

MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO DOURO: CENÁRIOS DE CHEIA E INFLUÊNCIA DOS NOVOS MOLHES

RAQUEL ALEXANDRA FERNANDES MENESES MACIEL PEIXOTO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Doutor Paulo Alexandre de Avilez Rodrigues de Almeida Valente

Coorientadora: Doutora Isabel Iglesias Fernández

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Este trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito da linha de investigação ECOSERVICES integrada no Projeto Estruturado de I&D&I INNOVMAR - Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation of Marine Resources (referência NORTE-01-0145- FEDER-000035), cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

À minha família

*“A persistência é o menor caminho do êxito.”
Charles Chaplin*

AGRADECIMENTOS

Sendo a dissertação o culminar da minha vida académica não poderia deixar de agradecer a algumas pessoas que foram essenciais na realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Paulo Avilez Valente, orientador deste trabalho, agradeço todos os conhecimentos transmitidos e toda a disponibilidade e acessibilidade demonstradas ao longo deste semestre. Sem o seu auxílio a realização deste trabalho teria sido impossível.

À minha coorientadora, a Doutora Isabel Iglesias por toda a amabilidade demonstrada em todas as vezes em que fui ao CIIMAR, por toda a ajuda prestada ao longo do semestre e por todas as críticas construtivas feitas ao trabalho que serviram como incentivos para o melhorar e completar.

Gostaria de agradecer também ao José Luís Pinho, Stênio de Sousa Venâncio e José Manuel Pereira Vieira da Universidade do Minho pela pesquisa de dados relativamente às cheias históricas no Douro que foi de extrema utilidade para as simulações feitas neste trabalho.

Agradeço também ao Doutor António Trigo Teixeira por fornecer os dados da campanha do Douro que foram essenciais na validação do modelo.

À D. Esmeralda que sempre se mostrou disponível para ajudar no que fosse necessário.

Aos meus colegas de curso e amigos que me acompanharam sempre ao longo destes 5 anos por todo o apoio prestado e por todos os momentos de diversão proporcionados.

Ao Filipe por ter estado sempre presente e por sempre me ter apoiado.

Um grande obrigado à minha família pois sem ela nada disto teria sido possível.

RESUMO

Os estuários são corpos aquáticos costeiros de transição entre a água doce proveniente dos rios e a água salgada proveniente do mar. Esta característica faz com que sejam zonas extremamente dinâmicas capazes de sofrer grandes variações a nível de salinidade, temperatura, correntes, estratificação, tempo de residência, transporte de sedimentos e qualidade da água. São também ecossistemas altamente produtivos onde podem ser encontradas espécies com características únicas.

O foco deste estudo é o estuário do Douro, que se prolonga desde a barragem de Crestuma-Lever até à foz onde o rio Douro desagua no Oceano Atlântico rodeado pelas cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia. As suas margens encontram-se fortemente urbanizadas tendo-se vindo a desenvolver inúmeras atividades de lazer e de comércio nessa região. Ao longo do curso do rio existe um canal de navegação que serve atividades turísticas e comerciais.

Por ação do transporte fluvial de sedimentos e da deriva litoral formou-se na embocadura do rio uma restinga, chamada Cabedelo, que ocupa quase toda a largura da seção transversal. Esta restinga revelou-se extremamente sensível à descarga de caudais, efeito do vento e agitação marítima, sofrendo acreção, erosão e consequentemente variações de área e de volume. Começou também a recuar progressivamente para o interior do estuário deixando as margens suscetíveis a tempestades marítimas.

O recuo da restinga aliado ao constante assoreamento do canal de navegação e à sua pouca segurança quando se fazia sentir uma forte agitação marítima fizeram com que fossem pensadas formas de resolver estes problemas. A solução passou pela construção de um molhe enraizado na margem norte e um quebramar destacado junto à restinga.

Esta dissertação tem como objetivo a implementação do modelo numérico OpenTelemac para o estudo de diferentes cenários de cheia antes e após a construção dos molhes. Pretende-se perceber qual será o comportamento esperado do estuário e qual a influência destas construções nas margens estuarinas, quando se produzir algum evento de cheia devido a um elevado caudal fluvial descarregado pela barragem de Crestuma-Lever.

