura 39- Localização do primeiro e segundo percursos da draga simulados, respetivamente.

O primeiro trajeto, apresentado com maior detalhe na Figura 40, foi implementado no centro da secção transversal da zona terminal do estuário, também chamada de baixo estuário. A operação de dragagem tem início na zona da doca de pesca e estende-se até ao canal de acesso aos estaleiros navais.

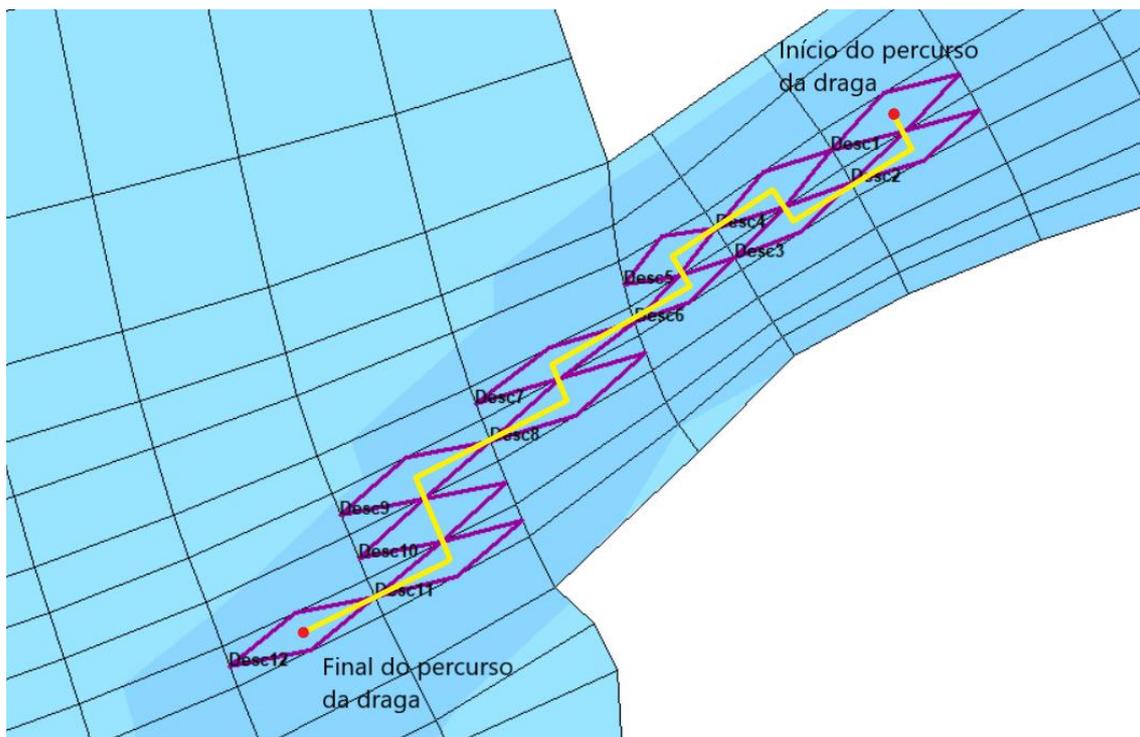


Figura 40- Vista aproximada do 1º percurso.

De acordo com os dados da APVC, a zona onde está implementado o primeiro trajeto das descargas é uma daquelas que possui maior profundidade, devido à constante passagem de navios de grande porte, decorrentes da atividade comercial do porto.

Este é por isso um local habitual para a realização de dragagens e conseqüentemente a libertação de sedimentos e formação da pluma por transbordamento.

O segundo trajeto, apresentado na Figura 41, foi implementado logo a seguir à ponte Eiffel, zona em que o estuário do rio Lima apresenta um grande alargamento.

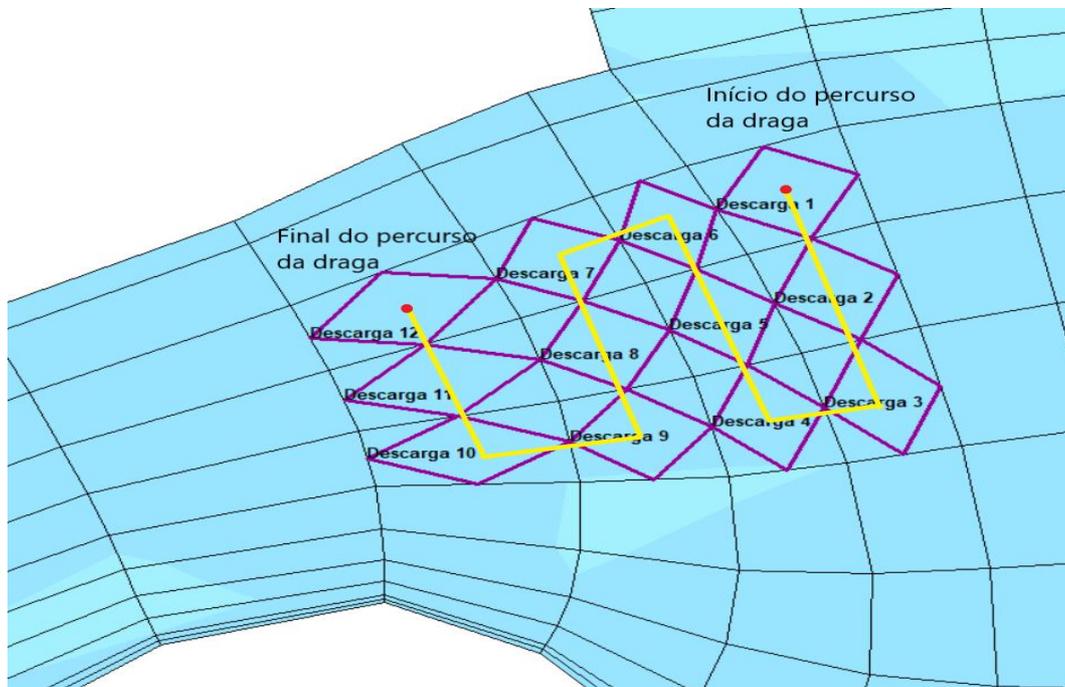


Figura 41- Vista aproximada do 2º percurso.

Por estarmos numa zona com características batimétricas e de escoamento diferentes, este trajeto assumiu também algum interesse. Este trajeto é também espacialmente diferente do anterior, uma vez que devido às próprias características morfológicas do escoamento, o primeiro percurso apresenta uma forma mais alongada, ao contrário deste, em que as operações de descarga estão confinadas a uma zona mais restrita.

Além disto, o facto deste se localizar já numa zona mais distante dos ENVC e da embocadura do estuário, atribui especial importância ao estudo que foi feito, permitindo estabelecer uma relação entre descargas realizadas nesta zona e o seu conseqüente impacto nas praias adjacentes ao porto.

4.3.3- Características dos cenários

O impacto da descarga por transbordamento foi avaliado através da concentração de silte e argila na massa hídrica recetora, nos instantes seguintes à operação de dragagem. Neste sentido, foram selecionados alguns parâmetros relativos à hidrodinâmica do escoamento, que vão caracterizar as simulações de dragagens (SD1 a SD6).

Tabela 12- Simulações e respetivas características selecionadas para o estudo da pluma por transbordamento.

Simulação	Tipo de Maré	Caudal fluvial (m ³ /s)	Carga da descarga- Silte (kg/s)	Carga da descarga- Argila (kg/s)	Duração (horas)	Localização (em relação à ponte Eiffel)
SD1	Viva	100	59,50	39,67	24	1-Jusante
SD2	Viva	200	59,50	39,67	24	1-Jusante
SD3	Morta	100	59,50	39,67	24	1-Jusante
SD4	Morta	200	59,50	39,67	24	1-Jusante
SD5	Viva	100	59,50	39,67	24	2-Montante
SD6	Morta	100	59,50	39,67	24	2-Montante

Foram escolhidos dois caudais diferentes (100 e 200 m³/s) e dois períodos temporais, um relativo a maré viva e outro relativo a maré morta.

O tipo de maré em que as operações são realizadas assume uma importância fulcral, sendo por isso inevitável abordar uma comparação entre ambas. Já em relação ao caudal, optou-se por valores próximos dos caudais médios diários que coincidem com a capacidade máxima de turbinamento na barragem de Touvedo (100 m³/s), assumindo que não seriam realizadas dragagens quando a principal descarga nas barragens do Lindoso e Touvedo ocorre em situações de cheia, o que poderia comprometer as operações de dragagem.

As operações de dragagens são assumidas como sendo realizadas ao longo de 24 horas, período durante o qual temos duas preia-mar e duas baixa-mar, e conseqüentemente, dois períodos de enchente e dois períodos de vazante.

A maré enchente representa o período entre uma baixa-mar e uma preia-mar sucessiva, em que se verifica um aumento do nível da água. Já a maré vazante representa o oposto, ou seja, o período entre uma preia-mar e uma baixa-mar sucessiva, em que o nível da água diminui.

Uma vez que vamos analisar as diferenças na dispersão da pluma por transbordamento para um período de maré viva e outro de maré morta, naturalmente teremos diferenças na distribuição temporal do comportamento das plumas resultantes.

No que diz respeito à maré viva, considera-se que as dragagens foram realizadas no dia 9 de abril de 2020. Em relação à maré morta, foi selecionado o dia 19 de março de 2020.

De seguida serão apresentadas as informações da maré referentes a esses dois dias.

Tabela 13- Dados recolhidos sobre as marés dos períodos selecionados.

Tipo de Maré	Data	1ª Preia-mar (h)	1ª Baixa-mar (h)	2ª Preia-mar (h)	2ª Baixa-mar (h)	Altura máxima e mínima (m)
Maré viva	09/04/2020	4:28	10:41	16:51	22:59	4,0 e 0,2
Maré morta	19/03/2020	_____	6:04	12:05	18:19	2,7 e 1,4

As marés destes dois períodos têm comportamentos diferentes, ou seja, o dia 9 de abril, maré viva, pode ser caracterizado por uma maré semidiurna regular, com duas preia-mar e duas baixa-mar num período de 24 horas. Já o dia 19 de março, maré morta, apresenta apenas uma preia-mar e duas baixa-mar. Neste sentido, e após ser analisado o comportamento do nível médio da água na maré morta, optou-se por estender o período de simulação até se atingir uma preia-mar “fictícia” às 00 horas e 10 minutos, para que a comparação fosse composta por duas baixa-mar e duas preia-mar.

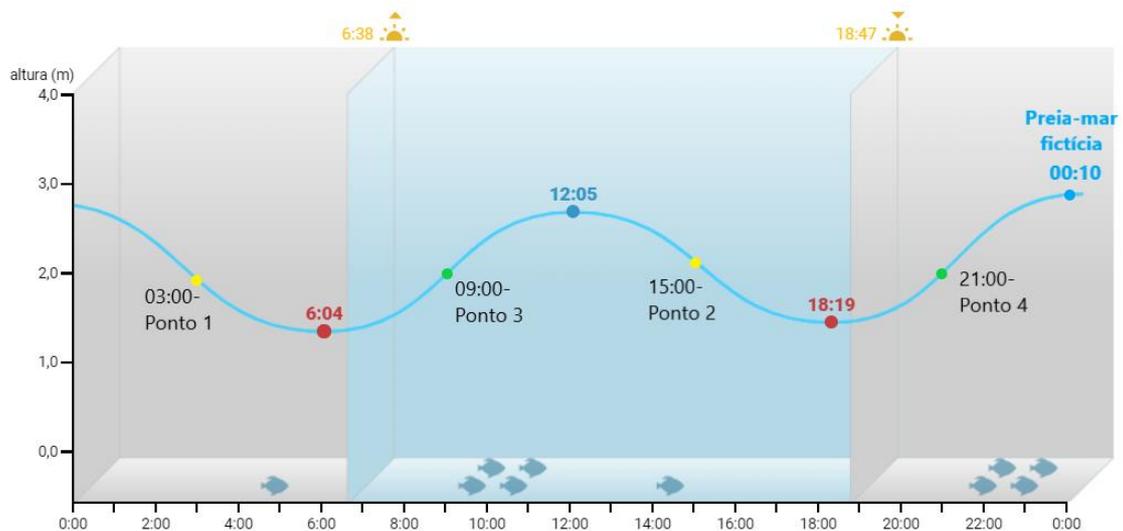


Figura 42- Progressão da maré morta do dia 19 de Março. (Retirado de Tábua de Marés, 2020)

Nas Figuras 43 e 43 estão representadas as progressões do nível da maré para ambas as situações, com a alteração referida na maré morta.

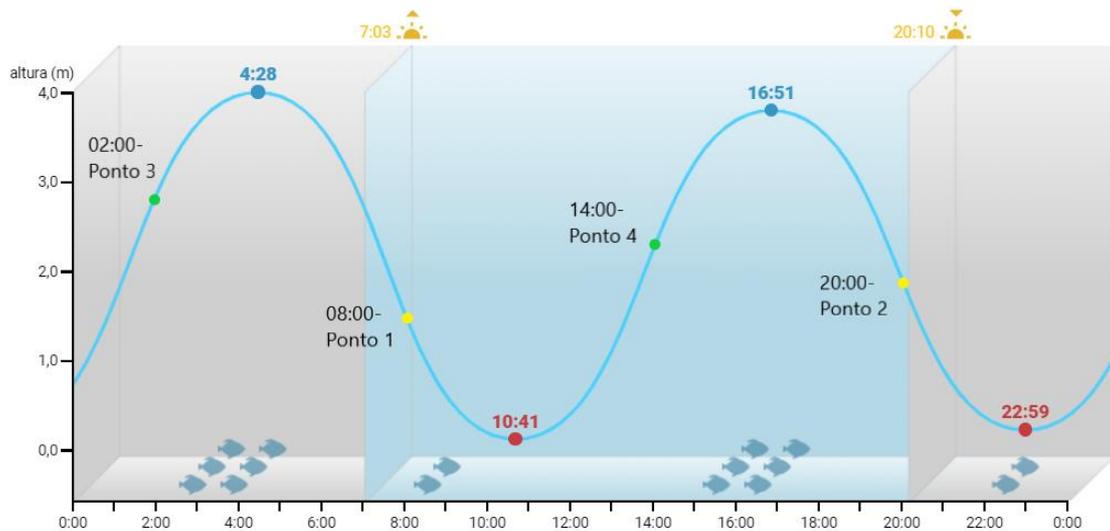


Figura 43- Progressão da maré viva do dia 9 de Abril. (Retirado de Tábua de Marés, 2020)

Para conseguir comparar duas marés com comportamento distintos, teremos de comparar instantes também eles distintos. Foram por isso definidos pontos de comparação de modo a poder ligar as marés enchente e vazante dos dois períodos. Estes pontos estão representados nas Figuras 40 e 41 com a cor amarela (fase vazante) e verde (fase enchente), e também na Tabela 14.

Tabela 14 Identificação dos pontos de comparação entre as duas marés.

Ponto de comparação	Instante maré viva	Instante maré morta	1ªVazante	2ªVazante	1ªEnchente	2ªEnchente
1	08:00	03:00	X			
2	20:00	15:00		X		
3	02:00	09:00			X	
4	14:00	21:00				X

Capítulo 5
Resultados e discussão

5- Resultados e discussão

5.1- Fase 1- Evolução da batimetria

Serão agora apresentados e discutidos os resultados obtidos para as simulações realizadas na primeira fase do trabalho, de modo a averiguar de que forma os vários parâmetros influenciam a evolução batimétrica do estuário do rio Lima.

5.1.1- Valores de erosão/sedimentação em função do caudal fluvial – Embocadura

Na Figura 44 são apresentados os resultados da erosão/sedimentação na embocadura do estuário do Rio Lima, para diferentes caudais fluviais (Q), para as simulações correspondentes aos cenários S1, S3, S4, S5, S6 e S7.

Podemos verificar que os resultados obtidos para a erosão e sedimentação se intensificam em conformidade com o aumento do caudal fluvial. Em todas as simulações em análise obtivemos variações significativas imediatamente a montante e a jusante da ponte Eiffel, em primeiro lugar com uma erosão assinalável logo a seguir ao estrangulamento do rio, e em seguida uma zona bem identificada de deposição.

À medida que o caudal foi aumentado, estas variações tornaram-se mais intensas. Surgem também outras zonas com sedimentação preponderante, nomeadamente a montante da ponte da A28, com uma sequência de zonas de deposição e erosão, resultado que é consentâneo com a existência de ilhas neste local. Este tipo de formas sedimentares, podem ser mais instáveis ou mais persistentes, em função do caudal fluvial considerado.

Com o aumento do caudal fluvial as alterações na batimetria são mais intensas, o que levou à necessidade de alterar a escala de visualização. Nas simulações S6 e S7 temos então uma zona de deposição muito relevante após a ponte Eiffel, bem como outra mais extensa a montante da ponte da A28 (no caso da simulação S7). Podemos também verificar erosões localizadas na proximidade das ilhas que se encontram formadas nesta zona, sendo seguidas de deposições.

A principal zona de erosão localiza-se a montante da ponte Eiffel, na margem esquerda do rio, devido às grandes velocidades da corrente que aqui se verificam.

Com os caudais mais elevados, teríamos provavelmente formação de novas ilhas, ou um prolongamento das já existentes.

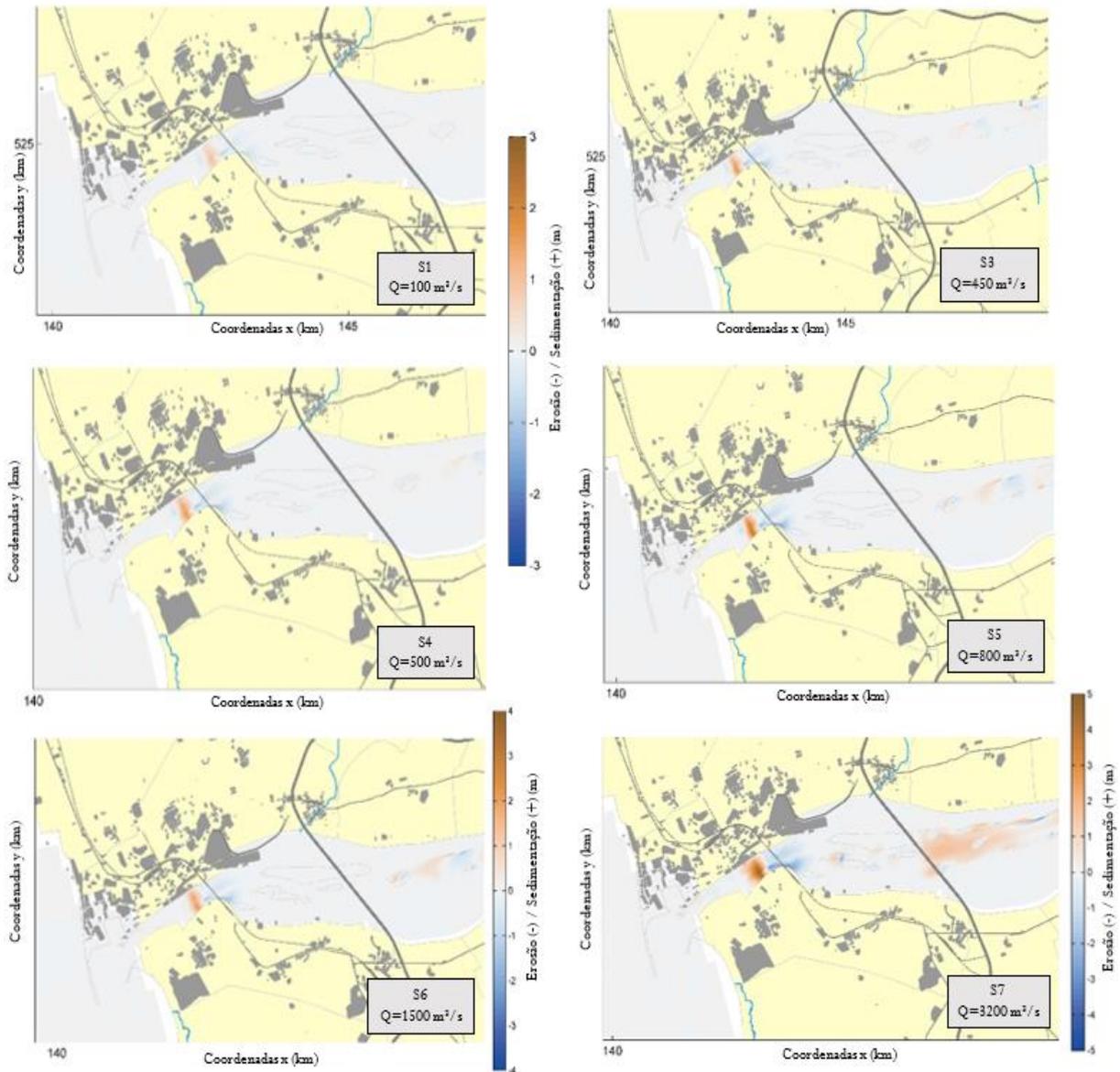


Figura 44- Resultados de erosão/sedimentação em função do caudal fluvial no baixo estuário e embocadura para as simulações S1, S3, S4, S5, S6 e S7.

