



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Civil

Joaquim Filipe Maia Peixoto

**Modelação hidrodinâmica tridimensional do
estuário do rio Douro**

Outubro de 2012



Universidade do Minho
Departamento de Engenharia Civil

Joaquim Filipe Maia Peixoto

**Modelação hidrodinâmica tridimensional do
estuário do rio Douro**

Dissertação de Mestrado
Engenharia Civil – Perfil de Hidráulica e Ambiente

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

Outubro de 2012

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de demonstrar o meu apreço ao Professor Doutor José Luís da Silva Pinho pela sugestão do tema e por me ter dado a oportunidade de o concretizar, além de todo o auxílio dado na elaboração deste trabalho.

RESUMO

Os sistemas estuarinos são compostos por duas massas de água com características diferentes, desde logo a concentração de salinidade que numa das massas de água é máxima (água do oceano ou mar) e na outra é nula ou muito baixa (água do rio). Além desta diferença existe ainda a diferença nas causas do movimento da massa de água, isto é, enquanto que a água salobra (água oceânica) se move devido à influência dos astros (sol, lua entre outros), pressão atmosférica, vento entre outras causas, a água doce move-se essencialmente devido à transformação da energia potencial em energia cinética (move-se devido à ação da gravidade). A forma como estas duas massas se relacionam é complexa. Para isso também contribui a geometria do fundo e a temperatura da água.

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre a hidrodinâmica do estuário do rio Douro realizou-se este trabalho que contempla a criação de um modelo hidrodinâmico tridimensional do estuário no programa computacional Delft3D. Este modelo serviu para simular diferentes cenários hidrodinâmicos correspondentes a diferentes condições de descarga da barragem de Crestuma-Lever, tipos de maré, salinidade e cenários fictícios de rutura dos molhes da embocadura.

Após a obtenção dos resultados da simulação procedeu-se à sua análise. Desta análise retirou-se que existem três fatores determinantes na forma como as duas massas de água se relacionam que são o caudal escoado pelo rio condicionado pela barragem de Crestuma, o estado da maré e a geometria do fundo e fronteiras. Nestas o molhe sul apresenta-se como o elemento determinante das condições atuais de escoamento na zona da embocadura.

Palavra chave: Delft3D, Estuário, Douro, Modelação, Tridimensional

ABSTRACT

Estuarine systems consist in two water masses with different characteristics like as, the concentration of salinity, in one of the water's bodies is maximal (ocean water or sea) and the other is nil or very low (river water). Besides this the causes of movement the water mass are different, that is, while the brackish water (ocean water) moves due to the influence of the heavenly bodies (sun, moon, etc.), atmospheric pressure, wind and other causes, fresh water moves primarily due to the transformation of potential energy into kinetic energy (moving due to gravity). The way these two masses are related is complex. To this also contributes the geometry of bottom and water temperature.

With the objective to improve the knowledge of the River Douro estuary hydrodynamics, this work includes the creation of a three-dimensional hydrodynamic model of the estuary in the software Delft3D. This model was used to simulate different hydrodynamic scenarios corresponding to different conditions of discharge Crestuma-Lever dam, types of tide, salinity and unreal scenarios of rupture the piers.

After obtaining the results of simulation, proceeded to the results analysis. In the analysis concludes that are three factors that influences the relation of the two mass of water the flow are drained by the river dam Crestuma, the state of the tide and the geometry of the background and borders. In this the south pier presents itself as the decisive factor of current flow in the area of the mouth.

Keywords: Delft3D, Estuary, Douro, Modeling, Three- dimensional

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	2
1. INTRODUÇÃO	3
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	3
1.2 OBJECTIVO E METODOLOGIA.....	5
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO 2	
MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA – REVISÃO BIBLIOGRÀFICA.....	8
2. MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DE MODELOS HIDRODINÂMICOS	9
2.1.1 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES.....	10
2.1.2 EQUAÇÕES DE REYNOLDS.....	11
2.2 PROGRAMAS PARA CRIAÇÃO DE MODELOS HIDRODINÂMICOS.....	12
2.2.2 PROGRAMA <i>RMA2</i>	13
2.2.3 PROGRAMA <i>TELEMAC</i>	14
2.2.4 PROGRAMA <i>FLOW-3D</i>	15

2.2.5 PROGRAMA <i>MOHID</i>	16
2.2.6 PROGRAMA <i>SISBAHIA</i>	17
2.2.7 PROGRAMA <i>DELFT3D</i>	18
CAPÍTULO 3	
MODELO HIDRODINÂMICO DO ESTUÁRIO DO RIO DOURO.....	20
3. MODELO HIDRODINÂMICO DO ESTUÁRIO DO RIO DOURO	21
3.1 RIO DOURO – BACIA E ESTUÁRIO	21
3.2 FRONTEIRA OCEÂNICA DO ESTUÁRIO.....	23
3.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO TRIDIMENSIONAL DO ESTUÁRIO DO RIO DOURO.....	24
3.4 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA.....	27
3.5 CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	28
CAPÍTULO 4	
CENÁRIOS DE MODELAÇÃO E RESULTADOS	32
4. CENÁRIOS DE MODELAÇÃO E RESULTADOS	33
4.1 CENÁRIOS MODELADOS	33
4.2 ANÁLISE HIDRODINÂMICA	34
4.2.1 MARÉ.....	34
4.2.2 VELOCIDADE.....	37
4.3 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ESTRATIFICAÇÃO.....	44

4.4 ANÁLISES DE SITUAÇÃO DE RUTURA DAS ESTRUTURAS DE DEFESA DA EMBOCADURA.....	54
4.4.1 ELEVÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE.....	54
4.4.2 VELOCIDADES.....	58
4.4.3 SALINIDADE	67
CAPITULO 5	
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
5.1 CONCLUSÕES	77
5.2 SUGESTÕES DE PRÓXIMOS TRABALHOS.....	80
BIBLIOGRAFIA	83

ÍNDICE DE FIGURAS E QUADROS

Figura 1.1: Projeto de autoria de José Salazar (1779). Extraída de Jesus, M (Volume II, 2003, página. XXII).....	4
Figura 3.1: Bacia Hidrográfica do Douro (http://mundoadescoberta.blogspot.pt).....	21
Figura 3.2: Foz do Douro (<i>Google Earth, 2012</i>).....	22
Figura 3.3: Representação dos passos da construção do modelo a) importação das margens e criação do quadrilátero; b) imagem da primeira malha; c) imagem duma malha intermédia; d) malha final.....	25
Figura 3.4: Imagem da área de estudo com o modelo implantado	26
Figura 3.5: Exemplo da divisão da profundidade pelas 10 camadas.....	26
Quadro 1: Componentes astronómicas da maré	28
Quadro 2: Correspondência entre os dias de simulação e os intervalos de tempo	29
Figura 3.5: Planta do modelo identificativa da localização do ponto escolhido para a obtenção dos valores da elevação da superfície livre.....	29
Figura 3.6: Curvas de elevação da superfície num ponto oceânico: linha – resultados do modelo, pontos – resultados previstos.....	29
Quadro 3: Valores das amplitudes das marés.....	30
Figura 3.7 Representação do vórtice ciclónico a sul (esquerda) e anticiclónico (direita)	31
Figura 3.8 Perfil longitudinal de velocidade para a camada superficial.....	31
Quadro 4: Cenários modelados.....	33
Figura 4.1: Gráfico com a elevação da superfície ao longo do tempo para o caudal de 100 m ³ /s.....	35

Figura 4.2: Gráfico com a elevação da superfície ao longo do tempo para o caudal de 200 m ³ /s a 800 m ³ /s.....	35
Figura 4.3: Gráfico com a elevação da superfície ao longo do tempo para o caudal de 10000 m ³ /s.....	35
Quadro 5: Valores de amplitude para os diferentes cenários.....	36
Figura 4.4: Velocidade na camada superficial no cenário 4.....	37
Figura 4.5: Representação dos vetores velocidade para a camada superficial (esquerda) , intermédia (centro) e penúltima (direita) para o cenário 4 (vetores velocidade representados com a mesma escala, independente da velocidade verificada e no mesmo instante).	38
Figura 4.6: Representação gráfica da velocidade ao longo do perfil longitudinal na camada superficial para o cenário 4 (Q100), 3 (Q10000) e 2 (Q800).	39
Figura 4.7: Representação gráfica da velocidade ao longo do perfil longitudinal na camada superficial para o cenário 5 (Q100), 6 (Q10000) e 7 (Q800).	39
Quadro 6: Número de localizações em que as curvas de caudais inferiores apresentam valores de velocidade maiores.	40
Figura 4.8: Planta onde se identifica os pontos no interior do estuário onde a curva Q10000 é menor que a curva Q800.....	40
Figura 4.9: Perfil vertical de velocidade para o caudal de 100 m ³ /s em maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	41
Figura 4.10: Perfil vertical de velocidade para o caudal de 200 m ³ /s a 800 m ³ /s em maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	41
Figura 4.11: Perfil vertical de velocidade para o caudal de 10000 m ³ /s em maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	41
Figura 4.12: Velocidade para o caudal de 100 m ³ /s na camada superficial para a maré morta e maré viva na entrada do estuário.....	42

Figura 4.13: Velocidade para o caudal de 200 a 800 m ³ /s na camada superficial para a maré morta e maré viva na entrada do estuário.....	42
Figura 4.14: Velocidade para o caudal de 10000 m ³ /s na camada superficial para a maré morta e maré viva na entrada do estuário.....	42
Figura 4.15: Perfil vertical da velocidade aquando da inversão de escoamento de entrada para saída (esquerda) do estuário e de saída para entrada no estuário (direita).	44
Figura 4.16: Salinidade na camada superficial para todo o domínio do modelo para o cenário 8 (caudal de 200 a 800 m ³ /s e maré viva).....	45
Figura 4.17: Intrusão salina para os caudais de 100, 200-800 e 10000 m ³ /s com maré morta à superfície (direita) e na penúltima camada (esquerda). EE-Entrada do estuário; PA – Ponte da Arrábida e PI – Ponte do Infante.	46
Figura 4.18: Intrusão salina para os caudais de 100, 200-800 e 10000 m ³ /s com maré viva à superfície (direita) e na penúltima camada (esquerda). EE-Entrada do estuário; PA – Ponte da Arrábida e PI – Ponte do Infante..	46
Figura 4.19: Salinidade na saída do estuário para o caudal de 100 m ³ /s (esquerda) e caudal de 200-800 m ³ /s (direita).....	47
Figura 4.20: Salinidade entre a entrada do estuário(esquerda da imagem) e São Miguel-o-Anjo (direita da imagem) em perfil vertical (caudal de 200 a 800 m ³ /s e maré viva).	47
Figura 4.21: Salinidade na entrada do estuário com caudal de 100 m ³ /s e maré viva (esquerda), maré morta (direita).....	48
Figura 4.22: Salinidade na entrada do estuário com caudal de 200-800 m ³ /s e maré viva (esquerda), maré morta (direita).....	49
Figura 4.23: Salinidade na entrada do estuário com caudal de 10000 m ³ /s e maré viva (esquerda), maré morta (direita).....	49
Quadro 7: Valores máximos de salinidade para cada caudal em maré morta.....	50
Quadro 8: Valores máximos de salinidade para cada caudal em maré viva.	50

Figura 4.24 Perfil vertical da salinidade para o caudal de 100 m ³ /s com maré morta (esquerda) e maré viva (direita).	51
Figura 4.25 Perfil vertical da salinidade para o caudal de 200-800 m ³ /s com maré morta (esquerda) e maré viva (direita).	51
Figura 4.26 Perfil vertical da salinidade para o caudal de 10000 m ³ /s com maré morta (esquerda) e maré viva (direita).	51
Figura 4.27: Salinidade na entrada do estuário (esquerda). na ponte da Arrábida (centro) e na ponte do Infante (direita) com caudal de 100 m ³ /s e maré viva (no mesmo instante).	53
Figura 4.28 Perfil vertical da salinidade na entrada do estuário para o cenário 8.....	53
Figura 4.29: Identificação da secção ME-MD em planta (esquerda) e vista em perfil vertical (direita).	55
Figura 4.30: Elevação máxima da água para o cenário de caudal de 100 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	55
Figura 4.31: Elevação máxima da água para o cenário de caudal de 800 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	55
Figura 4.32: Elevação máxima da água para o cenário de caudal de 10000 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	56
Figura 4.33: Elevação mínima da água para o cenário de caudal de 100 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	57
Figura 4.34: Elevação mínima da água para o cenário de caudal de 800 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	57
Figura 4.35: Elevação mínima da água para o cenário de caudal de 10000 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).....	57
Figura 4.36: Jato de água na situação de rutura de ambos os molhes (esquerda, cima) do molhe sul (direita, cima) e molhe norte (baixo).....	59

Figura 4.37: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 100 m ³ /s e maré viva na camada superficial (direita) e na penúltima camada (esquerda).....	60
Figura 4.38: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 200-800 m ³ /s e maré viva na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita).....	60
Figura 4.39: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 10000 m ³ /s e maré viva na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita).....	60
Figura 4.40: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 100 m ³ /s e maré morta na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita).....	61
Figura 4.41 :Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 200-800 m ³ /s e maré morta na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita). ..	61
Figura 4.42: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 10000 m ³ /s e maré morta na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita). ..	62
Figura 4.43: Perfil longitudinal da velocidade para o caudal de 100 m ³ /s e maré viva na camada superficial (esquerda) e para a maré morta (direita).....	63
Figura 4.44: Perfil longitudinal da velocidade para o caudal de 200-800 m ³ /s e maré viva na camada superficial (esquerda) e para a maré morta (direita).....	63
Figura 4.45: Perfil longitudinal da velocidade para o caudal de 10000 m ³ /s e maré viva na camada superficial (esquerda) e para a maré morta (direita).....	63
Figura 4.46: Perfil vertical de velocidade na entrada do estuário para a maré viva e caudal de 100 m ³ /s (esquerda), 200-800 m ³ /s (centro) e 10000 m ³ /s (direita).	64
Figura 4.47: Perfil vertical de velocidade em S. Miguel-o-Anjo para a maré viva e caudal de 100 m ³ /s (esquerda), 200-800 m ³ /s (centro) e 10000 m ³ /s (direita).	64
Figura 4.48: Perfil vertical de velocidade na ponte do Infante para a maré viva e caudal de 100 m ³ /s (esquerda), 200-800 m ³ /s (centro) e 10000 m ³ /s (direita).....	65
Figura 4.49: Corte vertical do escoamento na entrada do estuário para a maré viva e caudal de 10000 m ³ /s.	65

Figura 4.50: Perfil vertical de velocidade na entrada do estuário para a maré morta e caudal de 100 m ³ /s (esquerda), 200-800 m ³ /s (centro) e 10000 m ³ /s (direita).	66
Figura 4.51: Perfil vertical de velocidade em S. Miguel-o-Anjo para a maré morta e caudal de 100 m ³ /s (esquerda), 200-800 m ³ /s (centro) e 10000 m ³ /s (direita).	66
Figura 4.52: Perfil vertical de velocidade na ponte do Infante para a maré morta e caudal de 100 m ³ /s (esquerda), 200-800 m ³ /s (centro) e 10000 m ³ /s (direita).	66
Figura 4.53: Representação dos valores e vetores velocidade ao longo da profundidade do cenário 29 (esquerda), cenário 30 (meio) e cenário 31 (direita).	67
Figura 4.54: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 100 m ³ /s e maré viva.	68
Figura 4.55: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 200-800 m ³ /s e maré viva.	68
Figura 4.56: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 10000 m ³ /s e maré viva.	68
Figura 4.57: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 100 m ³ /s e maré morta.	69
Figura 4.58: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 200-800 m ³ /s e maré morta.	69
Figura 4.59: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 10000 m ³ /s e maré morta.	70
Figura 4.60: Perfil longitudinal da salinidade para a camada superficial e caudal de 100 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).	71
Figura 4.61: Perfil longitudinal da salinidade para a camada superficial e caudal de 200-800 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).	71
Figura 4.62: Perfil longitudinal da salinidade para a camada superficial e caudal de 10000 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).	71

Figura 4.63: Perfil vertical de salinidade nos pontos EE (esquerda) PA (centro) e PI (direita) para o caudal de 100 m ³ /s e maré viva.	73
Figura 4.64: Perfil vertical de salinidade nos pontos EE (esquerda) PA (centro) e PI (direita) para o caudal de 200-800 m ³ /s e maré viva.	73
Figura 4.65: Perfil vertical de salinidade no ponto EE para o caudal de 10000 m ³ /s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).	73
Figura 4.66: Perfil vertical de salinidade para a maré morta e caudal de 100 m ³ /s no ponto EE (esquerda) e PA (centro), e para o caudal de 200-800 m ³ /s e maré morta no ponto EE (direita).	74

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. Introdução

Neste capítulo irá ser feito o enquadramento do objecto de estudo, de forma a contextualizar e salientar a importância de um conhecimento mais alargado dos padrões de circulação no estuário do rio Douro. São também enunciados os objectivos e a metodologia associados ao desenvolvimento da dissertação.

1.1 Enquadramento do tema

Ao longo dos anos a foz do rio Douro tem sido alvo de inúmeras cheias como é exemplo a cheia de 1703. Devido a estas cheias as zonas ribeirinhas são devastadas com a destruição de bens materiais como embarcações e edifícios colocando em risco vidas humanas. Além dos danos materiais as cheias em alguns casos foram responsáveis pela morte de pessoas. Exemplo disso é a cheia ocorrida a 2 e 3 de Janeiro de 1962 em que foram levadas pela cheia 150 barcaças e apenas se recuperaram 25 tendo uma pessoa perdido a vida (Jesus, 2003).

Devido ao grande número de naufrágios ocorridos na foz, não só devido às cheias mas sobretudo às suas características hidráulicas e batimétricas, foram surgindo diferentes projetos, estudos e obras ao longo dos anos visando o melhoramento das condições de acesso à barra do Douro. A título de exemplo refere-se o projeto de José Monteiro Salazar de 1779 o qual definia a construção de quatro obras, estando elas representadas na figura 1.1 (Jesus, 2003).

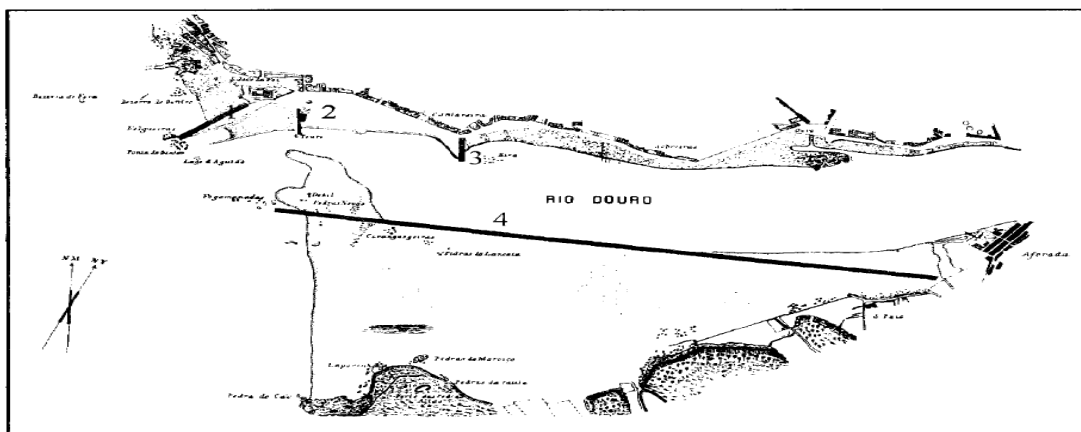


Figura 1.1: Projeto de autoria de José Salazar (1779). Extraída de Jesus, M (Volume II, 2003, página. XXII)

O projeto referido consistia na construção de dois molhes, assinalados pelos números 1 e 3 na figura 1.1, um esporão (número 2) e um molhe ou dique (número 4).

Quando se fala da hidrodinâmica do estuário do rio Douro não se pode olhar apenas para a hidrodinâmica fluvial, devendo-se ter em conta o que acontece no exterior do estuário, isto é deve-se olhar para o oceano Atlântico, já que estas duas massas de água estão em contato permanente, sendo a fronteira oceânica determinante para os níveis da superfície livre no interior do estuário e dos níveis de salinidade.

Além da questão das cheias provocadas essencialmente pelos caudais elevados e da questão dos naufrágios provocados pela maioria das vezes por encalhamento das embarcações existe ainda o processo de mistura da água doce existente no interior do estuário com água salina proveniente do oceano. Esta mistura tem elevada relevância se tivermos em consideração que na margem direita da foz estão a habitar 263 131 pessoas (Câmara Municipal do Porto, 2012), enquanto que na margem esquerda existe uma população de cerca de 290 000 pessoas (Câmara Municipal de Vila Nova de Gaia, 2012), podendo os efluentes das ETAR que recolhem as águas residuais das populações ribeirinhas, apresentar diferentes taxas de diluição em conformidade com o padrão de circulação estuarina instalado.

A distribuição salina apresenta-se ainda muito importante pois é determinante para as condições de habitat oferecidas pelo estuário para a existência de espécies biológicas, sendo que em Dezembro de 2007 foi proposto pelo município de Gaia em colaboração com a Administração dos Portos de Douro e Leixões (APDL) e a empresa municipal do Parque

Biológico que se tornasse uma reserva natural do estuário do rio Douro por este apresentar condições favoráveis para o abrigo de muitas aves, algumas de espécie de conservação prioritária segundo a diretiva comunitária Aves, tendo entretanto sido oficializada esta reserva natural. Também se podem encontrar algumas plantas protegidas no estuário do Douro. Do ponto de vista da fauna e da flora o estuário do Douro, fundamentalmente a parte final, assume um papel importante na proteção do ecossistema já que possibilita o habitat a espécies protegidas (Câmara Municipal de Gaia,2012).

1.2 Objectivo e metodologia

Pretendeu-se com este trabalho, a caracterização de padrões de circulação no estuário do rio Douro recorrendo ao programa computacional Delft3D.

Através do programa computacional de modelação da hidrodinâmica Delft3D foi criado um modelo do estuário do rio Douro. Procedeu-se à calibração deste modelo de modo a simular as condições hidrodinâmicas verificadas no estuário e à sua validação. Foram definidos e simulados diferentes cenários, analisando-se posteriormente os resultados obtidos.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos onde se descrevem as diferentes fases que constituíram o trabalho desenvolvido.

No primeiro capítulo – “Introdução – é efectuado o enquadramento do objecto de estudo, de forma a contextualizar e salientar a importância de um conhecimento mais alargado dos padrões de circulação no estuário do rio Douro. São também enunciados os objectivos e a metodologia associados ao desenvolvimento da dissertação.

No segundo capítulo – “Modelação hidrodinâmica - revisão bibliográfica” – apresenta-se a formulação matemática utilizada para modelar escoamentos com superfície livre, e apresentam-se características de diferentes programas computacionais aplicáveis em estudos de hidrodinâmica estuarina.

No terceiro capítulo – “ Modelo hidrodinâmico do estuário do rio Douro” – contempla uma descrição do estuário do rio Douro e do modelo adoptado para o simular. Contém ainda os resultados relativos à calibração e validação do modelo criado.

No quarto capítulo – “Cenários a modelar e discussão de resultados” – caracterizam-se os cenários modelados, apresenta-se e discute-se os resultados obtidos.

No quinto e último capítulo – “Conclusões e considerações finais” – é efectuada uma síntese do trabalho desenvolvido, são apresentadas as principais conclusões da dissertação, e propõem-se tarefas para desenvolvimento futuro.

CAPÍTULO 2

MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA – REVISÃO BIBLIOGRÀFICA

2. Modelação hidrodinâmica - Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta a formulação matemática utilizada para modelar escoamentos com superfície livre, e apresentam-se características de diferentes programas computacionais aplicáveis em estudos de hidrodinâmica estuarina.

2.1 Formulação matemática de modelos hidrodinâmicos

A formulação matemática derivada de leis físicas é a base de soluções numéricas para diversos problemas da física e da engenharia, entre outras áreas da ciência, cujas soluções analíticas não são possíveis de obter em situações que envolvam problemas de elevada dimensionalidade e complexidade. A razão para o sucesso deste tipo de solução, deve-se ao facto de a formulação matemática permitir a representação dos conceitos e processos envolvidos, permitindo o entendimento de aspetos do problema que não se revelam facilmente. No entanto a falta de conhecimento teórico sobre os problemas a analisar torna difícil a validação do modelo matemático (Andrade et al, 2005).

Como alternativa à formulação matemática podemos construir um modelo, em escala reduzida do problema que permita revelar as propriedades não óbvias do problema por meio duma solução empírica. No entanto, este método é caro e na maioria dos casos não é suficientemente flexível de forma a poder-se alterar livremente as variáveis envolvidos no problema. Por estes motivos opta-se pela resolução numérica de problemas derivados da formulação matemática fundamentados nas leis da física (Andrade et al, 2005).

Um dos passos da formulação matemática de um determinado problema é encontrar/adaptar as equações que quando solucionadas nos forneça um conjunto de soluções o mais próximo da realidade, ou seja, a formulação matemática não é mais do que encontrar um conjunto de equações que descrevam um determinado acontecimento da realidade com o maior rigor possível, o passo seguinte será validar essas equações.

No caso de regiões costeiras e estuarinas a descrição dos processos físicos e hidrodinâmicos é fornecida pelas equações diferenciais parciais (EDP's) que governam o escoamento. Tais equações empregam na sua formulação os princípios físicos baseados na conservação de massa (continuidade) e na conservação do momento linear (2ª Lei do movimento de Newton) (Siqueira, 2007).

2.1.1 Equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes traduzem o movimento de um volume elementar de fluido (newtoniano) incompressível e isotérmico, quando expresso em termos instantâneos das componentes das velocidades (m/s) u , v e w segundo a direção x , y e z , respetivamente e da pressão p . Estas equações encontram-se representadas a seguir (Pinho, 2000).

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

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

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

onde,

F_x , F_y e F_z , são as componentes das forças de volume por unidade de massa [$N Kg^{-1}$];

p é a pressão [Pa];

μ é o coeficiente de viscosidade dinâmico [$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$];

ρ é a massa volúmica da água [$kg\ m^{-3}$].

2.1.2 Equações de Reynolds

As equações de Reynolds, obtêm-se a partir das equações de Navier-Stokes, substituindo-se o valor instantâneo da velocidade pela soma de um valor médio temporal com uma flutuação aleatória. Estas equações caracterizam o movimento médio (média temporal) de uma partícula de fluido:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{u}\hat{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\hat{u}\hat{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\hat{u}\hat{w})}{\partial z} \right) \\ = \rho F_x - \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \overline{u'u'} + \frac{\partial}{\partial y} \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{u'w'} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

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

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

onde,

\hat{u}, \hat{v} e \hat{w} são médias temporais das componentes da velocidade [$m s^{-1}$]

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

u', v' , e w' , são flutuações das componentes da velocidade [$m s^{-1}$];

ρ é a massa volúmica da água [$kg m^{-3}$].

As equações de Reynolds na forma tridimensional e a equação da continuidade estabelecidas em termos de valores médios de \hat{u} , \hat{v} , \hat{w} , \hat{p} e \hat{c} , são o ponto de partida para o estudo de escoamentos reais. Em domínios como as zonas costeiras, estas equações deverão sofrer as adaptações necessárias para a consideração das particularidades que lhes são inerentes: fundos pouco profundos predominantes e consideração de outras forças aplicadas, como sejam, forças de Coriolis devidas à rotação da Terra, variações da pressão atmosférica, atrito na superfície devido ao vento e a influência de gradientes de massa volúmica provocados pela presença de substâncias tais como sal e poluentes (Pinho, 2000).