Verificou-se que acima de determinados caudais o estuário é completamente controlado pelos escoamentos fluviais, não se sentindo a influência das marés. Os caudais de cheia considerados mostraram que antes da construção dos molhes a restinga era galgada o que aumentava a capacidade de vazão da água procedente do rio, diminuindo o nível da água e, portanto, o efeito das cheias. Após a construção dos molhes a restinga fortaleceu-se não sendo galgada para os mesmos caudais. Desta forma, a construção dos molhes cumpriu a sua função, pois a agitação marítima já não se faz sentir com tanta intensidade no estuário e a restinga parece ter fixado a sua posição, mas facto de a restinga não ser galgável após a construção dos molhes cria um obstáculo. Esta diminuição da seção de jusante do estuário provoca o aumento da altura de água a montante, criando piores cenários de inundação.

PALAVRAS-CHAVE: estuário do Douro, cheias, modelação numérica, restinga, molhes

ABSTRACT

Estuaries are coastal water bodies of transition between freshwater from rivers, and saltwater from the sea. This makes them extremely dynamic zones exposed to large variations of salinity, temperature, currents, stratification, residence time, sediment transport and water quality. They are also highly productive ecosystems where species with unique characteristics can be found.

The focus of this work is the Douro estuary which extends from Crestuma-Lever dam to its mouth where the Douro River drains into the Atlantic Ocean near the cities of Oporto and Vila Nova de Gaia. Its banks are strongly urbanized and many recreation and trade activities have been developed in that area. There is a navigation channel along the river course which main purposes are tourism and trade.

Due to fluvial sediment transport and longshore drift, a sand spit, known as Cabedelo, has formed in the Douro River's mouth and occupies almost the entire width of the river's cross section. This sand spit has revealed to be extremely sensitive to river discharge flows, wind energy and wave action, suffering accretion, erosion and consequently variations in its area and volume. It had started to move progressively upstream in the estuary leaving the river banks susceptible to sea storms.

The upstream drift of the sand spit allied to the constant sedimentation within the navigation channel and its reduced security in case of strong wave action, were responsible for the attempt to think in solutions to solve these problems. The actual solution was the construction of a jettie that is rooted on the north bank and a detached breakwater near the sand spit.

The aim of this dissertation is the implementation of the OpenTelemac numerical model for the study of different flood scenarios, before and after the jetties construction, in order to understand what will be the expected behaviour of the estuary and what will be the influence of these constructions in the estuarine banks when a flood event caused by a high river discharge occurs.

It was found that above a certain flow rate the estuary is fully controlled by the river flow without any tidal influence. The considered flood scenarios showed that before the construction of the jetties, the sand spit was easily overtopped for high flow rates, reducing the water level within the estuary and, therefore, the flood's impact. After the jetties construction the sand spit seems to have been strengthened and it is no longer overtopped for the same flows. Thus the jetties construction fulfilled its function as strong wave action is no longer felt in the estuary and the sand spit seems to have settled its position. However, the fact that the sand spit is not overtopped after the jetties construction creates an obstacle to the flow which is responsible for the raising of the water level upstream, causing worse flood scenarios.

KEYWORDS: Douro estuary, floods, numerical modeling, sand spit, jetties

ÍNDICE GERAL	
AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	1
1.2 ÂMBITO E OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 CARATERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOURO	5
2.2 CARATERIZAÇÃO DO ESTUÁRIO DO DOURO	9
2.2.1 DEFINIÇÃO DE ESTUÁRIO	9
2.2.2 O ESTUÁRIO DO DOURO.....	11
2.3 AS CHEIAS NO DOURO	26
3 MODELO NUMÉRICO: OPENTELEMAC	31
3.1 OPENTELEMAC	31
3.2 TELEMAC 2D	32
3.2.1 APRESENTAÇÃO DO TELEMAC 2D	32
3.2.2 FICHEIROS DE ENTRADA E FICHEIROS DE SAÍDA	33
3.2.3 MALHA	35
3.2.4 CONDIÇÕES-FRONTEIRA E TRAÇADORES	38
3.2.5 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS GERAIS E FÍSICOS	40
3.2.6 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS.....	43
4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	45
4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	45
4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO	46
4.3 DISCUSSÃO.....	63
5 SIMULAÇÃO DE CHEIAS. ANÁLISE DE RESULTADOS	65
5.1 SIMULAÇÃO DE CHEIAS HISTÓRICAS	65
5.1.1 CHEIA DE JANEIRO DE 1962	70
5.1.2 CHEIA DE FEVEREIRO DE 1966.....	82
5.1.3 CHEIA DE FEVEREIRO DE 1979.....	88
5.1.4 CHEIA DE JANEIRO DE 1996	96