Estes caudais elevados acontecem com pouca frequência e provocam alterações bastante significativas na batimetria. Podemos também explicar o facto das referidas ilhas se manterem estáveis com o passar do tempo, uma vez que apenas caudais extraordinários provocam mudanças significativas na sua morfologia.

Podemos ainda verificar que as alterações batimétricas na zona mais próxima do porto de Viana do Castelo são muito reduzidas. Apenas na situação do maior caudal de cheia, são visíveis algumas

variações na zona terminal da estação de pilotos, sendo essas alterações sedimentações que ocorrerão nas condições consideradas.

5.1.2- Valores de erosão/sedimentação em função do caudal fluvial – Ponte de Lanheses

Na Figura 45 são apresentados os resultados da erosão/sedimentação na localidade de Lanheses, mais concretamente na área envolvente da ponte sobre o rio Lima e que se situa nesta localidade, para diferentes caudais fluviais (Q), para as simulações correspondentes aos cenários S1, S3, S4, S5, S6 e S7.

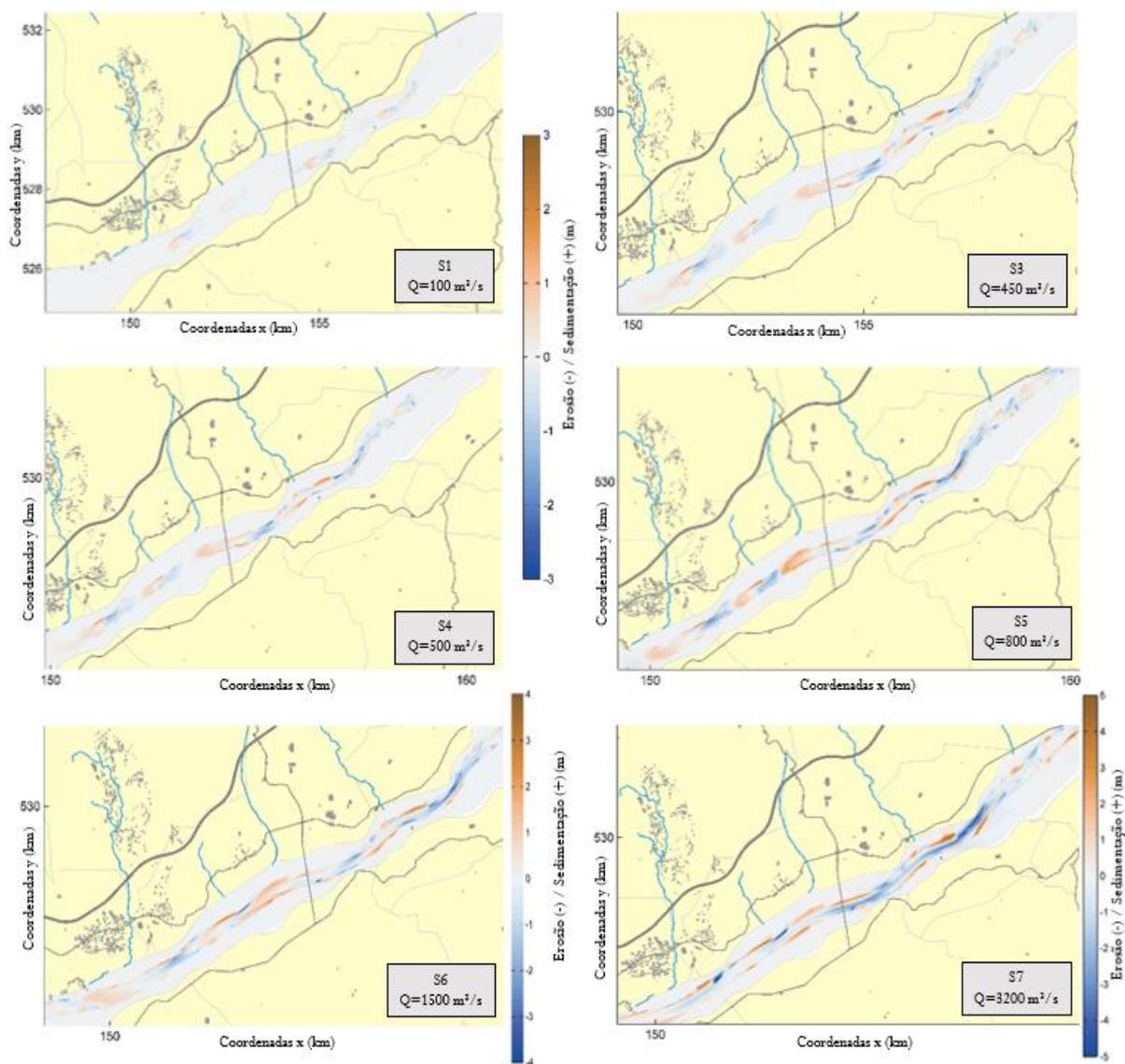


Figura 45- Resultados de erosão/sedimentação em função do caudal fluvial em Lanheses para as simulações S1, S3, S4, S5, S6 e S7.

Da observação dos resultados apresentados podemos concluir que esta zona é particularmente dinâmica, mesmo em situações de caudais de cheia mais reduzidos. Isto pode ser explicado pelo facto de estarmos na presença de uma zona com baixas profundidades, em que o nível médio da água se situa entre 2 m e 3 m (na zona central), levando naturalmente a uma maior tendência para intensificação dos processos sedimentares (erosão e sedimentação).

Por outro lado, esta é uma zona em que o estuário apresenta uma largura menor do que na embocadura, fazendo com que as velocidades das correntes sejam maiores, o que pode também explicar a intensificação dos padrões de erosão/deposição.

Na presença dos caudais mais intensos temos alterações profundas nesta zona do rio Lima, com uma visível alternância entre zonas de deposição e erosão, tanto a montante como a jusante da ponte de Lanheses. Podemos ainda verificar a ocorrência de alterações significativas em zonas mais próximas das margens do estuário, o que não acontecia em simulações com caudais inferiores. Isto mostra não só o maior poder de mobilização sedimentar pelo escoamento, mas também a possibilidade de erosão das margens nesta zona do estuário, que facilmente sofrem mudanças. (Lacasta et al., 2015)

5.1.3- Valores de erosão/sedimentação em função da dimensão dos sedimentos – Embocadura

Na figura 46 são apresentados os resultados da erosão/sedimentação na embocadura do estuário, para duas dimensões distintas de sedimentos.

A análise de resultados apresentados permite verificar que as maiores alterações ocorrem sobretudo a jusante da ponte Eiffel.

Na simulação S2.1, em que os sedimentos são de menor dimensão, temos uma zona de deposição ligeiramente mais extensa para jusante, mas menos acentuada, logo após a ponte Eiffel. Esta acumulação abrange uma extensão que ocupa toda a largura do estuário. Já as áreas de erosões são relativamente iguais às verificadas na simulação S2, sendo mais notórias na margem esquerda do estuário.

Na zona a montante da ponte da A28, os resultados são semelhantes entre as duas simulações aqui comparadas. Podemos constatar alterações respeitantes sobretudo a deposições, pouco significativas.

Em relação à comparação seguinte, a simulação S4 apresenta uma deposição ligeiramente maior do que aquela que se verifica na simulação S4.1; no que diz respeito à erosão, as diferenças são menos notórias, sendo muito pouco relevantes, verificando-se sobretudo na margem esquerda e também

numa zona mais central. De referir ainda que, neste caso, as alterações a montante da ponte Eiffel são praticamente nulas.

Podemos verificar que na simulação S6.1, que apresenta uma menor dimensão de sedimentos quando comparada com a simulação S6, obtivemos uma zona de deposição a jusante da ponte Eiffel menos intensa do que na simulação S6. Esta zona é notória sobretudo na margem esquerda do estuário.

A erosão verificou-se sobretudo sob a zona atravessada pela ponte Eiffel, quase exclusivamente na margem esquerda, e foi sensivelmente semelhante em ambas as situações.

Já em relação às zonas onde existem ilhas a montante da ponte da A28, podemos observar maioritariamente deposições, mais extensas, mas menos intensas na simulação S6.1, do que aquilo que é observado na simulação S6.

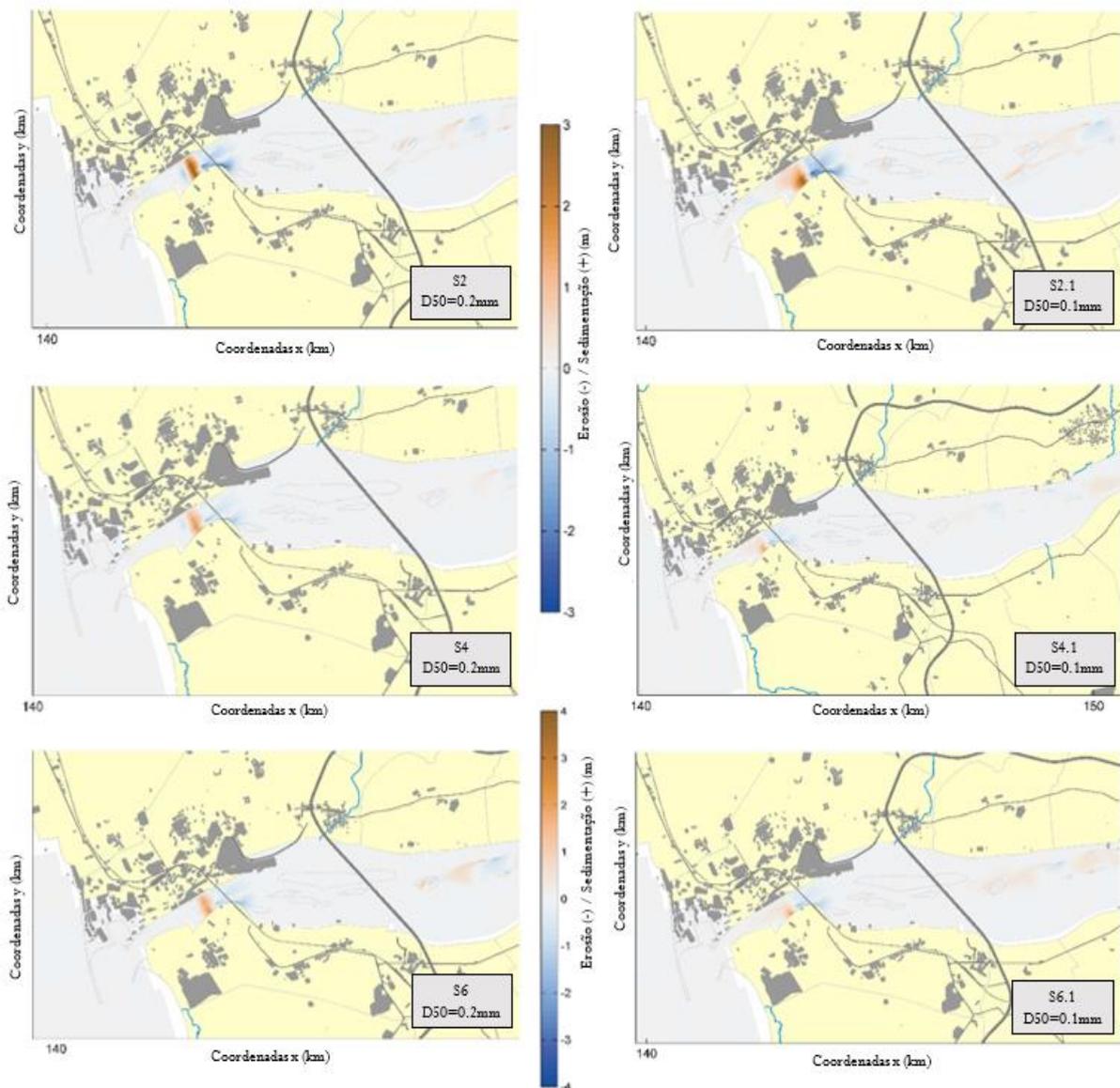


Figura 46- Resultados de erosão/sedimentação em função da dimensão dos sedimentos no baixo estuário e embocadura para as simulações S2, S2.1, S4, S4.1, S6 e S6.1.

5.1.4- Valores de erosão/sedimentação em função da dimensão dos sedimentos – Ponte de Lanheses

Na Figura 47 são apresentados os resultados da erosão/sedimentação na localidade de Lanheses, mais concretamente na zona envolvente da ponte sobre o estuário do rio Lima e que se situa nesta localidade, para duas dimensões diferentes de sedimentos.

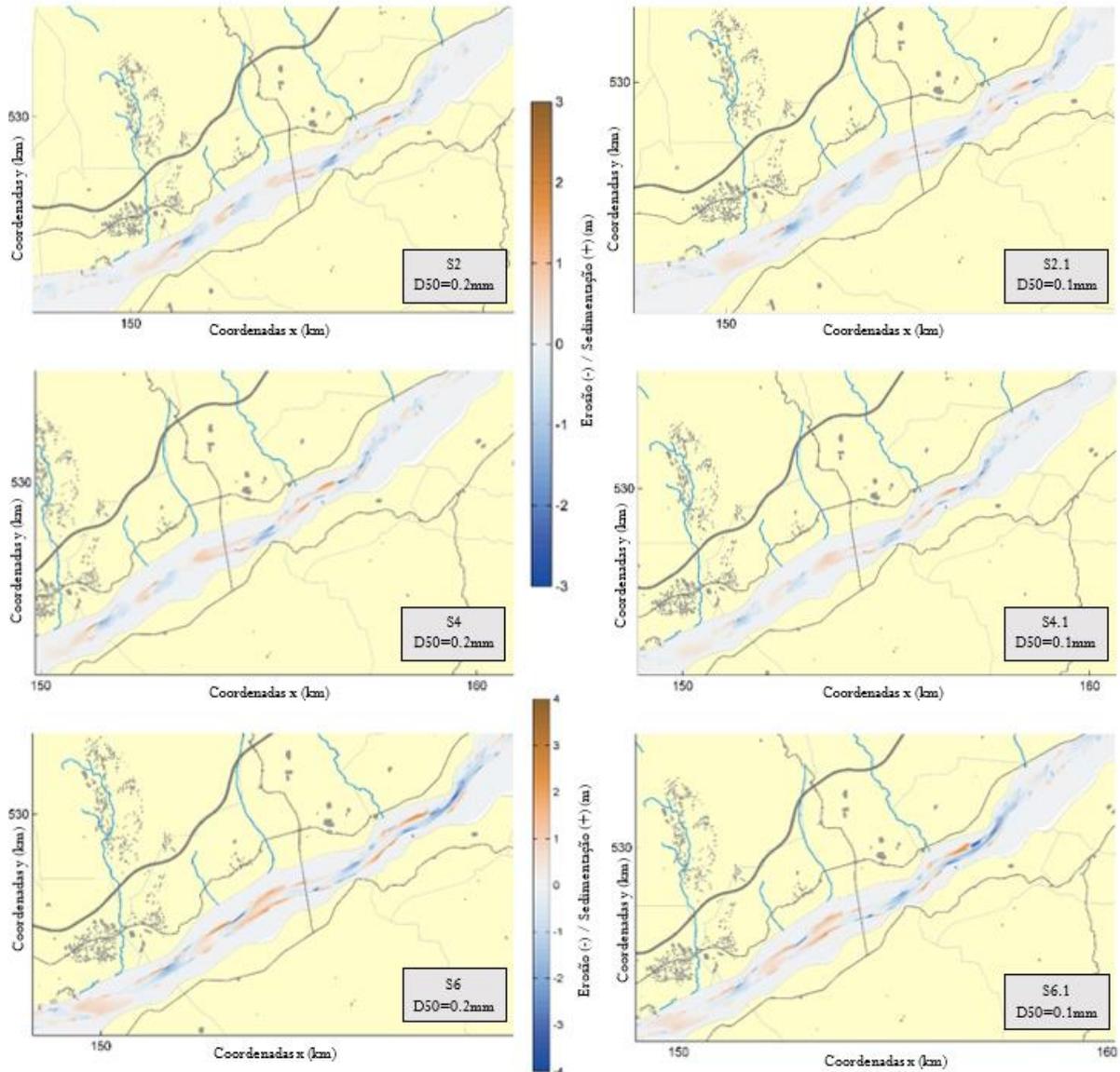


Figura 47- Resultados de erosão/sedimentação em função da dimensão dos sedimentos em Lanheses, para as simulações S2, S2.1, S4, S4.1, S6 e S6.1.

Da comparação entre as simulações S2 e S2.1, podemos verificar que a influência da dimensão dos sedimentos nos resultados de erosão/sedimentação é muito reduzida para as dimensões consideradas. As alterações apresentam intensidades semelhantes, sendo apenas as zonas com

alterações um pouco mais extensas no caso da simulação S2.1, que corresponde a sedimentos de dimensão inferior.

No que diz respeito às simulações S4 e S4.1, as conclusões são semelhantes às anteriores. Ambas as simulações apresentam resultados muito semelhantes, sendo que a simulação correspondente a sedimentos de menor dimensão aparenta ter alterações ligeiramente mais extensas. A batimetria altera-se na zona central do escoamento, com uma sucessão bem definida entre zonas de deposição e erosão.

Da comparação entre os resultados obtidos para as simulações S6 e S6.1, podemos verificar que em alguns pontos do trecho avaliado, a simulação correspondente a sedimentos de maior dimensão (S6) apresenta zonas mais extensas de alteração.

Também neste caso podemos observar a existência de zonas de deposição sucedidas por zonas de erosão. Estas alterações na configuração do fundo já vão sendo notórias na proximidade das margens, uma vez que estamos na presença de um caudal elevado, com grande capacidade de transporte.

Em relação à intensidade das alterações, parece ser sensivelmente idêntica nas duas situações, o que nos permite concluir que o principal fator interveniente serão as condições hidrodinâmicas, tendo grande destaque o caudal fluvial.

5.1.5- Valores de erosão/sedimentação de sedimentos em função da concentração de sedimentos na entrada de montante – Embocadura

Na Figura 48 são apresentados os resultados da erosão/sedimentação para a zona da embocadura do estuário, considerando o aumento da concentração de sedimentos na entrada de montante do modelo.

A partir da análise dos resultados obtidos verifica-se que a concentração de sedimentos na entrada de montante do modelo, não apresenta influência notória nas alterações batimétricas na embocadura do estuário. Tanto na comparação entre as simulações S2 e S2.2 como para as restantes simulações em comparação, as áreas e valores de erosão/sedimentação não sofreram mudanças após ser aumentada a variável analisada.