2.2 Programas para criação de modelos hidrodinâmicos

Durante os últimos anos, tem surgido novos programas computacionais com a capacidade para processar cálculos complexos, como é o caso das equações que regem o escoamento em superfície livre numa forma cada vez mais rápida e precisa, para isso contribuiu em muito o desenvolvimento de computadores com uma maior capacidade e rapidez no processamento de dados.

2.2.2 Programa *RMA2*

O programa descrito no parágrafo seguinte foi aplicado na modelação do estuário do Douro, com o objetivo de criar um sistema de previsão de cheias (Correia, 2011).

O programa *RMA2*, atualmente está a ser desenvolvido pelo corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos da América. Este programa permite a criação de modelos hidrodinâmicos bidimensionais no plano horizontal baseados num método de elementos finitos. Permite a obtenção de soluções em regime permanente ou variável, com o estabelecimento de condições de fronteira variáveis ao longo do tempo. As soluções são obtidas num determinado número de instantes, nos pontos nodais da malha de elementos finitos. Apresenta como principal limitação a impossibilidade de resolução de escoamentos super-críticos. Esta limitação advém do método numérico empregue na resolução das equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento. O programa *RMA2* inclui um algoritmo que permite a modelação de *regiões cobre/descobre*, ou seja, regiões que apenas se encontram inundadas em determinados períodos de tempo, muito útil para simulações de cheias. É baseado nas equações de conservação de massa e quantidade de movimento integradas segundo a coordenada vertical com as direcções horizontais, que são resolvidas por um método de elementos finitos usando-se a técnica dos resíduos pesados de Galerkin (para mais informações acerca desta técnica consultar, Carmo, 2009). Os elementos para a discretização espacial poderão ser triangulares e/ou quadrangulares de seis e oito nós, respectivamente. As funções de forma são quadráticas no caso das velocidades e lineares para a profundidade. A integração espacial é efectuada pelo método de Gauss. As derivadas temporais são discretizadas por uma aproximação de diferenças finitas. O método é totalmente implícito, sendo os sistemas de equações resolvidas pelo método de Newton-Raphson. O efeito do atrito no fundo é calculado usando as formulações de Manning ou Chezy, e as características turbulentas dos escoamentos são considerados a partir de coeficientes de viscosidade dinâmica. Podem ser analisados problemas em regime permanente ou em regime variado. A preparação de dados para a aplicação de modelos utilizando o *RMA2* é auxiliada pelo programa *SMS* (Surface-Water Modeling System), que funciona como um pré e pós processador de modelações hidráulicas em modelos uni, bi ou tridimensionais. O programa *SMS* (Surface-Water Modeling System) permite criar e analisar resultados de modelos

hidrodinâmicos bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) de águas superficiais. Esta interface, permite definir as condições iniciais das simulações, criar os ficheiros de dados e as malhas de elementos finitos. Possui uma ferramenta que permite efectuar a transformação de coordenadas entre diferentes sistemas e permite visualizar resultados de simulações (Correia, 2011).

2.2.3 Programa *TELEMAC*

O parágrafo que se segue foi retirado de um trabalho realizado com o objetivo de aprofundar o conhecimento da dinâmica sedimentar e da hidrodinâmica da Lagoa dos Patos e da região costeira adjacente. Esta lagoa encontra-se inserida em território brasileiro, mais precisamente no estado do Rio Grande do Sul que é banhado pelo oceano Atlântico, estando a interface lagoa/oceano situada no município de Rio Grande (Fernandes et al, 2010).

O programa *TELEMAC* resolve as equações tridimensionais de Navier-Stokes considerando as variações locais na superfície livre do fluido, desprezando as variações de densidade na equação de conservação da massa, considerando a pressão hidrostática e a aproximação de Boussinesq para resolver as equações de conservação da quantidade de movimento. O programa *TELEMAC* calcula a salinidade baseado na lei de conservação de massa. A solução das equações é baseada no método dos elementos finitos, que permite o controlo da distribuição de elementos na grelha utilizada, permitindo a definição da máxima resolução nas áreas de topografia de fundo complexa, e baixa resolução nas regiões de menor interesse. A discretização vertical do modelo é feita em coordenadas sigma, favorecendo a representação de variações batimétricas. O modelo morfológico e de transporte de sedimento em suspensão SediMorph funciona acoplado ao modelo hidrodinâmico (Fernandes et al, 2010).

O *TELEMAC* usa a linguagem computacional Fortran-90 e pode ser usado em qualquer computador independentemente do sistema operativo usado. Na eventualidade de ser necessário programar alguma sub-rotina o programa permite-o através das estruturas do Fortran-90 (*TELEMAC*, 2007).

2.2.4 Programa *FLOW-3D*

Foi efetuado um estudo na barragem hidroelétrica de São Salvador localizado no rio Tocantins, Brasil com o objetivo de analisar se, e, em que condições, os modelos matemáticos que simulem escoamentos turbulentos podem substituir os modelos físicos de escala reduzida no projeto de obras hidráulicas complexas na área da engenharia civil, recorrendo ao programa *FLOW-3D* (Fill, 2011)..

O programa *FLOW-3D*, foi desenvolvido pela *Flow Science Inc*. O referido programa é baseado no método dos volumes finitos para a resolução das equações de Reynolds e da continuidade. Com este programa é possível modelar fluxos tridimensionais de fluidos compressíveis e incompressíveis em regime permanente ou não permanente. É também possível a modelação de problemas com aproximações mais simples tais como consideração do comprimento de mistura de Prandtl, a representação 2D vertical ou horizontal ou a aproximação de águas pouco profundas. Este programa possui algumas características específicas, como a capacidade de modelar fluxos tridimensionais em domínios com obstáculos sólidos complexos. Esta capacidade deve-se à utilização de um método denominado “FAVOR” – *Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method*, onde se estabelece uma função de permeabilidade para obstáculos permeáveis ou não. Com este método é possível modelar contornos complexos mesmo trabalhando com uma malha ortogonal. A sua capacidade de modelar fluxos incompressíveis com superfície livre, e finalmente a capacidade de modelar escoamentos turbulentos através de vários modelos de turbulência. Na discretização temporal o software utiliza um método explícito para a integração da solução ao longo do tempo. No entanto obriga a que (por questões de estabilidade numérica) os incrementos temporais Δt) sejam bastante pequenos para que se verifique a condição de estabilidade de Courant (Fill, 2011).

2.2.5 Programa *MOHID*

Com o *MOHID* foi concretizado um estudo no maior porto da América Latina (porto de Santos), situado em Santos no Brasil. O objetivo deste trabalho era o de estudar o impacto do lodo dragado do canal de navegação do porto na área de despejo (Leitão et al, 2001).

O sistema de modelos *MOHID* compreende um conjunto de módulos capazes de, para além da hidrodinâmica, simular fenómenos de dispersão (abordagens lagrangeana e euleriana), qualidade da água e transporte de sedimentos (coesivos e não coesivos). Todos estes módulos apresentam a particularidade de poderem ser utilizados integrados nos códigos *MOHID2D* ou *MOHID3D* ou trabalharem isoladamente, utilizando neste caso valores de correntes fornecidos por ficheiros externos. O *MOHID2D* é um modelo hidrodinâmico bidimensional, integrado na vertical. Embora se trate de um modelo 2D permite a consideração simultânea de ramos 1D para a simulação de escoamentos em rios por exemplo. Este modelo resolve as equações para águas pouco profundas (*shallow water equations*), usando um algoritmo semi-implícito, baseado em diferenças finitas, e permite a simulação de escoamentos produzidos por diferentes agentes forçadores como sejam a maré, o vento ou as ondas produzidas pelo vento. O módulo de transporte lagrangeano do sistema do modelos *MOHID* tem diversas aplicações, possibilitando a simulação do movimento de traçadores com determinadas propriedades, com base num campo de velocidades calculado com os módulos hidrodinâmicos 2D ou 3D. Os traçadores podem ser utilizados para simular os mais diversos tipos de fenómenos como sejam, por exemplo, a dispersão de efluentes, o deslocamento de manchas resultantes de acidentes, a qualidade da água, fenómenos ecológicos, etc. O módulo de transporte lagrangeano apresenta-se como uma ferramenta privilegiada de integração em estudos de processos multidisciplinares com objectivo de compreender fenómenos que tenham uma vertente hidrodinâmica, química e biológica (Leitão et al, 2001).

2.2.6 Programa *SisBaHiA*

O objetivo do trabalho efetuado com o recurso a este programa era o de permitir um conhecimento mais aprofundado da influência do alagamento e secagem das zonas cobre/descobre pela maré na hidrodinâmica de canais de maré utilizando modelos numéricos baseados em elementos finitos, sendo que os resultados foram comparados a experiências levadas a cabo por outros autores (Siqueira, 2007).

O *SisBaHiA* é um sistema de modelos computacionais para previsão hidrodinâmica e também para a previsão da qualidade das águas ou transporte de grandezas escalares (modelos de dispersão) em massas de água superficiais. Este sistema oferece recursos para modelação de escoamentos (rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, e águas costeiras) com superfície livre sem estratificação vertical significativa. O modelo hidrodinâmico do *SisBaHiA* simula a circulação hidrodinâmica e dispõe de dois módulos, sendo um tridimensional (3D) e outro bidimensional (2DH). O *SisBaHiA* emprega um método numérico baseado em elementos finitos. Utiliza as equações diferenciais parciais (EDP's) que representam os princípios físicos de conservação de massa e da quantidade de movimento. No módulo hidrodinâmico 2DH do *SisBaHiA*, as equações são integradas na vertical, considerando as hipóteses de fluido incompressível, da pressão hidrostática, e de ondas longas, resultando nas equações de águas pouco profundas. As equações resultantes, nas direções x e y, da quantidade de movimento consideram o efeito de Coriolis, as tensões provocadas pelo vento, o atrito com o fundo e as tensões turbulentas de Reynolds. O módulo hidrodinâmico 2DH do *SisBaHiA* determina, a partir das três equações de águas pouco profundas que regem os escoamentos com a superfície livre, as elevações da superfície livre e as componentes das velocidades médias na vertical, nas direções x e y. A malha utilizada pelo *SisBaHiA* para representar a batimetria é de elementos finitos (Siqueira, 2007).

2.2.7 Programa *DELFT3D*

O estuário do rio Mondego, que se encontra no concelho da Figueira da Foz em Portugal, foi objeto de um estudo, no qual se pretendia modelar a hidrodinâmica de parte do estuário do rio Mondego, sendo considerados vários cenários baseados nas potenciais consequências induzidas pelas alterações climáticas, de modo a obter um conjunto de resultados que possibilitem a previsão das áreas de inundação. Este estudo foi concretizado com o recurso ao programa *Delft3D* (Santos et al, 2011).

O programa *Delft3D*, é um modelo numérico bastante aplicado na simulação de ambientes naturais, como zonas costeiras, rios, albufeiras e estuários. Este modelo permite aplicações bidimensionais no plano horizontal (2DH) e tridimensionais (3D). Trata-se de um modelo de elevada complexidade física e numérica devido ao grande número de processos físicos que permite simular e à diversidade de métodos e opções numéricas implementadas, sendo aplicável em: análises de fluxos de marés, correntes devidas ao vento, simulações do escoamento fluvial (fundamentalmente no plano horizontal) em rios, lagos e albufeiras profundas (fundamentalmente no plano vertical), na propagação de tsunamis, ressaltos hidráulicos e ondas de cheia, na morfodinâmica fluvial e costeira e no transporte de poluentes dissolvidos, bem como em análises da evolução da temperatura e de gradientes de salinidade (Santos et al, 2011).

O parágrafo seguinte foi retirado de um trabalho realizado com o recurso ao programa *Delft3D*, e tinha como objeto de estudo o estuário do rio Caravelas e Peruípe localizados no estado da Bahia, Brasil. O objetivo do estudo era o de aprofundar o conhecimento do objeto de estudo (Andutta, 2011).

O programa *Delft3D* é composto por vários módulos do qual se destaca o módulo *Flow* que simula fluxos não estacionários bi e tridimensionais, transportes induzidos por ações meteorológicas e/ou marés, pela descarga fluvial e os efeitos baroclínicos gerados pela componente longitudinal do gradiente de densidade. Este modelo fornece ainda a base hidrodinâmica para simulação de outros processos como qualidade da água, ecologia, ondas e morfodinâmica. Este modelo utiliza para resolução numérica das equações em que se baseia o método das diferenças finitas e uma grelha curvilínea. A coordenada vertical usada pelo

modelo é uma coordenada sigma, evitando assim que os elementos da malha intercetem a topografia do fundo, sendo possível adotar outras opções em termos de coordenadas verticais. O modelo tem por hipótese as aproximações usuais para regiões de águas pouco profundas, a variação longitudinal do campo de densidade é considerada no calculo da componente baroclínica da força de gradiente de pressão, e utiliza a aproximação de Booussinesq para determinação dos coeficientes de difusão turbulenta. O modelo resolve as equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível, cuja aceleração local é advetiva e adicionada ao efeito de Coriolis (aceleração devido ao movimento de rotação da Terra), e considera como aproximação águas pouco profundas. Os movimentos verticais são processados com a equação da continuidade (Andutta, 2011).

CAPÍTULO 3

MODELO HIDRODINÂMICO DO ESTUÁRIO DO RIO DOURO

3. Modelo hidrodinâmico do estuário do rio Douro

Os subcapítulos seguintes contemplam uma descrição do estuário do rio Douro e do modelo adoptado para o simular. Contém ainda os resultados relativos à calibração e validação do modelo criado.

3.1 Rio Douro – bacia e estuário

A bacia hidrográfica do rio Douro é uma das mais extensas e mais pluviosas da Península Ibérica, ocupando uma área de 97 603 km². Na figura 3.1 pode ver-se a bacia hidrográfica do Douro. Em solo português a área da bacia é de aproximadamente 18 643 km². No leito do rio estão construídas barragens de “fio de água” com pequena capacidade de armazenamento de água. As margens do estuário são também elevadas e por isso a secção transversal do estuário é, em geral, de pequena dimensão

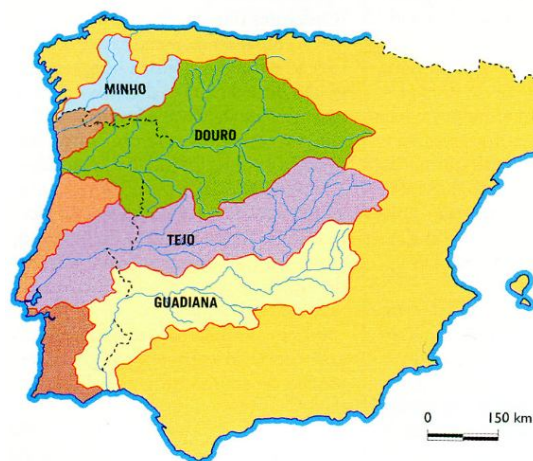


Figura 3.1: Bacia Hidrográfica do Douro (<http://mundoadescoberta.blogspot.pt>)

O rio Douro tem 927 km de comprimento e é o segundo rio mais extenso da Península Ibérica. É um rio de grande utilidade pública, sendo usado fundamentalmente para abastecimento da população, pesca, turismo, irrigação, agricultura e produção de energia hidroeléctrica, a qual representa 53% da exploração hidroeléctrica portuguesa. Entre os principais afluentes podem-se distinguir os rios Tâmega, Tua, Corgo, Sousa, Sabor, Águeda, Côa, Paiva e Távora (Correia, 2011).

Segundo o INAG (2012), o estuário tem cerca de 22 km de comprimento, no seu início encontra-se a barragem de Crestuma-Lever, e é formado por um vale estreito, com largura mínima de 135 m na ponte D. Luís (a 6 km da embocadura). A jusante da ponte da Arrábida, o estuário alarga atingindo a largura máxima de 1300 m. Na embocadura, o banco de areia do Cabedelo disposto perpendicularmente ao eixo do estuário, confina o escoamento ao canal estreito junto à margem norte. A cota da parte central do Cabedelo é da ordem dos 5 m acima do nível médio do mar (Descrição do estuário INAG, 2012).

A parte final do Estuário do Douro, nomeadamente o Cabedelo, a zona que resta do sapal e a área de areias que cobrem e descobrem com as marés, apresenta condições favoráveis para o abrigo e nidificação de muitas aves, e outras espécies biológicas.

O Cabedelo constitui um importante elemento natural de defesa do estuário contra o avanço do mar, particularmente em situações de temporal, pelo que importa reforçar e estabilizar o seu cordão dunar.

Na figura 3.2 mostra-se a parte final do estuário.



Figura 3.2: Foz do Douro (Google Earth, 2012)

3.2 Fronteira oceânica do estuário

A fronteira oceânica do estuário é determinante para o funcionamento hidrodinâmico no seu interior, sendo afetada pelas correntes oceânicas, pelas marés e pelas sobre-elevações de tempestade.

As correntes oceânicas podem agrupar-se, de acordo com a fonte de energia que está na sua origem, em *correntes induzidas pelo vento*, *correntes termohalinas* e *correntes de maré*. As primeiras, tal como a sua designação indica têm origem na ação do vento, enquanto as segundas têm como principal fonte de energia o Sol. As correntes de maré são induzidas pelas forças gravíticas astronómicas (incluindo o Sol), desempenhando a Lua uma ação preponderante. O movimento ondulatório forma-se ao longo das interfaces entre fluidos de diferentes densidades. No caso das ondas de superfície os fluidos em causa são a água e o ar (Pinho, 2000).

No caso das marés, podemos dizer que temos preia-mar (maré cheia) quando a Lua passa por cima de nós e quando a Lua passa por baixo de nós, ou seja, por cima dos nossos antípodas. As preia-mares sucedem-se assim, regularmente, com um intervalo médio de meio-dia lunar (aproximadamente 12h 25m) o que corresponde matematicamente à constituinte lunar semi-diurna (M2). Por sua vez, o intervalo de tempo entre uma preia-mar e a baixa-mar seguinte é, em média, 6 h 13 m. No entanto, o mar não reage instantaneamente à passagem da Lua, havendo, para cada local, um atraso maior ou menor das preia-mares e baixa-mares. Outro aspeto importante a ter em conta é o fenómeno quinzenal da alternância entre marés vivas e marés mortas; este fenómeno, matematicamente explicado pela constituinte S2 (solar semi-diurna), decorre do efeito do sol como elemento "perturbador". Com efeito, quando o Sol e a Lua estão em oposição (Lua cheia) ou conjunção (Lua nova), a influência do Sol reforça a da Lua e ocorrem as marés vivas (matematicamente as constituintes somam-se). Por outro lado, quando o Sol e a Lua estão em quadratura (Quarto crescente e Quarto minguante), a influência do Sol contraria a da Lua e ocorrem as marés mortas (matematicamente as constituintes subtraem-se). Regra geral, as amplitudes de marés vivas em Portugal Continental são cerca de 1,5 m. Isto é, o mar sobe e desce 1,5 metros em relação ao nível médio. Em marés mortas, a amplitude da maré é da ordem dos 70 centímetros (Instituto hidrográfico, 2012).

A fronteira oceânica criada para este modelo fica a uma distância de aproximadamente 8 quilómetros do molhe sul e tem uma extensão de aproximadamente de 7 quilómetros. No subcapítulo 3.4 serão abordadas as condições de fronteira impostas.

3.3 Construção do modelo hidrodinâmico tridimensional do estuário do rio Douro

O primeiro passo na construção de um modelo é a definição do seu domínio, ou seja é a definição das fronteiras. Das várias hipóteses que existem para definir as fronteiras fechadas (margens) a que foi utilizada neste trabalho foi a importação das margens como ficheiro **.spl*, isto porque, aproveitou-se um modelo já existente num formato **.dxf* (*Autocad*) e através duma folha de texto e duma rotina criada na ferramenta *Visual Basic* do *Excel* transformou-se o ficheiro **.dxf* num **.spl*. O modelo foi gentilmente cedido pelo professor Pinho tal como a rotina do *Excel*.

No entanto o modelo cedido não tinha o molhe sul daí a necessidade de o acrescentar para isso usou-se a ferramenta “Adicionar Caminho” do *Google Earth* de seguida converteu-se o ficheiro criado (**.kml*) num ficheiro editável no programa *Autocad*, através da ferramenta *kml2cad* disponível na internet, juntando-se este ficheiro ao ficheiro **.dxf* descrito no parágrafo anterior.

A malha foi criada no modulo *RFGRID* da seguinte forma, primeiro importou-se o ficheiro com as margens, oriundo do processo descrito anteriormente, de seguida com o botão *draw a new spline*, desenharam-se quatro novas *splines* de forma a que as margens ficassem contidas dentro do perímetro do quadrilátero, como mostra a figura 3.3a). Em alternativa a este método podia-se ter seccionado o modelo no entanto este método cria células com dimensões dispares que na fase do calculo podem originar problemas de instabilidade numérica. Logo, optou-se por criar o quadrilátero que permite obter células com dimensões mais uniformes. Após a definição do quadrilátero pode-se criar a malha propriamente dita através do botão *change splines into a grid*, ora esta primeira malha é muito grosseira, como se pode verificar na figura 3.3 b), por isso devemos refinar a malha utilizando o botão *refine grid* existente no menu

Operations que nos permite diminuir o tamanho das células dividindo-as em células mais pequenas e com o recurso desse botão vamos refinando a malha sucessivamente até obtermos uma malha com células de dimensões satisfatórias. À medida que vamos refinando a malha vão surgindo células no exterior da área de estudo essas células são apagadas usando a ferramenta *delete interior* do sub menu *block* do menu *Edit*. A figura 3.3d) foi obtida com o refinamento da malha localmente.

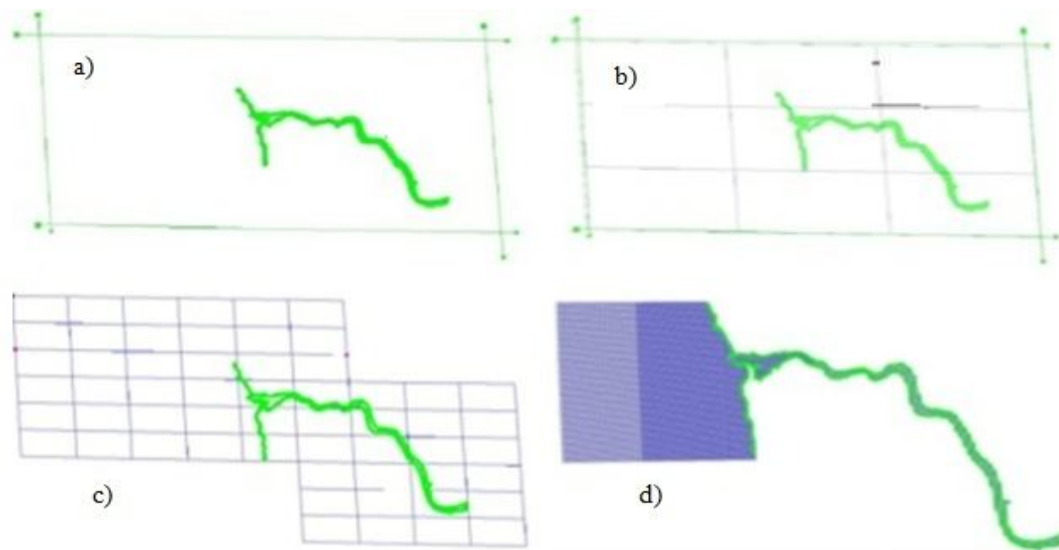


Figura 3.3: Representação dos passos da construção do modelo a) importação das margens e criação do quadrilátero; b) imagem da primeira malha; c) imagem duma malha intermédia; d) malha final.

O módulo *QUICKIN* permite-nos implementar a batimetria no modelo. A batimetria usada neste trabalho foi cedida pelo professor Pinho e vinha num formato passível de ser lido como um documento de texto. Isso permitiu subdividir este ficheiro noutros mais pequenos de forma a ser possível importa-los para o modulo referido e assim usando o botão *depth* inseriu-se os valores da batimetria manualmente nos pontos onde havia informação para os restantes pontos procedeu-se à interpolação linear através da ferramenta *depth* linear, e desta forma recriou-se o fundo do modelo, posteriormente no modulo *Flow Input*, esta profundidade será dividida em dez camadas como se demonstra na figura 3.5.

A figura 3.4 mostra a área de estudo com o modelo criado, enquanto que a figura 3.5 diz respeito à divisão da profundidade nas 10 camadas.

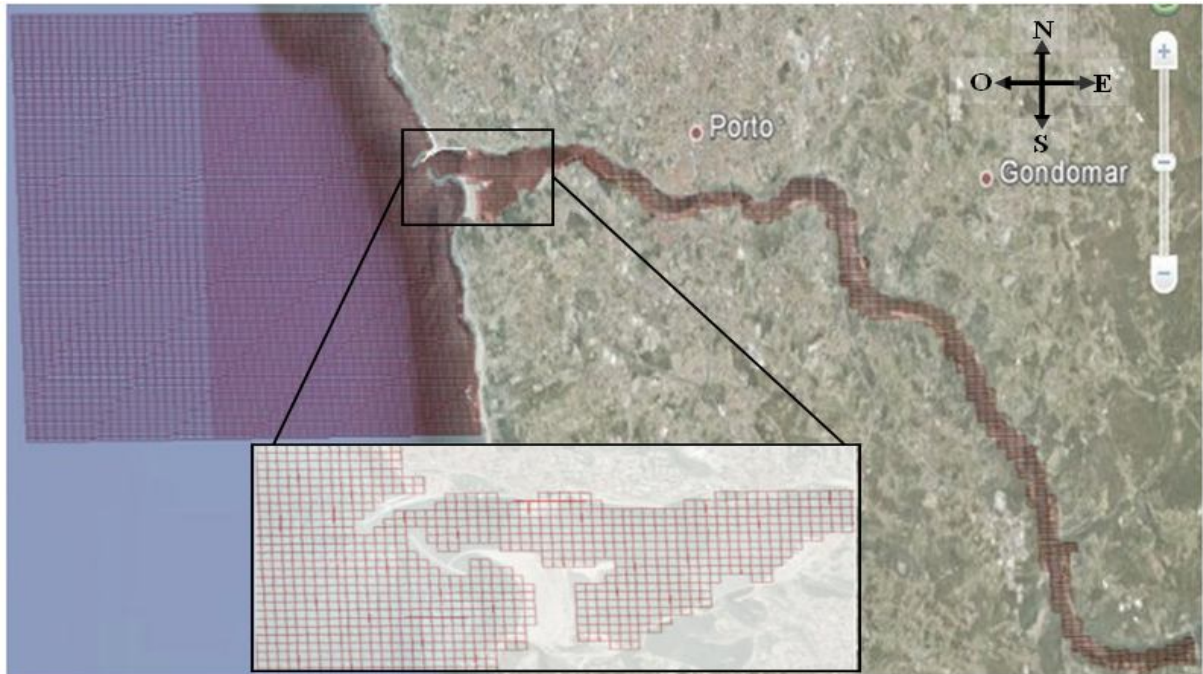


Figura 3.4: Imagem da área de estudo com o modelo implantado

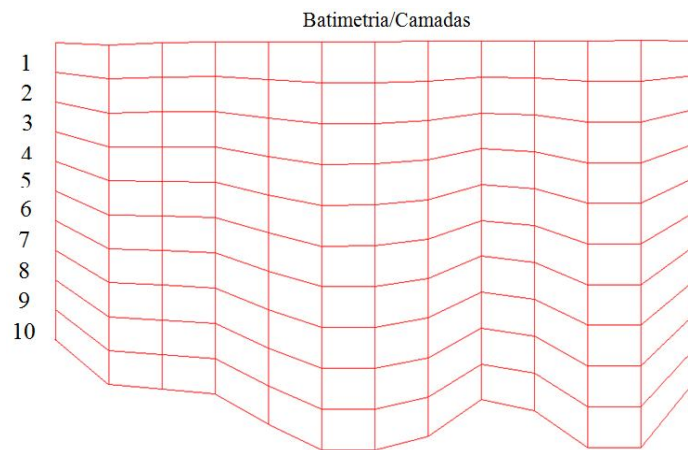


Figura 3.5: Exemplo da divisão da profundidade pelas 10 camadas

De notar que a divisão da batimetria presente na figura 3.5 é feita numa forma percentual, isto é cada camada corresponde a 10% da batimetria. Também se deve ter em atenção que este valor (10% da batimetria) sofre alterações ao longo da simulação, já que está diretamente

relacionado com o nível da superfície livre da água. Na figura 3.5 a camada 1 corresponde à camada de superfície e logicamente a camada 10 corresponde a camada de fundo.