5.1.5	CHEIA DE JANEIRO DE 2001	102
5.2	SIMULAÇÃO DE CHEIAS EXTREMAS	110
5.2.1	SIMULAÇÃO PARA O CAUDAL DE 20000 M ³ S ⁻¹	110
5.2.2	SIMULAÇÃO PARA O CAUDAL DE 23000 M ³ S ⁻¹	119
5.2.3	SIMULAÇÃO PARA O CAUDAL DE 26000 M ³ S ⁻¹	125
5.2.4	SIMULAÇÃO PARA UM CAUDAL DE 1000 M ³ S ⁻¹	131
5.3	DISCUSSÃO.....	138
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS....	141
6.1	CONCLUSÕES	141
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	142
	BIBLIOGRAFIA	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Bacia hidrográfica do rio Douro (Fonte: APA, 2015).	5
Figura 2.2- Planta de um meandro e seções transversais correspondentes aos pontos A, B e C.	6
Figura 2.3- Meandros do Douro junto à barragem de Miranda (Fonte: Google Maps).	6
Figura 2.4- Barragem da Régua com a sua eclusa de navegação (Fonte: EDP).	8
Figura 2.5- Relação entre a salinidade, forma e abertura de alguns tipos de estuário.	10
Figura 2.6- Descrição das 3 partes do estuário segundo Dionne (1963) (Fonte: Perillo, 1995).	11
Figura 2.7- Representação dos 3 trechos em que se pode dividir o estuário (Fonte: Vieira e Bordalo, 2000).	12
Figura 2.8- Alterações na morfologia da restinga após a cheia de 1909 (Fonte: dos Santos, 2014)... ..	14
Figura 2.9- Evolução da restinga desde 1862. 1: Muro de Luís Gomes de Carvalho construído em 1820; 2: Baía de São Paio; 3: Molhe norte; 4: Quebramar destacado; 5: Estrada de acesso ao quebramar (Fonte: Bastos et al., 2012).	14
Figura 2.10- Embocadura do estuário do Douro com pormenores do quebramar destacado e do molhe Norte (Adaptado de Irmãos Cavaco S.A, 2016).	15
Figura 2.11- Alterações no contorno e altura da restinga entre as campanhas efetuadas (Fonte: Bastos et al., 2012).	17
Figura 2.12- Efeito dos caudais, ondas e vento nos diferentes sectores da restinga (a tracejado) antes da construção do quebramar. As setas cinzentas destinam-se à totalidade da restinga e as pretas apenas ao setor indicado (Fonte: Bastos et al., 2012).	18
Figura 2.13- Efeito dos caudais, ondas e vento nos diferentes setores da restinga (a tracejado) após a construção do quebramar. As setas cinzentas destinam-se à totalidade da restinga e as pretas apenas ao setor indicado (Fonte: Bastos et al., 2012).	18
Figura 2.14- Maré semidiurna.	19
Figura 2.15- Posições predominantes da cunha salina e as suas distâncias relativamente à embocadura (Fonte: Vieira e Bordalo, 2000).	20
Figura 2.16- Ne como função do caudal do rio. Valores de Ne inferiores a 0,1 indicam condições fortes de estratificação (Fonte: Azevedo et al., 2008).	22
Figura 2.17- Variação da salinidade, Ne, tempo de residência (Tr) e concentração de traçadores para os diferentes caudais e regimes testados. Tempo de residência em dias e traçadores em μM (Fonte: Azevedo et al., 2010).	23
Figura 2.18- Caudais médios diários na barragem de Crestuma (linhas) e dragagens anuais na entrada do estuário (barra) entre 1988 e 1996 (Fonte: Portela, 2008).	24
Figura 2.19- Simulação do transporte do caudal sólido para um caudal de $2036 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na enchente e na vazante a 5 e a 18 km da embocadura (fonte: Portela, 2008).	25
Figura 2.20- Hidrograma de uma cheia lenta no rio Reno em 1995.	26
Figura 2.21- Hidrograma de uma cheia rápida no rio Almanzora (Espanha) em 1973.	27