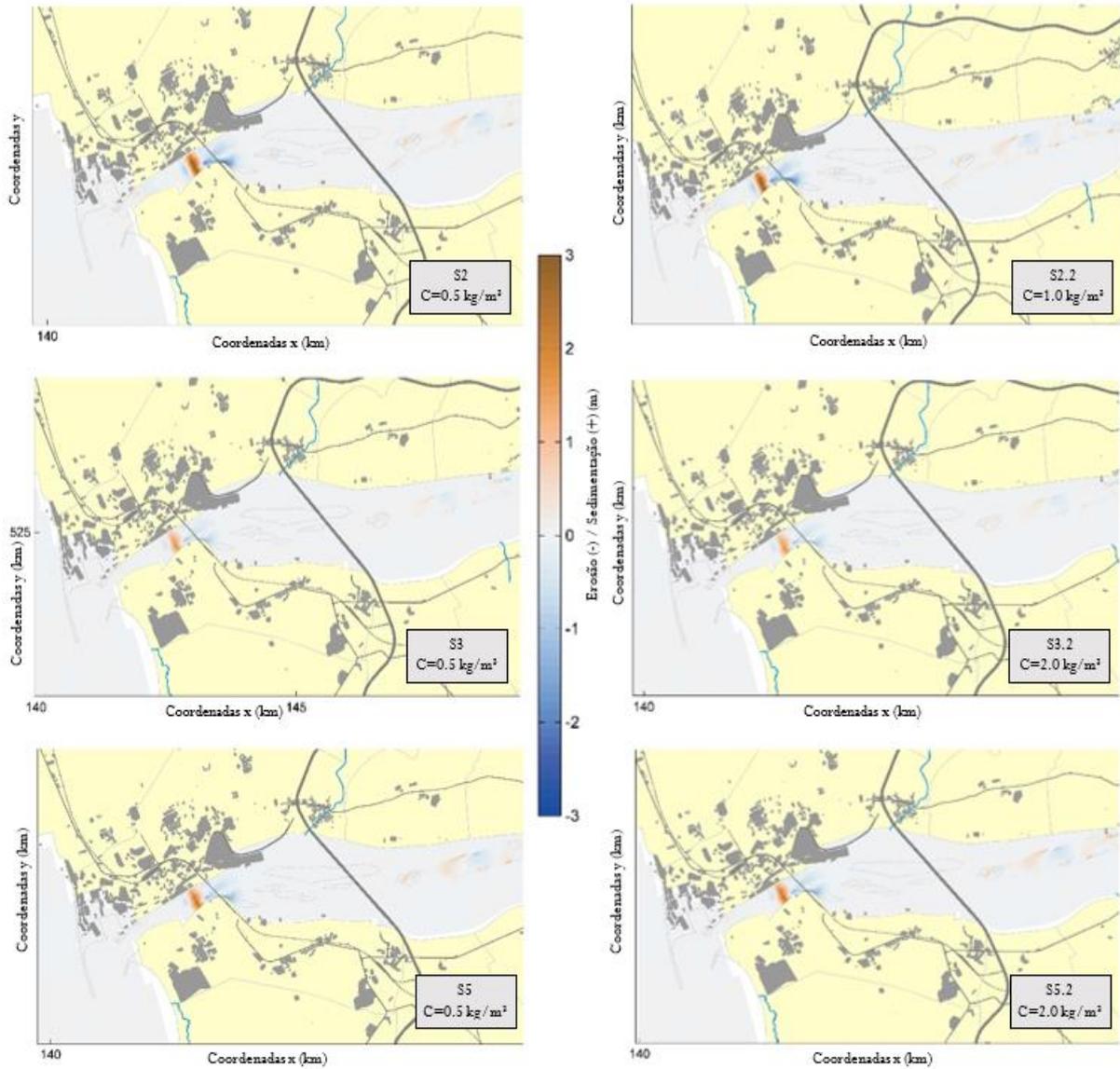


Figura 48- Resultados de erosão/sedimentação em função da concentração de sedimentos na entrada de montante, na zona da embocadura, para as simulações S2, S2.2, S3, S3.2, S5 e S5.2.

5.1.6- Valores de erosão/sedimentação de sedimentos em função da concentração de sedimentos na entrada de montante – Ponte de Lanheses

Na Figura 49 são apresentados os resultados de erosão/sedimentação na zona de Lanheses, mais concretamente na proximidade da ponte que atravessa o estuário, considerando o aumento da concentração de sedimentos na entrada montante do modelo.

Assim como acontecia na embocadura do estuário, na zona de Lanheses as alterações batimétricas provocadas pelo aumento da concentração de sedimentos na entrada montante do modelo são insignificantes.

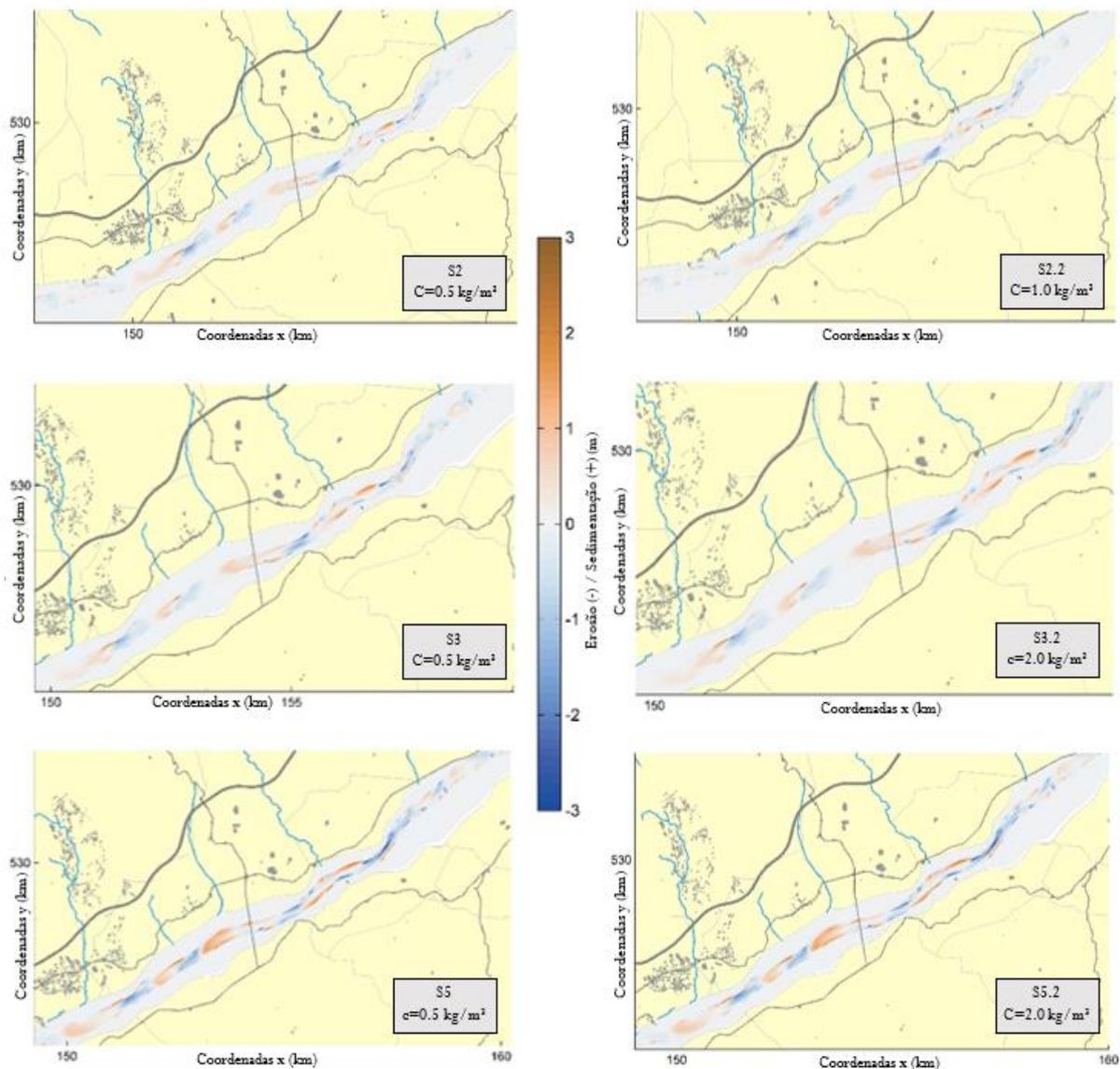


Figura 49- Resultados de erosão/sedimentação em função da concentração de sedimentos na entrada de montante, em Lanheses, para as simulações S2, S2.2, S3, S3.2, S5 e S5.2.

5.1.7- Valores de erosão/sedimentação em função do tipo de maré – Embocadura

Na Figura 50 são apresentados os resultados dos valores de erosão/sedimentação na embocadura de estuário, para dois tipos de marés: viva ou morta.

Na simulação S2 considera-se um caudal pouco intenso ($100 \text{ m}^3/\text{s}$), mas com um tempo de simulação (5x5 dias) superior ao da simulação S3, em que se considera um caudal substancialmente maior ($450 \text{ m}^3/\text{s}$), mas correspondendo a um período de simulação de apenas 6x1 dias.

Apesar de termos diferentes conjugações de condições, podemos verificar o impacto enorme que a maré tem nas alterações batimétricas na entrada da zona portuária. Nas três situações de maré morta, o fundo do estuário manteve-se praticamente igual.

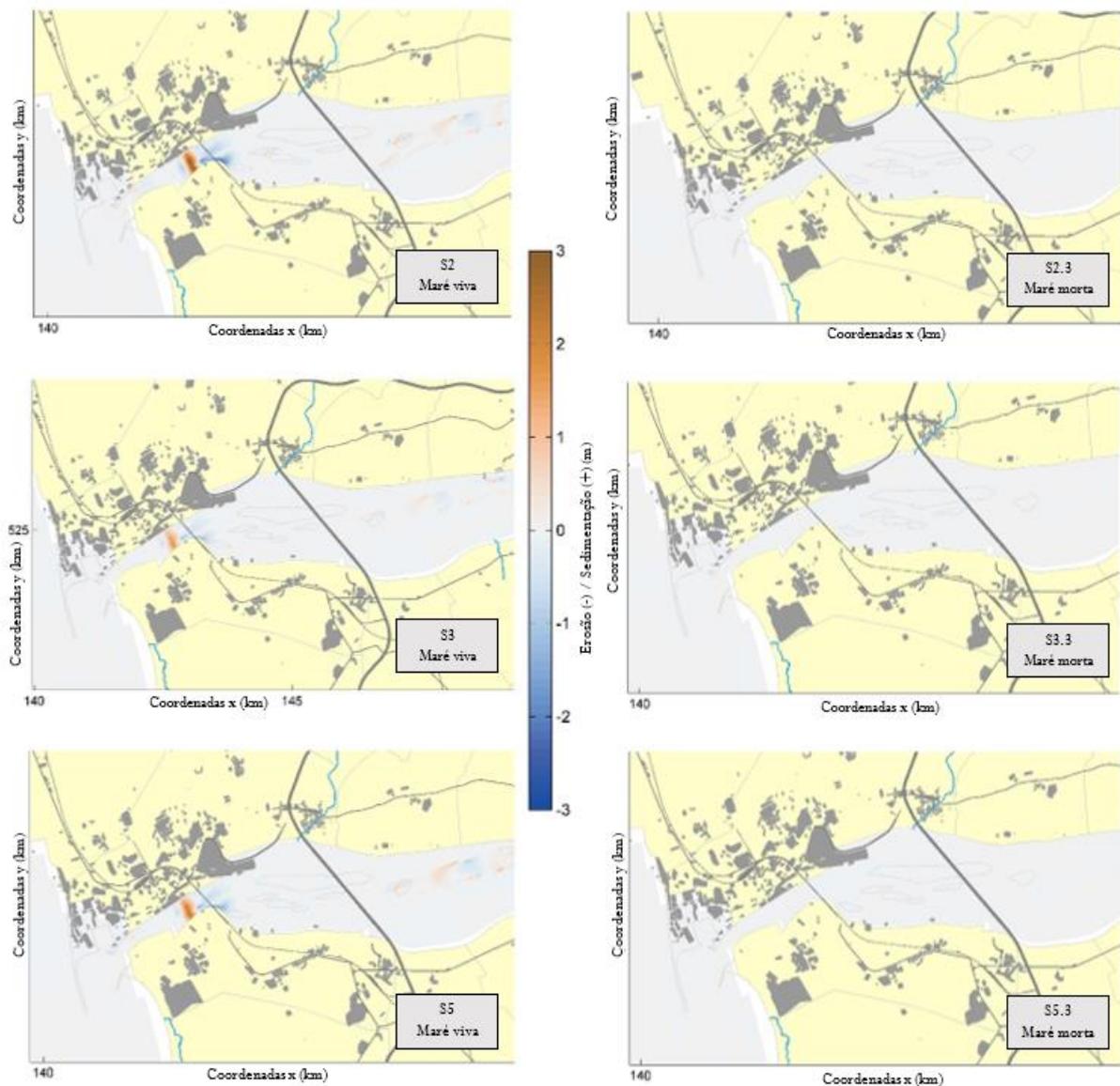


Figura 50- Resultados de erosão/sedimentação em função do tipo de maré, na zona da embocadura, para as simulações S2, S2.3, S3, S3.3, S5 e S5.3.

Após ser alterada a escala gráfica dos resultados, foi possível verificar que, no caso da simulação S2.3, a variação batimétrica na zona do estreitamento do canal, perto da ponte Eiffel, era da ordem dos 15 centímetros. Já para a simulação S3.3, esse valor era de cerca de 10 centímetros.

É importante referir que a simulação S2.3 representa cinco períodos de cinco dias com situação de maré morta, não podendo ser entendido como um período de cinco dias consecutivos.

Nas simulações S5 e S5.3, apesar de estarmos na presença de um caudal substancialmente mais elevado, podemos verificar novamente que se confirma a grande influência da maré no comportamento da batimetria da embocadura do estuário. Na simulação da maré morta, obtivemos erosões e deposições que rondavam os 15 centímetros, valor pouco significativo. Contudo, se a mesma

descarga fluvial ocorrer durante uma maré viva, este caudal de 800 m³/s induz alterações morfológicas muito superiores (1 a 2 m).

5.1.8- Valores de erosão/sedimentação em função do tipo de maré- Ponte de Lanheses

Na Figura 50 são apresentados os resultados da erosão/sedimentação em Lanheses, mais concretamente na proximidade da ponte que atravessa o rio Lima e que se situa nesta localidade, para os dois tipos de maré: viva ou morta.

Da comparação entre os resultados das simulações realizadas, podemos verificar que, mais uma vez, a maré viva se mostra determinante para as alterações na batimetria, desta vez na zona de Lanheses.

Em relação à comparação entre as simulações S2 e S2.3, os resultados seguem as conclusões retiradas na secção anterior, em que os cenários com maré morta apresentam alterações na batimetria inferiores a 20 centímetros. No entanto, podemos já distinguir algumas zonas mais intensas a montante da ponte de Lanheses, com variações que ultrapassam 1 metro.

Ainda assim, e ao contrário do que aconteceu na zona da embocadura, na simulação S3.3 podemos verificar algumas alterações de realce. Apesar de não termos resultados tão intensos como para uma situação de maré viva, a montante da ponte de Lanheses ainda se registam algumas sucessões de zonas de deposição e erosão significativas, mesmo em situação de maré morta.

No que diz respeito à simulação S5, e ao contrário do que acontecia na embocadura, na zona de Lanheses podemos verificar variações significativas na batimetria, sobretudo a montante da ponte, para os dois tipos de maré, com natural destaque para a simulação com maré viva (S5).

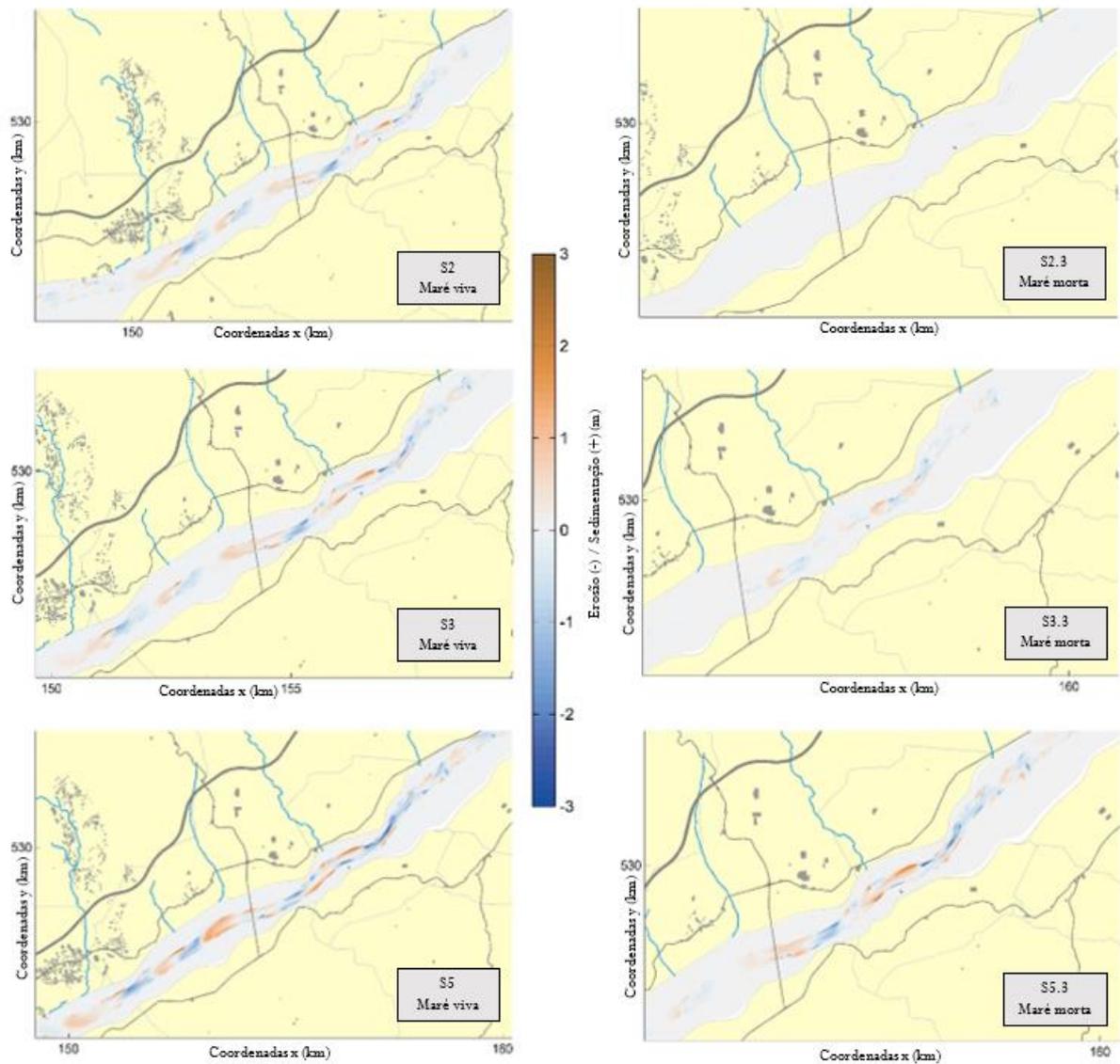


Figura 51- Resultados de erosão/sedimentação em função do tipo de maré, em Lanheses, para as simulações S2, S2.3, S3, S3.3, S5 e S5.3.

Após ter sido analisada a influência do caudal fluvial, dimensão dos sedimentos, concentração de sedimentos na entrada de montante e o tipo de maré, é possível agora retirar várias conclusões sobre os resultados obtidos.

O caudal fluvial é um dos principais responsáveis pela modificação da batimetria do estuário do rio Lima. A simulação 3, com uma duração de seis dias e um caudal de $450 \text{ m}^3/\text{s}$, apresenta já alterações significativas no leito do estuário, com uma zona de forte deposição a jusante da ponte Eiffel, e uma zona de erosão que é atravessada pela mesma ponte, na margem esquerda do rio, onde ocorre o estrangulamento do escoamento. Ainda com estas condições, são visíveis ligeiras alterações nas ilhotas que se situam sobretudo a montante da ponte da A28. Estas alterações seguem o ritmo do caudal, sendo mais visíveis à medida que o caudal fluvial sobre.