3.4 Condições de fronteira

As condições de fronteira foram definidas de forma a obtermos resultados que permitissem a caracterização do escoamento (análise hidrodinâmica) em função das descargas fluviais e maré, das condições de estratificação e a análise da rutura das estruturas de defesa de embocadura. Foram consideradas fronteiras abertas na barragem de Crestuma (canto inferior direito da figura 3.4) e a outra no oceano Atlântico.

A condição de fronteira criada na barragem é do tipo *Water level* combinada com a opção *Q-H relation* este tipo de condição necessita de um caudal e da respetiva altura da coluna de água (distancia vertical da superfície livre da água ao fundo). Por sua vez a fronteira oceânica é do tipo *Water level* combinada com a opção *Astronomic* e para esta condição é necessário conhecer a amplitude e a fase das componentes astronómicas da maré que se queiram considerar.

Para a condição de fronteira criada na barragem de Crestuma foram definidos, com base nos dados disponíveis no *website* do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (<http://www.snirh.pt>, 2012), um caudal característico de Verão (100 m³/s), um caudal de Inverno (800 m³/s) e um caudal de cheia de 10000 m³/s, e um outro caudal médio de um ano seco (200 m³/s) conforme consta da descrição do estuário do Douro (INAG, 2012). No que diz respeito à fronteira oceânica foram impostos dois tipos de marés ,isto é, definiu-se uma maré morta e uma maré viva, para esta condição de fronteira foram consideradas as componentes astronómicas expostas no quadro 1 (para mais informações consultar <http://www.hidrografico.pt>).

Quadro 1: Componentes astronómicas da maré

Componentes astronómicas	Amplitude (m)	Fase (graus)
M2	1.041	73.8159
S2	0.363	102.4
N2	0.222	55.0603
K2	0.106	100.7179
K1	0.069	59.0589
O1	0.06	315.457
NU2	0.04	61.1874
MU2	0.037	32.3318
SA	0.031	106.6589
2N2	0.031	38.6046
MSF	0.027	143.7841

Foi ainda acrescentada uma outra condição, além das descritas anteriormente relacionada com a salinidade. Para esta condição foi imposto que a água salina (água oceânica) teria uma salinidade de 35 ppt (Pinho, 2000) para todo tempo de simulação enquanto que a água doce proveniente do rio Douro teria uma salinidade de 0 ppt. Para a temperatura o valor definido foi de 18 graus Celsius. Chegou-se a este valor após uma análise dos dados de temperatura disponíveis no SNIRH (2012). Foi ainda considerada informação obtida a partir do portal do Instituto Meteorológico (<http://www.meteo.pt>, 2012) e do Instituto Geográfico Português (<http://www.igeo.pt>, 2012).

Todos os parâmetros descritos neste subcapítulo foram introduzidos no módulo *Flow Input* do programa *Delft3D*.

3.5 Calibração do modelo

Na calibração do modelo foram obtidos valores de amplitude de maré para o período entre 18 de Junho de 2009 e 23 de Junho de 2009, com um intervalo de tempo de 15 minutos entre cada valor. O primeiro valor corresponde às 24 horas do dia 18 e a simulação tem a duração de cinco dias. O quadro 2 indica-nos quais os instantes em que se inicia o começo de um novo dia.

Quadro 2: Correspondência entre os dias de simulação e os intervalos de tempo

Dias	0	1	2	3	4	5
Intervalos de tempo	0	96	192	288	384	480

A figura 3.6 representa o gráfico da elevação da superfície livre, no ponto identificado na figura 3.5, para o modelo criado (curva modelo) e compara-os com os valores observados na estação de Leixões (curva real).

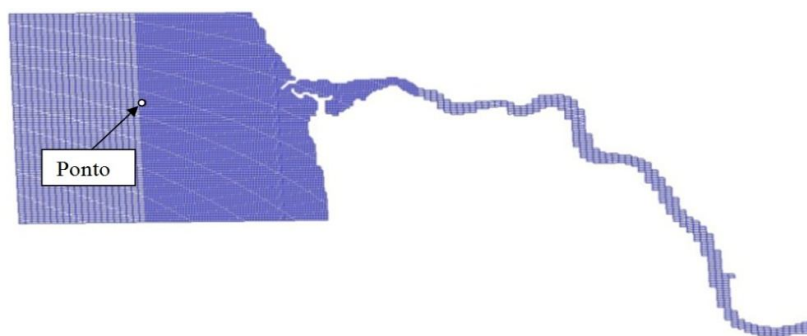


Figura 3.5: Planta do modelo identificativa da localização do ponto escolhido para a obtenção dos valores da elevação da superfície livre.

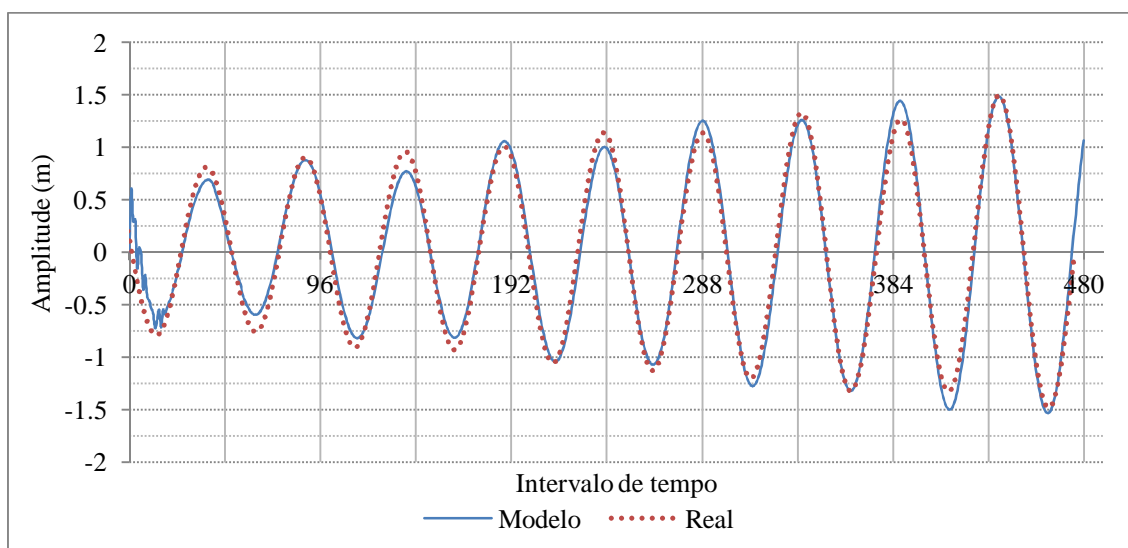


Figura 3.6: Curvas de elevação da superfície num ponto oceânico: linha – resultados do modelo, pontos – resultados previstos.

Inicialmente (antes do instante 96) a curva do modelo apresenta algum ruído que tem origem na passagem das condições iniciais (repouso) para o estado dinâmico. Ao olharmos para a figura 3.6 podemos ver que a partir do instante 192 (dia 2) de simulação apenas por uma vez é que o modelo se afasta de forma considerável da curva real isto em baixa-mar. Em preia-mar isso acontece por duas ocasiões, contudo apesar desse afastamento os treços retos, que representam a passagem de baixa-mar para preia-mar e vice versa, estão bastante próximos. Apesar de nem sempre a curva modelo se aproximar da curva real de forma a o incerteza ser inferior às décimas (<0.1) podemos afirmar que a curva modelo é uma boa aproximação à curva real. Será importante lembrar que dos muitos fatores que podem influenciar a elevação da superfície livre, nesta simulação apenas foram consideradas as componentes astronómicas expostas no quadro 1, ficando de fora o vento, a pressão entre outros.

No quadro 3 estão representados os valores das amplitudes de maré para as duas curvas do gráfico representado anteriormente. Pelos valores representados no quadro podemos verificar que até ao instante 189 da curva modelo, os valores de amplitude superiores pertencem à curva real sem exceção, mas no intervalo de tempo referido a curva modelo apresenta amplitude de valor superior, repetindo o feito nas amplitudes ocorridas nos instante 288, 313, 388, 413 e 462 da curva modelo.

Quadro 3: Valores das amplitudes das marés

Modelo		Real		Diferença
Amplitude (m)	Instante	Amplitude (m)	Instante	
-0.723323	13	-0.79	13	0.066677
0.690908	40	0.806	39	0.115092
-0.595831	63	-0.759	63	0.163169
0.874991	89	0.901	88	0.026009
-0.817923	115	-0.909	113	0.091077
0.767839	139	0.954	139	0.186161
-0.813266	164	-0.93	163	0.116734
1.05434	189	1.003	188	0.05134
-1.04303	214	-1.055	213	0.01197
1.00147	239	1.134	238	0.13253
-1.06904	264	-1.129	263	0.05996
1.25012	288	1.132	288	0.11812
-1.2724	313	-1.2	312	0.0724
1.25749	338	1.324	338	0.06651
-1.3198	363	-1.323	363	0.0032
1.43806	388	1.262	388	0.17606
-1.49782	413	-1.328	412	0.16982
1.48087	437	1.492	437	0.01113
-1.53291	462	-1.484	462	0.04891

Dos 19 valores de amplitude presentes no quadro 3, apenas 8 desses valores apresentam diferenças acima de 0.1 sendo que a diferença máxima e mínima se encontram no instante 139 e 363 respectivamente.

Segundo descrito pelo Instituto Nacional da Água (INAG, 2012) existem dois vórtices induzidos pelo jato de saída um ciclônico a sul e outro anticiclônico a norte e a velocidade máxima ocorre junto do Cabedelo na parte mais profunda do canal, o modelo criado também apresenta essas três características como se demonstra nas figuras 3.7 e 3.8. O gráfico foi obtido segundo um perfil longitudinal do modelo aquando da velocidade máxima ocorrida para todo o tempo de simulação na camada superficial.

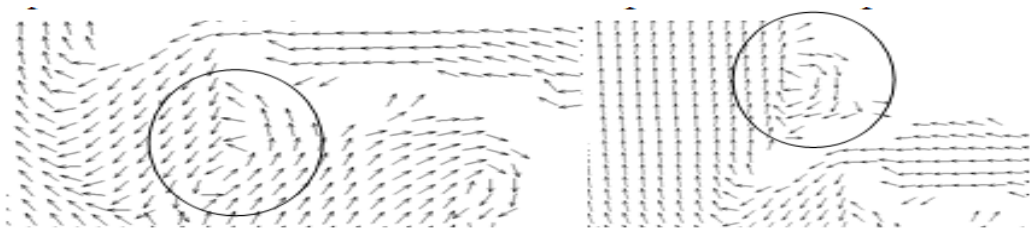


Figura 3.7 Representação do vórtice ciclônico a sul (esquerda) e anticiclônico (direita)

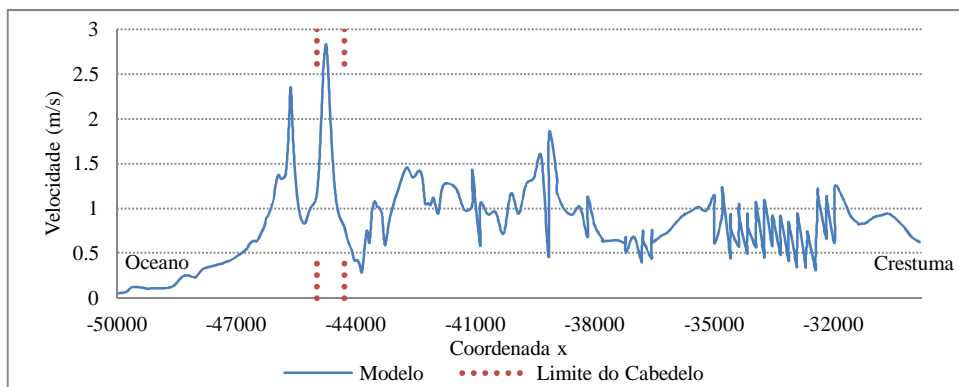


Figura 3.8 Perfil longitudinal de velocidade para a camada superficial

CAPÍTULO 4

CENÁRIOS DE MODELAÇÃO E RESULTADOS

4. Cenários de modelação e resultados

No presente capítulo serão apresentados os cenários modelados, tal como os resultados obtidos da simulação desses cenários.

4.1 Cenários modelados

Os cenários modelados (quadro 4) resultaram das combinações dos caudais e das marés para além do acréscimo de rutura dos molhes. A variação de caudal imposta em alguns dos cenários (por exemplo cenário 2) é linear e tem como caudal inicial o valor de 200 m³/s e caudal final o valor de 800 m³/s, nos cenários em que só é apresentado um valor de caudal, significa que o caudal inicial é o mesmo que o caudal final.

Quadro 4: Cenários modelados

Problema em análise	Cenário	Maré	Caudal (m ³ /s)	Temperatura (°C) Oceano	Temperatura (°C) Rio	Salinidade (ppt) Oceano	Salinidade (ppt) Rio	Acidentes
1 - Calibração validação	1	Medida	Medido	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada
2 - Análise hidrodinâmica	2	Viva	200 a 800	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada
	3	Viva	10000	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada
	4	Viva	100	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada
	5	Morta	100	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada
	6	Morta	10000	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada
	7	Morta	200 a 800	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada
3 - Análise das condições de estratificação	8	Viva	200 a 800	18	18	35	0	Não considerada
	9	Viva	10000	18	18	35	0	Não considerada
	10	Viva	100	18	18	35	0	Não considerada

Problema em análise	Cenário	Maré	Caudal (m ³ /s)	Temperatura (°C) Oceano	Temperatura (°C) Rio	Salinidade (ppt) Oceano	Salinidade (ppt) Rio	Acidentes
3 - Análise das condições de estratificação	11	Morta	100	18	18	35	0	Não considerada
	12	Morta	10000	18	18	35	0	Não considerada
	13	Morta	200 a 800	18	18	35	0	Não considerada
6 - Análise de situação de rutura das estruturas de defesa da embocadura	14	Viva	200 a 800	18	18	35	0	Molhe norte destruído
	15	Viva	10000	18	18	35	0	
	16	Viva	100	18	18	35	0	
	17	Morta	100	18	18	35	0	
	18	Morta	10000	18	18	35	0	
	19	Morta	200 a 800	18	18	35	0	Molhe sul destruído
	20	Viva	200 a 800	18	18	35	0	
	21	Viva	10000	18	18	35	0	
	22	Viva	100	18	18	35	0	
	23	Morta	100	18	18	35	0	
	24	Morta	10000	18	18	35	0	Ambos os molhes destruídos
	25	Morta	200 a 800	18	18	35	0	
	26	Viva	200 a 800	18	18	35	0	
	27	Viva	10000	18	18	35	0	
28	Viva	100	18	18	35	0		
29	Morta	100	18	18	35	0		
30	Morta	10000	18	18	35	0		
31	Morta	200 a 800	18	18	35	0		

4.2 Análise hidrodinâmica

4.2.1 Maré

Nos gráficos seguintes (figuras 4.1 a 4.3) apresentam-se os resultados da elevação da

superfície livre ao longo do tempo de simulação para cada um dos cenários simulados para o estudo da hidrodinâmica, no ponto identificado na figura 3.5.

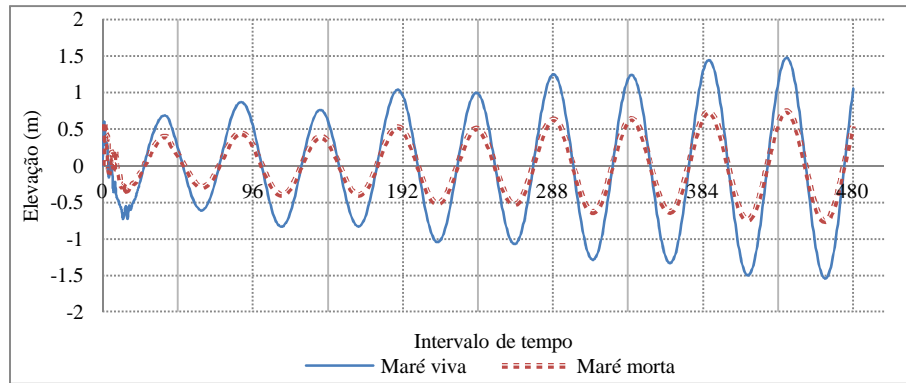


Figura 4.1: Gráfico com a elevação da superfície ao longo do tempo para o caudal de 100 m³/s.

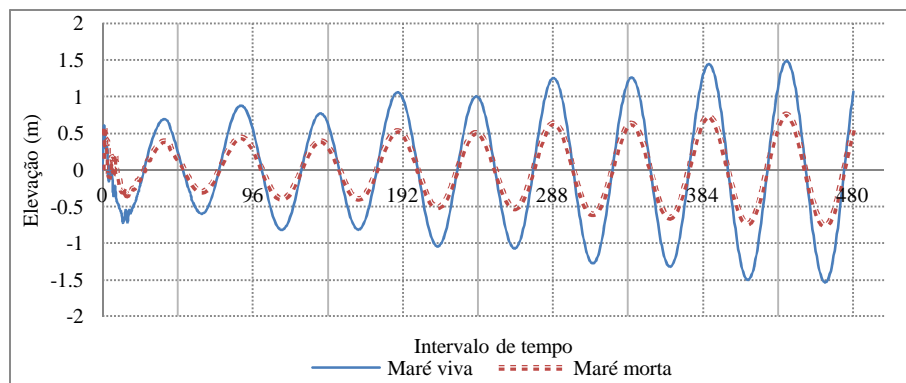


Figura 4.2: Gráfico com a elevação da superfície ao longo do tempo para o caudal de 200 m³/s a 800 m³/s.

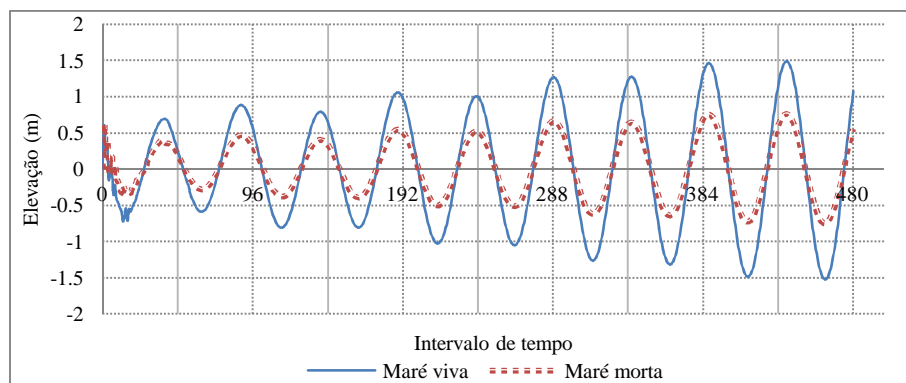


Figura 4.3: Gráfico com a elevação da superfície ao longo do tempo para o caudal de 10000 m³/s.

No início da simulação (Dia 0) a curva apresenta alguma irregularidade que se deve à instabilidade resultante da transição entre as condições iniciais (consideradas de repouso) e a situação dinâmica. No entanto, com o decorrer do tempo de simulação essas irregularidades vão desaparecendo obtendo-se uma curva regular (num intervalo de tempo inferior a 6 horas). Ao analisarmos cada um dos gráficos o primeiro aspeto que é de realçar é a diferença de amplitudes entre os dois tipos de marés. De facto, a amplitude da maré morta é sensivelmente metade da amplitude da maré viva. Como se comprova no quadro 5.

Quadro 5: Valores de amplitude para os diferentes cenários.

Maré viva				Maré morta			
Instante	Amplitude (m)			Instante	Amplitude (m)		
	Q100	Q800	Q10000		Q100	Q800	Q10000
189	1.04108	1.05434	1.05656	189	0.52746	0.534919	0.542923
214	-1.04199	-1.04303	-1.02715	214	-0.516593	-0.510268	-0.501671
239	1.00153	1.00147	1.0032	239	0.506609	0.50963	0.51872
263	-1.0665	-1.0699	-1.05132	263	-0.526558	-0.522339	-0.514371
288	1.25093	1.2501	1.26317	288	0.630696	0.638857	0.659681
313	-1.28108	-1.27228	-1.26278	314	-0.632941	-0.604187	-0.619068
338	1.24431	1.25762	1.27094	338	0.637577	0.63334	0.642217
363	-1.32663	-1.31948	-1.31754	363	-0.631132	-0.648631	-0.638555
388	1.44558	1.43849	1.45671	388	0.733304	0.732263	0.750236
413	-1.49351	-1.49676	-1.48435	413	-0.739621	-0.728481	-0.726245
437	1.47886	1.48131	1.48374	437	0.744671	0.759612	0.757089
462	-1.538	-1.53252	-1.52365	462	-0.758361	-0.758209	-0.749147

No quadro 5 temos seis valores de preia-mar e outros tantos de baixa-mar para cada um dos cenários de maré, isto é no total temos doze valores de preia-mar e outros tantos de baixa-mar. Ora, desses doze valores de preia-mar (valores da amplitude com sinal positivo) apenas por uma vez o valor máximo não nos é dado pelo cenário de caudal de cheia (Q10000) essa exceção encontra-se no instante 437 correspondente à maré morta. No que diz respeito aos valores de baixa-mar (valores da amplitude com sinal negativo) máximos são-nos dados pelos cenários de caudal de Verão (Q100) nos instantes 313, 363 e no 462 nos restantes o valor máximo é-nos dado pelo cenário com variação de caudal (Q800) isto nos cenários correspondente à maré viva, por sua vez nos cenários de maré morta com a exceção do instante 363 no qual o valor máximo se encontra na coluna Q800, em todos os outros instantes, o valor máximo encontra-se na coluna Q100.

Embora o ponto escolhido para a obtenção da elevação da superfície livre se encontrar afastado da zona de embocadura, e fora da influência direta do jato de água proveniente do rio Douro, que devido a presença do molhe norte será direcionado para sul como se irá demonstrar mais à frente. Verificam-se pequenas diferenças nos valores de amplitude quando estamos perante a mesma situação de maré mas com os diferentes caudais, com isto podemos acrescentar ao capítulo 3.2, mais uma condição que em sistemas estuarinos influencia a corrente oceânica, que é o caudal que circula no rio.

4.2.2 Velocidade

Na análise dos resultados da velocidade começamos com a identificação das zonas onde ocorrem as velocidades máximas, seguidamente mostram-se os valores das velocidades para essas zonas ao longo da profundidade e por fim apresenta-se a curva da velocidade ao longo do tempo na saída do estuário.

Na Figura 4.4 apresentam-se resultados das velocidades da corrente na camada superficial para o cenário 4 (quadro 4) no instante 452 (correspondente a vazante).

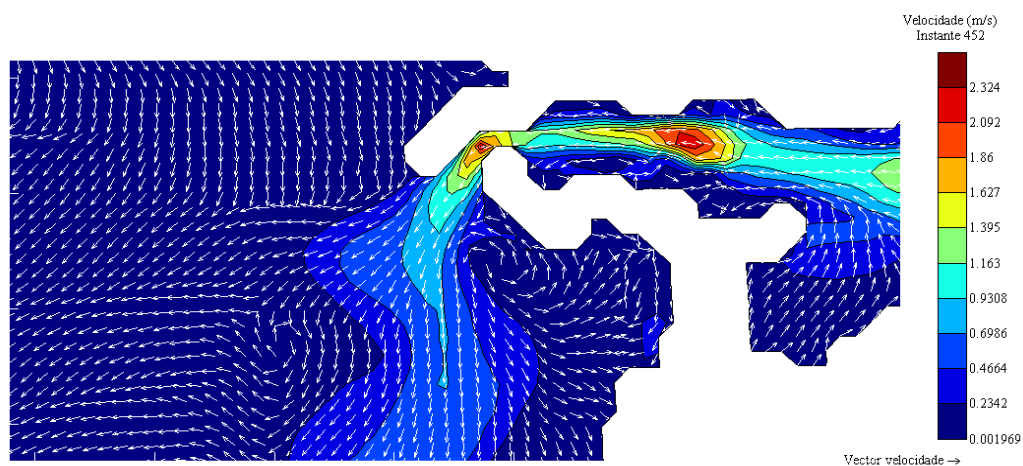


Figura 4.4: Velocidade na camada superficial no cenário 4.

São aparentes vórtices que resultam da circulação complexa resultante da irregularidade geométrica do estuário na zona da embocadura. Esses vórtices são de dois tipos: um com

direção dos ponteiros do relógio (a noroeste do jato principal) e outro com a direção contrária dos ponteiros do relógio (a nordeste do jato principal). No interior do vórtice resultam velocidades muito perto de zero e assim que nos afastamos do interior os valores da velocidade aumentam. Estes vórtices não se prolongam de uma forma uniforme por toda a coluna de água já que para cada camada os vetores velocidade apresentam direções diferentes.

A figura 4.5 mostra a direção do escoamento junto ao molhe sul na camada superficial (esquerda), intermédia (centro) e na penúltima camada (direita) para o cenário 4.

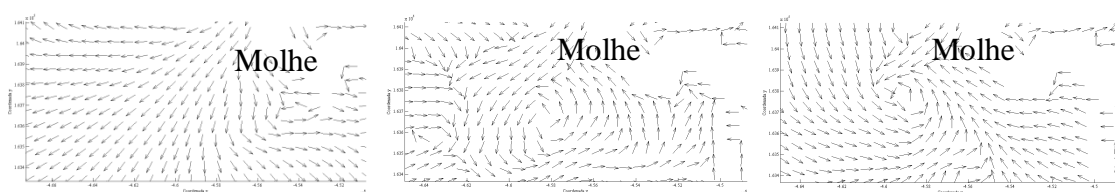


Figura 4.5: Representação dos vetores velocidade para a camada superficial (esquerda) , intermédia (centro) e penúltima (direita) para o cenário 4 (vetores velocidade representados com a mesma escala, independente da velocidade verificada e no mesmo instante).