Figura 2.22- Propagação da superfície frontal na Península Ibérica associada à cheia de Dezembro de 2002 no Douro (Fonte: Rodrigues et al., 2003).....	27
Figura 3.1- Módulos do OpenTelemac e as suas aplicações.	31
Figura 3.2- Malha anterior à construção dos molhes com batimetria de 2002.	36
Figura 3.3-Topografia da restinga na malha sem molhes.	36
Figura 3.4-Malha posterior à construção dos molhes com batimetria de 2002 e 2009.	37
Figura 3.5- Pormenor do quebramar destacado e do molhe norte da malha da Figura 3.4.	37
Figura 3.6- Topografia da restinga na malha pós-molhes.	38
Figura 3.7- Delimitação das fronteiras no estuário do Douro.	39
Figura 4.1-Localização dos pontos das medições.	46
Figura 4.2- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.	47
Figura 4.3- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.	48
Figura 4.4- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.	48
Figura 4.5- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões no período entre 25 de Setembro e 4 de Outubro de 1994.	49
Figura 4.6- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões no período entre 27 e 29 de Setembro de 1994.	49
Figura 4.7-Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões no período entre 1 e 3 de Outubro de 1994.	50
Figura 4.8-Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 25 de Setembro e 4 de Outubro.	50
Figura 4.9- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 27 e 29 de Setembro de 1994.	51
Figura 4.10- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 1 e 3 de Outubro de 1994.	51
Figura 4.11- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 25 de Setembro e 4 de Outubro de 1994.	52
Figura 4.12- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 27 e 29 de Setembro de 1994.	52
Figura 4.13- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 1 e 3 de Outubro de 1994.	53
Figura 4.14- Comparação entre a elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões e a maré criada pelo modelo de marés TPXO.2 e introduzida no modelo para o período entre 25 de Setembro e 4 de Outubro de 1994.	53
Figura 4.15- Corrente registada no ponto Le8 no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.	55

Figura 4.16- Velocidade da corrente registada no ponto Le7 no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.....	56
Figura 4.17- Corrente registada no ponto A1 no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.	56
Figura 4.18- Corrente registada no ponto A2 no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.	57
Figura 4.19- Corrente no ponto A1 no dia 1 de Outubro de 1994.	58
Figura 4.20- Corrente no ponto A1 no dia 27 de Setembro de 1994.....	58
Figura 4.21- Corrente no ponto A2 no dia 1 de Outubro de 1994.	59
Figura 4.22- Corrente no ponto A2 no dia 27 de Setembro de 1994.....	59
Figura 4.23- Corrente no ponto B1 no dia 3 de Outubro de 1994.	60
Figura 4.24- Corrente no ponto B1 no dia 29 de Setembro de 1994.....	60
Figura 4.25- Corrente no ponto B2 no dia 29 de Setembro de 1994.....	61
Figura 4.26- Corrente no ponto B2 no dia 3 de Outubro de 1994.	61
Figura 4.27- Corrente no ponto B1 no dia 21 de Setembro de 1994.....	62
Figura 4.28- Corrente no ponto B2 no dia 21 de Setembro de 1994.....	62
Figura 5.1- Cantareira e São Pedro da Afurada. Encontram-se também assinalados a Restinga do Cabedelo, a Reserva Natural Local do Estuário do Douro e o Miradouro do Estuário do Douro.	66
Figura 5.2-Massarelos, Alfândega, Cais da Ribeira e Cais de Gaia.....	66
Figura 5.3- Marina do Freixo e Gramido.	67
Figura 5.4- Aldeia Nova, Arnelas e Zebreiros.	67
Figura 5.5- Crestuma.	68
Figura 5.6- Ponto inicial a partir do qual foi definido o caminho para traçar os perfis espaciais da elevação da superfície livre.....	70
Figura 5.7- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior para a cheia de 1962 antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	70
Figura 5.8- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio para a cheia de 1962 antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	71
Figura 5.9- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior para a cheia de 1962 antes da construção dos molhes em preia-mar e baixa-mar.....	71
Figura 5.10- Número de Froude na embocadura na cheia de 1962 antes da construção dos molhes, na preia-mar.	72
Figura 5.11- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1962 antes da construção dos molhes.....	73
Figura 5.12- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de baixa-mar na cheia de 1962 antes da construção dos molhes.....	73
Figura 5.13- Cotas da restinga na malha sem os molhes.	74