O caudal de cheia (S7) provocaria alterações profundas nas zonas referidas, sobretudo uma vasta área de sedimentos depositados a seguir à ponte Eiffel, e também nas referidas ilhotas.

No que diz respeito à dimensão dos sedimentos, o seu impacto foi notório sobretudo na área de deposição de sedimentos. Foi possível verificar que, para o sedimento de maior dimensão, a deposição de sedimentos a jusante da ponte Eiffel foi mais intensa, mas produziu uma área de deposição inferior ao sedimento menor, tanto para caudais mais reduzidos, como para caudais mais elevados.

Já a concentração de sedimentos na entrada montante do modelo revelou não ter influência digna de assinalar nos resultados. Uma explicação para o sucedido é o facto de o modelo ter vários km de extensão, e nesse percurso a diferença no valor de entrada ter-se-á perdido. Também importa referir que os valores testados foram valores baixos, uma vez que seria pouco provável termos grandes quantidades de sedimento na coluna de água, devido às barragens do Alto Lindoso e Touvedo.

Em relação à maré, verificamos que no caso de termos vinte cinco dias de maré viva, ainda que com um caudal considerado baixo, de 100 m³/s, seriam produzidas alterações significativas na zona da ponte Eiffel. A relevante zona de deposição aqui criada, irá também criar condições para que estes sedimentos sejam mais facilmente erodíveis e transportados para zonas a jusante, mais próximas da embocadura.

No entanto, estes resultados do grupo de simulação 2 devem ser interpretados com precaução, uma vez que é impossível registarmos durante vinte cinco dias a mesma maré, seja ela morta ou viva.

No que diz respeito à zona de Lanheses, os impactos dos parâmetros em estudo foram em geral semelhantes aos verificados no estuário. No entanto, devido à profundidade mais reduzida que esta zona apresenta, surgiram mais alterações. A dimensão do sedimento, bem como a concentração de sedimento na entrada montante do modelo, não produziram qualquer alteração nos resultados.

Um dado que importa destacar é que nesta zona, foram verificadas alterações no caso de estarmos num período de maré morta, ao contrário do que acontecia na embocadura do estuário.

Podemos assim afirmar que:

- No estuário o principal fator com impacto na alteração da batimetria é o tipo de maré, seguido do caudal. Já na zona de Lanheses, o caudal fluvial assume maior relevância;

- As principais alterações verificam-se na zona atravessada pela ponte Eiffel, com uma intensa erosão na margem esquerda; uma zona de elevada deposição na doca de recreio, sendo esta a localização do estuário com menor profundidade;

- Perto dos ENVC as alterações batimétricas são residuais.

Em relação à pouca influência da dimensão dos sedimentos:

- Os sedimentos com menor dimensão requerem menor intensidade de corrente para serem transportados, bem como têm uma velocidade de sedimentação menor, ou seja, demoram mais tempo a depositarem-se.

- Os processos de erosão e deposição são facilmente controlados num ambiente fechado, em que é possível prever o seu comportamento, através das condições do escoamento e do próprio sedimento, tendo conhecimento das equações que regem o movimento das partículas. No entanto, em ambiente fluvial e estuarino, esta previsão é significativamente mais complexa, uma vez que o controlo e conhecimento dos processos envolvidos é muito menor e dependentes de condições hidrodinâmicas complexas.

-Com as condições hidrodinâmicas que os estuários apresentam, não podemos esperar que uma simulação com sedimentos de menor dimensão apresente obrigatoriamente zonas de erosão e deposição mais acentuadas, considerando apenas as características do próprio sedimento, como mostram os resultados apresentados.

- Por outro lado, o caudal escoado tem também um papel importante nos processos de sedimentação/erosão, sendo que caudais elevados terão a capacidade de transportar os sedimentos para distâncias maiores.

5.2- Pluma de sedimentos por transbordamento

Em seguida serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após a realização das descargas por transbordamento e consequente formação de pluma, de acordo com os vários cenários definidos.

5.2.1- Pluma de sedimento silte para um caudal de 100 m³/s e maré enchente- 1º

Trajeto

Na Figura 52 apresentam-se os resultados obtidos da pluma de silte por transbordamento, para um caudal fluvial de 100 m³/s e uma situação de maré viva e maré morta, sensivelmente a meio das duas marés enchentes que o estuário apresenta.

Em relação à primeira enchente, podemos verificar o claro impacto da maré. A maré morta (SD3) mostra-nos uma concentração de silte no geral claramente superior à de maré viva (SD1), devido à sua inferior capacidade de transporte. Também verificamos que praticamente todo o canal da zona portuária

mais estreita apresenta elevados valores de sólidos em suspensão, aproximando-se do valor da zona em que foi realizado o transbordamento.

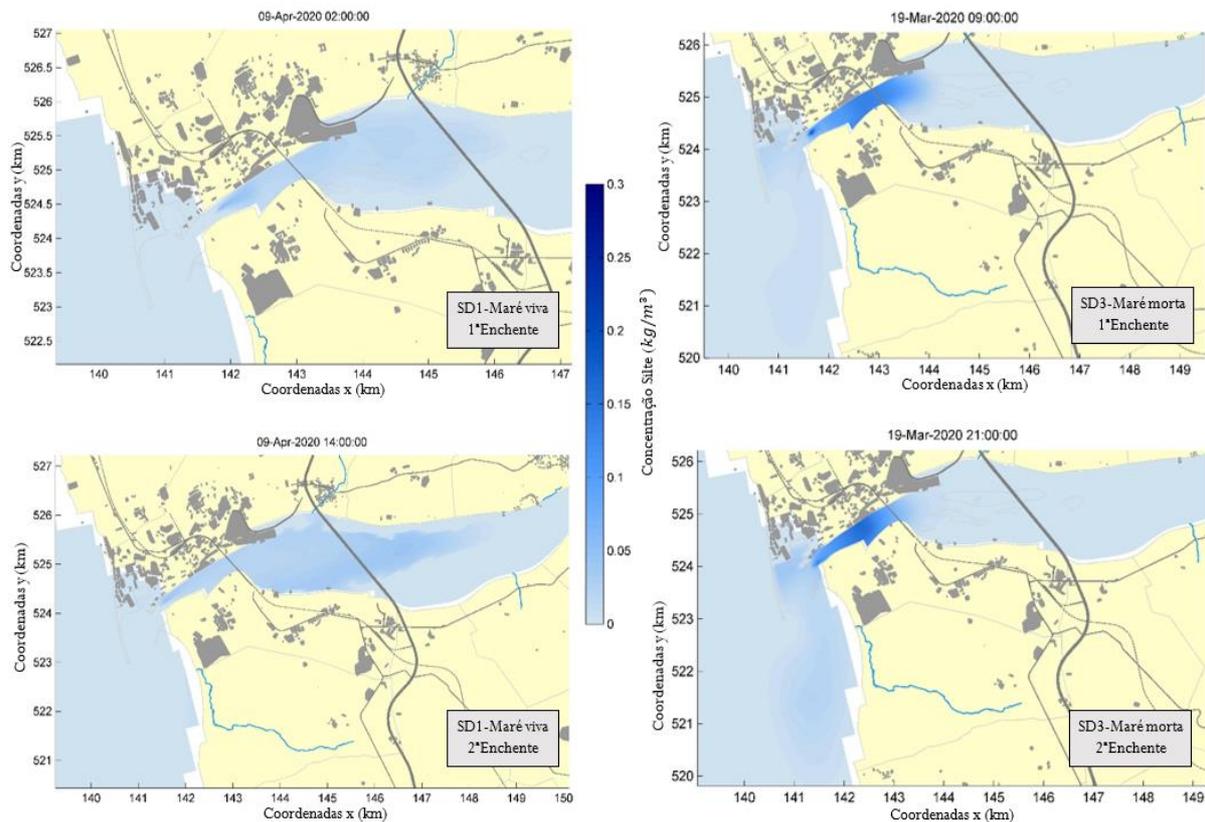


Figura 52- Pluma de silte devido às descargas por transbordamento nos pontos de comparação 3 e 4 das simulações 1 e 3.

A pluma é mais intensa na zona atravessada pela ponte Eiffel, em que a concentração ronda o valor $0,25 \text{ kg/m}^3$, sendo suavizada à medida que o estuário aumenta a sua largura. Podemos também observar que apesar de estarmos numa situação de enchente, decorreu já algum tempo desde que foi efetuada a primeira dragagem e consequentemente o transbordamento, o que explica uma ligeira pluma na zona dos estaleiros navais e também no mar, estendendo-se até à praia do Cabedelo. A forma da pluma mostra-nos também o percurso das correntes de maré devido à existência dos quebra-mares.

Em relação à maré viva (SD1), é importante também referir que a sua primeira maré de enchente acontece num instante precoce do processo de descarga por transbordamento, o que também influencia a baixa concentração existente. Aqui a pluma estende-se exclusivamente para montante, sendo inclusive mais extensa do que na situação anterior, aproximando-se das ilhas na zona de montante em análise. A sua intensidade é baixa e constante ao longo de toda a pluma, não superando o valor de $0,1 \text{ kg/m}^3$.

Em relação à segunda maré enchente, a maré viva (SD1) traduz-se noutra tipo de resultados. Temos concentrações um pouco mais elevadas perto da ponte da A28 e podemos também perceber os

efeitos da intensidade da maré através da extensão da pluma. Nesta situação, a mesma atinge e inclusive ultrapassa claramente a ponte mais afastada, que fica já situada a uma grande distância do local onde foi realizado o processo de transbordamento. Vemos que mesmo numa zona mais larga do estuário, a pluma ocupa a sua totalidade.

A segunda situação de enchente da maré morta permite-nos tirar algumas conclusões: i) o facto da segunda enchente se verificar já muito tardiamente, ajuda a explicar as elevadas concentrações de silte na zona mais estreita do estuário; ii) a menor dimensão da pluma deve-se ao facto de que ao longo do dia de dragagens, uma parte do sedimento vá depositando, até pelas características da maré em si; iii) a jusante, em mar aberto e numa zona com uma área considerável, verificamos valores de concentrações superiores à primeira enchente, o que acontece devido à maré vazante anterior; iv) na zona dos estaleiros navais, mais protegida, é propício a que ocorra uma maior deposição de sedimento, uma vez que o efeito da maré é mais reduzido, e por isso temos águas menos agitadas.

5.2.2- Pluma de sedimento silte para um caudal de 100 m³/s e maré vazante- 1º Trajeto

Na Figura 53 podemos observar os resultados obtidos da pluma de silte por transbordamento, para um caudal fluvial de 100 m³/s e uma situação de maré viva e maré morta, sensivelmente a meio das duas marés vazantes que o estuário apresenta.

Em relação à primeira vazante da maré viva (SD1), foram registadas no geral baixas concentrações de sedimento. Formou-se uma pluma bem visível e bem definida que se estende por vários quilómetros até mar aberto.

Já a primeira vazante da maré morta (SD3), apresenta por um lado concentrações consideravelmente superiores, o que seria de esperar, e também uma pluma bastante reduzida em área, em comparação com a anterior, que se estende durante alguns quilómetros para sul, atingindo mesmo a praia da Amorosa.

Podemos assim verificar o poder de transporte elevado na vazante, sobretudo em situação de maré viva.

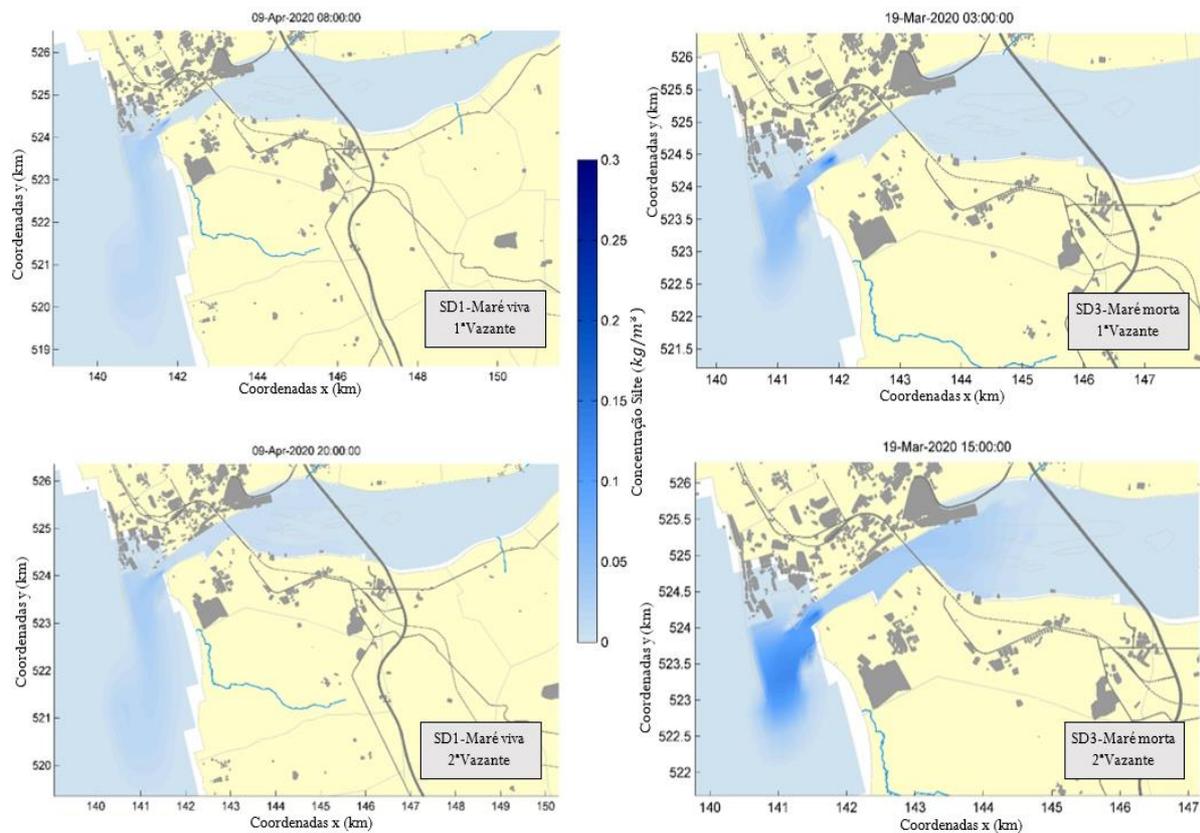


Figura 53- Pluma de silte devido às descargas por transbordamento nos pontos de comparação 1 e 2 das simulações 1 e 3.

Passando para a segunda vazante, os resultados são semelhantes aos anteriores. Para a maré viva (SD1), verificou-se uma pluma de grandes dimensões, assim como a primeira, e com concentrações reduzidas, abaixo dos $0,1 \text{ kg/m}^3$. A sua maior intensidade é sentida na embocadura do estuário. Podemos também perceber que, a montante da zona onde foi realizada a dragagem, já não são visíveis os efeitos da pluma após a ponte da A28, sendo que na zona entre as duas pontes estes são praticamente residuais

A simulação SD3 (maré morta) apresenta também uma pluma de sedimento que se estende para montante do estuário, ainda que com fraca intensidade. Para jusante, temos uma pluma com concentrações elevadas desde a zona onde é realizada a dragagem e até serem atingidos os quebra-mares, zona em que se faz evidenciar o poder de diluição e diminui a quantidade de sedimento suspenso na água. Esta pluma é consideravelmente menor, uma vez que o caudal fluvial também não apresenta intensidade suficiente para que a mesma atinja grandes distâncias, como se verifica na maré viva.

5.2.3- Pluma de sedimento argila para um caudal de 100 m³/s e maré enchente- 1º Trajeto

Na Figura 54 podemos observar os resultados da pluma de argila por transbordamento, obtidos para um caudal fluvial de 100 m³/s e uma situação de maré viva e maré morta, sensivelmente a meio das duas marés enchentes que o estuário apresenta.

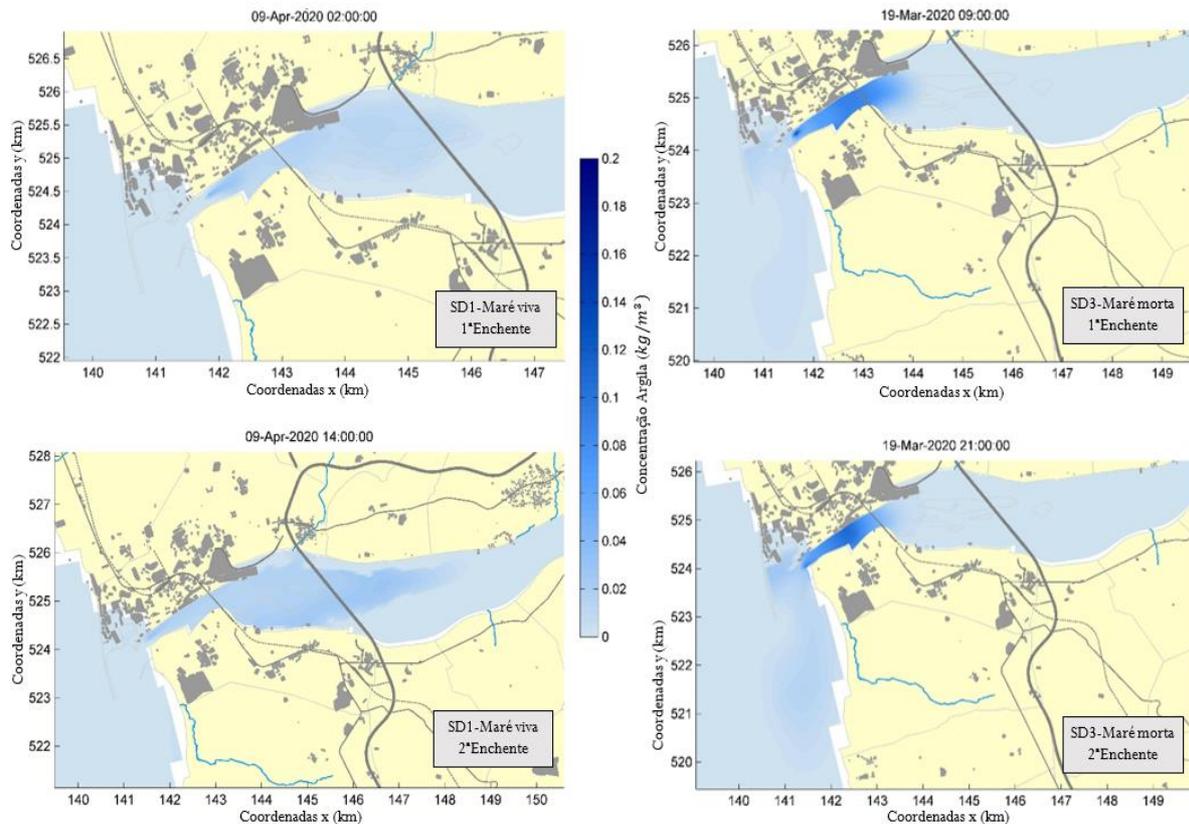


Figura 54- Pluma de argila devido às descargas por transbordamento nos pontos de comparação 3 e 4 das simulações 1 e 3.

Em primeiro lugar, a quantidade de argila presente na mistura água + sedimento que é libertada por transbordamento é significativamente inferior à quantidade de silte, o que poderá ter efeitos na da pluma resultante.

Começando pela primeira enchente, na SD1 (maré viva), temos uma pluma bem formada, mas pouco intensa, devido ao facto de as operações de dragagem se terem iniciado apenas duas horas antes. Apesar disto, ultrapassa já a ponte mais afastada do local das descargas.

Em relação à maré morta (SD3), podemos observar uma pluma que se estende para montante, com concentrações elevadas, ocupando o estuário na sua totalidade, na zona mais estreita.

Esta pluma começa a perder a sua intensidade a partir do momento em que o estuário alarga, após a ponte Eiffel. Devido a estarmos numa situação de enchente, a pluma que se verifica a jusante é muito reduzida.