Esta diferença de direções nas várias camadas é uma característica comum a todos os cenários, e portanto pode-se afirmar que o escoamento não é uniforme em profundidade, dado que na superfície não é visível o vórtice ao contrário do que acontece nas outras duas imagens.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 apresentam-se as curvas de velocidade ao longo do perfil longitudinal aquando da velocidade máxima ocorrida na simulação dos cenários criados para a análise hidrodinâmica. Nestas figuras também constam três pontos identificados por EE, PA e PI que correspondem à entrada do estuário, à ponte da Arrábida e à ponte do Infante, respetivamente.

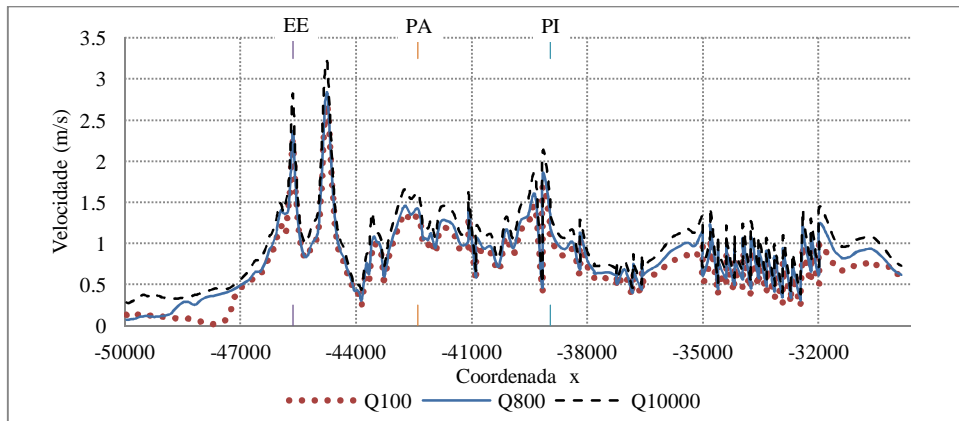


Figura 4.6: Representação gráfica da velocidade ao longo do perfil longitudinal na camada superficial para o cenário 4 (Q100), 3 (Q10000) e 2 (Q800).

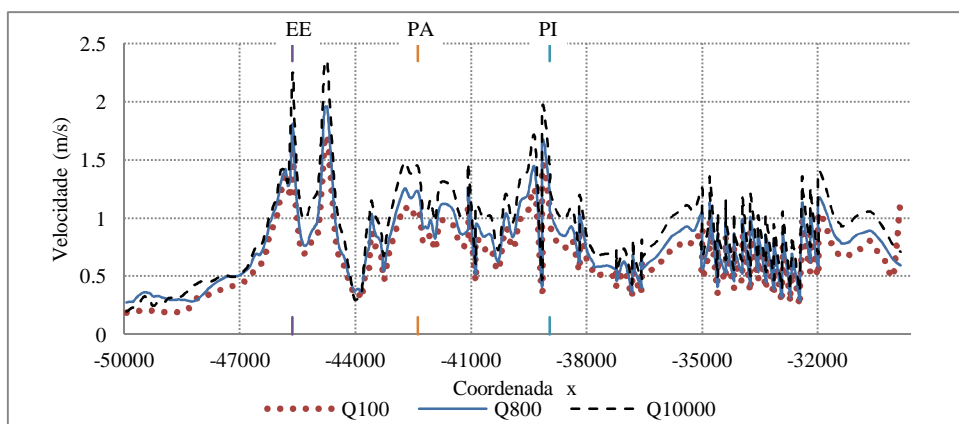


Figura 4.7: Representação gráfica da velocidade ao longo do perfil longitudinal na camada superficial para o cenário 5 (Q100), 6 (Q10000) e 7 (Q800).

Nos gráficos, acima representados podemos identificar três zonas onde a velocidade atinge valores mais elevados. Essas zonas correspondem à entrada do estuário (primeiro pico a contar da esquerda), o segundo pico de velocidade ocorre na zona mais profunda do estuário que se situa perto da capela de São Miguel-o-Anjo (perto do Cabedelo) e o terceiro pico encontra-se junto á ponte do Infante. Além disso podemos afirmar que caudais elevados conduzem a escoamentos mais rápidos visto que a curva de velocidade do caudal de 10000 m³/s (Q10000) encontra-se acima das curvas do caudal 800 m³/s (Q800) e da 100 m³/s (Q100) e a curva Q100 encontra-se abaixo das outras duas, no entanto existem algumas exceções que contrariam o que anteriormente foi escrito como por exemplo no gráfico da maré viva na parte oceânica do modelo (esquerda do gráfico) a curva Q100 apresenta valores superiores à curva Q800. No quadro 6 identificam-se essas exceções.

Quadro 6: Número de localizações em que as curvas de caudais inferiores apresentam valores de velocidade maiores.

	Q10000-Q800	Q10000-Q100	Q800-Q100	Total de localizações
Maré viva	0	0	17	300
Maré morta	26	6	5	

As 17 localizações em que a curva Q800 é superior à curva Q100 encontram-se no oceano. Quanto aos 26 pontos em que a curva Q10000 é inferior à curva Q800, vinte e um desses pontos estão no oceano, enquanto que os outros cinco se encontram na parte interior do estuário perto da margem direita, como se mostra na figura 4.8.

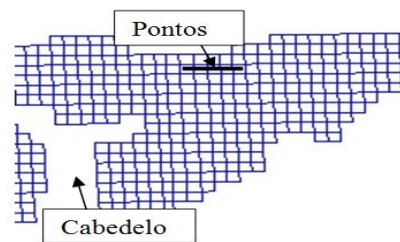


Figura 4.8: Planta onde se identifica os pontos no interior do estuário onde a curva Q10000 é menor que a curva Q800.

As figuras 4.6 e 4.7 dão-nos uma perceção das flutuações da velocidade no estuário durante o instante em que se atinge o maior valor da velocidade na camada superficial, e como se pode ver as maiores flutuações de velocidade ocorrem na parte interior do estuário (parte fluvial), no entanto apesar das flutuações da velocidade o regime de escoamento, segundo o número de Froude é fluvial para todo o tempo de simulação. Uma vez que o número de Froude (obtido através da expressão $Fr = U/(gh)^{0.5}$) é menor que 1.

Nas Figuras 4.9 a 4.11 apresenta-se a variação da velocidade com a profundidade aquando a ocorrência da velocidade máxima na superfície em cada um dos pontos onde ocorrem os picos de velocidade identificados nos gráficos das figuras 4.6 e 4.7. Deve-se ter em atenção que no gráfico estão representadas as camadas, as quais foram atribuídas a mesma percentagem da altura real (10% da altura real para cada camada), como foi referido anteriormente. Obviamente que esta altura real é diferente em todas as curvas representadas.

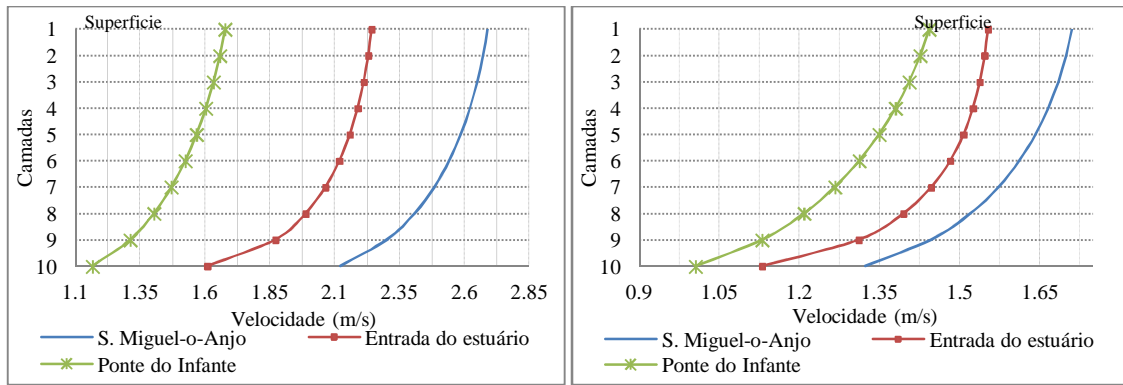


Figura 4.9: Perfil vertical de velocidade para o caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ em maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

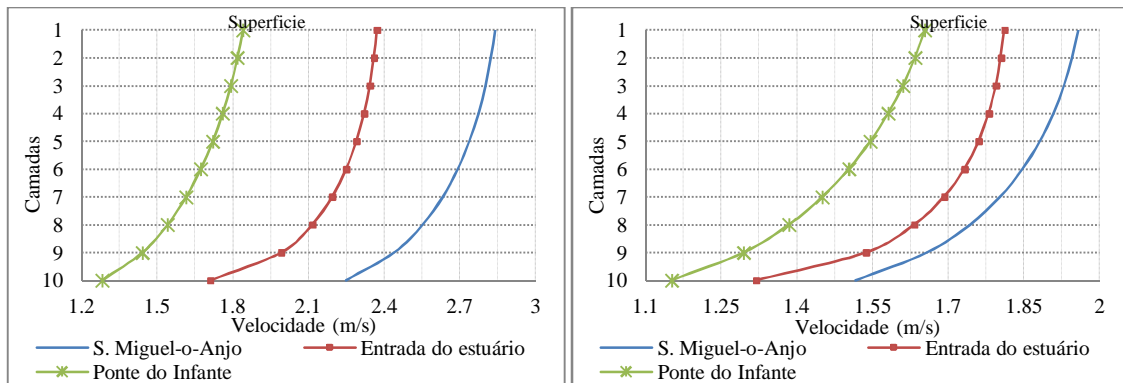


Figura 4.10: Perfil vertical de velocidade para o caudal de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ a $800 \text{ m}^3/\text{s}$ em maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

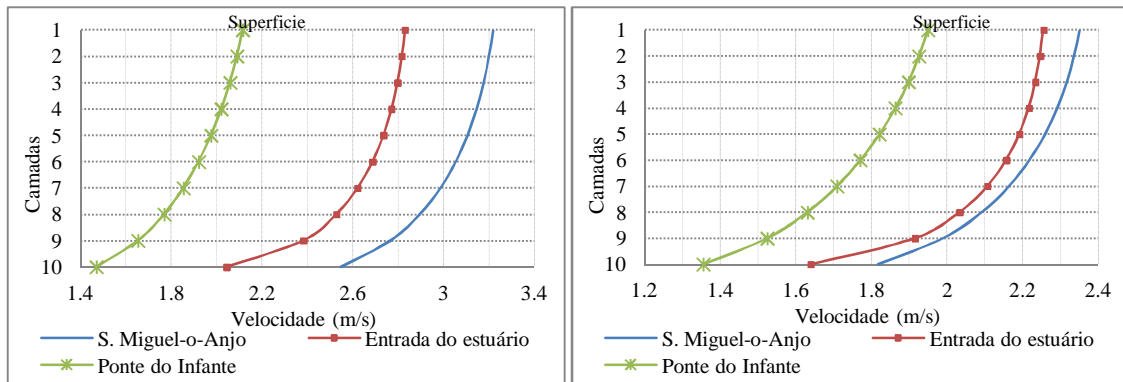


Figura 4.11: Perfil vertical de velocidade para o caudal de $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ em maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

Todas as curvas apresentam valores superiores para a velocidade à superfície, como seria de esperar já que não é considerada a atuação do vento, diminuindo com a profundidade, de uma forma menos acentuada até à quinta camada acentuando-se depois desta. Em cada um dos gráficos a curva correspondente à saída do estuário é a que apresenta uma curvatura superior na passagem da nona camada para a décima, isto pode ser explicado pela ação da maré que se

desloca com direção contrária ao do escoamento fluvial e como veremos mais à frente esta vai-se introduzindo no estuário pela parte mais profunda.

O conjunto de gráficos apresentados de seguida (Figuras 4.12 a 4.14) apresentam os valores da velocidade na saída do estuário ao longo de todo o tempo de simulação para os diferentes caudais combinados com os dois tipos de maré para a camada da superfície.

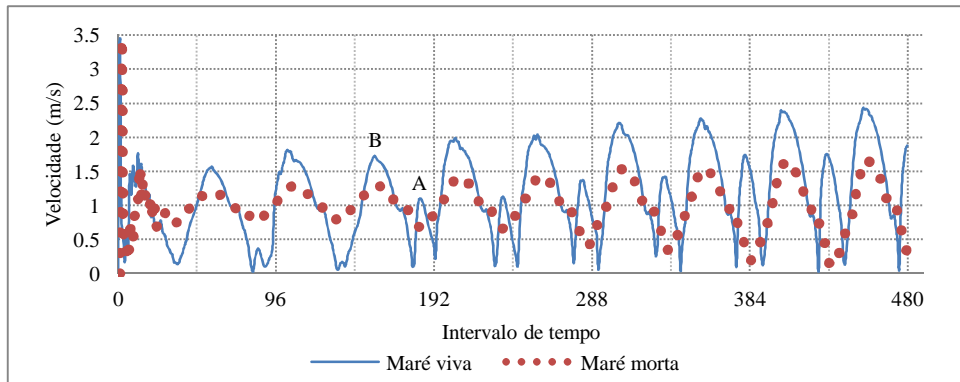


Figura 4.12: Velocidade para o caudal de 100 m³/s na camada superficial para a maré morta e maré viva na entrada do estuário.

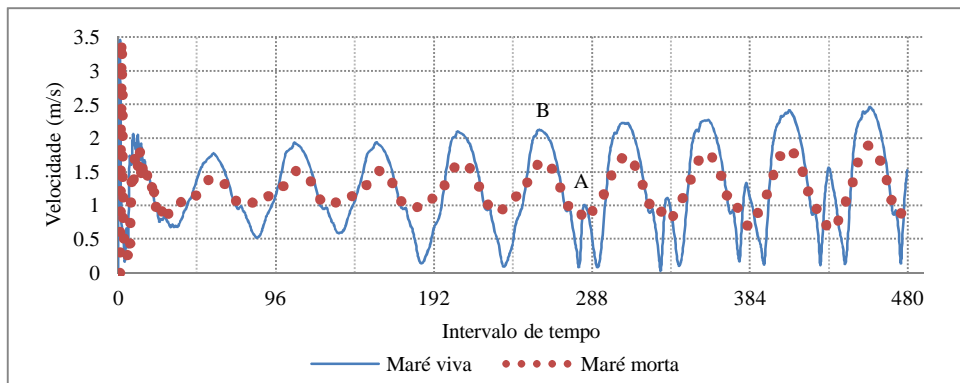


Figura 4.13: Velocidade para o caudal de 200 a 800 m³/s na camada superficial para a maré morta e maré viva na entrada do estuário.

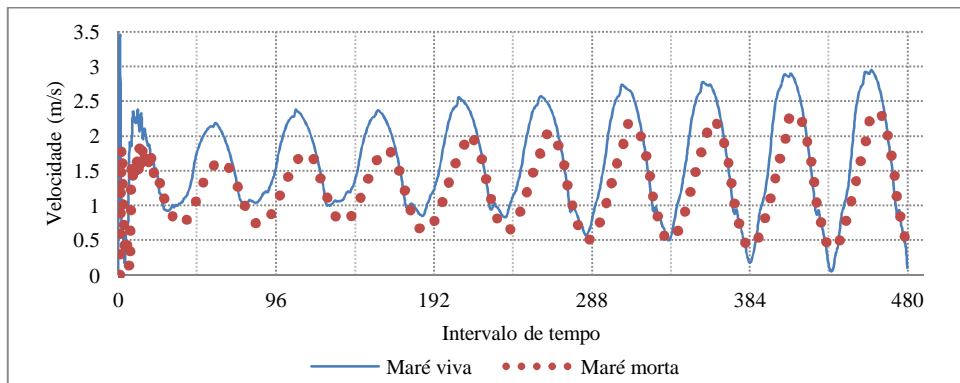


Figura 4.14: Velocidade para o caudal de 10000 m³/s na camada superficial para a maré morta e maré viva na entrada do estuário.

Nestes gráficos também se observa que com o aumento do caudal a velocidade aumenta. Se olharmos para os valores obtidos apartir do dia 2 de simulação (intervalo de tempo 192) observamos que a curva maré viva da figura 4.12 e 4.13 apresentam valores perto de zero seguidos de um pequeno aumento voltando a zero e aumentando para um valor superior. Isto deve-se à mudança no sentido do escoamento, ou seja quando temos água a entrar no estuário temos um pico de velocidade como o assinalado pela letra A, quando a água volta a sair do estuário estamos perante um pico de velocidade como o assinalado pela letra B, de salientar que estes saltos acontecem alternadamente, e identificam-se através da visualização dos vetores (direção e sentido) da velocidade, sendo esta a razão (possibilidade de visualização dos vetores) de não existirem valores negativos para a velocidade. A curva Q10000 apesar de apresentar alguns valores perto de zero, nesta simulação não ocorre nenhuma mudança no sentido de escoamento, por outras palavras a água mantém-se sempre a sair do estuário.

A curva maré morta não apresenta mudanças no sentido do escoamento em nenhuma das figuras anteriores (figura 4.12 a 4.14), contudo isso não significa que nas camadas inferiores não haja mudança no sentido de escoamento que como podemos verificar na figura 4.15 essa mudança de escoamento ocorre primeiro nas camadas inferiores, propagando-se posteriormente para as camadas superiores.

Já foi referido que a velocidade de escoamento está diretamente relacionada com o caudal que circula no rio, no entanto os gráficos anteriores (figura 4.12 a 4.14) mostram que o estado da maré também é um fator a ter em conta quando analisamos a velocidade de sistemas estuarinos, uma vez que as velocidades máximas são inferiores para o estado da maré morta.

O conjunto de gráficos seguinte (figura 4.15) revela-nos como a mudança de sentido do escoamento é feita ao longo da profundidade aquando da mudança do sentido do escoamento, sendo que o gráfico da esquerda mostra o perfil vertical de velocidade quando esta inverte o sentido do escoamento de entrada para saída do estuário, enquanto o gráfico da direita mostra a situação inversa.

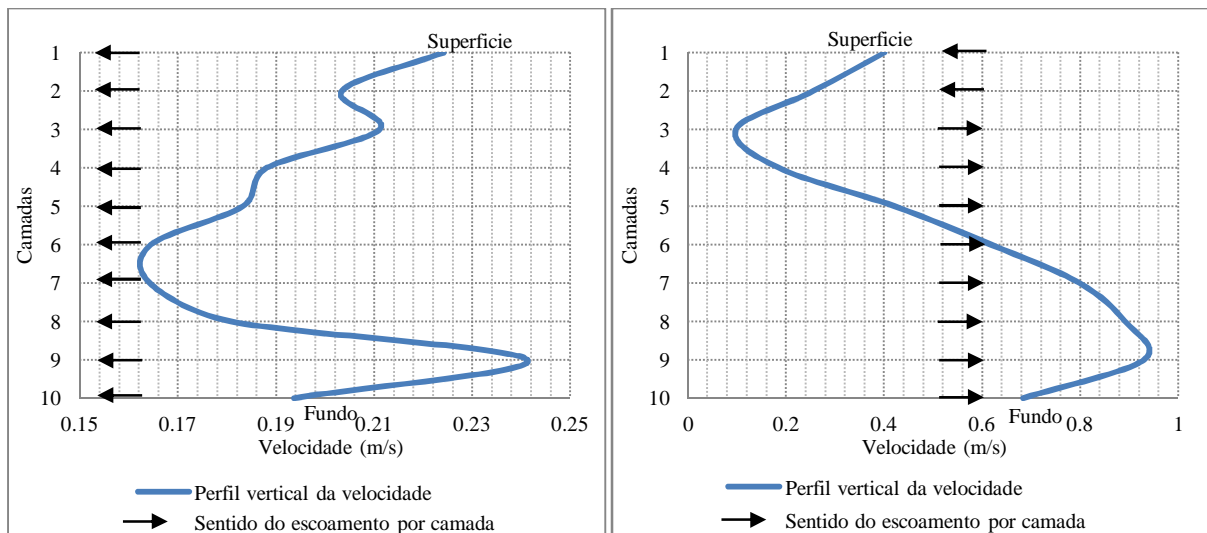


Figura 4.15: Perfil vertical da velocidade aquando da inversão de escoamento de entrada para saída (esquerda) do estuário e de saída para entrada no estuário (direita).

No gráfico da direita temos uma curva com variações acentuadas o que nos indica a existência de importantes variações ao longo da profundidade. Esta situação dura apenas um intervalo de tempo (15 minutos). No intervalo de tempo que antecede e no que o precede a curva de velocidade apresenta uma forma semelhante às curvas apresentadas na figura 4.9, este facto indica-nos que a mudança de direção da velocidade ocorre durante o intervalo de tempo representado no gráfico e que toda a coluna vertical muda de direção quase em simultâneo. Por sua vez no gráfico da esquerda identificamos um troço reto que separa duas curvas com concavidades opostas e conseqüentemente com escoamentos opostos, nas camadas mais à superfície temos água a sair do estuário enquanto que nas camadas mais profundas temos água a entrar no estuário. A supressão do troço reto acontece duma forma progressiva até que seja atingido o equilíbrio entre as duas massas de água, que tem velocidades com sentidos opostos.

4.3 Análise das condições de estratificação

Na figura 4.16 representa-se a distribuição salina na camada da superfície no instante em que a pluma de água doce tem maior penetração sobre o oceano.

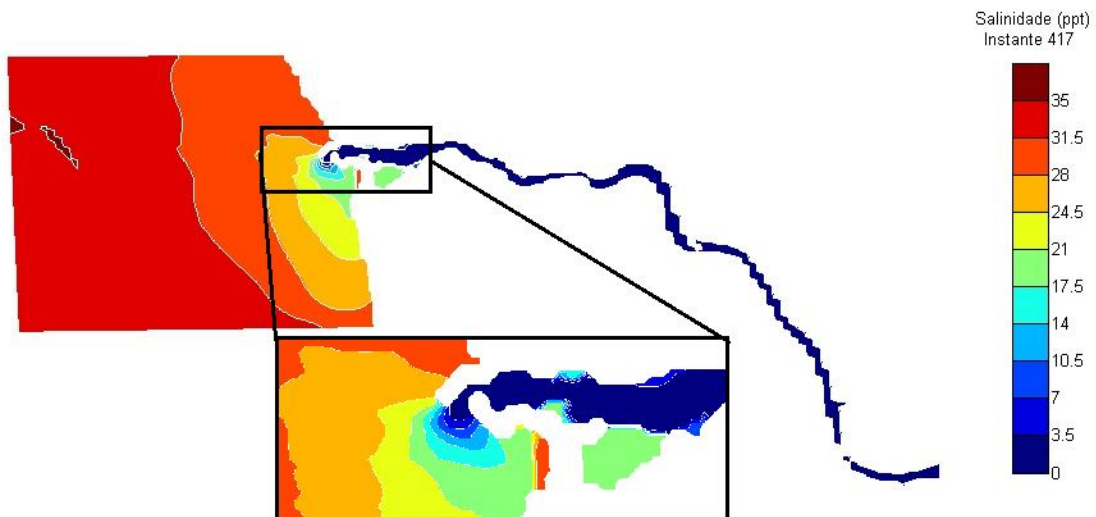


Figura 4.16: Salinidade na camada superficial para todo o domínio do modelo para o cenário 8 (caudal de 200 a 800 m³/s e maré viva).

Como seria de esperar a zona que apresenta maior valor de salinidade é a zona mais próxima do alto mar, diminuindo de valor à medida que nos afastamos desta zona na direção da embocadura. Neste cenário a água está a sair do estuário com uma velocidade na embocadura de 1.84 m/s e um caudal de 800 m³/s em maré viva. Esta figura também nos revela que a água salobra na faixa central do rio (zona mais profunda) é “varrida” pelo caudal fluvial enquanto que nas zonas próximas das margens (zonas menos profundas) a água salobra é diluída pela água doce.

Nos outros cenários as condições de estratificação na zona perto da embocadura são em tudo semelhantes, existindo diferenças mais acentuadas à medida que nos afastamos desta, ou seja se as condições de maré forem iguais e o caudal for superior a concentração de salinidade vai ultrapassar a barreira dos 31.5 ppt num local mais distante da embocadura, no caso de termos um caudal inferior os valores da salinidade atingirão o 31.5 ppt mais perto da embocadura.

Os gráficos que se seguem correspondem ao perfil longitudinal de concentração na camada superficial (direita) e da penúltima camada (esquerda) para a maré morta (figura 4.17) e maré viva (figura 4.18) e permitem analisar o alcance da cunha salina.

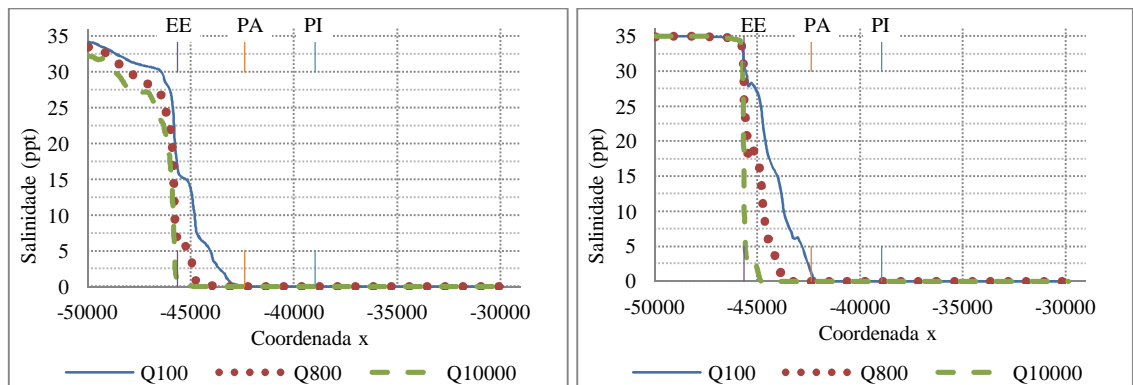


Figura 4.17: Intrusão salina para os caudais de 100, 200-800 e 10000 m³/s com maré morta à superfície (direita) e na penúltima camada (esquerda). EE-Entrada do estuário; PA – Ponte da Arrábida e PI – Ponte do Infante.

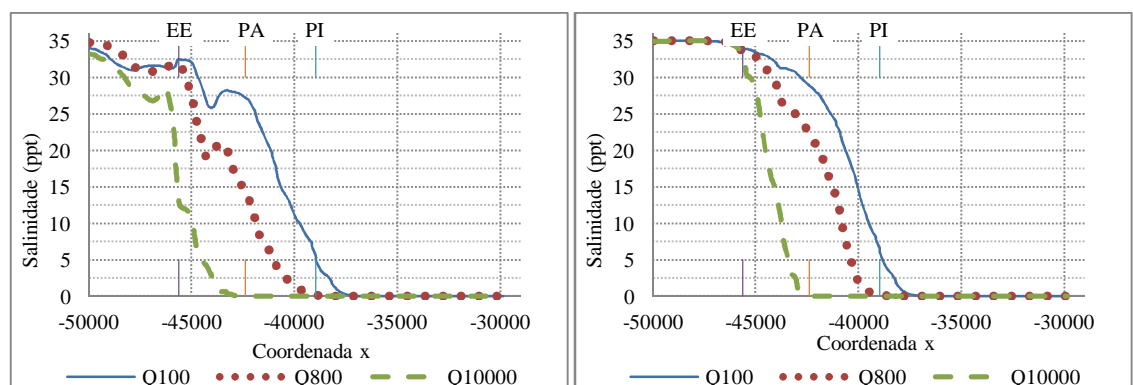


Figura 4.18: Intrusão salina para os caudais de 100, 200-800 e 10000 m³/s com maré viva à superfície (direita) e na penúltima camada (esquerda). EE-Entrada do estuário; PA – Ponte da Arrábida e PI – Ponte do Infante..