Figura 5.14- Profundidades da água na zona da restinga na cheia de 1962 antes da construção dos molhes e na preia-mar.	74
Figura 5.15- Profundidades da água na zona da restinga na cheia de 1962 antes da construção dos molhes e na baixa-mar.	75
Figura 5.16- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior para a cheia de 1962 após a construção dos molhes em preia-mar e baixa-mar.	76
Figura 5.17- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio para a cheia de 1962 após a construção dos molhes em preia-mar e baixa-mar.	76
Figura 5.18- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior para a cheia de 1962 após a construção dos molhes em preia-mar e baixa-mar.	77
Figura 5.19- Localização do ponto fora do estuário para traçar o novo perfil.	78
Figura 5.20- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para a cheia de 1962 na preia-mar, após construção dos molhes.	78
Figura 5.21- Número de Froude junto à embocadura na cheia de 1962 após a construção dos molhes, na preia-mar.	79
Figura 5.22- Elevação da superfície livre junto à embocadura do estuário para a cheia de 1962, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.	79
Figura 5.23- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1962, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.	80
Figura 5.24- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1962, contando com a presença dos molhes e na situação de baixa-mar.	80
Figura 5.25- Elevação da superfície livre junto à embocadura para a cheia de 1962 antes e após a construção dos molhes para a preia-mar e baixa-mar.	81
Figura 5.26- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	82
Figura 5.27- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	82
Figura 5.28- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	83
Figura 5.29- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1966 antes da construção dos molhes.	83
Figura 5.30- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1966, antes da construção dos molhes e na situação de preia-mar.	84
Figura 5.31- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar após a construção dos molhes.	85
Figura 5.32- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar após a construção dos molhes.	85
Figura 5.33- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar após a construção dos molhes.	86

Figura 5.34- Elevação da superfície livre junto à embocadura do estuário para a cheia de 1966, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.	86
Figura 5.35- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1966, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.	87
Figura 5.36- Elevação da superfície livre para a cheia de 1966 antes e após a construção dos molhes para a BM e para a PM.	88
Figura 5.37- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	89
Figura 5.38- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	89
Figura 5.39- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	90
Figura 5.40- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1979 antes da construção dos molhes.	91
Figura 5.41- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1979, antes da construção dos molhes e na situação de preia-mar.	91
Figura 5.42- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.	92
Figura 5.43- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.	93
Figura 5.44- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.	93
Figura 5.45- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1979 após a construção dos molhes.	94
Figura 5.46- Profundidade da água na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1979 após a construção dos molhes.	94
Figura 5.47- Elevação da superfície livre para a cheia de 1979 antes e após a construção dos molhes para a baixa-mar e preia-mar.	95
Figura 5.48- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário inferior antes da ocorrência da cheia de 1996 em preia-mar e em baixa-mar, sem a presença dos molhes.	96
Figura 5.49- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário médio antes da ocorrência da cheia de 1996 em preia-mar e em baixa-mar, sem a presença dos molhes.	96
Figura 5.50- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário superior antes da ocorrência da cheia de 1996 em preia-mar e em baixa-mar, sem a presença dos molhes.	97
Figura 5.51- Elevação da superfície livre junto à embocadura do estuário para a cheia de 1996, sem a presença dos molhes e na situação de preia-mar.	97
Figura 5.52- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1996, antes da construção dos molhes e na situação de preia-mar.	98