Já para a segunda enchente, no caso de termos maré viva, é possível concluir a importância do efeito da maré comparado com o caudal fluvial. Aqui, a maré tem capacidade de transportar a pluma a longas distâncias, mantendo a argila em suspensão, ainda que com concentrações baixas, mesmo após a ponte da A28.

A jusante, podemos referir que na zona dos estaleiros navais a quantidade de argila em suspensão é praticamente nula, e apenas é visível uma ligeira faixa da pluma ao longo dos primeiros quilómetros de costa.

Por fim, na segunda enchente da maré morta, temos a montante uma pluma ligeiramente menos extensa do que na primeira enchente, mas com uma intensidade semelhante, ocupando também a totalidade do estuário na zona mais estreita. A jusante, temos concentrações ligeiramente superiores na zona dos estaleiros navais, bem como uma pluma maior e mais intensa após os quebra-mar que protegem o estuário.

5.2.4- Pluma de sedimento argila para um caudal de 100 m³/s e maré vazante- 1º Trajeto

Na Figura 55 podemos observar os resultados da pluma de argila por transbordamento, obtidos para um caudal fluvial de 100 m³/s e uma situação de maré viva e maré morta, sensivelmente a meio das duas marés vazantes que o estuário apresenta.

A primeira vazante da maré viva apresenta-nos uma pluma ligeira, mas com uma grande extensão. O efeito da vazante está bem expresso, no alcance atingido pela pluma por transbordamento. A primeira vazante da maré morta, como habitualmente apresenta concentrações de argila superiores, sensivelmente constantes em toda a pluma, sendo esta mais reduzida em área abrangida.

A segunda vazante apresenta uma concentração semelhante para a situação de maré viva, e superior para a situação de maré morta, devido ao facto de esta acontecer num momento já mais tardio, e a massa hídrica não possuir tanta capacidade para atenuar os efeitos prolongados do transbordamento.

A simulação com maré morta apresenta uma pluma com concentrações elevadas, superiores a 0,1 kg/m³ sendo este valor praticamente constante desde a zona da descarga por transbordamento até à embocadura do estuário.

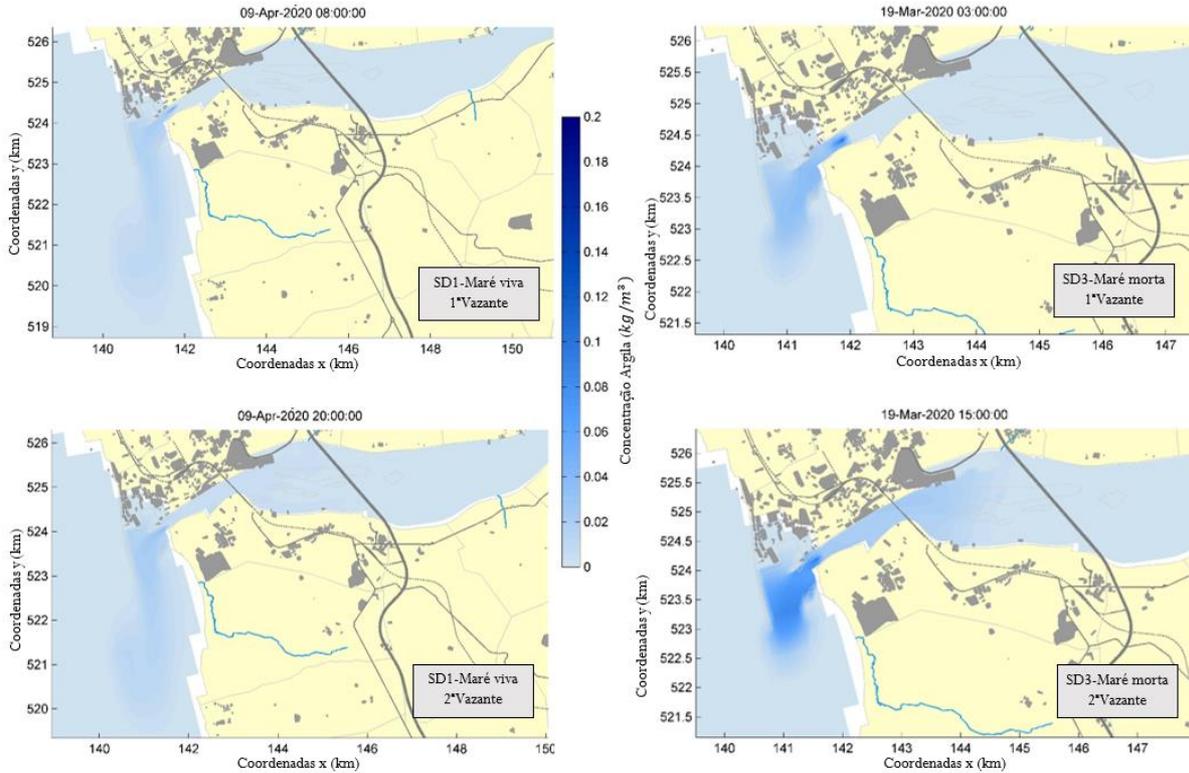


Figura 55- Pluma de argila devido às descargas por transbordamento nos pontos de comparação 1 e 2 das simulações 1 e 3.

A dimensão da pluma repete-se em relação à segunda vazante da maré morta, e aumenta no que toca à maré viva, sendo este aumento localizado a montante do local da dragagem, ainda que com baixas concentrações de argila.

Os resultados relativos ao primeiro trajeto da draga, que foram apresentados anteriormente, permitem-nos concluir:

- Quer estejamos em situação de maré vazante ou enchente, a maré viva mostrou-se capaz de produzir plumas de sedimentos bastante alongadas, com vários quilómetros, e com concentrações sensivelmente constantes ao longo de toda a sua extensão;
- As plumas resultantes da maré viva e enchente prolongaram-se por cerca de 7 quilómetros para montante; já em situação de maré vazante o alcance reduziu para cerca de 5 quilómetros, em mar aberto;
- A maré morta produziu plumas bastante mais intensas, mas mais curtas. Isto pode ser explicado através da pouca capacidade de transporte da maré em si, que leva os sedimentos a depositarem mais rapidamente;

- As plumas resultantes da maré morta e enchente preencheram o estuário na sua zona mais estreita com concentrações bastante consideráveis, mas não atingiram a ponte da A28; já em situação de maré enchente, o seu impacto ficou-se sobretudo pela zona da embocadura;

- Com a maré morta era ainda possível ver os efeitos, ainda que ligeiros, da subida e descida do nível da água anterior, pois tínhamos plumas tanto a jusante como a montante das zonas onde foram efetuadas as descargas;

- Na zona da praia adjacente ao molhe interior formaram-se plumas de sedimentos mesmo numa situação de maré enchente, com maré morta;

- A pluma da maré morta numa situação de maré vazante perde grande parte da sua intensidade quando ultrapassa a embocadura, devido ao efeito das correntes marítimas;

- A pluma que se forma na praia do cabedelo na maré vazante, não está tao próxima da costa como aquela que se forma na maré enchente, apesar desta última ter, naturalmente, menor expressão;

- As formas das plumas obtidas para a argila foram semelhantes àquelas produzidas pela silte, mas com concentrações inferiores.

5.2.5- Pluma de sedimento silte para um caudal de 100 m³/s e maré enchente- 2º Trajeto

Na Figura 56 podemos observar os resultados da pluma de silte por transbordamento, obtidos para um caudal fluvial de 100 m³/s e uma situação de maré viva e maré morta, sensivelmente a meio das duas marés enchentes que o estuário apresenta.

Começando pela primeira enchente, na maré viva (SD5) podemos observar uma pluma reduzida que se desenvolve para montante e ocupa a margem direita do estuário. As concentrações são reduzidas, na ordem dos 0,1 kg/m³, devido também a ter sido realizada apenas uma descarga. Apesar de se ter passado apenas uma hora, podemos já ver o impacto da maré viva, e o alcance que esta dá à pluma de sedimentos.

Em relação à maré morta (SD6), a primeira maré enchente verifica-se num período do dia já mais avançado, o que explica as concentrações substanciais que se verificam. Apesar da diferença temporal, a extensão da pluma é mais reduzida, comparativamente com a pluma da SD5 (maré viva).

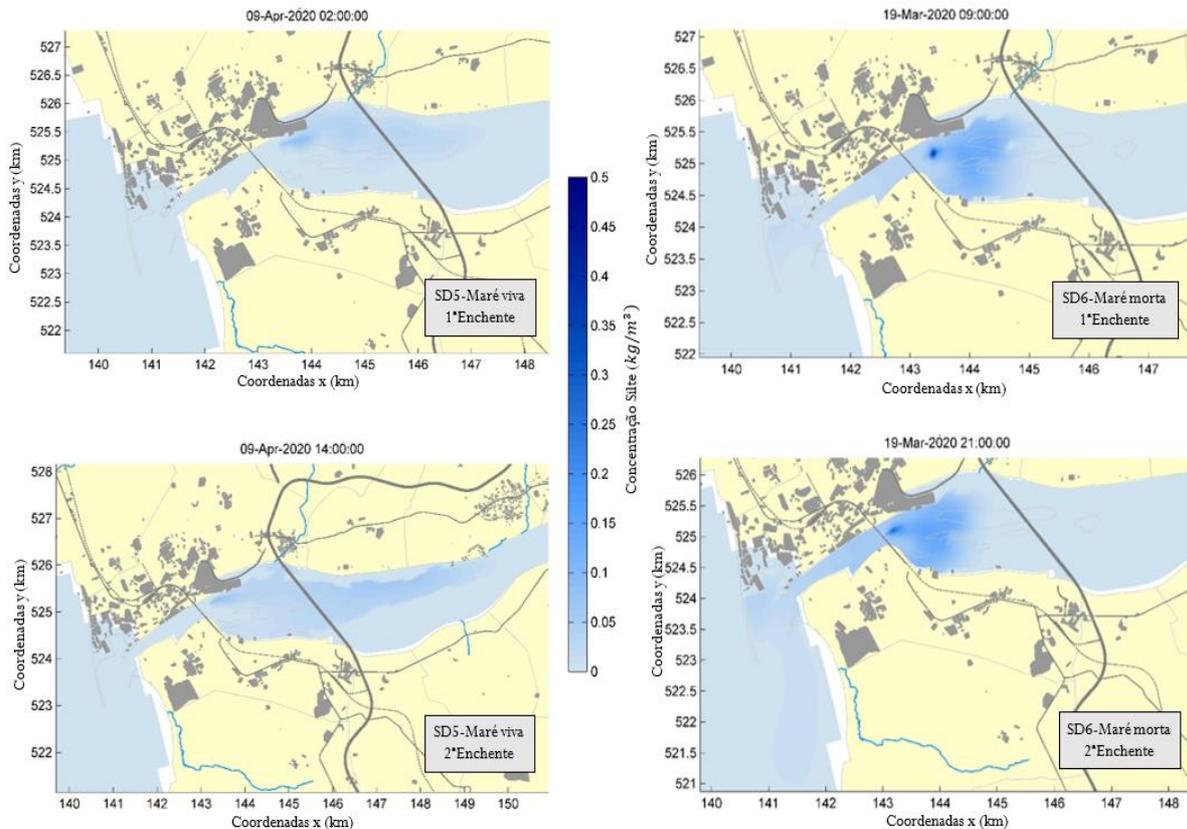


Figura 56- Pluma de argila devido às descargas por transbordamento nos instantes de comparação 3 e 4 das simulações 5 e 6.

A pluma não ultrapassa a ponte da A28, mas aproxima-se muito desta. Além disto, cobre quase todo o estuário na sua zona mais larga, o que é também de assinalar.

No que toca à segunda enchente, a maré viva volta a apresentar uma pluma suave, com valores a rondar os $0,1 \text{ kg/m}^3$, mas com uma vasta área. Podemos verificar que os efeitos da descarga por transbordamento ainda se fazem sentir a vários quilómetros para montante. Imediatamente a seguir ao local da descarga, a concentração de sedimento mantém-se praticamente inalterada, outro indicador da força da sobreposição dos efeitos da maré viva com maré enchente.

A maré morta apresenta uma pluma ainda mais reduzida, comparativamente com a situação de primeira enchente. Isto prova que para dragagens realizadas nesta zona, a maré morta não tem capacidade de manter os sedimentos em suspensão ao longo do ciclo da maré. Caso contrário, teríamos uma sobreposição dos efeitos da primeira e segunda maré enchente, o que claramente não acontece.

Podemos também verificar que os efeitos a jusante são residuais. Em ambas as situações de maré viva a pluma não teve qualquer expressão neste sentido, verificando-se apenas para montante.

Já em relação à maré morta, criou-se uma ligeira pluma na zona dos estaleiros navais para a primeira enchente, que se alongou no momento da segunda enchente. Apesar deste aumento, as

concentrações são muito reduzidas, o que nos permite concluir que para dragagens neste local, o seu impacto nas praias a sul será muito reduzido.

5.2.6- Pluma de sedimento silte para um caudal de 100 m³/s e maré vazante- 2º Trajeto

Na Figura 57 podemos observar os resultados da pluma de argila por transbordamento, obtidos para um caudal fluvial de 100 m³/s e uma situação de maré viva e maré morta, sensivelmente a meio das duas marés vazantes que o estuário apresenta.

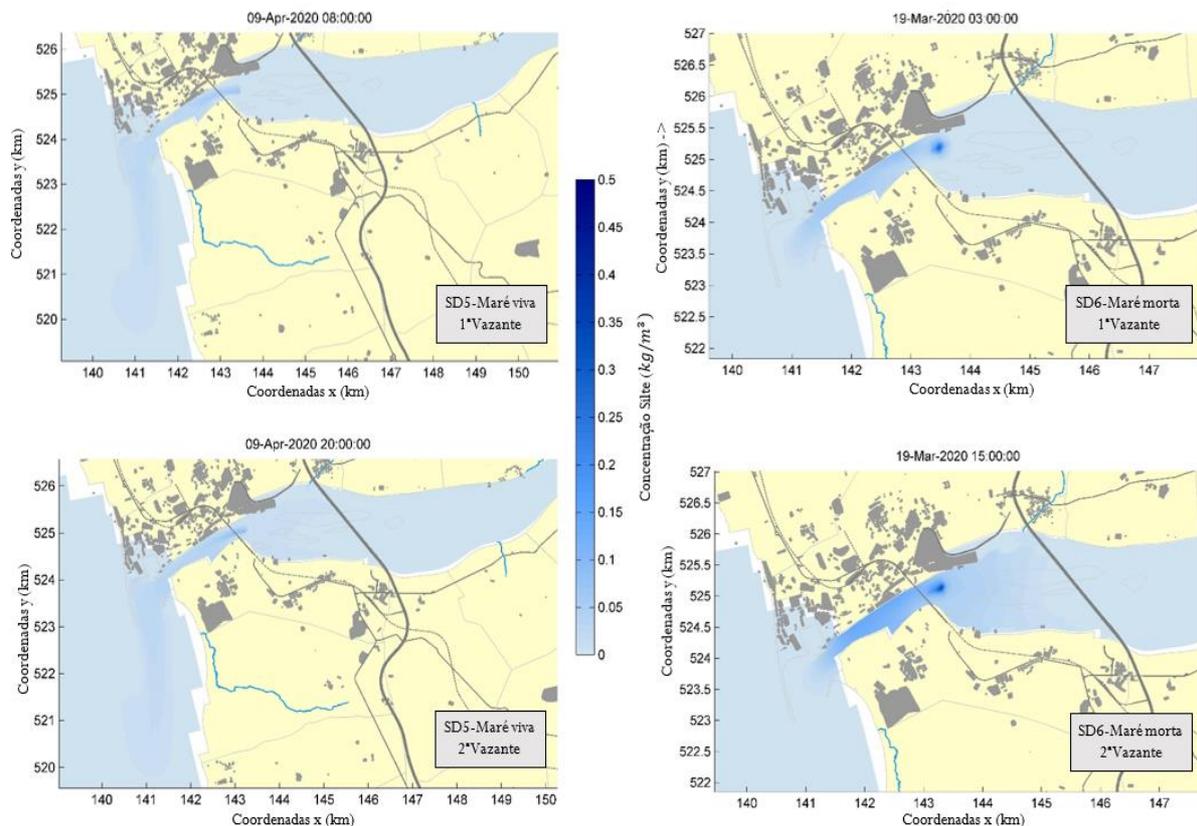


Figura 57- Pluma de silte devido às descargas por transbordamento nos instantes de comparação 1 e 2 das simulações 5 e 6.

Os resultados da primeira vazante mostram-nos que, para uma situação de maré viva, forma-se uma pluma constante ao longo de vários quilómetros, ainda que com baixas concentrações. Para o caso de maré morta, a pluma reduz a sua área, fazendo-se sentir até à zona dos quebra-mares que protegem o estuário, e apresenta também uma concentração ligeiramente superior, mas ainda longe do máximo verificado em toda a simulação.

Em relação à segunda vazante, a simulação com maré viva dá-nos uma pluma bastante alongada para jusante. A montante, temos concentrações residuais de sedimento entre a ponte Eiffel e a ponte da A28. Assim como na primeira vazante, as concentrações a jusante são bastante reduzidas.

A simulação de maré morta confirma mais uma vez a sua pouca expressão para jusante, mesmo apesar desta se verificar numa hora já avançada.

Para montante, as concentrações são ligeiramente superiores às verificadas na primeira vazante, sobretudo na zona mais estreita do estuário, onde são atingidos níveis de $0,2 \text{ kg/m}^3$. Também a área da pluma sofreu um aumento notório em relação ao que se verificava na primeira vazante.

5.2.7- Pluma de sedimento argila para um caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré enchente- 2º Trajeto

Na Figura 58 podemos observar os resultados da pluma de argila por transbordamento, obtidos para um caudal fluvial de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma situação de maré viva e maré morta, sensivelmente a meio das duas marés enchentes que o estuário apresenta.

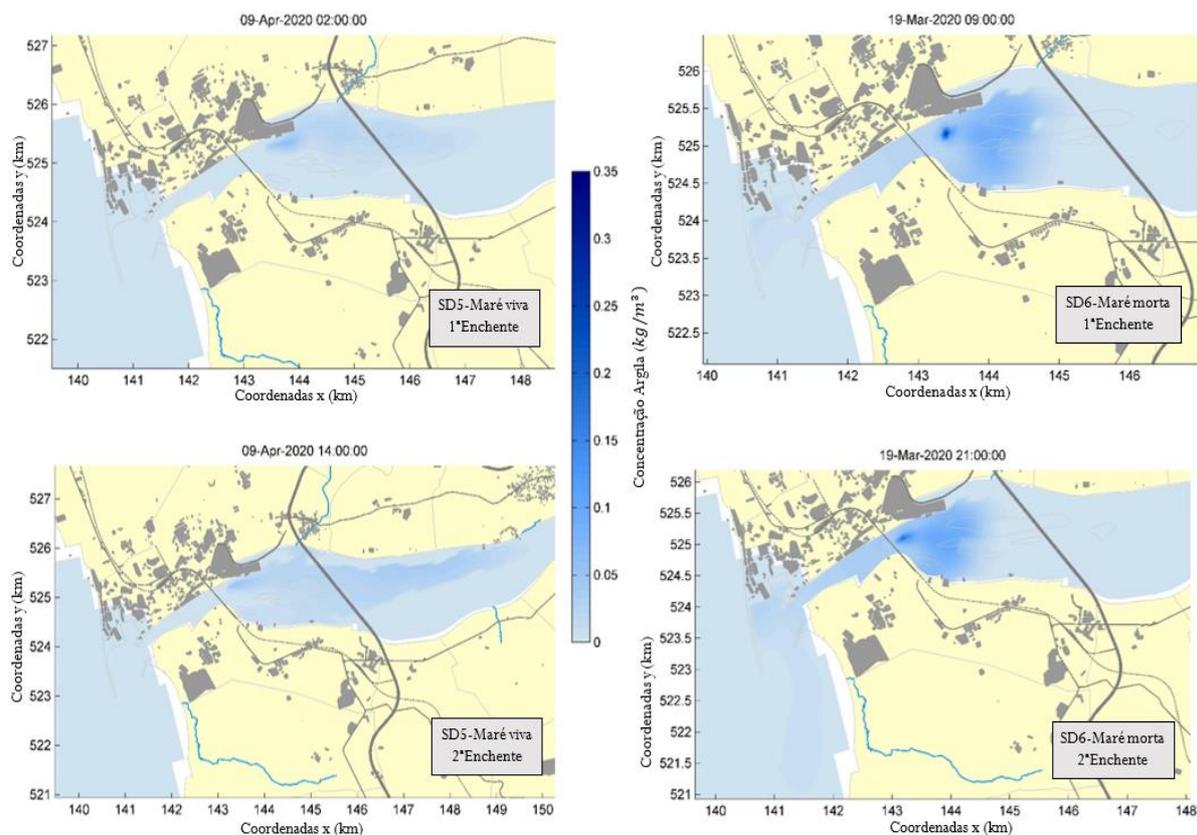


Figura 58- Pluma de argila devido às descargas por transbordamento nos instantes de comparação 3 e 4 das simulações 5 e 6.