No primeiro conjunto de gráficos (figura 4.17) os valores da salinidade diminuem desde a fronteira oceânica, numa forma mais lenta no início mas assim que se aproxima da entrada do estuário (EE) sofre uma forte redução isto à superfície (gráfico da esquerda), enquanto que na penúltima camada (gráfico da direita) a concentração mantém-se com valores quase constantes para a parte oceânica do modelo. No entanto, à semelhança da camada mais à superfície assim que se atinge o estuário os valores da salinidade começam a diminuir numa forma rápida chegando à ponte da Arrábida (PA) com valores abaixo de 2 ppt e à ponte do Infante (PI) com o valor de zero, isto em ambos os gráficos.

No segundo conjunto (figura 4.18) temos um comportamento diferente na concentração da salinidade. Curiosamente na parte oceânica (parte à esquerda de EE) temos a curva de caudal de 100 m³/s (Q100) abaixo da curva de 200-800 m³/s (Q800), ou seja a curva Q100 apresenta valores de concentração inferiores à curva Q800, isto acontece porque no intervalo de tempo a

que a curva Q800 diz respeito, devido à irregularidade do fundo na saída do estuário e com o recuo da água salina combinadas com o facto de as velocidades associadas ao caudal de 100 m³/s serem inferiores ao de 800 m³/s faz com que a água salina consiga atingir as camadas mais à superfície dando origem a essa diferença de valores, como se mostra na figura seguinte.

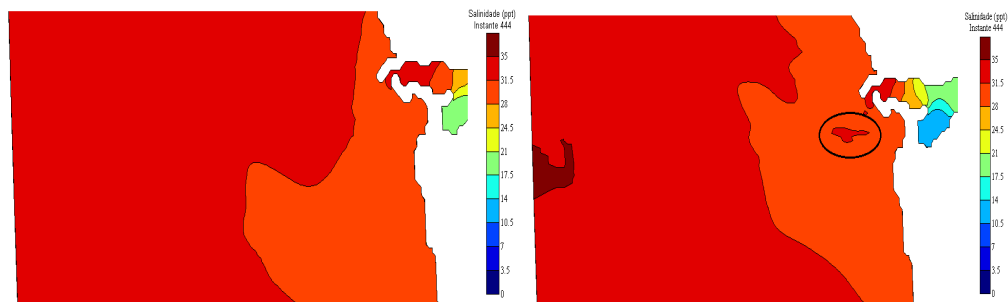


Figura 4.19: Salinidade na saída do estuário para o caudal de 100 m³/s (esquerda) e caudal de 200-800 m³/s (direita).

Por sua vez a penúltima camada com maré viva apresenta um comportamento semelhante à da maré morta, apenas diferindo na forma como diminui os valores da concentração salina no interior do estuário que ao contrário do gráfico da maré morta apenas a curva Q10000 apresenta valores próximos de zero na PA enquanto que a curva Q800 só se aproxima de zero perto da PI e por sua vez a curva Q100 alcança valores perto de zero depois da PI, isto em ambos os gráficos.

A figura 4.20 evidencia a razão pela qual a curva da salinidade Q100 e Q800 da camada superficial (figura 4.18) após entrar no estuário a decrescer volta a crescer, isto tudo antes da ponte da Arrábida. O instante da figura 4.20 não é o mesmo da figura 4.18.

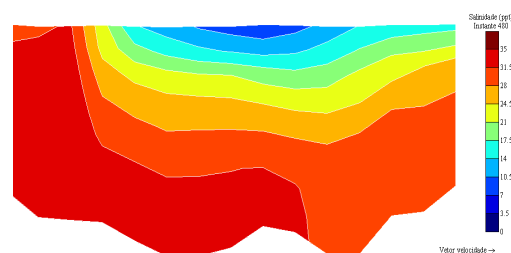


Figura 4.20: Salinidade entre a entrada do estuário(esquerda da imagem) e São Miguel-o-Anjo (direita da imagem) em perfil vertical (caudal de 200 a 800 m³/s e maré viva).

Ora como se pode constatar na figura 4.20 na superfície a concentração de salinidade não é uniforme, aliás nesta imagem estão presentes quase todas as gamas de cores correspondentes a um intervalo de valores de concentração salina (faltam a gama mínima e máxima). A presença desta variedade de gamas deve-se essencialmente à forma do fundo associado à complexidade da mistura de duas massas de água com características diferentes, desde logo a concentração salina, para além da diferença do vetor da velocidade (sentido, direção e valor)

Deste conjunto de gráficos (figura 4.17 e 4.18) deve-se reter a seguinte informação, que o caudal transportado pelo rio e o tipo de maré do oceano são fatores condicionantes da distância percorrida pela água salobra no interior do estuário. Caudais baixos associados ao mesmo tipo de maré (viva ou morta) permitem que a distância percorrida pela salinidade seja maior do que caudais elevados associados ao mesmo tipo de maré. Se compararmos os dois estados de maré verifica-se que a maré viva permite uma maior intrusão salina. Talvez fosse de esperar este comportamento já que os caudais elevados apresentam maiores velocidades e a maré morta tem uma maior inercia que a maré viva, contudo não deixa de ser interessante saber que a intrusão salina pode alcançar a ponte do Infante (PI) com valores na ordem dos 5 ppt na camada superficial (a PI fica a cerca de 7 Km da embocadura).

Os gráficos que a seguir se apresentam (figuras 4.21 a 4.23) mostram a forma como os valores da salinidade oscilam durante o tempo de simulação para cada cenário na entrada do estuário.

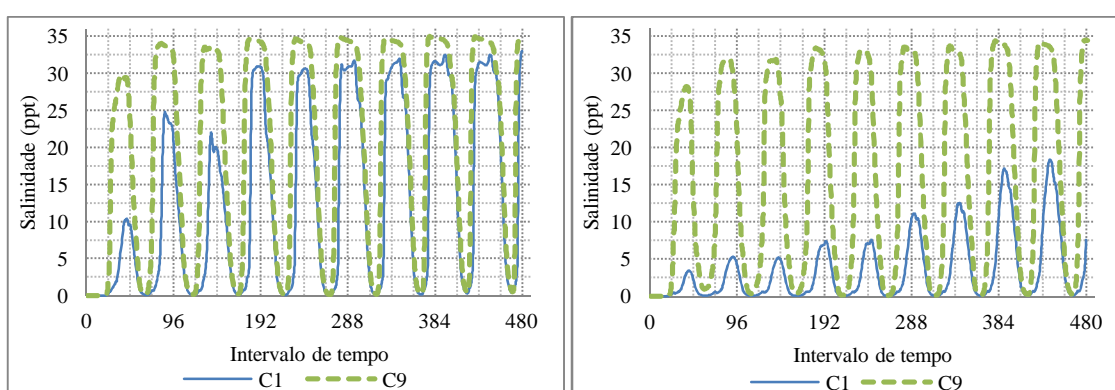


Figura 4.21: Salinidade na entrada do estuário com caudal de 100 m³/s e maré viva (esquerda), maré morta (direita).

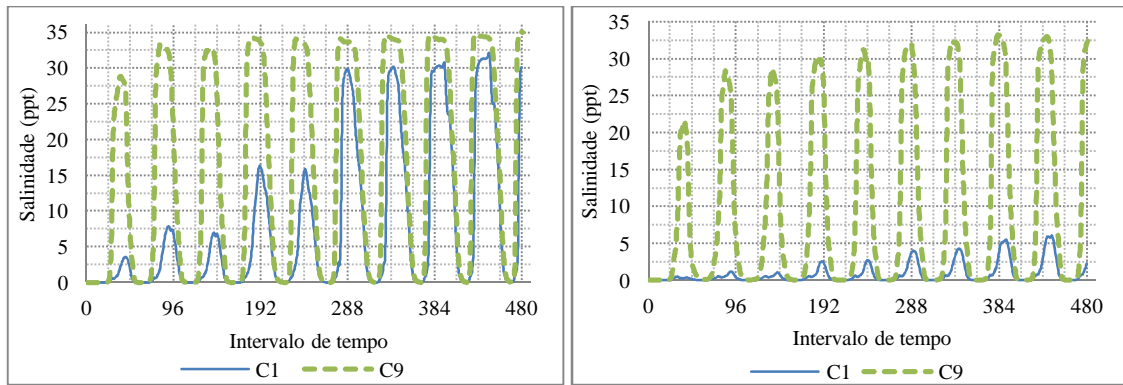


Figura 4.22: Salinidade na entrada do estuário com caudal de 200-800 m³/s e maré viva (esquerda), maré morta (direita).

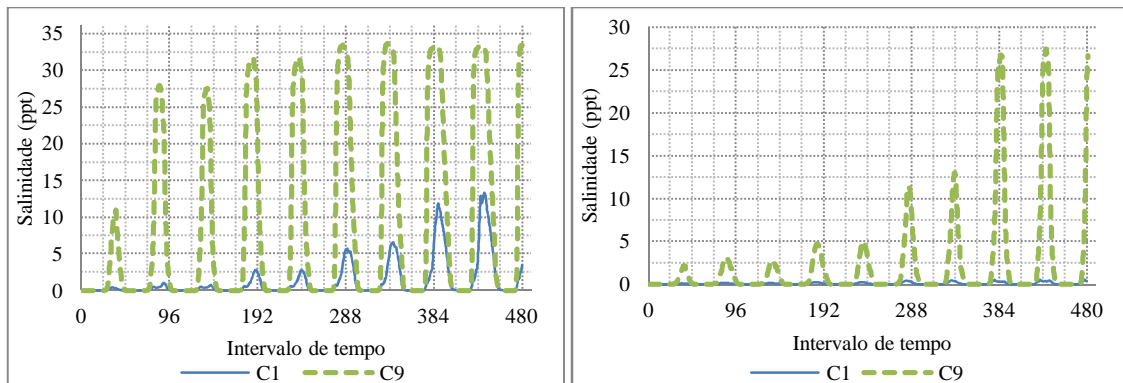


Figura 4.23: Salinidade na entrada do estuário com caudal de 10000 m³/s e maré viva (esquerda), maré morta (direita).

Algo comum a todos os cenários é o facto da penúltima camada (C9) obter os valores mais elevados para a concentração da salinidade quando comparados com a camada superficial (C1). Um outro aspeto comum a quase todos os cenários, a exceção é o gráfico da direita da figura 4.23, é o aumento da concentração da salinidade na camada superficial à medida que o tempo avança, por outras palavras com o avançar da simulação a salinidade na camada superficial vai atingindo valores de pico mais próximos dos valores de pico da penúltima camada.

Ao compararmos os gráficos com o mesmo caudal mas com situações de maré diferentes observamos que a curva C9 em ambos os casos apresenta valores da mesma ordem de grandeza a partir do intervalo de tempo 288 (dia 3), mais uma vez com exceção do caudal de cheia (10000 m³/s).

Os Quadros 7 e 8 dizem respeito aos valores máximos obtidos para a concentração salina e o respetivo instante para três pontos dispostos ao longo da vertical, um à superfície (C1), outro a meio (C5) e por último um junto ao fundo (C9) nas mesmas condições em que foram obtidos os gráficos anteriores.

Quadro 7: Valores máximos de salinidade para cada caudal em maré morta.

Caudal (m ³ /s)	Superfície		Intermédia		Fundo	
	Salinidade (ppt)	Instante	Salinidade (ppt)	Instante	Salinidade (ppt)	Instante
100	18.4219	440	29.6121	440	34.4693	479
800	6.07107	442	23.1276	437	33.1564	382
10000	0.535913	429	7.65006	480	27.4181	434

Quadro 8: Valores máximos de salinidade para cada caudal em maré viva.

Caudal (m ³ /s)	Superfície		Intermédia		Fundo	
	Salinidade (ppt)	Instante	Salinidade (ppt)	Instante	Salinidade (ppt)	Instante
100	33.0044	480	34.5431	428	34.9576	377
800	32.0906	444	34.4392	479	35.1621	477
10000	13.3059	439	28.2286	439	33.6582	333

Apenas em dois cenários é que temos o valor máximo no mesmo instante em dois pontos diferentes, esses cenários são o do caudal de 10000 m³/s com a maré morta e o caudal de 100 m³/s com a maré viva em que para ambos os casos temos um valor máximo na superfície e no ponto intermedio. Também se observa que os valores do quadro 8 e da linha Q100 e Q800 se encontram bastante próximos ao contrário do que acontece no quadro 7 que apresenta valores substancialmente mais afastados nas referidas linhas.

Seguidamente são apresentados um conjunto de gráficos (figuras 4.24 a 4.26) que mostram as curvas de salinidade ao longo da profundidade para o valor máximo de concentração salina obtido na camada mais profunda em três locais distintos EE (entrada do estuário), PI (ponte do Infante) e PA (ponte da Arrábida). Deve-se ter em conta que cada curva acontece em intervalos de tempo diferentes.

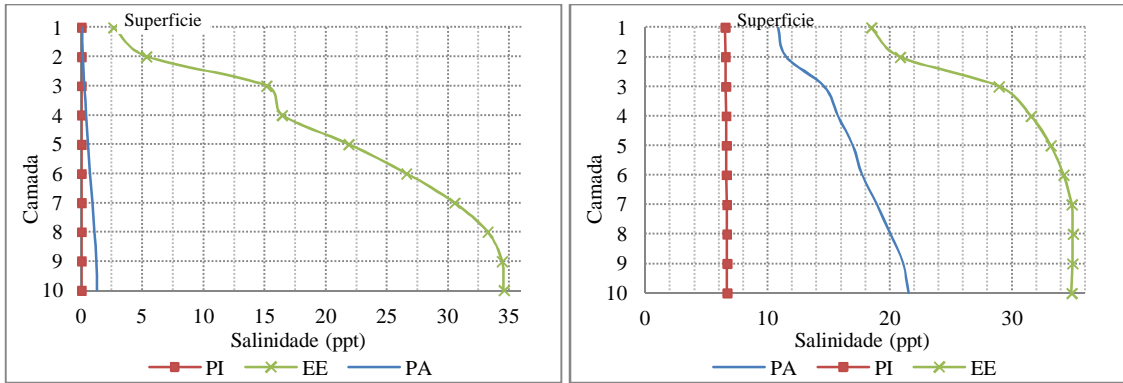


Figura 4.24 Perfil vertical da salinidade para o caudal de 100 m³/s com maré morta (esquerda) e maré viva (direita).

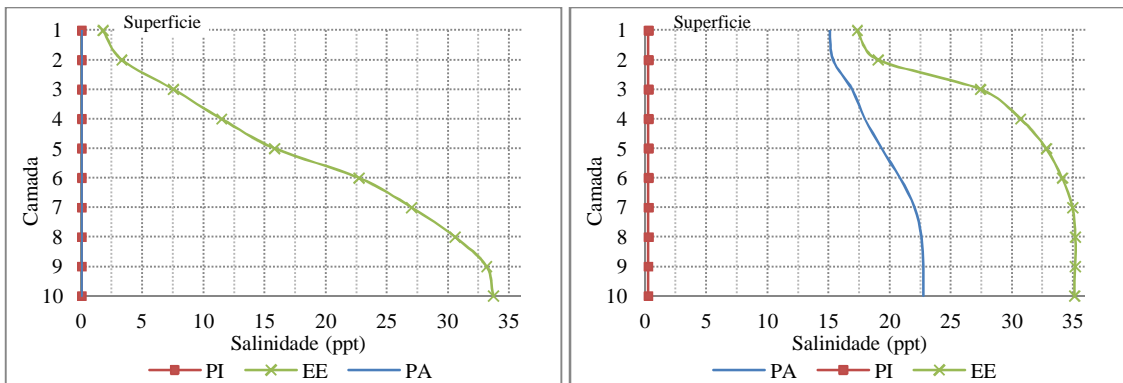


Figura 4.25 Perfil vertical da salinidade para o caudal de 200-800 m³/s com maré morta (esquerda) e maré viva (direita).

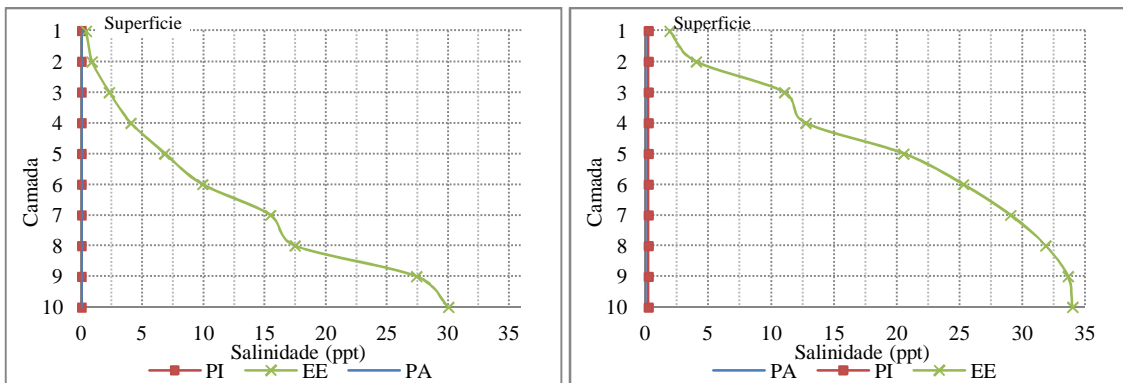


Figura 4.26 Perfil vertical da salinidade para o caudal de 10000 m³/s com maré morta (esquerda) e maré viva (direita).

Torna-se evidente neste conjunto de gráficos que o valor da salinidade aumenta com a profundidade independentemente das condições em que ocorrem o escoamento, essas condições apenas intervêm na direção da curva ou seja apenas definem o declive da curva já que a salinidade será sempre crescente com a profundidade.

De todos os cenários simulados apenas em um deles se obteve valores para a salinidade superiores a 2.5 ppt na ponte do Infante (PI), o cenário contemplado corresponde ao caudal de 100 m³/s com a maré viva em todos os outros cenários para este ponto os valores são nulos. No cenário referido esta curva apresenta-se quase perfeitamente vertical sendo a diferença entre o valor na superfície (6.51 ppt) e o valor em profundidade (6.66 ppt) apenas de 0.15 ppt. Esta pequena característica dá-nos a ideia de que a estratificação neste ponto é vertical.

A curva PA nos cenários de variação de caudal (200-800 m³/s) e na presença de maré viva e 100 m³/s na presença de ambas as marés apresenta valores diferentes de zero, sendo que em ambos os caudais na presença de maré viva a curva na parte inicial tenha um comportamento igual, isto é o valor da salinidade da primeira camada para a segunda não sofra grande alteração alcançando o equilíbrio (máximo intervalo de salinidade) para o caso do caudal de 200-800 m³/s na camada 7 aumentando a salinidade entre a camada 2 e a 7 numa forma quase constante. Por sua vez no caso do caudal de 100 m³/s a curva não atinge um equilíbrio, indo aumentando o valor de salinidade quase de forma constante a partir da camada 3. Entre esta camada e a camada 2 existe um aumento mais acentuado no valor da salinidade. No que diz respeito à curva PA do gráfico correspondente ao caudal de 100 m³/s e maré morta não há muito a dizer já que o valor na superfície é nulo e no fundo é inferior a 2 ppt.

Por último temos a curva EE que tem um comportamento semelhante para os caudais mais baixos na maré viva. Aliás, a diferença de valores entre eles é de cerca de 1 ppt, no entanto apesar disso o equilíbrio na mistura é atingido na camada 7 e na 6 para o caudal de 200-800 m³/s e de 100 m³/s respetivamente, o comportamento das curvas antes de atingir a camada de equilíbrio é igual, ou seja da primeira camada para a segunda surge um pequeno aumento tendo o maior aumento da segunda para a terceira camada. Nos outros cenários a principal diferença é a forma com que o valor da salinidade aumenta da terceira para a quarta camada e da sétima para a oitava camada que o faz de uma forma quase vertical, para além da diferença dos valores atingidos.

A figura 4.27 identifica as três situações de estratificação que se pode encontrar no interior do estuário. Para a obtenção das imagens da referida figura foram feitos pequenos cortes longitudinais na entrada do estuário, na ponte da Arrábida e na ponte do Infante, mostrando-se assim a salinidade ao longo da profundidade.

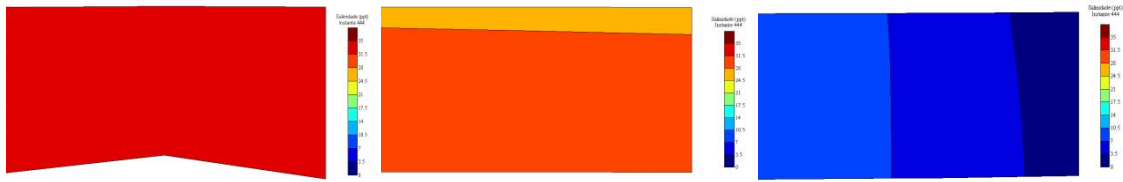


Figura 4.27: Salinidade na entrada do estuário (esquerda). na ponte da Arrábida (centro) e na ponte do Infante (direita) com caudal de 100 m³/s e maré viva (no mesmo instante).

Na entrada do estuário (imagem da esquerda da figura 4.27) temos toda a coluna de água pertencente a apenas um intervalo de valores, por sua vez temos que na ponte da Arrábida a coluna de água apresenta duas gamas de valores e a linha divisória entre estas duas gamas se encontra disposta na horizontal, enquanto que na ponte do Infante temos representados três intervalos de valores estando orientados na vertical.

O conjunto de figuras atrás representado (figura 4.24 a 4.27) permite-nos concluir que no estuário podemos ter três situações de estratificação: sem estratificação, quando temos o escoamento a sair do estuário; estratificação horizontal, presente nas zonas mais próximas da fonte salina (água oceânica); e estratificação vertical na zona mais próxima da água doce.

Na figura 4.28 evidencia-se o equilíbrio que foi referido nos parágrafos anteriores para o cenário com o caudal de 800 m³/s e maré viva. Os três últimos valores obtidos nas três camadas mais profundas atingiram o valor máximo de salinidade.

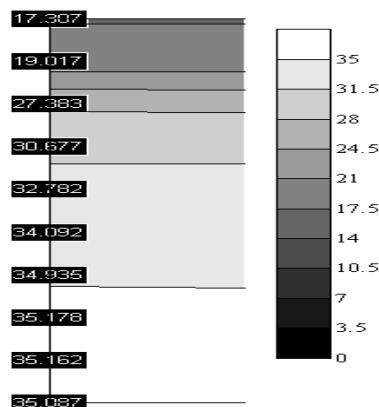


Figura 4.28 Perfil vertical da salinidade na entrada do estuário para o cenário 8.

Os parágrafos anteriores revelam, uma vez mais, o quão complexo é o sistema estuarino. O processo de mistura das duas águas inicia-se na camada junto ao fundo na entrada do estuário mas devido ao terreno acidentado e ao próprio escoamento a mistura começa a ascender para as camadas superiores (estratificação horizontal) mas à medida que esta ascensão acontece a água doce vai recuando e na interface desta com a água salobra existe a estratificação vertical.

4.4 Análises de situação de rutura das estruturas de defesa da embocadura

A criação dos cenários para esta análise passou por retirar os molhes por completo e pelo preenchimento do espaço vazio deixado na malha (batimetria) pelos molhes através da interpolação linear. Primeiramente retirou-se um molhe de cada vez, designando os cenários de sem molhe norte (SMN) e sem molhe sul (SMS) e posteriormente retirou-se ambos os molhes em simultâneo, designado de sem molhes (SM).

4.4.1 Elevação da superfície livre

A figura 4.29 apresenta a localização dos pontos a que os gráficos que se seguem se referem. Pontos esses que estão a traço mais negro, e nas extremidades tem a sigla MD (margem direita) e ME (margem esquerda) que estão a uma distancia de 1029 metros, pela figura podemos ver que os pontos escolhidos estão perto do Cabedelo, optou-se por esta zona pelo fato de apresentar uma batimetria bastante desnivelada, isto é na zona mais próxima da margem esquerda (ME) temos a zona com profundidade menor na ordem dos 0.15 metros e no extremo oposto temos um valor para a profundidade na ordem dos 2.5 m passando por um valor máximo no ponto de coordenada N 138 de 5.3 m. Devido a estas características batimétricas esta zona é adequada para estudarmos as zonas de cobre-descobre.

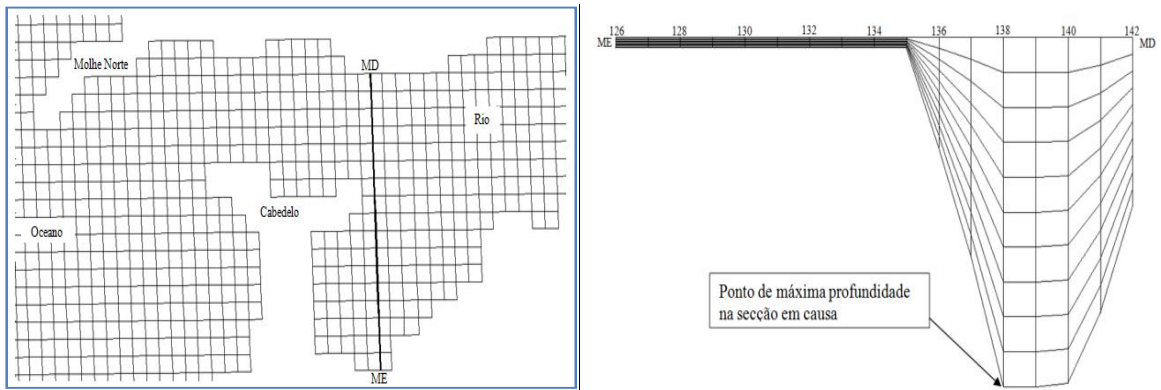


Figura 4.29: Identificação da secção ME-MD em planta (esquerda) e vista em perfil vertical (direita).

Os gráficos seguintes (figuras 4.30 a 4.32) mostram a elevação máxima da superfície livre que ocorre nos pontos da malha identificados na figura 4.29, para cada um dos caudais (Q100, Q800, Q10000) com os dois tipos de maré e na situação de rutura do molhe norte (SMN), molhe sul (SMS) e de ambos os molhes em simultâneo (SM).