Figura 5.53- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1996, na preia-mar e na baixa-mar.	99
Figura 5.54- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1996, na preia-mar e na baixa-mar.	99
Figura 5.55- Perfil longitudinal da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1996 em preia-mar e baixa-mar, contando com a presença dos molhes.	100
Figura 5.56- Elevação da superfície livre junto à embocadura do estuário para a cheia de 1996, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.	100
Figura 5.57- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1996, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.	101
Figura 5.58- Elevação da superfície livre para a cheia de 1996 antes e após a construção dos molhes para a baixa-mar e preia-mar.	102
Figura 5.59- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	103
Figura 5.60- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	103
Figura 5.61- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.	104
Figura 5.62- Elevação da superfície livre na embocadura para a cheia de 2001, na situação de preia-mar antes dos molhes.	104
Figura 5.63- Profundidade da água na embocadura para a cheia de 2001 em situação de preia-mar antes da construção dos molhes.	105
Figura 5.64- Perfis longitudinais da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.	106
Figura 5.65- Perfis longitudinais da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.	106
Figura 5.66- Perfis longitudinais da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.	107
Figura 5.67- Elevação da superfície livre na embocadura para a cheia de 2001, na situação de baixa-mar após a construção dos molhes.	107
Figura 5.68- Elevação da superfície livre na embocadura para a cheia de 2001, na situação de preia-mar após a construção dos molhes.	108
Figura 5.69- Profundidade da água na embocadura para a cheia de 2001 em situação de preia-mar após a construção dos molhes.	108
Figura 5.70- Profundidade da água na embocadura para a cheia de 2001 em situação de baixa-mar após a construção dos molhes.	108
Figura 5.71- Elevação da superfície livre para a cheia de 1996 antes e após a construção dos molhes para a preia-mar.	109

Figura 5.72- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ no estuário inferior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	111
Figura 5.73- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ no estuário médio antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	111
Figura 5.74- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ no estuário superior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	112
Figura 5.75- Elevação da superfície livre para um caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ na preia-mar antes da construção dos molhes, junto à embocadura do rio Douro.	112
Figura 5.76- Elevação da superfície livre para um caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ na baixa-mar antes da construção dos molhes, junto à embocadura do rio Douro.	113
Figura 5.77- Profundidade da água na embocadura para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ em situação de preia-mar antes da construção dos molhes.	114
Figura 5.78- Profundidade da água na embocadura para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ em situação de baixa-mar antes da construção dos molhes.	114
Figura 5.79- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ no estuário inferior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	115
Figura 5.80- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ no estuário médio após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	116
Figura 5.81- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ no estuário superior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	116
Figura 5.82- Elevação da superfície livre para um caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ na preia-mar após a construção dos molhes, junto à embocadura do rio Douro.	117
Figura 5.83- Profundidade da água na embocadura para o caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ em situação de preia-mar após a construção dos molhes.	117
Figura 5.84- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 20000 m ³ s ⁻¹ antes e após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	118
Figura 5.85- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ no estuário inferior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	119
Figura 5.86- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ no estuário médio antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	119
Figura 5.87- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ no estuário superior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	120
Figura 5.88- Elevação da superfície livre na embocadura para um caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ antes da construção dos molhes, em preia-mar.....	120
Figura 5.89- Profundidade junto à embocadura para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ , em preia-mar e antes da construção dos molhes.	121
Figura 5.90- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ no estuário inferior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.....	122