A primeira maré enchente da simulação com um período de maré viva dá-nos resultados muito precoces, devido ao instante da maré enchente. Temos uma maré suave e com pequena área abrangida, exclusivamente a jusante da zona de descarga.

A maré morta apresenta já resultados assinaláveis, sobretudo porque cobrem o rio na sua quase totalidade no sentido transversal, e têm concentrações na casa dos $0,15 \text{ kg/m}^3$. Adicionalmente, para jusante é possível observar uma ligeira pluma ao longo do escoamento, que termina a seguir aos estaleiros navais, devido ao alargamento que se começa a verificar.

Para a segunda enchente, a simulação com maré viva (SD5) mostra uma pluma de argila com um grande alcance de vários quilómetros para montante, e concentrações muito baixas, que se mantém sensivelmente constante ao nível da intensidade, sobretudo na zona central do escoamento. Para jusante não há qualquer alteração devido às descargas por transbordamento.

A simulação relativa à maré morta (SD6) mostra-nos uma pluma considerável para jusante, ao longo da costa, ainda que com valores muito baixos. A montante do local das descargas podemos ver uma pluma não muito grande, com dimensão inferior à primeira enchente, e valores semelhantes. Esta pluma perde toda a sua intensidade num curto espaço, o que mostra a pouca energia da maré morta.

5.2.8- Pluma de sedimento argila para um caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré vazante- 2º Trajeto

Na Figura 59 podemos observar os resultados da pluma de argila por transbordamento, obtidos para um caudal fluvial de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma situação de maré viva e maré morta, sensivelmente a meio das duas marés vazantes que o estuário apresenta.

Começando pela primeira vazante, a simulação de maré viva (SD5) apresenta já uma pluma bastante extensa para jusante. A capacidade da maré viva está expressa na baixa e constante concentração ao longo de toda a pluma, sendo apenas ligeiramente superior na zona em que é realizada a descarga. Após a embocadura podemos referir que temos “duas plumas” bem visíveis, uma inserida dentro de outra, sendo a exterior naturalmente menos intensa.

Em relação à maré morta, esta não apresenta tanta capacidade para transportar os sedimentos a longas distâncias. A pluma termina antes da embocadura do estuário, e tem também uma concentração que se mantém estável.

É possível ver um claro aumento da concentração no local em que é efetuada a descarga, visto que a maré não tem capacidade para transportar esta quantidade de sedimentos.

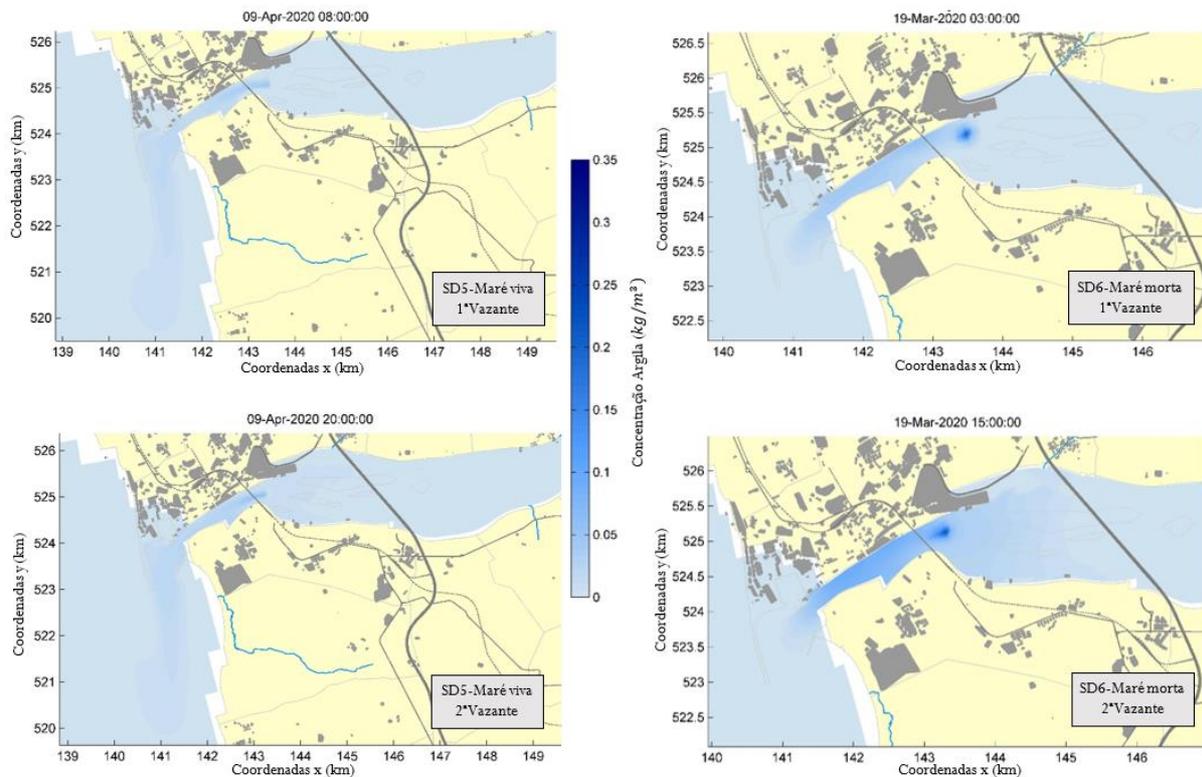


Figura 59- Pluma de argila devido às descargas por transbordamento nos instantes de comparação 1 e 2 das simulações 5 e 6.

Comparativamente com a primeira, a segunda vazante apresenta resultados semelhantes para a situação de maré viva, com a única diferença de termos também uma pluma que se desenvolve para montante do local das descargas, sendo bastante reduzida. A pluma que se estende até mar aberto possui uma concentração inferior a 0,1 kg/m³.

Por fim, a maré morta possui uma pluma mais curta, que se desenvolve entre a embocadura e a ponte da A28, tendo o seu máximo de concentração na zona mais estreita do estuário, ligeiramente a jusante do local onde foram efetuadas as descargas.

Após a análise dos resultados obtidos para o segundo trajeto efetuado pela draga, podemos também retirar algumas considerações gerais:

- Os efeitos da localização do segundo trajeto sentiram-se sobretudo na forma como a pluma da maré morta se comportou, tomando uma forma mais aberta, devido à maior largura do rio nesta zona;
- As plumas com maré morta evidenciaram concentrações bastante elevadas na zona da descarga, que rapidamente diminuíram;
- A maré morta enchente resultou em plumas muito concentradas na zona da descarga, mas com uma curta área abrangida. Na zona da embocadura e da praia, os efeitos diminuíram significativamente, em relação ao primeiro trajeto;

- A maré morta vazante produz também concentrações muito elevadas na zona da descarga, mas devido ao percurso da draga, os seus efeitos apenas se fazem sentir até à zona dos quebra-mares. A montante, o efeito foi, como no percurso anterior, também reduzido;

- O alcance da maré viva vazante para jusante não sofreu um aumento tão significativo como seria de esperar, e ficou mais afastada da praia, em relação ao primeiro trajeto da draga;

- Já a maré viva enchente demonstra também os efeitos das descargas terem sido efetuadas numa zona mais larga do rio, sobretudo na primeira enchente;

- Em relação ao valor das concentrações das plumas obtidas no segundo trajeto, foram em geral superiores às plumas obtidas no primeiro trajeto efetuado pela draga, sendo os seus valores máximos também relativamente superiores, com valores na ordem dos $0,5 \text{ kg/m}^3$ para a silte;

- O segundo trajeto introduziu efeitos consideravelmente mais reduzidos na praia adjacente ao molhe interior; estas diferenças nos resultados entre os dois trajetos simulados pela draga podem ser uteis quando se pretender que os sedimentos libertados por transbordamento atinjam a praia do Cabedelo;

- Também verificamos que no geral, a localização a montante da ponte Eiffel (trajeto 2) resulta numa pluma significativamente mais reduzida para jusante, e ligeiramente maior para montante. Isto indica que as dragagens realizadas neste local, terão efeitos mais reduzidos no ecossistema de transição entre o rio e o mar, sobretudo para o caso de termos um período de maré morta e maré vazante em simultâneo;

- Devido à estrutura e dimensões da grelha que compõe o modelo, por várias vezes toda a largura do estuário foi abrangida pela pluma, o que na realidade poderá não acontecer com tanta frequência.

- Mais uma vez, o comportamento da pluma de argila mostrou-se semelhante ao da pluma de silte, com intensidade inferior;

- As simulações de dragagem 2 e 4, com caudal de $200 \text{ m}^3/\text{s}$, produziram resultados muito semelhantes às restantes simulações, e por esse motivo não foram aqui expostas.

5.3- Desenvolvimento da pluma por transbordamento

Será agora apresentada uma perspectiva mais ampla de como evolui a pluma por transbordamento ao longo do tempo, e não apenas em instantes selecionados de acordo com o comportamento da maré. Foram selecionadas duas simulações, com caudal, maré e trajetos diferentes, de modo a termos uma interpretação geral de como a pluma se desenvolve nas duas situações.

5.3.1- 1º Trajeto

Nas Figuras 60 e 61 é apresentada evolução da pluma de silte, resultante da descarga por transbordamento para a simulação de dragagem 2, inserida no 1º trajeto de dragagem, a jusante da ponte Eiffel. As imagens estão apresentadas de duas em duas horas, desde o início da simulação até às 04 horas do dia seguinte.

A simulação de dragagem 2 corresponde a um período de maré viva, tendo por isso a sua primeira e segunda enchente às 01h e 13h, respetivamente, e a primeira e segunda vazante nos instantes 07h e 19h, respetivamente.

Às 00h de 9 de abril começa o processo de descarga da mistura de sedimento e água, não estando por isso representada ainda qualquer alteração. Neste instante, a maré encontra-se na enchente, o que significa que nas próximas horas, a pluma gerada pelas descargas estará voltada para o interior do estuário. É isso que podemos ver às 02h, com uma pluma pouco intensa, mas com um alcance considerável, característico da maré viva.

Por volta das 04h, mais concretamente às 04 horas e 28 minutos, temos a primeira preia-mar. A imagem correspondente ao resultado das 04h vai apresentar ainda os efeitos da maré enchente, com uma pluma que se desenvolve por cerca de 6 quilómetros, como é possível observar. A pluma atinge concentrações de $0,16 \text{ kg/m}^3$ no local onde é feita a descarga.

Após se verificar a primeira preia-mar, passamos para uma situação de maré vazante e a pluma vai diminuir a sua influência a montante, e começar a desenvolver-se para jusante, como é possível ver na imagem registada para as 06h. A pluma a montante das descargas perde quase toda a sua intensidade, sendo os sedimentos em suspensão transportados muito além da embocadura do estuário. Devido à mudança de maré, a pluma perde expressão e as concentrações de silte diminuem para valores inferiores a $0,1 \text{ kg/m}^3$.

Às 08h, continuamos numa situação de maré vazante, por esse motivo a pluma deverá aumentar a sua influência a jusante, o que é visível na respetiva imagem. Neste instante, não é visível qualquer pluma a montante da zona de descarga.

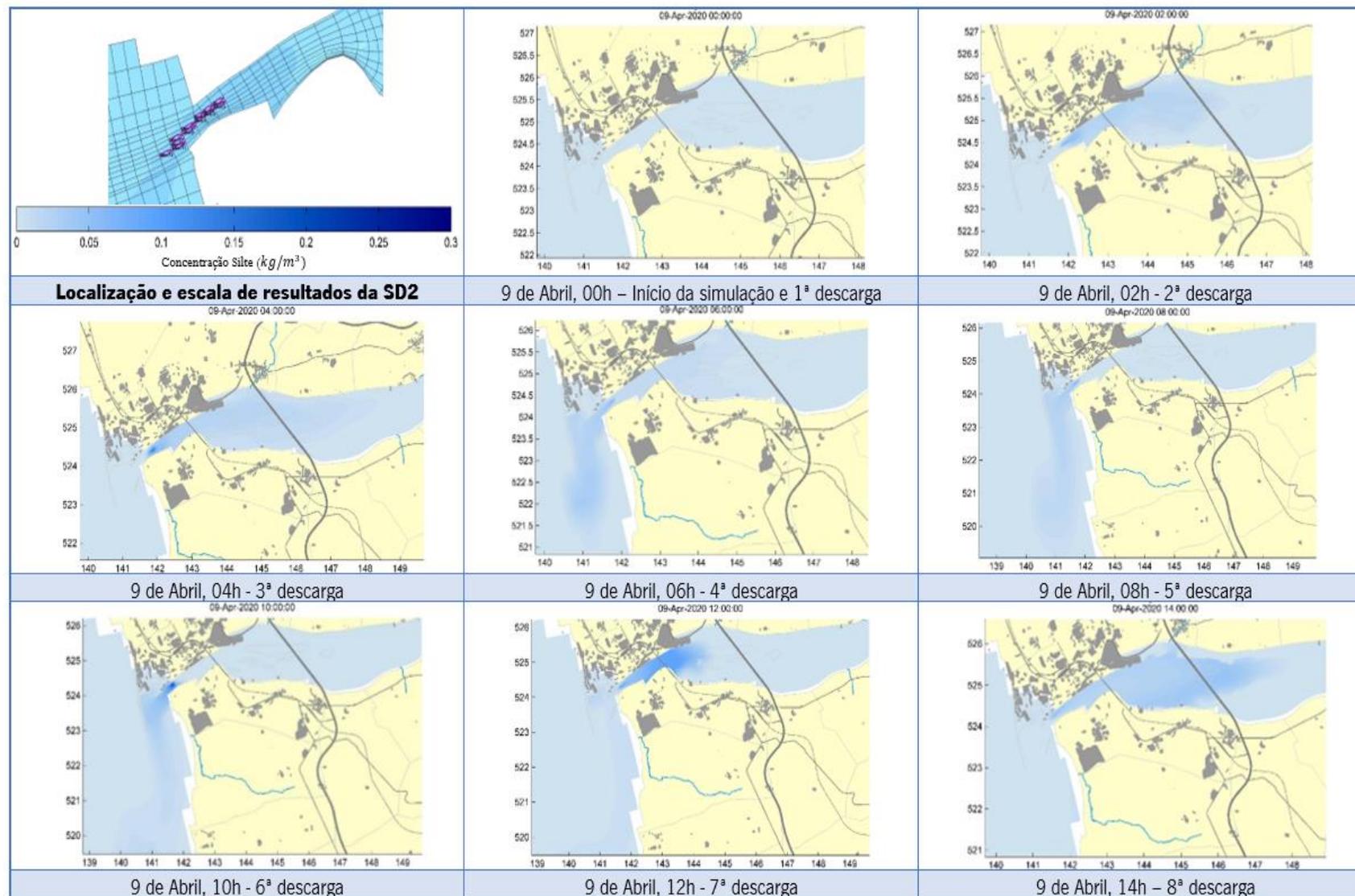


Figura 60- Evolução da pluma de silte da simulação de dragagem 2, até às 14 horas do dia 9 de abril

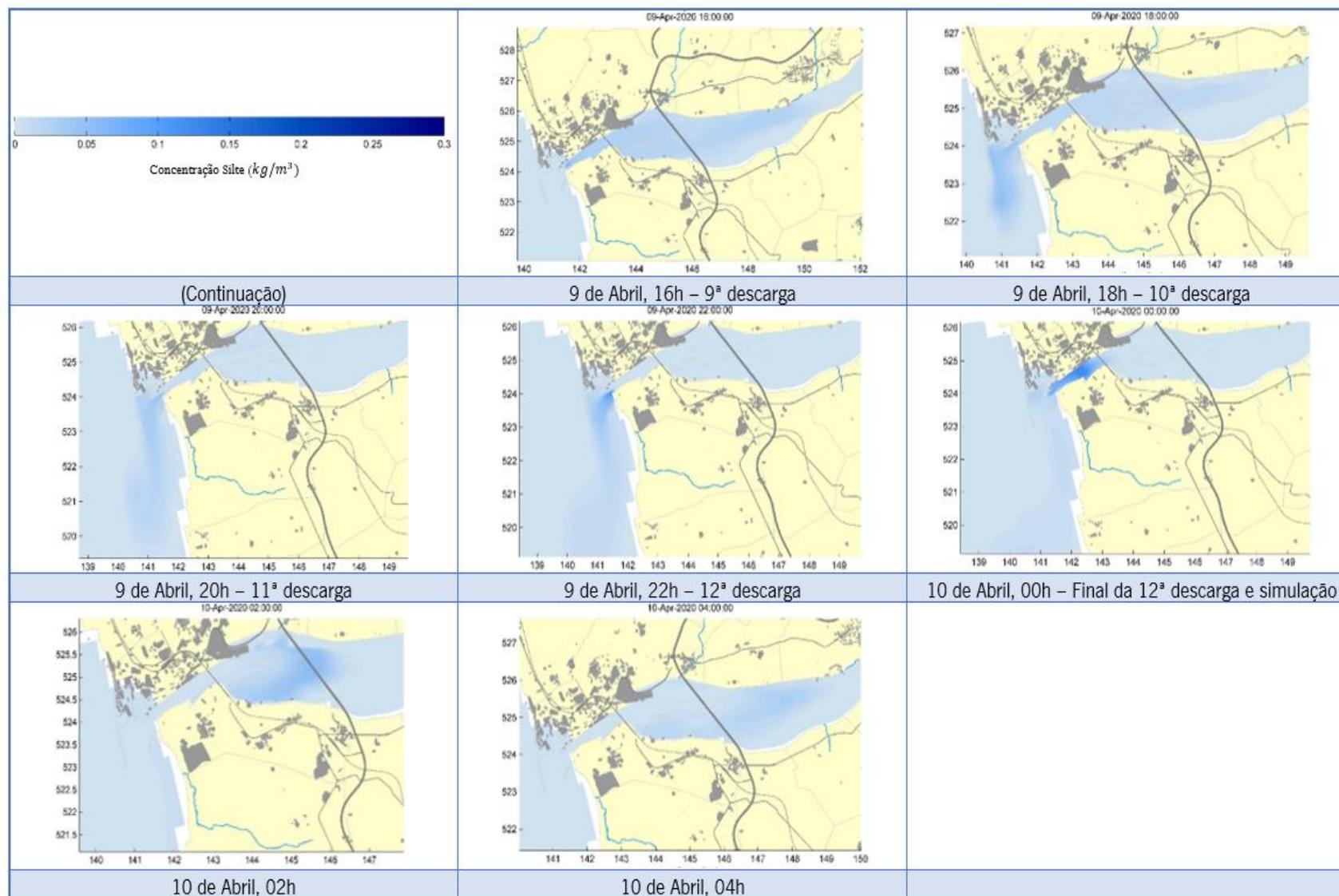


Figura 61- Continuação da evolução da pluma de silte da simulação de dragagem 2, até ao final da mesma.