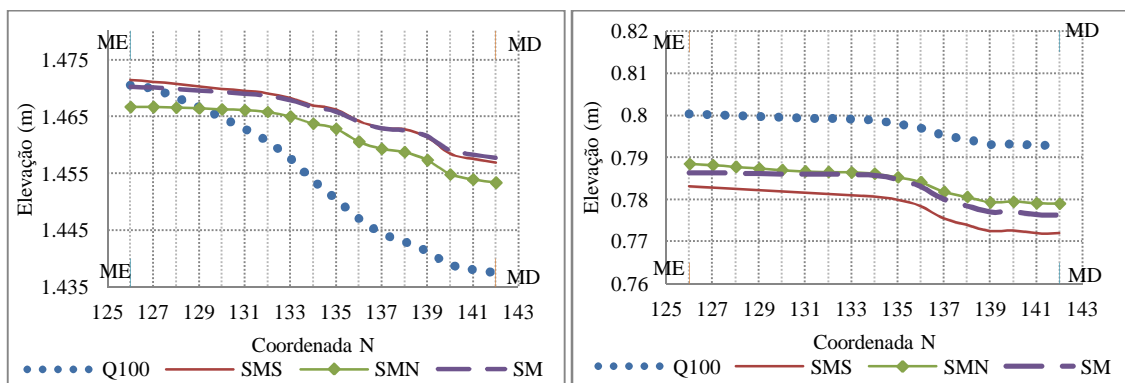


Figura 4.30: Elevação máxima da água para o cenário de caudal de 100 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

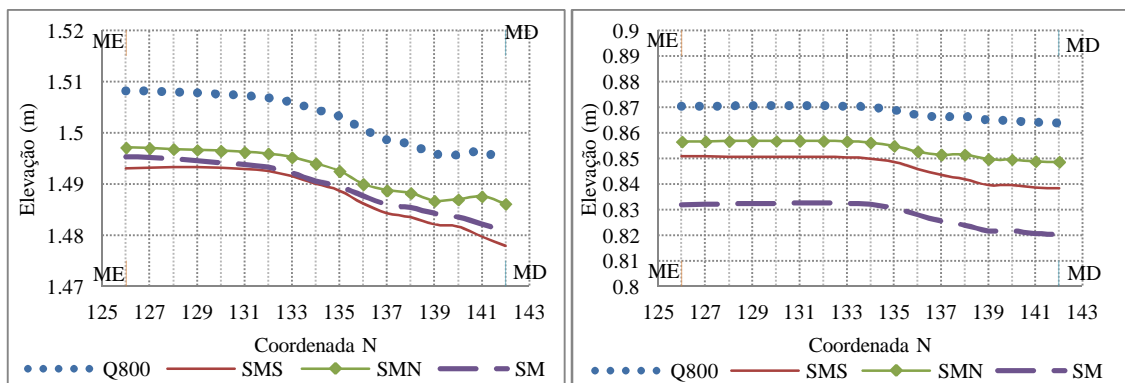


Figura 4.31: Elevação máxima da água para o cenário de caudal de 800 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

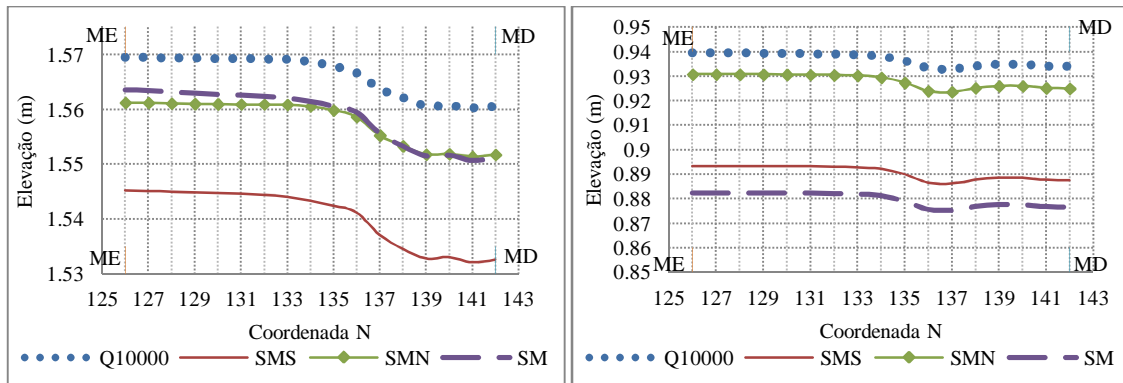


Figura 4.32: Elevação máxima da água para o cenário de caudal de 10000 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

Em todas as situações apresentadas nos gráficos anteriores temos que a elevação máxima mais baixa situa-se na parte mais profunda da secção em análise, no entanto a diferença de elevação máxima para os valores da mesma curva é de apenas 3.3 cm e ocorre na curva Q100 (caudal de 100 m³/s e maré viva), como é obvio este valor de 3.3 cm é-nos fornecido pelo programa e serve apenas para constatar que a diferença da elevação da superfície livre, entre as margens não é significativa, isto é a elevação máxima no interior do estuário no local escolhido é praticamente igual independentemente da batimetria. Ora, este valor centesimal deve ser encarado apenas como um valor indicativo e não como uma representação da realidade, já que não é expectável que uma curva de elevação da superfície, com esta precisão de casas decimais, apresente uma forma tão retilínea, isto devido à ondulação existente na superfície da água, seja ela causada pelo vento, e/ou pelo escoamento (mudanças no sentido e/ou na direção do escoamento), aliás este tipo de elevação (representada nos gráficos) só poderia ser uma cópia fiel da realidade se o rio Douro estivesse congelado.

Com exceção desse mesmo gráfico (figura 4.30 e gráfico da direita) todos os outros gráficos apresentam a curva correspondente ao cenário de não rutura dos molhes (Q100, Q800 e Q10000) com elevação superior às outras curvas. Os cenários de maré viva para os diferentes caudais e as curvas dos respetivos gráficos estão mais próximas do que os gráficos correspondentes à maré morta. Por sua vez os cenários de maré morta mantem as curvas quase paralelas com exceção do cenário de caudal de 100 m³/s em que as curvas SM e SMN se aproximam.

Os próximos gráficos (figuras 4.33 a 4.35) representam os valores mínimos para a elevação nos cenários anteriormente descritos.

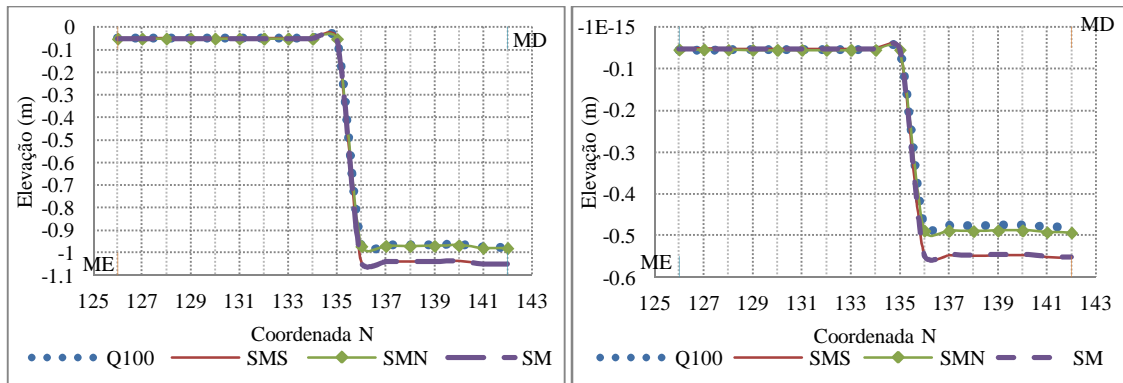


Figura 4.33: Elevação mínima da água para o cenário de caudal de 100 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

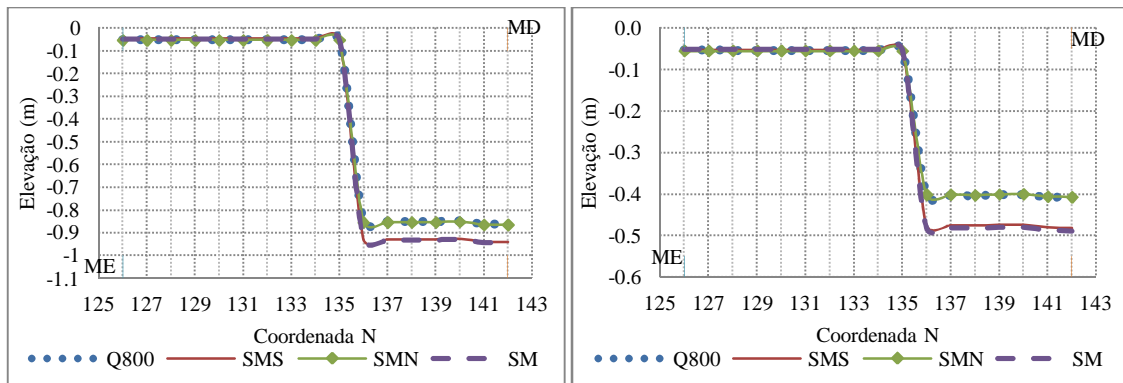


Figura 4.34: Elevação mínima da água para o cenário de caudal de 800 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

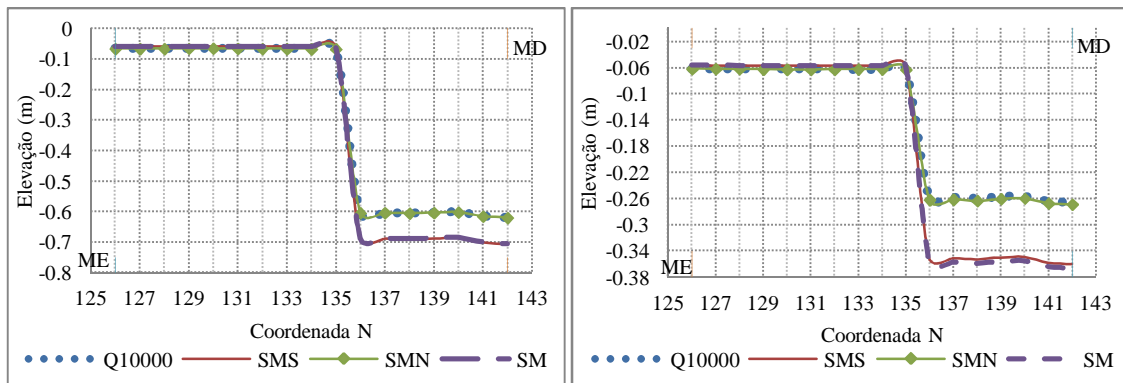


Figura 4.35: Elevação mínima da água para o cenário de caudal de 10000 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

Ao observarmos os gráficos anteriores um aspeto que se destaca é a queda na elevação a partir da coordenada 135 até à 136, esta queda deve-se à passagem da parte menos profunda para a parte mais profunda da secção em análise. De uma forma geral em todos os gráficos as curvas de elevação começam muito próximas e continuam juntas até a coordenada 136 separando-se nesta zona em pares, isto é as curvas SM e SMS continuam muito próximas mas descem mais

um pouco do que as outras duas curvas que também se mantêm juntas. As elevações mais baixas são apresentadas pelo figura 4.33 (Q100) e são de 1.05 m no caso de termos maré viva e de 0.55 m no cenário de maré morta e encontram-se na zona mais profunda da secção como seria de esperar, algo que não seria de esperar é o facto da água não descobrir totalmente a zona com o fundo mais elevado. Isto poderá acontecer por esta zona apresentar uma extensão de 660 m e o tempo em que a água se mantém abaixo do fundo desta zona não ser suficiente para o descobrimento total independentemente do cenário analisado já que a elevação é praticamente igual em todos os cenários.

Talvez fosse de esperar que com a construção dos molhes o aumento da elevação da superfície livre no interior do estuário fosse mais significativa, visto que a construção dos molhes, principalmente o molhe sul diminuí a secção de escoamento na zona da embocadura, embora que a diminuição da secção de escoamento possa ser compensada com o aumento da velocidade continuando desta forma a termos caudais idênticos na entrada do estuário ($Q=VS$).

4.4.2 Velocidades

A figura 4.36 mostra-nos o jato de água em planta no instante 451, tal como a direção e sentido da velocidade do escoamento nos cenários de caudal de 100 m³/s com rutura dos molhes e maré viva.

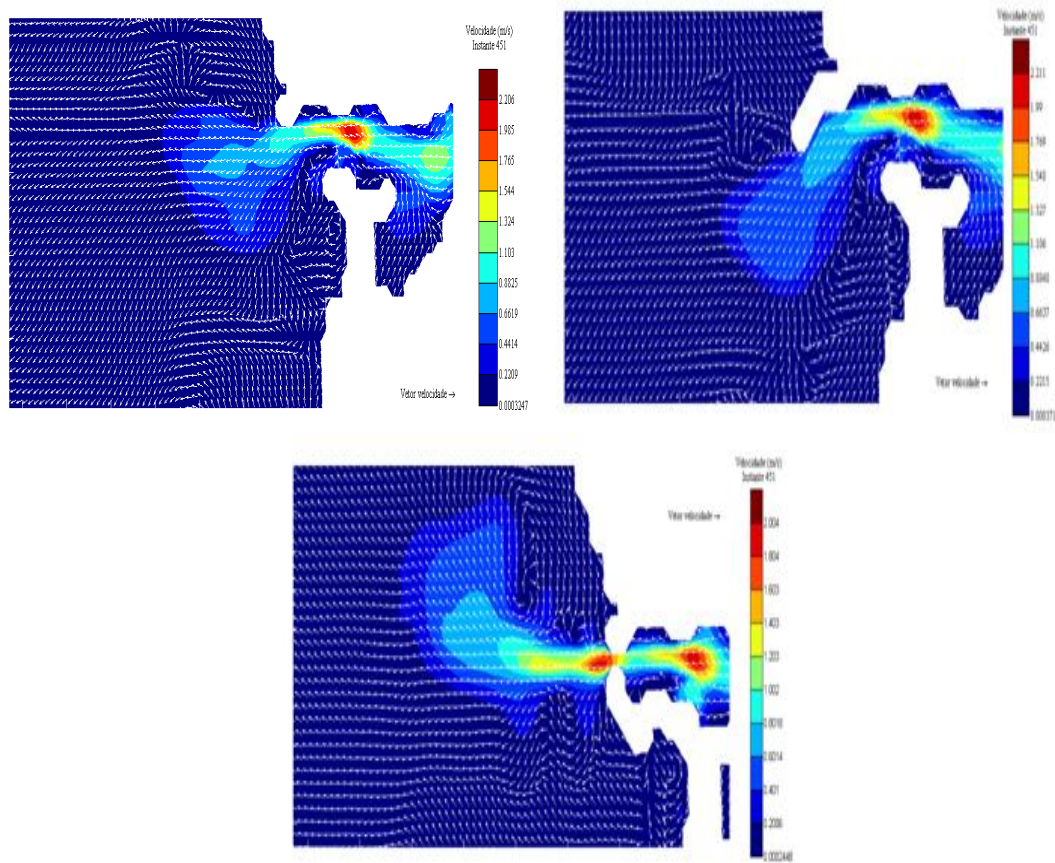


Figura 4.36: Jato de água na situação de rutura de ambos os molhes (esquerda, cima) do molhe sul (direita, cima) e molhe norte (baixo).

A direção do jato e consequentemente a forma como este se dispersa no oceano, é fortemente influenciada pelos molhes. Na situação de rutura de ambos os molhes o jato entra no oceano em forma de pluma aproximadamente circular, por sua vez na presença apenas do molhe norte o jato é desviado por este como mostra a figura, chegando ao oceano com forma de pluma alongada dirigida para sul. No cenário em que só existe o molhe sul o jato não muda de direção mas entra no oceano com uma forma mais estreita alargando à medida que se afasta da embocadura.

Os gráficos seguintes (figuras 4.37 a 4.39) dão-nos a informação da velocidade na entrada do estuário a partir do instante 96 (dia 1) de simulação para os cenários de maré viva com rutura do molhe norte (SMN), molhe sul (SMS) e de ambos em simultâneo (SM).

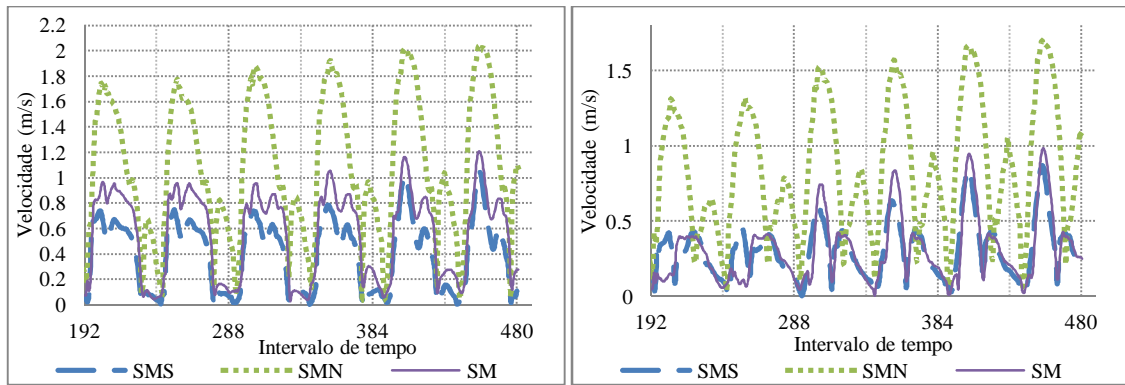


Figura 4.37: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré viva na camada superficial (direita) e na penúltima camada (esquerda).

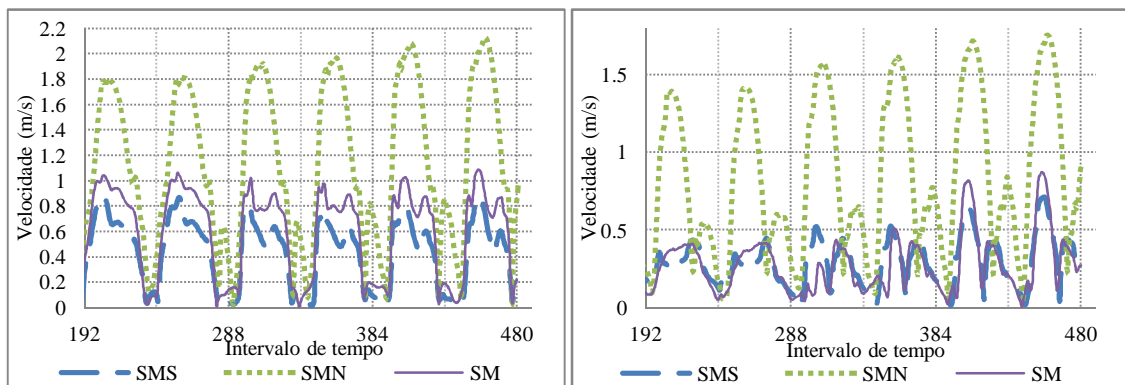


Figura 4.38: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de $200\text{-}800 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré viva na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita).

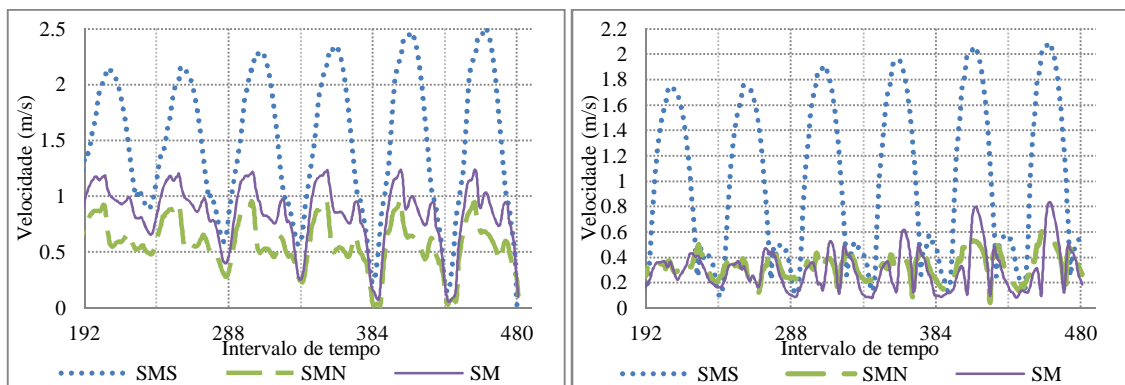


Figura 4.39: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré viva na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita).

Os gráficos revela-nos que a rutura dos molhes tem uma influência diferente na velocidade dependendo do caudal que circula no rio. Se o caudal do rio for inferior a $800 \text{ m}^3/\text{s}$ a curva com valores de velocidade superior é a curva SMN e a curva de valores inferiores é a SMS, mas se o caudal for de $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ estas curvas trocam de lugares isto é a curva SMS apresenta valores superiores para a velocidade enquanto que a curva SMN apresenta os

valores inferiores. Os valores da velocidade para este ponto são substancialmente inferiores aos do cenários sem rutura dos molhes chegando à diferença máxima de 2.26 m/s, 1.73 m/s e de 1.65 m/s para as curvas Q10000 (figura 4.14, curva maré viva), Q800 (figura 4.13, maré viva) e Q100 (figura 4.12, maré viva) respetivamente, estas diferenças ocorrem em instantes diferentes. À semelhança do que acontecia nos cenários sem rutura dos molhes apenas no cenário de caudal de cheia é que não existe mudança na direção do escoamento.

No caso da maré morta (figuras 4.40 a 4.42) todas as curvas se apresentam dispostas na mesma ordem nos três gráficos da camada superficial contrariamente ao que acontecia nos cenários da maré viva.

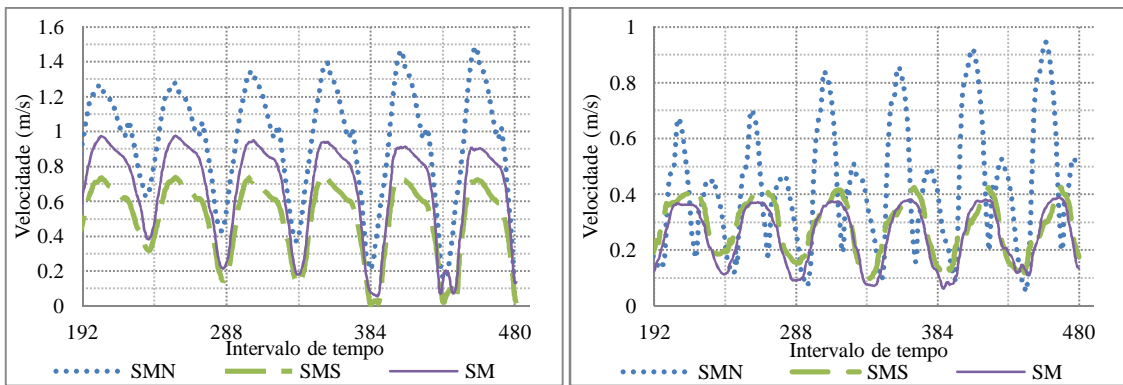


Figura 4.40: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 100 m³/s e maré morta na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita).

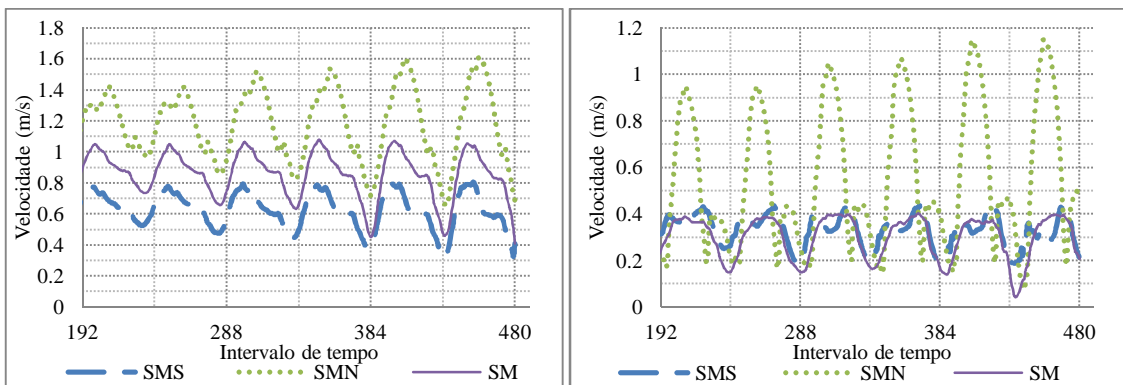


Figura 4.41 : Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 200-800 m³/s e maré morta na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita).

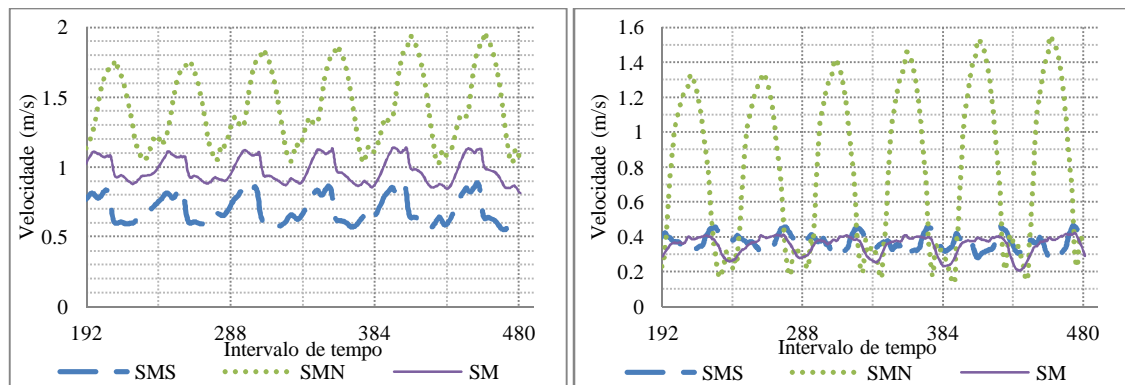


Figura 4.42: Velocidade ao longo do tempo na entrada do estuário para o caudal de 10000 m³/s e maré morta na camada superficial (esquerda) e na penúltima camada (direita).

No entanto, tal como acontecia nos cenários de maré viva os valores destas curvas são inferiores aos das curvas dos cenários de maré morta e sem rutura dos molhes chegando a diferença máxima a ser de 0.96 m/s, 1.21 m/s e de 1.67 m/s para os caudais de 100 m³/s (figura 4.12, curva maré morta), 800 m³/s (figura 4.13, curva maré morta) e 10000 m³/s (figura 4.14, curva maré morta) respetivamente isto para a camada superficial. O gráfico correspondente ao cenário de cheia para a camada superficial apresenta a curva SMS no intervalo de valores de 0.5 e 0.9 m/s, por sua vez a curva SM está contida entre os valores 0.8 e 1.2 m/s. Na penúltima camada estas curvas aproximam-se estando ambas contidas no intervalo de valores de 0.2 e 0.5m/s. Isto repete-se em todos os cenários de maré morta, isto é, com o aumento da profundidade as curvas SMS e SM aproximam-se. A curva SMN é a que apresenta as maiores velocidades.

Anteriormente foi referido que era de esperar que com a construção dos molhes o nível de água no interior do estuário aumenta-se numa forma mais significativa, ora a explicação para isso não ter acontecido está presente nos parágrafos anteriores que como se pode depreender pelo que foi apontado nesses parágrafos a construção dos molhes (situação atual) levou a um aumento da velocidade de escoamento.

De seguida (figuras 4.43 a 4.45) é mostrada a curva de velocidades da camada superficial segundo um perfil longitudinal aquando da ocorrência da velocidade máxima durante todo o tempo de simulação para cada um dos cenários de rutura com as variações de caudal e marés.

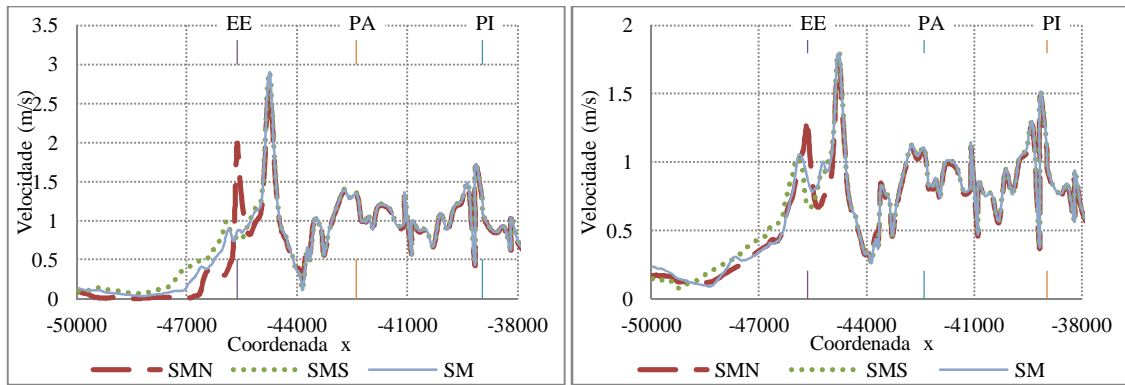


Figura 4.43: Perfil longitudinal da velocidade para o caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré viva na camada superficial (esquerda) e para a maré morta (direita).

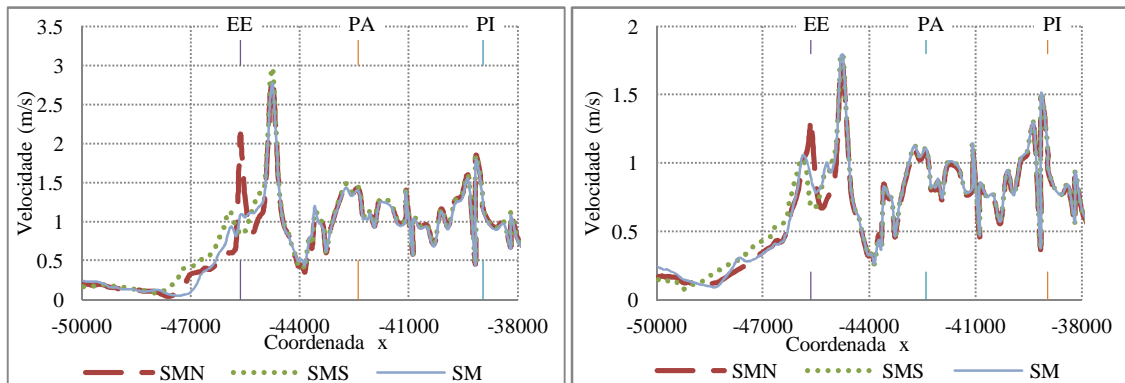


Figura 4.44: Perfil longitudinal da velocidade para o caudal de $200\text{-}800 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré viva na camada superficial (esquerda) e para a maré morta (direita).

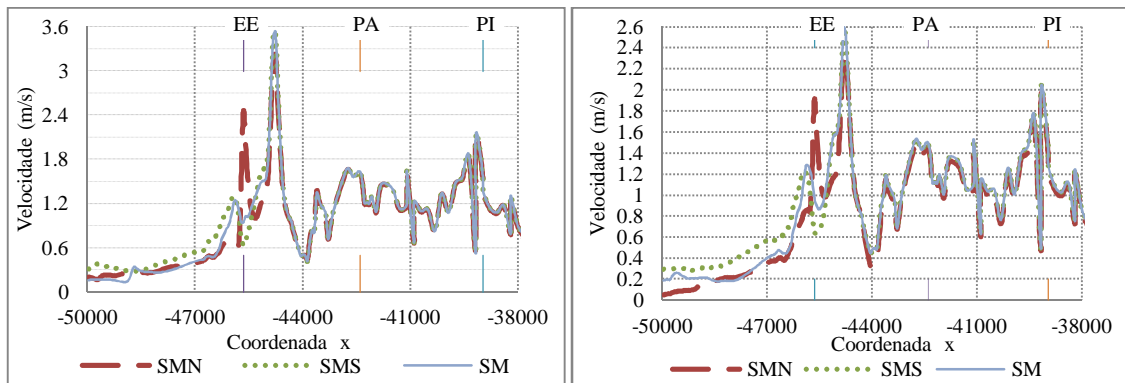


Figura 4.45: Perfil longitudinal da velocidade para o caudal de $10000 \text{ m}^3/\text{s}$ e maré viva na camada superficial (esquerda) e para a maré morta (direita).

Em todos os cenários apenas a curva SMN (sem molhe norte) apresenta três picos de velocidade, faltando nas outras curvas o pico de velocidade na entrada do estuário (EE). As curvas de velocidade até ao ponto de velocidade máxima que acontece entre EE e PA (ponte da Arrábida), apresentam valores muito próximos (parte fluvial do estuário). A partir deste ponto os valores das curvas apresentam-se mais distanciados, no entanto esse distanciamento

não é muito significativo mesmo para a curva SMN que como já foi dito anteriormente apresenta um pico de velocidade na entrada do estuário. Após esse ponto a velocidade diminui para valores próximos das outras curvas, em alguns casos para valores inferiores.

Este conjunto de gráficos (4.43 a 4.45) permite-nos atribuir o pico de velocidade que acontece na entrada do estuário (EE) à construção do molhe sul e afirmar que os outros dois picos de velocidade não estão relacionados com a construção dos molhes, mas sim com as características próprias do escoamento e do terreno.

De seguida (figuras 4.46 a 4.48) mostra-se os perfis verticais da velocidade dos cenários sem molhe sul (curva SMS), sem molhe norte (curva SMN) e sem ambos os molhes (curva SM) nos pontos de velocidade máxima que foram revelados pelos gráficos anteriores (figuras 4.43 a 4.45) e referem-se aos locais entrada do estuário (EE), entre EE e a ponte da Arrábida (São Miguel-o-Anjo) e perto da ponte do Infante (PI).

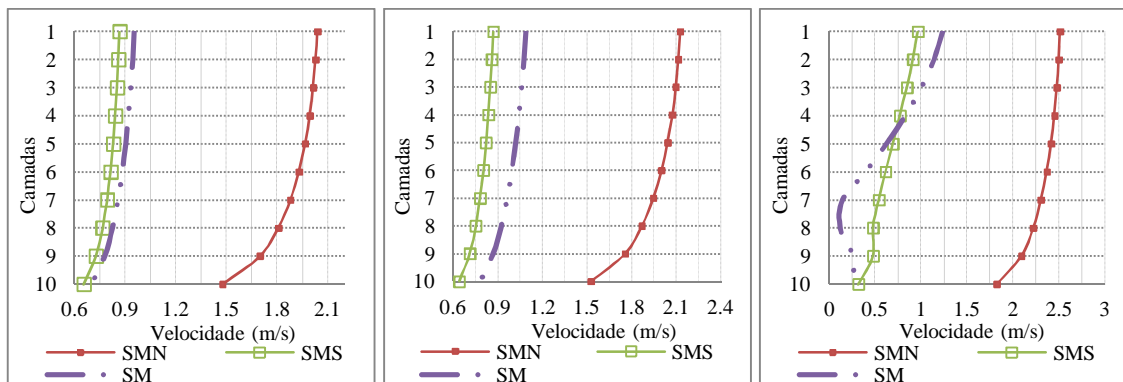


Figura 4.46: Perfil vertical de velocidade na entrada do estuário para a maré viva e caudal de 100 m³/s (esquerda), 200-800 m³/s (centro) e 10000 m³/s (direita).

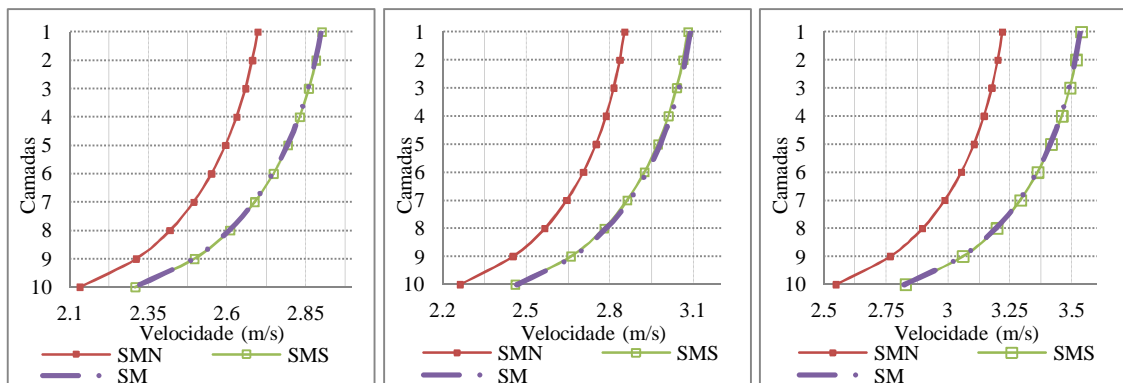


Figura 4.47: Perfil vertical de velocidade em S. Miguel-o-Anjo para a maré viva e caudal de 100 m³/s (esquerda), 200-800 m³/s (centro) e 10000 m³/s (direita).

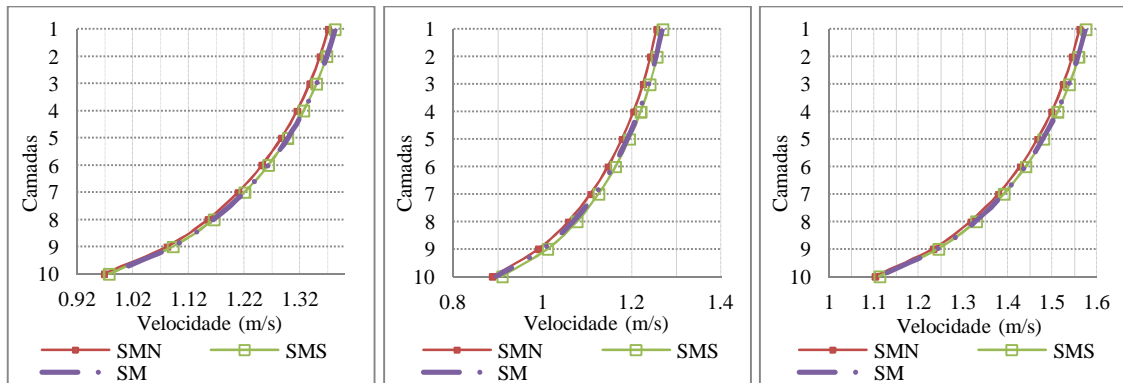


Figura 4.48: Perfil vertical de velocidade na ponte do Infante para a maré viva e caudal de 100 m³/s (esquerda), 200-800 m³/s (centro) e 10000 m³/s (direita).

As curvas atrás representadas foram obtidas para o instante de velocidade máxima ocorrido em cada um dos locais. Numa análise mais geral podemos observar que à medida que nos vamos aproximando do oceano as curvas se vão afastando, isto é na ponte do Infante as três curvas permanecem juntas independentemente do caudal, no segundo ponto que fica a jusante da ponte do Infante a curva SMN distancia-se das outras duas, já na entrada do estuário todas as curvas se encontram separadas.

Na entrada do estuário a curva SM do gráfico de caudal 10000 m³/s tem mudanças de curvatura, por outras palavras se traçássemos tangentes em cada ponto da curva obteríamos retas com declives positivos e negativos, isto acontece porque no instante a que a curva diz respeito junto ao fundo temos água a deslocar-se com o sentido inverso das camadas superficiais. Como mostra a figura 4.49, na qual os vetores que se encontram dentro do retângulo dizem respeito ao ponto representado no gráfico.

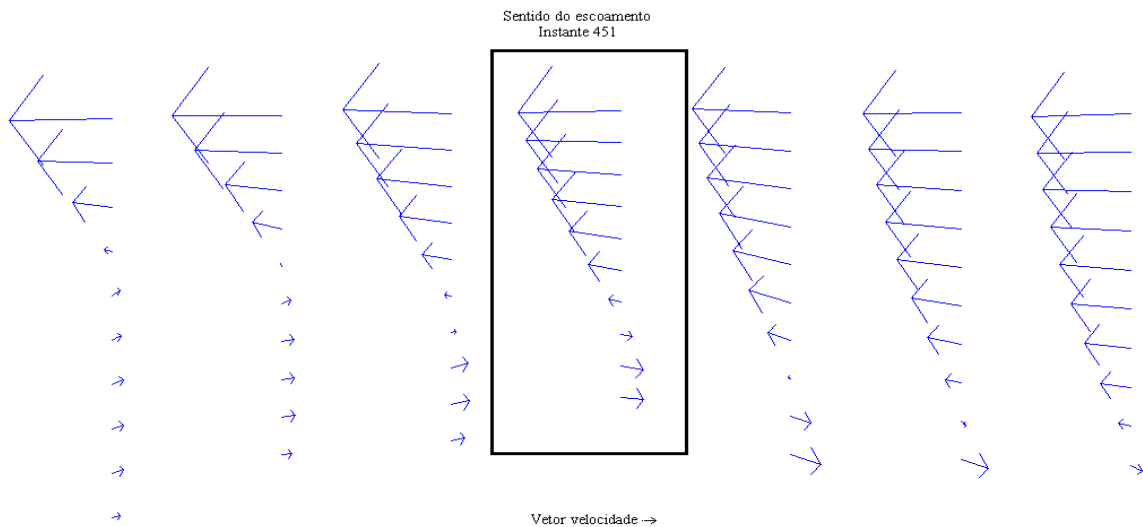


Figura 4.49: Corte vertical do escoamento na entrada do estuário para a maré viva e caudal de 10000 m³/s.

Nas Figuras 4.50 a 4.52 apresenta-se o perfil vertical de velocidades na entrada do estuário, ponte do Infante e São Miguel-o-Anjo para os cenários de rutura das estruturas de defesa da embocadura.

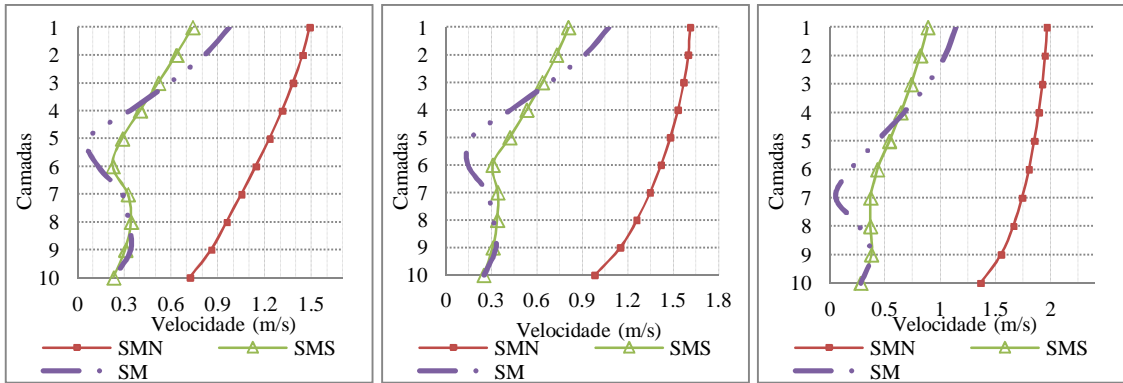


Figura 4.50: Perfil vertical de velocidade na entrada do estuário para a maré morta e caudal de 100 m³/s (esquerda), 200-800 m³/s (centro) e 10000 m³/s (direita).

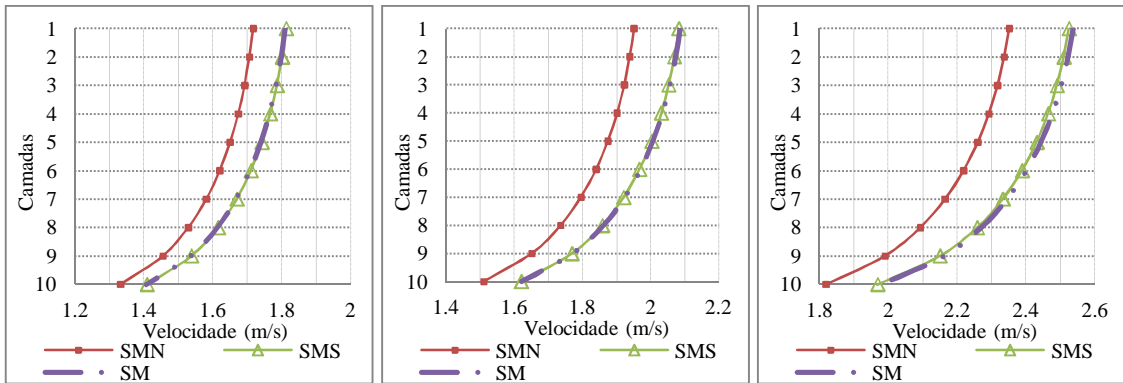


Figura 4.51: Perfil vertical de velocidade em S. Miguel-o-Anjo para a maré morta e caudal de 100 m³/s (esquerda), 200-800 m³/s (centro) e 10000 m³/s (direita).

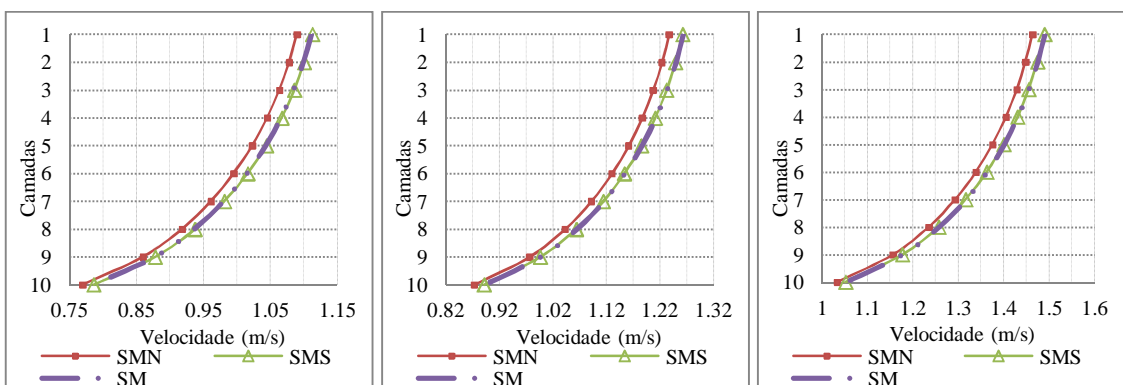


Figura 4.52: Perfil vertical de velocidade na ponte do Infante para a maré morta e caudal de 100 m³/s (esquerda), 200-800 m³/s (centro) e 10000 m³/s (direita).

A curva SMN (sem molhe norte) na ponte do Infante está mais afastada das outras duas curvas na situação de maré morta do que a quando da ocorrência da maré viva mas, à semelhança do que acontecia nesse cenário (figura 4.48), também neste, a curva aproxima-se

das outras duas com a profundidade. Neste caso, na entrada do estuário os gráficos referentes a cada caudal possuem as curvas SM (sem molhe) e a SMS (sem molhe sul) com mudanças na curvatura que, como vimos anteriormente, a razão disso acontecer tem haver com o facto de termos água a sair do estuário nas camadas superiores e a entrar nas camadas inferiores.

A figura 4.53 mostra os valores da velocidade e o vetor velocidade correspondente à curva SM da figura 4.50, para o cenário 29 (caudal de 100 m³/s), 30 (caudal de 200-800 m³/s) e 31 (caudal de 10000 m³/s) combinado com a maré morta.



Figura 4.53: Representação dos valores e vetores velocidade ao longo da profundidade do cenário 29 (esquerda), cenário 30 (meio) e cenário 31 (direita).

4.4.3 Salinidade

Os gráficos seguintes (figuras 4.54 a 4.56) dizem respeito à salinidade na entrada do estuário na penúltima camada para todo o tempo da simulação para os cenários de maré viva.

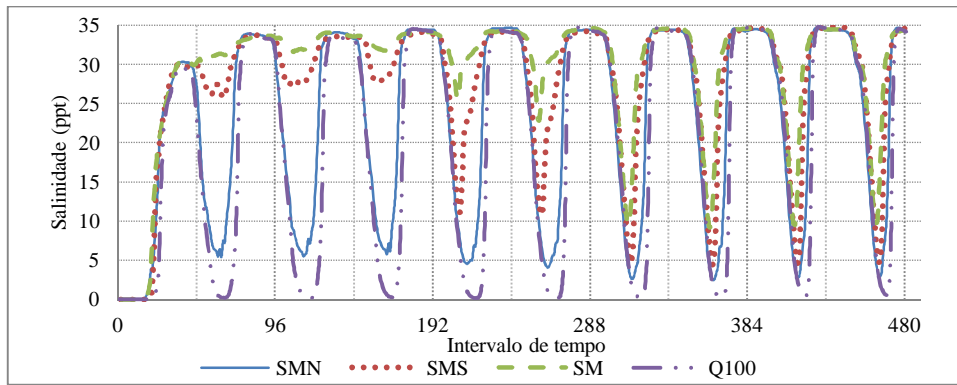


Figura 4.54: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 100 m³/s e maré viva.

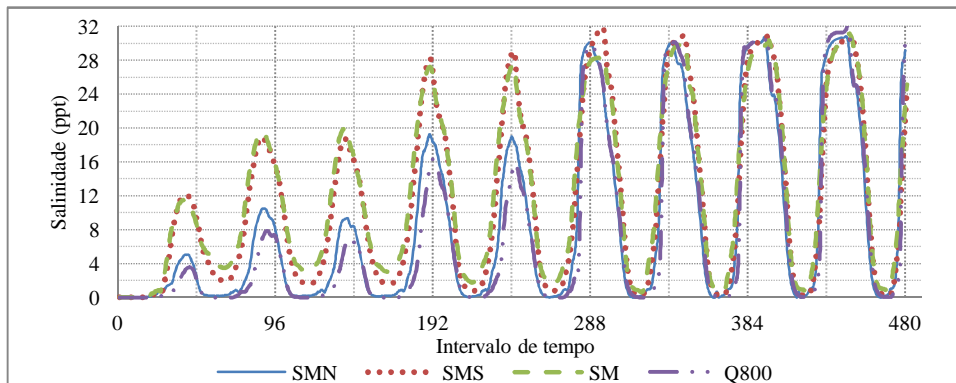


Figura 4.55: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 200-800 m³/s e maré viva.

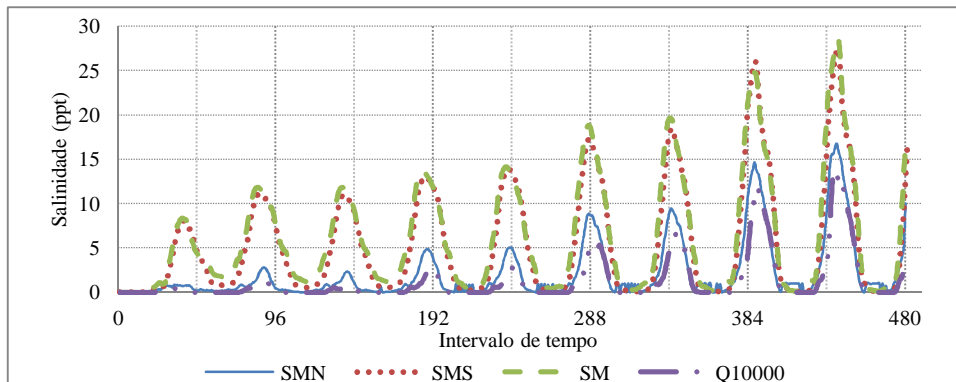


Figura 4.56: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 10000 m³/s e maré viva.

Os dois primeiros gráficos permitem-nos observar que as curvas apesar de estarem afastadas no início da simulação a partir do instante 288 (dia 3) aproximam-se. No entanto, a curva que mais se aproxima da curva respeitante aos cenários com ambos os molhes (Q100, Q800 e Q10000) é a curva SMN (sem molhe norte) tendo como máxima diferença o valor de 19 ppt no gráfico da curva Q100 (figura 4.54) e de 7 ppt nos outros dois gráficos (figura 4.55 e 4.56),

os instantes para os quais acontecem as diferenças máximas são o 123, 281 e 480 para o gráfico com a curva Q100, Q800 e Q10000, respetivamente. Também é de assinalar o facto de a curva SMS (sem molhe sul) não baixar a concentração de salinidade além dos 25 ppt antes do instante 192 (dia 2) enquanto que a curva SM (sem molhes) apenas baixa a concentração para valores inferiores a 25 ppt depois do instante 240, isto para na figura 4.54 que reflete a concentração da salinidade para o caudal de Verão.

Nas figuras 4.57 a 4.59 apresentam-se as curvas de salinidade na entrada do estuário na penúltima camada para todo o tempo da simulação para os cenários de maré viva.

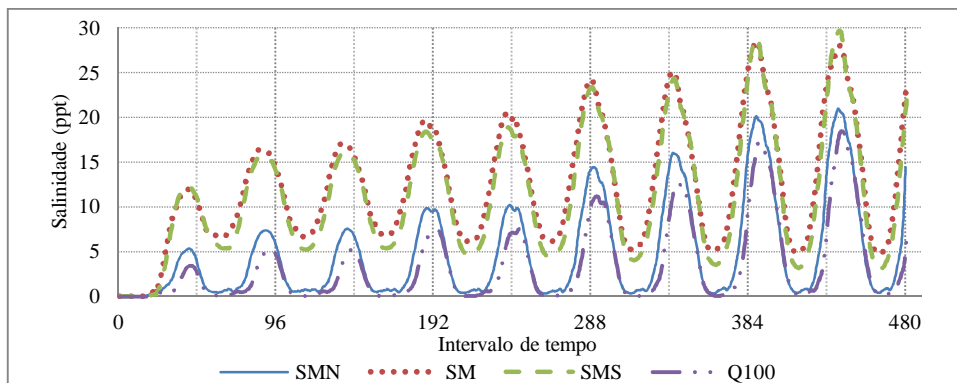


Figura 4.57: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 100 m³/s e maré morta.

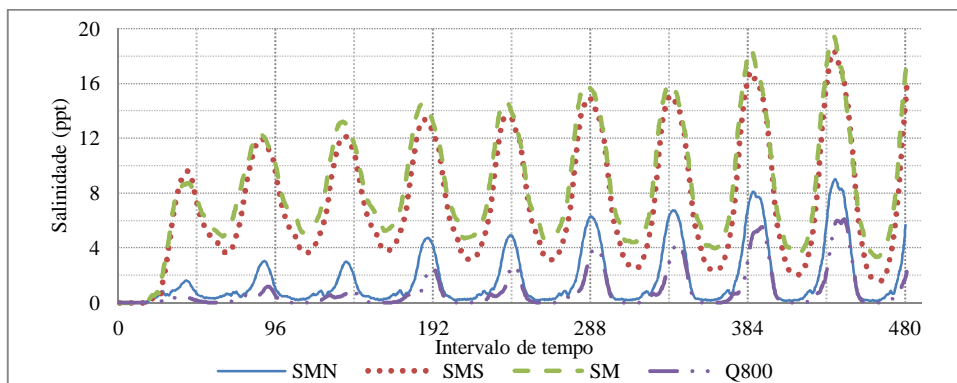


Figura 4.58: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 200-800 m³/s e maré morta.

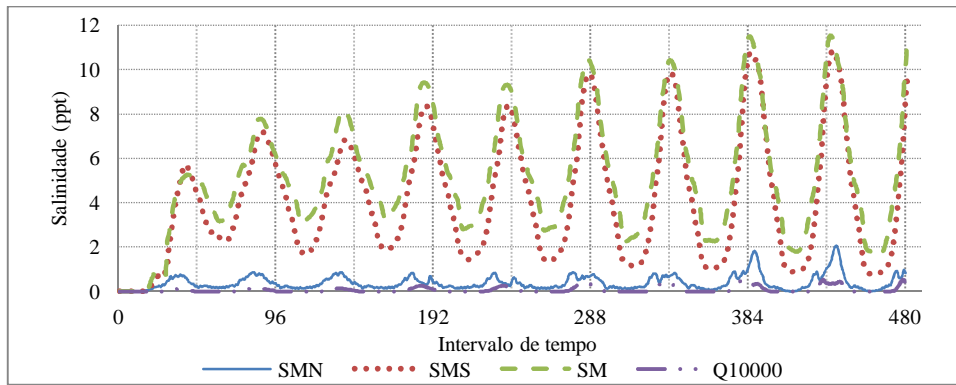


Figura 4.59: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada para o caudal de 10000 m³/s e maré morta.