A tabela das marés mostra-nos que a próxima baixa-mar tem lugar às 10 horas e 41 minutos, por isso a imagem referente às 10h vai revelar uma pluma ainda mais alongada em relação à imagem anterior, apresentando vários quilómetros de extensão. Para além de aumentar a sua dimensão, neste instante a pluma aproxima-se do valor de $0,25 \text{ kg/m}^3$ na zona mais estreita do estuário.

Na imagem referente às 12h, ocorreu já a inversão de maré, e estamos por isso na segunda maré enchente. A pluma que se tinha fixado junto à praia perde intensidade e dimensão, mas mantendo-se ainda com uma área abrangida assinalável, inclusive na zona dos ENVC. A pluma a montante volta a desenvolver-se, ocupando grande parte da zona mais estreita do estuário, ultrapassando a ponte rodoferroviária e dissipando quando o estuário se alarga.

Às 14h, a sobreposição da maré viva com a maré enchente é bastante visível, através do grande aumento da área da pluma para montante, comparativamente com o instante anterior. Aqui temos também o desaparecimento da pluma residual que se encontrava a jusante, junto à praia. Apesar de tudo, as concentrações apresentadas são bastante reduzidas, na ordem dos $0,05 \text{ kg/m}^3$.

No instante seguinte a pluma encontra-se no seu estado mais alongado. Esta, apesar de caracterizada por baixas concentrações, atinge um comprimento de sensivelmente 8 km entre o local da descarga e a sua extremidade. Ao longo de todo este comprimento, a concentração mantém-se quase sempre constante, e ocupa o estuário quase na sua totalidade.

Às 16 horas e 51 minutos ocorre a segunda preia-mar, o que indica uma inversão no sentido da pluma, como se mostra na figura seguinte (18h). A pluma perde intensidade e extensão a montante, e volta a desenvolver-se para jusante, sendo a sua maior concentração verificada na zona dos ENVC.

No instante 20h, a maré vazante faz a pluma aumentar o seu impacto a jusante, e perder a montante. Na zona mais larga do estuário, perto da ponte da A28, a pluma apenas subsiste nas margens, sendo que na zona central já foi removida pela maior velocidade e consequente capacidade de transporte da massa hídrica que se verifica nesta zona.

O instante seguinte, 22h, aproxima-se da segunda baixa-mar, motivo pelo qual a pluma aumenta de tamanho e de intensidade, sendo esta de $0,12 \text{ kg/m}^3$ perto da zona ocupada pelos ENVC. As concentrações de silte a montante da zona de descarga por transbordamento voltam a ser nulas.

Por volta das 22 horas e 59 minutos verifica-se o fim do período de maré, com mais uma baixa-mar. A figura relativa às 00h de 10 de abril já apresenta por isso uma inversão da pluma. Nas praias adjacentes a concentração é já muito baixa, sendo que o maior valor se verifica na zona mais estreita do estuário, com valores ligeiramente superiores a $0,12 \text{ kg/m}^3$. Neste instante terminam também as descargas por transbordamento.

Os dois instantes seguintes, 02h e 04h foram colocados de modo a demonstrar que mesmo após serem cessadas as operações no estuário, continua-se ainda a sentir os efeitos das descargas. No entanto, convém também referir que este efeito é muito reduzido, com concentrações na ordem de 0,05 kg/m³ para as 02h e 0,03 kg/m³ para as 04h.

Após a análise aos resultados obtidos, podemos observar que é muito próximo dos instantes de baixa-mar que se verificam as maiores concentrações de sedimento. A maior concentração registada ultrapassou o valor de 0,25 kg/m³, às 10 horas e 30 minutos e também às 22 horas e 30 minutos.

Nos instantes em que o mar atinge o seu nível máximo também se registaram concentrações assinaláveis, na ordem dos 0,16 kg/m³.

Nos instantes intermédios entre a preia-mar e a baixa-mar foram registadas as concentrações mais baixas, o que indica a maior capacidade das correntes de maré para transportar os sedimentos descarregados, não permitindo que os sedimentos permaneçam em suspensão.

5.3.3- 2º Trajeto

Nas Figuras 62 e 63 é apresentada evolução da pluma de argila, resultante da descarga por transbordamento para a simulação de dragagem 6, inserida no 2º trajeto de dragagem, a montante da ponte Eiffel. As imagens estão apresentadas de duas em duas horas, desde o início da simulação até às 04 horas do dia seguinte.

A simulação de dragagem 6, ao contrário da apresentada anteriormente, está inserida num período em que temos uma situação de maré morta. De acordo com a tabela de marés e a modificação explicada previamente, temos uma preia-mar fictícia às 00h e 10 minutos e uma preia-mar verdadeira sensivelmente 12h depois, às 12 horas e 5 minutos. Em relação às baixa-mar, essas são duas, sendo a primeira por volta das 6 horas e 4 minutos e a segunda às 18 horas e 19 minutos.

O sedimento aqui em análise é a argila, sendo libertada em menor quantidade nas descargas por transbordamento, comparativamente com a silte. Se por um lado temos menores quantidades de sedimento a ser rejeitadas para o meio hídrico, por outro lado temos uma maré morta e a sua menor capacidade de transportar os sedimentos a maiores distâncias. Esta conjugação de fatores poderá ter um desfecho interessante para o estudo, e por isso foi escolhida para análise esta combinação de condições.

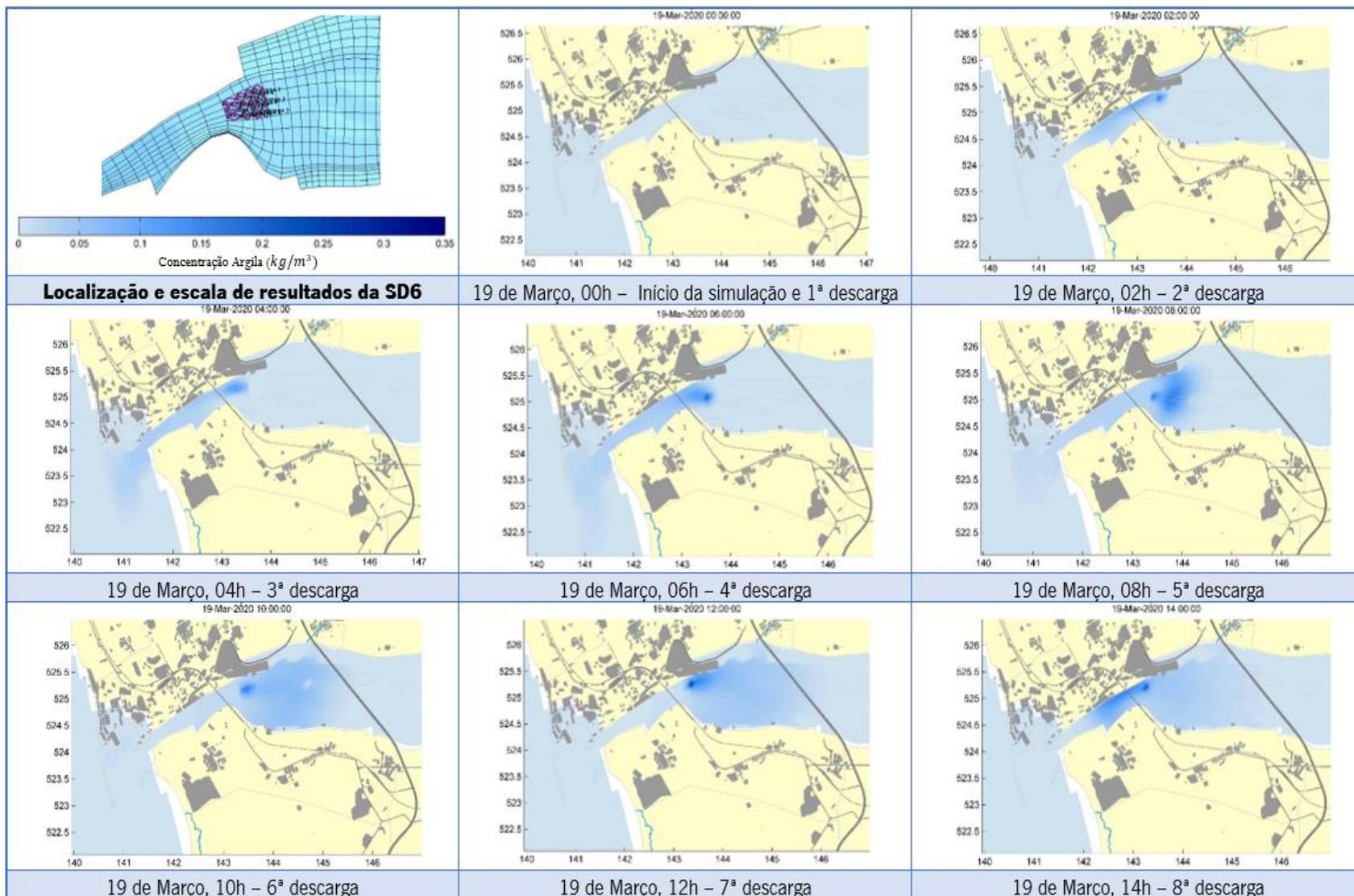


Figura 62- Evolução da pluma de argila da simulação de dragagem 6, até às 14 horas do dia 19 de março.

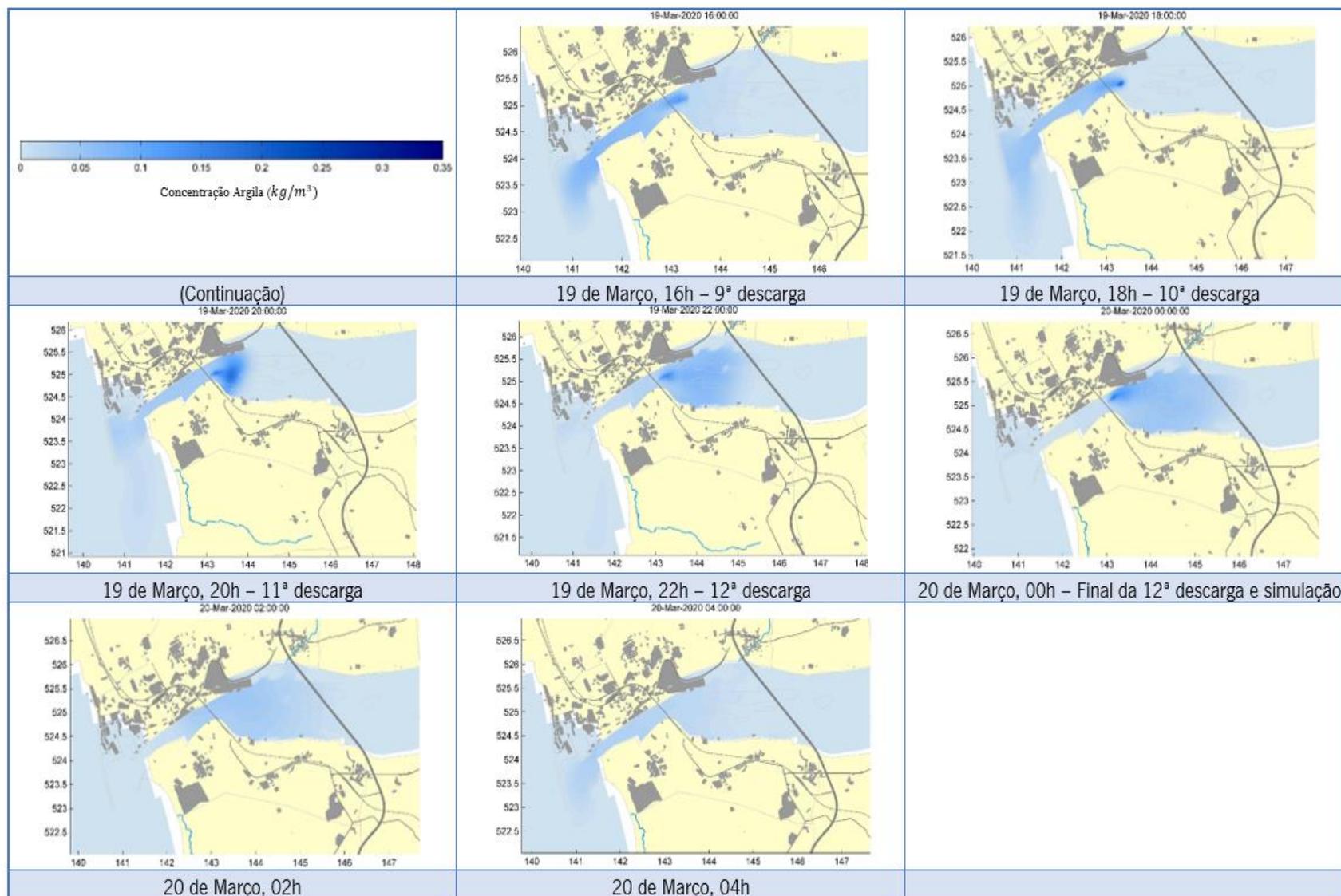


Figura 63- Continuação da evolução da pluma de argila da simulação de dragagem 6, até ao final da mesma.

A simulação tem início às 00h do dia 19 de março, com a primeira rejeição de sedimentos no estuário por transbordamento. Podemos assim começar por analisar a figura referente às 02h. Sabemos previamente que a partir das 00 horas e 10 minutos vamos ter uma preia-mar, ainda que fictícia, e por isso uma maré vazante nas horas seguintes. A imagem mostra-nos isso mesmo, em que é possível ver uma pluma a jusante do local da descarga. Esta primeira descarga é efetuada mais próxima à margem direita do rio, e é também deste lado do escoamento que a pluma de argila é mais visível. Devido à pouca quantidade de sedimento ainda libertada, a pluma é reduzida, dissipando-se ligeiramente antes da zona dos ENVC. Apesar da sua dimensão não ser elevada, apresenta já valores superiores a $0,16 \text{ kg/m}^3$ na zona mais intensa. A montante do local de descarga não temos qualquer pluma.

A imagem seguinte, 04h, continua a não apresentar qualquer pluma para montante. Para jusante, temos um prolongamento da pluma previamente existente. Agora, esta ocupa já a totalidade do estuário na sua zona mais estreita, bem como o local onde se situam os ENVC, perdendo intensidade quando atinge a embocadura. A zona da descarga é sem dúvida o local de maior concentração de sedimento, apesar deste valor ser inferior à da imagem anterior.

No instante seguinte vamos ter uma pluma com valores de concentrações de argila consideráveis. Além da concentração ter aumentado para valores de $0,2 \text{ kg/m}^3$, a pluma aumentou para além da embocadura do estuário, tendo uma dimensão considerável, com alguns quilómetros. A zona mais intensa é claramente aquela onde são realizadas as descargas, isto porque a maré morta não confere ao escoamento energia suficiente para transportar consigo as partículas de sedimentos, levando a que estas fiquem concentradas no local em que são libertadas.

Minutos depois da situação registada na imagem anterior, temos a primeira baixa-mar do dia, o que indica que deveremos ter já alterações na imagem referente às 08h. A pluma a jusante que ultrapassava já a embocadura do estuário diminui a sua extensão e intensidade, mantendo-se constante em praticamente todo o seu comprimento, com concentrações de cerca de $0,1 \text{ kg/m}^3$. A montante da zona de descarga aconteceu precisamente o inverso, com a formação de uma pluma intensa, mas também bastante curta. Apesar da reduzida extensão, esta representa-se uma mancha bem visível numa área considerável e concentrações de cerca de $0,2 \text{ kg/m}^3$.

A imagem seguinte (10h) corresponde ao desenvolvimento da maré enchente. A jusante apenas é notória uma residual concentração de argila na zona dos ENVC. A montante, a pluma aumentou de dimensão, propagando-se até à ponte da A28. A concentração apresenta valores superiores na zona da descarga, $0,16 \text{ kg/m}^3$, mas mantém-se com valores de cerca de $0,1 \text{ kg/m}^3$ à medida que se expande. A margem esquerda do rio está completamente coberta pela pluma, ao contrário da margem direita.

Às 12 horas e 05 minutos temos a única preia-mar real deste ciclo de maré. A figura retirada às 12h não apresenta por isso quaisquer sinais desta mudança, pelo contrário. Verificamos que a pluma aumentou a sua intensidade para um valor de $0,25 \text{ kg/m}^3$ no local de descarga, bem como ligeiramente o seu alcance para montante, chegando mesmo a ir além da ponte da A28. Após ser ultrapassado o local da descarga, as concentrações de sedimento diminuem bastante, o que mostra que o escoamento não tem capacidade para manter os sedimentos em suspensão, levando a que uma grande parte deles se deposite no leito do rio.

A ligeira concentração que era visível anteriormente na zona dos ENVC tornou-se ainda mais reduzida.

Na imagem do instante 14h é já possível ver os efeitos da maré vazante. A pluma com grande área que se encontrava desde a zona de descarga até à ponte da A28 perdeu relevância, sendo esta transportada para a zona mais estreita do estuário, sobretudo na margem direita. Apesar de termos já uma pluma formada a jusante do trajeto 2, esta é reduzida, ficando ainda longe da zona dos ENVC. A concentração de argila diminui no geral, sendo que na zona mais estreita chega aos $0,15 \text{ kg/m}^3$, e a montante do local de descarga é inferior a $0,1 \text{ kg/m}^3$.

Às 16h ocorre nova inversão da pluma. Deixamos praticamente de ter concentrações de argila a montante do local de descarga, e voltamos a ter uma pluma bem definida a jusante da zona de descarga, que ocupa todo o estuário desde o local inicial até à zona da embocadura. A concentração é sensivelmente regular ao longo de toda a pluma, sendo ligeiramente maior, naturalmente, no local da descarga. Aqui a concentração atinge $0,12 \text{ kg/m}^3$, enquanto que no resto da pluma fica pelos $0,1 \text{ kg/m}^3$.

A imagem seguinte antecede a segunda baixa-mar deste ciclo, que tem lugar às 18h e 19 minutos. Apresenta por isso uma pluma bem característica de uma maré vazante. A zona da descarga volta a ser a mais intensa, com concentrações na ordem dos $0,2 \text{ kg/m}^3$. Após a zona da embocadura, voltamos a verificar um aumento da amplitude da pluma, e a concentração mantém-se regular, nos $0,1 \text{ kg/m}^3$.

Após ser ultrapassada a última maré baixa deste ciclo, o nível da água volta a aumentar, arrastando os sedimentos para montante do estuário. Como vemos na imagem correspondente ao instante 20h, a pluma que se encontrava a jusante da embocadura mantém o seu tamanho, mas tem a sua intensidade reduzida, assim como na zona estreita do estuário. Aqui as concentrações são sempre inferiores a $0,1 \text{ kg/m}^3$. É possível ver claramente no local onde é efetuado a descarga, o padrão de dispersão em arco da pluma. Esta tem um aumento significativo na zona em que é realizada a descarga por transbordamento, atinge o valor de $0,18 \text{ kg/m}^3$, e logo de seguida uma redução também ela significativa. Isto prova que os sedimentos percorrem muito pouco espaço até perderem a capacidade

de se manter em suspenso na coluna de água, e acabam por depositar-se muito próximo do local onde foram rejeitados.

O período compreendido entre as 18h e 20h é aquele em que a pluma alcança a sua maior extensão a jusante.

Às 22h temos a maré enchente a mostrar o seu efeito, através do desaparecimento da pluma que se encontrava na zona da embocadura e a jusante desta, e do aumento da pluma a montante da ponte Eiffel. As quantidades de argila muito concentradas que se verificavam na zona da descarga da imagem anterior foram já reduzidas, seja através da sua deposição ou da baixa capacidade da maré de transportar os sedimentos. Apesar de não ser significativo, regista-se um aumento da área da pluma na zona compreendida entre as duas pontes do estuário. O valor mais alto é referente à zona de descarga, $0,14 \text{ kg/m}^3$, e a pluma que se segue situa-se nos $0,1 \text{ kg/m}^3$.

A imagem respeitante às 00h de 20 de março marca o fim da simulação. O nível da água continua a subir e a pluma atinge a maior extensão para montante de todo o dia. A concentração na zona de descarga é ligeiramente superior à anterior. Já a concentração entre as duas pontes mantém-se nos $0,1 \text{ kg/m}^3$, apesar da sua maior dimensão.

A jusante não se verifica qualquer concentração dos sedimentos libertados por transbordamento.

Apesar da simulação ter finalizado às 00h e 10 min teríamos uma nova preia-mar fictícia, e o nível do mar voltaria a descer. Devido a essa corrente estuarina, vemos nas imagens referentes às 02h e 04h de 20 de março a simultânea inversão e diminuição das concentrações da pluma, sendo estas já muito reduzidas.

Constatamos que, em geral, a simulação de dragagem 2, que corresponde à descarga de silte numa situação de maré viva, e a simulação de dragagem 6, com descarga de argila numa situação de maré morta, apresentam concentrações médias ao longo do dia bastante diferentes, sendo claramente superior no caso da simulação de dragagem 6.

Este cenário apresenta ao longo do dia vários estados em que as concentrações se aproximam e superam o valor de $0,25 \text{ kg/m}^3$. Podemos referir como exemplo a única preia-mar real com concentração superior a $0,25 \text{ kg/m}^3$, bem como a baixa-mar que teve lugar às 18 horas e 19 minutos. Também é de assinalar as elevadas concentrações nos pontos intermédios tanto das vazantes como enchentes.

Este é um dado interessante, uma vez que a quantidade de argila libertada é inferior à de silte, provando assim a forte influência do tipo de maré nos resultados obtidos.

Capítulo 6

Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros

6- Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros

6.1- Conclusões

A história mostra que a simbiose entre a gestão ambiental e económica dos ambientes costeiros ocupados pelo homem é tudo menos simples. As crescentes preocupações com a sustentabilidade, o aumento da população mundial e uma série de outros desafios que as sociedades têm em mãos, exigem um melhor aproveitamento dos recursos existentes.

Neste sentido, a importância da manutenção das condições de segurança e de navegabilidade dos estuários e respetivas funções ecológicas tornam fundamental a modernização e otimização dos processos de monitorização dos mesmos. Esta dissertação provou, através de uma abordagem aos processos morfodinâmicos estuarinos, a utilidade das ferramentas hidroinformáticas no processo de tomada de decisão em relação à gestão destes meios hídricos tão complexos.

Considerando as principais ações naturais e condicionantes hidrodinâmicas e sedimentares, foi possível perceber, fazendo uso da modelação morfodinâmica, o modo como as dragagens afetam a evolução dos estuários, em particular do estuário do rio Lima.

De acordo com os cenários simulados, a maré mostrou-se determinante no processo de modificação do leito do baixo estuário. Foi possível verificar que cinco períodos de maré viva com uma duração de cinco dias em cada um dos períodos e um caudal de 100 m³/s, possuem capacidade de introduzir modificações na batimetria do estuário do rio Lima. A importância da maré viva está patente nas escassas alterações produzidas nas simulações em que se verificava maré morta, mesmo com caudais elevados.

O caudal fluvial do rio Lima provou ser também importante na modificação da batimetria do estuário, bem como na zona da ponte de Lanheses. Foi possível verificar que com caudais na ordem dos 450 m³/s já se verificam alterações assinaláveis, sobretudo na zona da ponte Eiffel e nas ilhas existentes a montante desta. Por outro lado, como seria de esperar em situações extremas, no caso da barragem de Touvedo estar a debitar o seu caudal de cheia, 3200 m³/s, verificar-se-iam alterações significativas nas referidas zonas.

Importa também referir que, para todos os cenários testados, as alterações batimétricas na zona mais avançada do estuário foram muito baixas, nomeadamente perto do porto comercial e no canal de acesso. Uma hipótese para que isto aconteça é de que a deposição de grande parte dos sedimentos erodidos acontecer logo após a ponte Eiffel.

No que diz respeito às restantes variáveis estudadas, a dimensão do sedimento (D50) revelou algum impacto, ao contrário da concentração de sedimentos na fronteira de montante do modelo, que se mostrou praticamente impercetível.

Já em relação à pluma formada durante eventuais trabalhos de dragagem nos canais e portuários com descargas por transbordamento, o principal fator influente foi sem dúvida a maré. Tanto em situação de enchente como de vazante, a maré viva produziu plumas de sedimentos com vários quilómetros de extensão. Já a maré morta produziu em geral plumas curtas, mas com intensidade bastante superior.

Também a localização das dragagens foi tida em conta, e os resultados mostraram que dragagens realizadas a montante da ponte Eiffel produzem plumas com concentrações de sedimento superiores em relação às dragagens realizadas a jusante da referida ponte, especialmente se forem realizadas em situação de maré morta, bem como uma interferência menos visível na praia localizada a sul do estuário.

A análise de dois cenários com trajetos, tipo de maré e sedimento diferentes, demonstrou mais uma vez a influência da maré, uma vez que a situação de maré morta com libertação de sedimento em menor quantidade (argila), foi capaz de produzir plumas mais intensas relativamente à situação de maré viva, com maior quantidade de sedimento libertado (silte).

Em ambos os trajetos analisados, as maiores concentrações foram verificadas durante a baixa-mar, sendo que a maré morta produziu plumas com valores consideráveis ao longo de toda a simulação.

Para além das referidas conclusões, este estudo permitiu perceber a forma como a pluma se desenvolve para ambos os cenários. Com estes dados e com os objetivos pretendidos na realização das dragagens, a obtenção de resultados que vão ao encontro daquilo que é pretendido torna-se mais facilitada.

Todo o trabalho realizado, tanto na vertente da evolução da batimetria do estuário, como na vertente da formação de plumas de sedimento devido às descargas por transbordamento, mostrou as potencialidades das ferramentas de modelação morfodinâmica, em particular do *software* Delft3D, que permitiu escrutinar com clareza o modo como as dragagens deixam a sua marca nos estuários e quais os principais processos intervenientes, conferindo à sua previsão uma especial importância, tanto económica como ambiental.

Muito ficou ainda por explorar, ao nível dos vários módulos que o programa possui, que possibilitam um estudo mais abrangente, e conseqüentemente resultados mais precisos e fidedignos.

Sendo conhecida a complexidade do ambiente estuarino e marítimo, a agregação da maior quantidade de dados fiáveis possível é de fulcral importância, tendo sido este um dos principais entraves

na realização deste trabalho, pelo que esforços deverão ser realizados neste sentido, de modo que seja possível aproveitar ao máximo as valências das ferramentas hidroinformáticas existentes.

6.2- Sugestões para desenvolvimentos futuros

Após o trabalho efetuado, apresentam-se algumas propostas para trabalhos futuros, com vista a melhorar os resultados que aqui foram obtidos:

- Um estudo aprofundado do tipo de sedimento constituinte do leito ao longo do rio Lima, sobretudo na zona da embocadura;
- Realização de levantamentos batimétricos ao longo do rio Lima, especialmente nas suas zonas mais sensíveis;
- Prever um possível aumento do nível médio do mar de modo a estudar os impactos que essa subida poderá ter nas zonas adjacentes ao rio e nas estruturas aí existentes;
- Avaliação de soluções estruturais com o objetivo de diminuir a velocidade das correntes e consequentemente a erosão em determinados locais;
- Instalação de sondas de monitorização de níveis e velocidades da corrente de modo a ser possível obter séries de dados que permitam melhorar a calibração do modelo, bem como de estações hidrométricas, com vista a monitorizar os caudais e os fluxos sedimentares;
- Simulação da pluma de sedimentos por transbordamento incorporando o efeito da agitação marítima.

Referências bibliográficas

- Administração dos Portos do Douro Leixões e Viana do Castelo. (2020). *Localização - Porto de Viana do Castelo*. Consultado em setembro 10, 2020. Disponível em https://viana.apdl.pt/pt_PT/localizacao
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2020). *SNIRH*. Consultado em maio 12, 2020. Disponível em <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=>
- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics - The Basics with applications* (J. J. Corrigan & E. Castellano (eds.)). McGraw-Hill.
- ARPH. (2007). *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*. Consultado em junho 04, 2020. Disponível em <https://www.aprh.pt/rgci/glossario/mare.html>
- Azevedo, J. (2011). *Plano de Gestão da Albufeira da Barragem de Touvedo*. Instituto Politécnico de Viana do Castelo.
- Becker, J. H. (2011). *Dredge plumes - Ecological risk assessment*. Master thesis. Delft University of Technology.
- Becker, J. H., van Eekelen, E., van Wiechen, J., de Lange, W., Damsma, T., Smolders, T., & van Koningsveld, M. (2015). Estimating source terms for a far field dredge plume modelling. *Journal of Environmental Management*, 149, 282–293.
- Boskalis. (2020a). *Cutter suction dredger*. Consultado em setembro 25, 2020. Disponível em <https://boskalis.com/about-us/fleet-and-equipment/dredgers/cutter-suction-dredgers.html>
- Boskalis. (2020b). *Trailing suction hopper dredger*. Consultado em setembro 25, 2020. Disponível em <https://boskalis.com/about-us/fleet-and-equipment/dredgers/trailing-suction-hopper-dredgers.html>
- Bray, R. N., Bates, A. D., & Land, J. M. (1996). *Dredging - A handbook for engineers* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Bray, R. N., & Cohen, M. (2010). Dredging for development. *International Association of Dredging Companies (IADC) International Association of Ports and Harbors (IAPH)*, 6th editio.
- Canelas, L. M. F. (2012). *Sistemas de informação geográfica no apoio às dragagens portuárias*. Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa.
- Carneiro, J. J. F. (2014). *Caracterização de estados de agitação marinha e processos de propagação*. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho.
- Civil Engineering Portal. (2020). *How does overflowing in trailing suction hopper dredger affect the water regime*. Marine Works.
- Coelho, J. R. R. (2016). *Transporte sedimentar no estuário do rio Lima - avaliação de soluções de minimização do assoreamento na embocadura*. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho.
- Comissão Europeia. (2011). *As Diretivas Aves e Habitats em estuários e zonas costeiras*. <https://doi.org/10.2779/45370>
- Conceição, R. A. A. (2016). *Gestão de dragagens portuárias – alguns aspectos geotécnicos e geoambientais* [Universidade Nova de Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10362/18510>
- Confluence. (2020). *Trailing Suction Hopper Dredger (TSHD) - Object Definitions*. Consultado em dezembro 29, 2020. Disponível em <https://confluence.qps.nl/qinsy/latest/en/trailing-suction-hopper-dredger-tshd-object-definitions-54878709.html>
- Consulmar. (2017). *Estudo de Impacte Ambiental - Dragagem do canal de acesso aos Estaleiros Navais de Viana do Castelo*. https://siaia.apambiente.pt/AIADOC/AIA3004/vol_ii_eia_dragagem_pvcastelo201841115425.pdf
- Costa, N. (2015). *Avaliação do transporte sedimentar na bacia do Lima baseada em ferramentas de modelação*. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho.

Dalrymple, R. W., Zaitlin, B. A., & Boyd, R. (1992). Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62, 1130–1146. <https://doi.org/10.1306/D4267A69-2B26-11D7-8648000102C1865D>

Day, J. H. (1980). What is an estuary? *South African Journal of Science*, 76, 198–199.

de Castro, S. M., & de Almeida, J. R. (2012). Dragagem e conflitos ambientais em portos clássicos e modernos: uma revisão. *Sociedade e Natureza*, 24, 519–533. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000300011>

Delgado, A. L. S. A. P. (2011). *Caracterização Hidrodinâmica E Sedimentar Do Estuário Do Rio Minho*. Dissertação de mestrado, Universidade do Porto.

Deltares. (2014). *Delft3D Suite - Functional Specifications*.

Duarte, A. A. L. S. (2005). *Influência da hidrodinâmica em sistemas estuarinos sujeitos a eutrofização* [Universidade do Minho]. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/5914>

Duarte, A. A. L. S., & Vieira, J. M. P. (1997). Caracterização dos Ambientes Estuarinos - Mistura em Estuários. *Engenharia Civil - UM*, 6, 41–55. http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/2495/1/Num6_pag_41_55.pdf

Elhakeem, A., & Elshorbagy, W. (2015). Hydrodynamic evaluation of long term impacts of climate change and coastal effluents in the Arabian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 101(2), 667–685. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.032>

Engineering ToolBox. (2010). *Densities of Materials*. Consultado em setembro 30, 2020. Disponível em https://www.engineeringtoolbox.com/density-materials-d_1652.html

FBO. (2002). *Plano de Ordenamento e Expansão do Porto de Viana do Castelo*.

Garranos.pt. (2020). *Ínsuas do Lima*. Consultado em dezembro 14, 2020. Disponível em <https://www.garranos.pt/pt/pontos-de-interesse/insuas-do-lima>

Geocaching.com. (2012). *Barragem do Alto Lindoso*. Consultado em dezembro 10, 2020. Disponível em https://www.geocaching.com/geocache/GC41PY3_barragem-do-alto-lindoso?guid=9030986f-f292-4e18-b266-11c984100594

Google. (2020). *Google Earth*. Consultado em outubro 5, 2020. Disponível em <https://earth.google.com/web/>

Gomes, M. . P., Pinho, J. L. S., do Carmo, J. S. A., & Lara, L. I. V. (2015). Hazard Assessment of Storm Events for The Battery, New York. *Ocean and Coastal Management*, 118(Part A), 22–31.

IADC. (2020a). *Bucker-ladder dredger*. Consultado em outubro 10, 2020. Disponível em <https://www.iadc-dredging.com/subject/equipment/bucket-ladder-dredgers/>

IADC. (2020b). *Rainbowing*. Consultado em outubro 10, 2020. Disponível em <https://www.iadc-dredging.com/subject/techniques/rainbowing/>

Instituto de Biologia da Universidade Federal da Bahia. (2020). *Estuários*. Estuários. Consultado em agosto 14, 2020. Disponível em <http://www.zonacosteira.bio.ufba.br/estuarios.html>

Instituto Hidrográfico. (2005). *Roteiro da Costa de Portugal - Portugal Continental - Do Rio Minho ao Cabo Carvoeiro - Volume 1*. Consultado em setembro 07, 2020. Disponível em <https://loja.hidrografico.pt/?product=rio-minho>

Kemps, H., & Mills, D. (2016). *Generation and release of sediments by hydraulic dredging: a review*. https://www.researchgate.net/publication/315684717_Generation_and_release_of_sediments_by_hydraulic_dredging_a_review

Lacasta, N., Lacerda, M., Rodrigues, R., & Rocha, F. (2015). *Plano de gestão da região hidrográfica do Minho e Lima*. https://apambiente.pt/_zdata/Políticas/Agua/PlaneamentoGestao/PGRH/PGRH_ParticipacaoPublica/PGRH_2/PTRH1/PGRH1_Parte2.pdf

Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 883–915.

- Lima, M. M. T. (2012). *Gestão portuária com subsídios de modelagem computacional para projetos de dragagem*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MARETEC/IST, & INAG. (2001). *Limites dos Estuários de Portugal*.
- Marine Insight. (2020). *What is dredging?* Consultado em novembro 12, 2020. Disponível em <https://www.marineinsight.com/guidelines/what-is-dredging/>
- Mendes, F. R. . (2009). *Contributos para o plano do estuário do rio Lima*. Dissertação de mestrado, Universidade do Porto.
- Miranda, L. B., Castro, B. M., & Kjerfve, B. (2002). *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. Editora da Universidade de São Paulo.
- Nul, J. de. (2020). *Trailing suction hopper dredgers*. Consultado em outubro 13, 2020. Disponível em <https://www.jandenul.com/fleet/trailing-suction-hopper-dredgers>
- Offshore Industry and Technology Journal. (2017). *Dredging fleet*. Consultado em outubro 13, 2020. Disponível em <http://offshore-fleet.com/data/dredging-fleet.htm>
- Parijs, M. Van. (2009). Mitigating the environmental impact of hopper dredging by choking the overflow. *Eco-Friendly Dredging in the Modern World*.
- Parlamento Europeu. (2000). Directiva 2000/60/CE. *Jornal Oficial Das Comunidades Europeias*.
- Pinho, J. L. S. (2000). *Aplicação de modelação matemática ao estudo da hidrodinâmica e da qualidade da água em zonas costeiras*. Dissertação de doutoramento, Universidade do Minho. <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/2798>
- Pinho, J. L. S. (2014). Monitorização e modelação da morfodinâmica costeira. *Ingenium*. <http://www.ordemengenhadores.pt/pt/centro-de-informacao/publicacoes/revista-ingenium/revista-ingenium-n-o-141-maio-junho/>
- Pinho, J. L. S. (2016). *Sebenta hidráulica marítima*.
- Pinho, J. L. S., Coelho, J., Venâncio, S., Vieira, L., Vieira, B., & Vieira, J. M. P. (2018). Application of Delft3d for designing and assessing new solutions to improve sediment input to an erosion prone coast. *EPiC Series in Engineering, 3*(HIC 2018, 13th International Conference on Hydroinformatics), 1665–1672. <https://doi.org/10.29007/lqms>
- Pinto, C. A., Silveira, T. M., & Teixeira, S. B. (2018). *Alimentação artificial de praias na faixa costeira de Portugal Continental: enquadramento e retrospectiva das intervenções realizadas (1950-2017)*.
- Pinto, L. L. M. de A. (2010). *Modelação da Morfodinâmica de Estuários*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Portela, L. I. (2011). Dragagens nos portos comerciais de Portugal Continental: dados preliminares. *Laboratorio Nacional de Engenharia Civil*. http://repositorio.inec.pt:8080/bitstream/123456789/1004004/1/62_Dragagens_LPortela.pdf
- Pritchard, D. W. (1952). Estuarine Hydrography. In *Advances in Geophysics* (Vol. 1, pp. 243–280). [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60208-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60208-3)
- Pritchard, D. W. (1967). What is an estuary: physical viewpoint. *Estuaries, G.H. Lauff, 83*, 3–5.
- PROMAN. (2004). *Projecto das Obras de 1º Fase de Expansão Portuária do Porto de Viana do Castelo*.
- Royal IHC. (2020). *Overflow systems*. Consultado em outubro 20, 2020. Disponível em <https://www.royalihc.com/en/products/dredging/hopper-dredging/overflow-systems>
- Simões, M. H. (2009). *Sistematização dos aspectos ambientais de dragagens portuárias marítimas no Brasil*. Universidade de São Paulo.
- Spearman, J. R., van Koningsveld, M., Aarninkhof, S., & de Heer, A. (2011). Validation of the TASS system for predicting the environmental effects of trailing suction hopper dredgers. *Terra et Aqua, 125*, 14–22.

- Stewart, R. H. (2008). *Introduction to Physical Oceanography*. Texas A&M University. <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/160216>
- Tábua de Marés. (2020). *Tábua de Marés- Viana do Castelo*. Consultado em setembro 27, 2020. Disponível em <https://tabuademares.com/pt/viana-do-castelo/viana-do-castelo>
- Torres, R. J. (2000). *Uma análise preliminar dos processos de dragagem do porto de Rio Grande, RS*. Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- Tuinhof, T. (2014). *Modelling far-field dredge plume dispersion*. Delft University of Technology.
- van Maren, D. S., van Kessel, T., Cronin, K., & Sittoni, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 95, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.010>
- Venâncio, S. S., Pinho, J. L. S., Vieira, J. M. P., Avilez-Valente, P., & Iglesias, I. (2019). Analysis of estuarine flood levels based on numerical modelling - the Douro river estuary case study. *Revista Eletrônica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 29. <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/2236117038538>
- Vieira, J. M. P., & Pinho, J. L. S. (2010, November). Distribuição salina na embocadura do rio Lima em diferentes regimes hidrodinâmicos. *Revista Recursos Hídricos*, 5–14.
- Vlasblom, W. J. (2003). *Designing Dredging Equipment*.
- Woodroffe, C. D. (2003). *Coasts - Form, Process and Evolution*. Cambridge University Press.
- Yu, C., Cheng, J.-J., Wanh, Y. Y., Jones, L. G., Loureiro, C., Faillace, E., & Chia, Y. P. (1993). *Data collection handbook to support modeling the impacts of radioactive material in soil*. <https://doi.org/10.2172/10162250>