Este conjunto de gráficos evidencia o que os gráficos 4.52 a 4.54 já mostravam: a curva sem molhe norte (SMN) comporta-se de forma muito semelhante à curva Q10000, Q800 e Q100, enquanto que a curva sem molhe sul (SMS) se aproxima da curva sem molhes (SM). Deve-se chamar a atenção para o gráfico da figura 4.59, no qual a curva SMN ao longo da simulação alcança um valor máximo de 2.04 ppt, que é substancialmente menor que o valor máximo alcançado pelas outras duas curvas.

Algo bastante interessante que nos é revelado por estes conjuntos de gráficos (4.54 a 4.59) é a semelhança no comportamento quanto à presença de salinidade no ponto na situação de rutura do molhe norte (SMN), ou seja apenas temos o molhe sul, e na situação de não rutura de ambos os molhes (Q100, Q800, Q10000). Com isto pode-se afirmar que o molhe sul é que desempenha o papel preponderante no impedimento da entrada da água salobra no estuário, se calhar era de esperar que assim fosse já que este molhe reduz a secção de escoamento no ponto referido. Contudo, quando temos maré viva estas duas curvas e a curva SM (sem molhes) ficam bastante próximas à medida que a simulação avança, embora se possa verificar o mesmo nas figuras respeitantes à maré morta, nesta a aproximação das curvas é inferior.

Do parágrafo anterior conclui-se que apesar dos molhes reduzirem a presença da água salobra no interior do estuário no início da simulação, estes à medida que a simulação avança perdem essa capacidade e os valores de concentração salina aproximam-se da situação natural (sem molhes, curva SM dos gráficos), ficando ao cargo do caudal do rio a diminuição da concentração da água salobra no interior do estuário.

Pelos gráficos seguintes (figuras 4.60 a 4.62) podemos ver até que distância no interior do estuário temos penetração da água salgada na camada superficial (distância máxima para a intrusão salina), para os cenários de maré morta e maré viva conjugados com a rutura dos molhes.

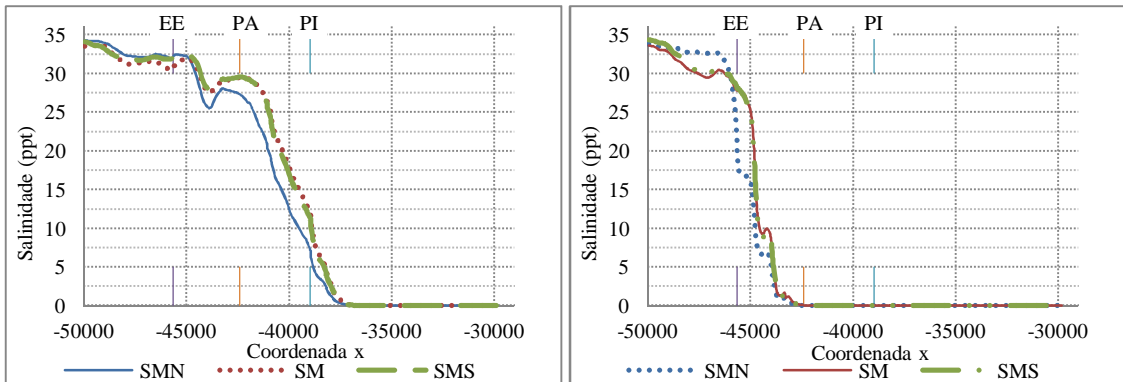


Figura 4.60: Perfil longitudinal da salinidade para a camada superficial e caudal de 100 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

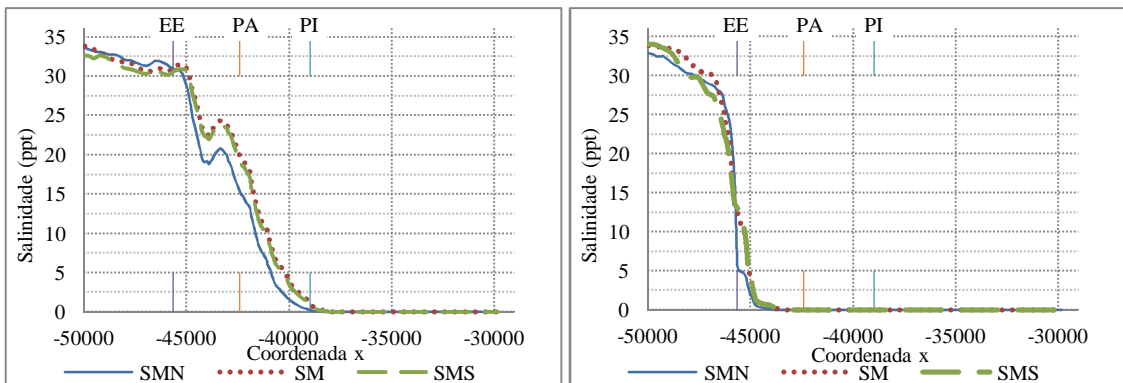


Figura 4.61: Perfil longitudinal da salinidade para a camada superficial e caudal de 200-800 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

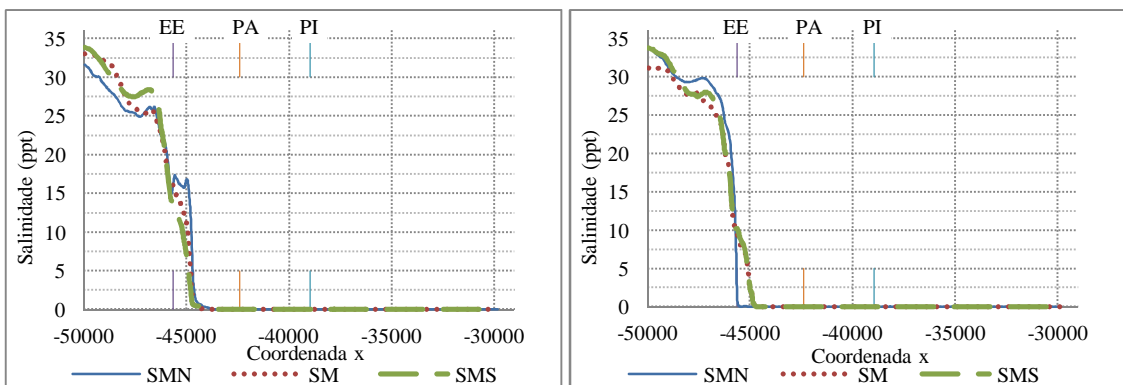


Figura 4.62: Perfil longitudinal da salinidade para a camada superficial e caudal de 10000 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

Em quase todos os cenários, a exceção é o gráfico da direita da figura 4.62, a curva SMN (sem molhe norte) apresenta os valores inferiores a partir do ponto EE (entrada do estuário) estando as outras duas curvas muito próximas. Apenas no gráfico correspondente ao cenário de caudal de 100 m³/s e maré viva (figura 4.60, direita) é que as curvas chegam ao ponto PI (ponte do Infante) com valores de salinidade superiores a 2.5 ppt. Além do gráfico referido apenas o gráfico do cenário de caudal de 200 a 800 m³/s com maré viva apresentam valores de salinidade superiores a 2.5 ppt no local PA (ponte da Arrábida). Olhando agora para o ponto EE apenas o gráfico do cenário de caudal 10000 m³/s com maré morta não apresenta valores superiores a 2.5 ppt isto só é aplicado à curva SMN.

Dos gráficos atrás representados não existe grandes diferenças para com os gráficos que representam a situação atual, sendo que as maiores diferenças se encontram no gráfico de caudal 200-800 m³/s e maré viva, em que no caso de termos rutura de molhes a concentração de salinidade na ponte do Infante (PI) é inferior a 2.5 ppt, no entanto na situação atual (sem rutura dos molhes) a salinidade neste local é superior ao valor referido.

Possivelmente o local mais distante da embocadura ao qual a intrusão salina tem acesso, localiza-se perto da ponte do Infante, isto porque em nenhum dos cenários modelados temos valores de concentração salina com distância significativa a montante da ponte do Infante, esta distancia é imposta pelas características do terreno onde ocorre o escoamento e pelo próprio escoamento, não estando relacionada com a construção dos molhes ou ausência deles, uma vez que em ambos os casos existe salinidade na ponte do Infante em alguns dos cenários analisados.

As figuras 4.63 a 4.66 dizem respeito ao máximo valor de concentração salina ocorrido durante todo o tempo de simulação e a forma como esta se relaciona com a profundidade, nos locais identificados nos gráficos que antecedem estes por EE (entrada do estuário), PA (ponte da Arrábida) e PI (ponte do Infante) para os cenários identificados no quadro 4 pelos números 14 ao número 31 .

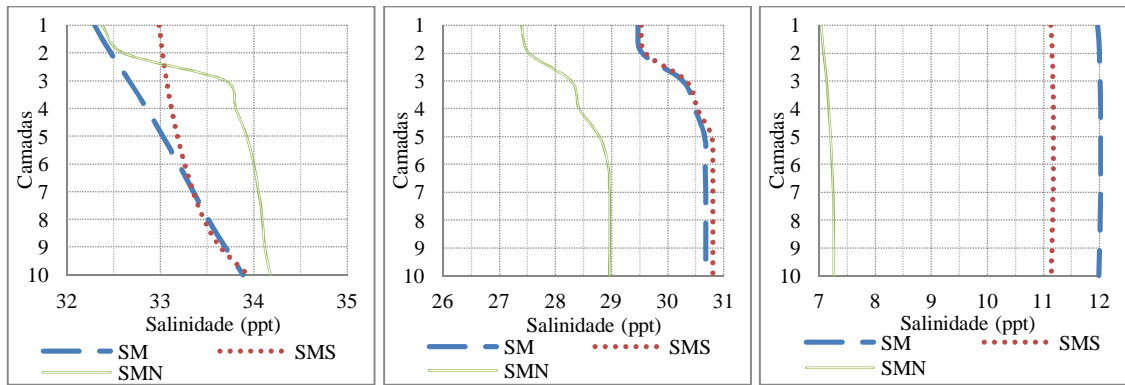


Figura 4.63: Perfil vertical de salinidade nos pontos EE (esquerda) PA (centro) e PI (direita) para o caudal de 100 m³/s e maré viva.

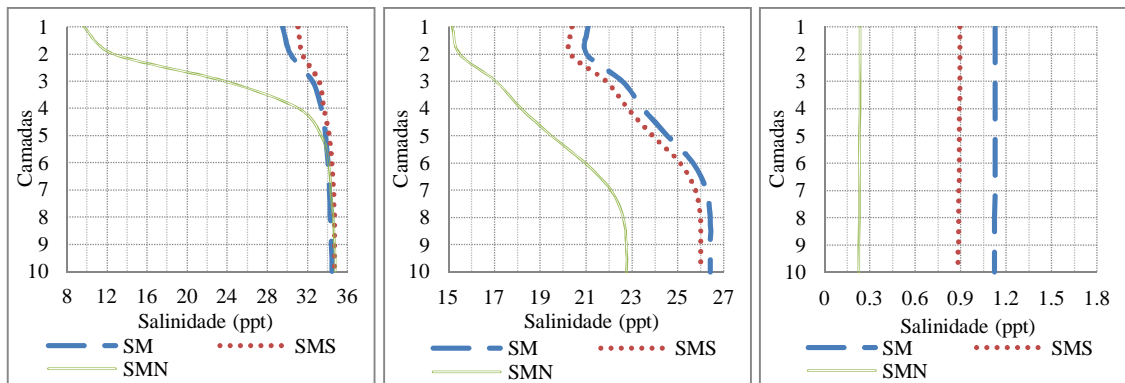


Figura 4.64: Perfil vertical de salinidade nos pontos EE (esquerda) PA (centro) e PI (direita) para o caudal de 200-800 m³/s e maré viva.

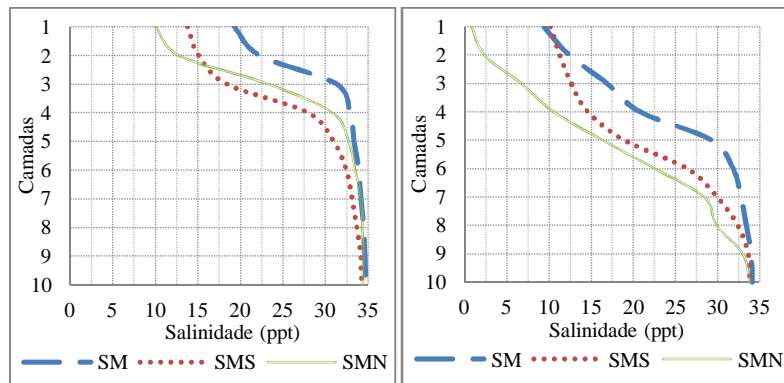


Figura 4.65: Perfil vertical de salinidade no ponto EE para o caudal de 10000 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

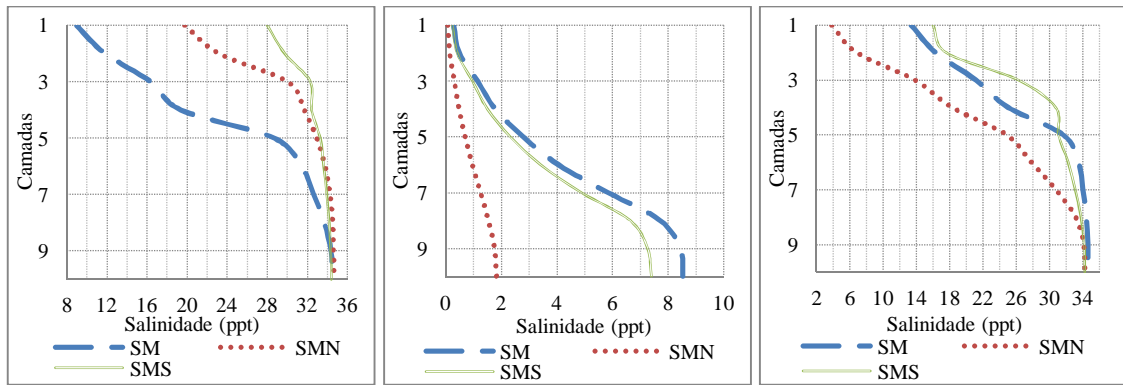


Figura 4.66: Perfil vertical de salinidade para a maré morta e caudal de 100 m³/s no ponto EE (esquerda) e PA (centro), e para o caudal de 200-800 m³/s e maré morta no ponto EE (direita).

O cenário da figura 4.63 é o único no qual as três curvas tem salinidade superior a 2 ppt em todos os três locais. Todas as outras figuras apenas tem salinidade com todos os valores superiores a 2 ppt no local EE (entrada do estuário) e no local PA (ponte da Arrábida), como é exemplo disso o cenário de caudal 100 m³/s com maré morta e o cenário de caudal de 200-800 m³/s com maré viva, ou apenas no ponto EE como é o caso da figura 4.65 e no cenário de caudal de 200-800 m³/s e maré morta. Na figura 4.63 e na figura 4.64 o último gráfico (PI) as curvas estão quase na vertical, a razão para isso acontecer deve-se à disposição vertical da salinidade como mostra a figura 4.27 na imagem mais à esquerda. Apesar das curvas SMS (sem molhe sul) e SM (sem molhe) do cenário de caudal de 100 m³/s com maré morta no ponto PA não apresentar valores significativos à superfície o mesmo não se aplica nas camadas inferiores já que estas apresentam valores consideráveis para a salinidade nessas localizações.

Em geral as curvas obtidas nos cenários sem rutura dos molhes apresentam valores inferiores às curvas representadas nas figuras anteriores, no entanto essa diferença diminui com o aumento da profundidade, sendo que o traçado das curvas dos cenários sem rutura dos molhes é em tudo semelhante ao apresentado nos gráficos da figura 4.63 à 4.66.

CAPITULO 5

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

5. Conclusões e considerações finais

O presente capítulo está dividido em dois subcapítulos. O subcapítulo 5.1 sintetiza as conclusões que se podem retirar da análise dos cenários, enquanto que no subcapítulo 5.2 sugerem-se trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Do trabalho desenvolvido pode retirar-se as seguintes conclusões gerais:

Da análise hidrodinâmica podemos depreender que a velocidade do escoamento depende de três fatores essenciais que são o caudal transportado pelo rio, o tipo de maré e das características geométricas do fundo e fronteiras. O caudal do rio e o tipo de maré por razões óbvias, isto é quanto maior for o caudal maior será a velocidade se a secção for a mesma (recordando $caudal = velocidade * secção$). O tipo de maré porque com a maré viva a massa de água oceânica tem mais energia o que resulta na capacidade de elevação da superfície a alturas mais elevadas dificultando a saída de água do estuário. O fundo e fronteiras influenciam o escoamento na medida que criam obstáculos à passagem da água, tendo esta de contorna-los, além da criação de atrito que irá criar dificuldades no escoamento na camada de água junto ao fundo, e esta irá dificultar o escoamento da camada de água imediatamente acima e assim sucessivamente até à camada superficial.

As condições de estratificação estão inteiramente dependentes das condições acima referidas, isto é, no estuário o processo de mistura das duas massas de água depende das condições hidrodinâmicas em que se encontram essas duas massas de água. No interior do estuário podemos não ter salinidade se o caudal for suficientemente elevado, ou podemos ter salinidade caso o caudal não seja elevado e/ou as condições de maré tenham energia suficiente para transportar a água doce para o interior do estuário o que acontece nas camadas mais profundas mesmo para caudais elevados. Neste caso (presença de salinidade no interior do estuário) existem dois tipos de

estratificação uma quase horizontal mais perto da fonte de salinidade e outra vertical na proximidade da interface da água doce com a água salina. A distância à qual podemos encontrar valores de salinidade superiores a zero está inteiramente relacionada com o tipo de maré, caudal e com as características do fundo, contudo neste trabalho não se obteve valores superiores a zero para a salinidade muito distanciados da ponte do Infante, logo pode afirma-se que este será o limite para intrusão salina para o conjunto de cenários simulados. Falta assinalar que a progressão da água salobra no interior do estuário tem a forma de cunha salina, isto é a intrusão salina nas camadas mais profundas é maior do que na superfície. Obviamente as zonas com maior valor de salinidade são as mais próximas da água salobra.

Da análise de rutura dos molhes podemos afirmar que do ponto de vista hidráulico o molhe que pode entrar em colapso sem trazer grandes alterações na mudança das condições de escoamento e salinidade no interior do estuário do ponto de vista da situação atual (sem rutura dos molhes) é o molhe norte, por outras palavras o molhe sul é o molhe que interfere com maior severidade no escoamento e na distribuição de salinidade.

Salientam-se as seguintes conclusões específicas:

Apesar do ponto escolhido para a obtenção da elevação da superfície livre se encontrar afastada da zona de embocadura (ponto identificado na figura 3.5) , e fora da influência direta do jato de água proveniente do rio Douro, verificaram-se pequenas diferenças nos valores de amplitude quando estamos perante a mesma situação de maré mas com os diferentes caudais, logo podemos concluir que os níveis no exterior da embocadura sofrem uma ligeira influência do caudal que circula no rio.

O escoamento da água não é uniforme em perfil vertical, isto é nas camadas superiores podemos ter água a sair do estuário e nas camadas inferiores podemos ter água a entrar no estuário, ou ainda podemos ter água a sair do estuário em todo o perfil vertical. No entanto, nesta situação nas camadas superiores podem não ser visíveis os vórtices ao contrário das camadas inferiores. Também se pode afirmar que quando temos mudança na direção do escoamento esta acontece de forma quase imediata e homogénea ao longo do perfil vertical. No caso da mudança ser de entrada para saída

do estuário, na situação contrária (saída para entrada do estuário) temos que a mudança acontece de forma progressiva e começa nas camadas inferiores alastrando para as camadas superiores à medida que a simulação avança.

Os valores superiores para a velocidade estão à superfície, como seria de esperar já que não é considerada a atuação do vento, diminuindo com a profundidade. Em todos os cenários e apesar das flutuações da velocidade o regime de escoamento é, segundo o número de Froude, fluvial.

A maré também é um fator a ter em conta quando analisamos a velocidade de sistemas estuarinos, uma vez que as velocidades máximas são inferiores para o estado da maré morta na entrada do estuário.

O caudal transportado pelo rio e o tipo de maré do oceano são fatores condicionantes da distância percorrida pela água salobra no interior do estuário. Caudais baixos associados ao mesmo tipo de maré (viva ou morta) permitem que a distância percorrida pela salinidade seja maior do que caudais elevados associados ao mesmo tipo de maré. Se compararmos os dois estados de maré verifica-se que a maré viva permite uma maior intrusão salina.

A construção dos molhes não originou um aumento significativo da elevação da superfície livre no interior do estuário, mas provocou um aumento da velocidade, sendo que o molhe sul é o principal responsável pelo pico de velocidade que acontece na entrada do estuário (segundo valor mais alto da velocidade). Além de alterar a forma de saída do jato de água doce e a sua dispersão no oceano.

Apesar dos molhes reduzirem a presença da água salobra no interior do estuário no início da simulação, estes à medida que a simulação avança perdem essa capacidade e os valores de concentração salina aproximam-se da situação natural (sem molhes).

5.2 Sugestões de próximos trabalhos

Ainda há muito por saber em relação ao estuário do Douro. A primeira sugestão será a de fazer uma análise hidrodinâmica e das condições de estratificação para um período de tempo maior, isto porque neste trabalho em algumas situações os valores aumentavam ao longo do tempo de simulação chegando ao fim da simulação com essa tendência de aumento.

Uma outra sugestão passa por fazer o mesmo estudo acrescentando uma análise de transporte de sedimentos. A razão para esta sugestão deve-se ao facto de o Cabedelo ser um local de deposição de materiais além de que a salinidade é influenciada pela presença de sedimentos.

Um outra sugestão passa por arranjar uma estrutura que seja mais eficaz na proteção da embocadura, apesar de reduzir a salinidade no interior do estuário este desenho cria um pico de velocidade na entrada do estuário que pode dificultar a entrada e saída de embarcações, por exemplo pode-se fazer uma pesquisa de todos os projetos e escolher alguns desses projetos e aplica-los ao modelo comparando-os após a simulação.

Pode-se ainda sugerir que se faça uma previsão de qual a altura a que o nível médio da água oceânica tem de alcançar para que se obtenha salinidade acima de 2 ppt na barragem de Crestuma, esta sugestão relaciona-se com as alterações climáticas, e tem como objetivo saber quais as zonas inundadas e até que ponto se torna realista essa subida. Como sugestão deve-se considerar nesta análise a evaporação da água e a infiltração desta no solo.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

Andrade E. X. L., Sampaio R., Silva G. N. (2005), *Notas em matemática aplicada 15*, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional.

Andutta, F.P., (2011). O Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe (Bahia): Observações simulações, tempo de residência e processos difusivos e advectivo. Tese de doutoramento, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

Bordalo, A. A., Vieira, M. E. C., (2005), Spatial variability of phytoplankton, bactéria and viroses in the mesotidal salt wedge Douro Estuary (Portugal). *Estuarine Coastal and Shelf Science* 63, Elsevier.

Câmara municipal do Porto. *O Porto em números síntese estatística*. [Consultado em 17 Julho 2012] .Disponível em URL: <http://www.cm-porto.pt>

Câmara municipal de Vila Nova de Gaia, *História*, [Consultado em 17 Julho 2012]. Disponível em URL: <http://www.cm-gaia.pt>.

Carmo, J. S. A. (2009). Modelação em hidráulica fluvial e ambiente. 2ª edição, Universidade de Coimbra.

Carmo, J. S. A., Pinho J. L. S., Vieira J. P. Oil spills in coastal zones: Enviromental impacns and pratical mitigating solutions..

Coastal Planning & Engineering do Brazil, (2010). Modelagem numérica dos processos de transporte de sedimentos e mudanças morfológicas como ferramenta para a estimativa da taxa de sedimentação do canal de acesso aos portos de Paranaguá e Antonina, Aquaplan.

Conceição, T. E. C., (2008), *Impacto das acções antropogénicas no comportamento sedimentar do rio Douro*, Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro.

Correia. P. G. (2011), Universidade do Minho.

Duarte, A. A. L., Pinho, J. L. S., Boaventura, R. A. R., Vieira, J. M. P., *Modelação da hidrodinâmica e da dispersão longitudinal no rio Mondego*.

Fill, G. C., (2011) *Modelagem hidrodinâmica 3D de escoamentos em vertedouros*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná.

Frazão, E. P., (2003), Caracterização hidrodinâmica e morfosedimentar do estuário Potengi e áreas adjacentes: subsídios para controle e recuperação ambiental no caso de derrames de hidrocarboneto. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Grube, R., Fill G. C., (2008), *Modelação matemática aplicada a análises de obras hidráulicas*, VI Simpósio Brasileiro sobre pequenas e médias centrais hidroelétricas

Inoue, F.K. (2005), *Modelagem matemática em obras hidráulicas*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná.

Instituto da Água, IP. *Descrição – Douro*. [Consultado em 14 Março 2012]. Disponível em URL: www.inag.pt

Instituto de Meteorologia, IP. *Grandezas Meteorológicas – Temperatura*. [Consultado em 23 Março 2012]. Disponível em URL: www.meteo.pt

Instituto Hidrográfico. *Glossário Científico – Marés*. [Consultado em 20 Março 2012]. Disponível em URL: www.hidrografico.pt

Jesus, M. E. R. V., (2003), *Morfodinâmica do Cabedelo da foz do rio Douro : Perspectiva histórica e monitorização por GPS para o conhecimento da sua evolução actual. Aplicabilidade pedagógica numa vertente CTSA, Volume I e II*, Dissertação de mestrado, Universidade do Porto.

Leitão, J. C., Silva A., Ferreira P. (2001), *Modelação matemática da deposição de dragados na zona costeira do estado de São Paulo- Brasil*, Congresso: A hidroinformática em Portugal. Lisboa.

Pinho, J. L. S., (2005), *Modelação da hidrodinâmica e dinâmica sedimentar no estuário do rio Cávado*, Universidade do Minho

Pinho, J.L. (2000). Aplicação de modelação matemática ao estudo da hidrodinâmica e da qualidade da água em zonas costeiras. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho.

Pinho, J. L. S., Vieira, J. M. P., Mathematical modelling of salt Water intrusion in a Northern Portuguese estuary, Universidade do Minho.

Ribeiro, A. A., Maia R., Rio Douro: Passado, presente e perspectiva de futuro.

Santos, L. I. V., Carmo, J. S. A., Pinho, J. L. S., (2012), *Influência da variação do nível médio das águas do mar no estuário do rio Mondego Portugal*, Recursos Hídricos, Volume 33#01, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos .

Siqueira, J. M. (2007), Estudo do mecanismo de alagamento de secamento em modelo computacional 2DH baseado em elementos finitos, Dissertação de Pós-Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo.

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. *Dados de Base* [Consultado em 8 de Março 2012]. Disponível em URL: <http://snirh.pt>

Telemac-3D, (2007), *Telemac Modelling System*, operating manual.