Figura 5.91- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ no estuário médio após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	122
Figura 5.92- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ no estuário superior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	123
Figura 5.93- Elevação da superfície livre na embocadura para um caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ após a construção dos molhes, em preia-mar.	123
Figura 5.94- Profundidade junto à embocadura para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ , em preia-mar e após a construção dos molhes.	124
Figura 5.95- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 23000 m ³ s ⁻¹ antes e após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	125
Figura 5.96- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ no estuário inferior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	125
Figura 5.97- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ no estuário médio antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	126
Figura 5.98- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ no estuário superior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	126
Figura 5.99- Elevação da superfície livre na embocadura para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ antes da construção dos molhes, em preia-mar.	127
Figura 5.100- Profundidade junto à embocadura para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ , em preia-mar e antes da construção dos molhes.	127
Figura 5.101- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ no estuário inferior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	128
Figura 5.102- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ no estuário médio após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	129
Figura 5.103- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ no estuário superior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	129
Figura 5.104- Elevação da superfície livre na embocadura para um caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ após a construção dos molhes, em preia-mar.	130
Figura 5.105- Profundidade junto à embocadura para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ , em preia-mar e após a construção dos molhes.	130
Figura 5.106- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de 26000 m ³ s ⁻¹ antes e após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	131
Figura 5.107- Perfil longitudinal espacial da elevação da superfície livre antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	132
Figura 5.108- Elevação da superfície livre no estuário na preia-mar para um caudal de 1000 m ³ s ⁻¹	132
Figura 5.109- Elevação da superfície livre no caso da baixa-mar antes da construção dos molhes. .	133
Figura 5.110- Profundidade na zona da restinga em baixa-mar, antes da construção dos molhes. .	133
Figura 5.111- Profundidade na zona da restinga em preia-mar, antes da construção dos molhes. ..	134

Figura 5.112- Perfil longitudinal espacial da elevação da superfície livre após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.	135
Figura 5.113- Elevação da superfície livre no estuário após a construção dos molhes, na preia-mar para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	135
Figura 5.114- Elevação da superfície livre no estuário após a construção dos molhes, na baixa-mar para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$	136
Figura 5.115- Profundidade na zona da restinga em preia-mar, após a construção dos molhes.	136
Figura 5.116- Profundidade na zona da restinga em baixa-mar, após a construção dos molhes.	137
Figura 5.117- Perfis longitudinais espaciais da baixa-mar e preia-mar, antes e após a construção dos molhes.	138

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Afluentes do rio Douro e a localização da sua foz.....	7
Quadro 2.2- Aproveitamentos hidroelétricos do Douro português e a sua localização.	7
Quadro 2.3- Capacidades úteis de algumas barragens do Sistema Douro e do Sistema Cávado- Rabagão-Homem (Fonte: EDP).	9
Quadro 2.4- Cotas atingidas pela água em algumas das cheias no estuário do Douro (Fonte: Dias, sem data).....	28
Quadro 3.1- Condições-fronteira para cada um dos parâmetros.	38
Quadro 4.1- Coordenadas dos pontos de medição.	47
Quadro 4.2- Dias para os quais foi feita a validação da corrente e os pontos correspondentes.	55
Quadro 5.1- Distância à embocadura e cota (NMA) dos locais com maior suscetibilidade à ação das cheias	65
Quadro 5.2- Características das cheias simuladas no Telemac 2D. (BM-Baixa-mar PM-Preia-mar)....	69
Quadro 5.3- Cotas atingidas pela água na cheia de 1962 na simulação da baixa-mar e da preia-mar antes da construção dos molhes.....	75
Quadro 5.4- Cotas atingidas pela água de 1962 na simulação da baixa-mar e da preia-mar na presença dos molhes	81
Quadro 5.5- Cotas atingidas pela água na cheia de 1966 na simulação da baixa-mar e da preia-mar antes da construção dos molhes.....	84
Quadro 5.6- Cotas atingidas pela água na cheia de 1966 na preia-mar e na baixa-mar, na presença de molhes	87
Quadro 5.7- Cotas atingidas pela água na cheia de 1979 na simulação da baixa-mar e da preia-mar antes da construção dos molhes.....	92
Quadro 5.8- Cotas atingidas pela água na cheia de 1979 na simulação de baixa-mar e da preia-mar após a construção dos molhes.....	95
Quadro 5.9- Cotas atingidas pela água na cheia de 1996 na simulação da baixa-mar e da preia-mar antes da construção dos molhes.....	98
Quadro 5.10- Cotas atingidas pela água na cheia de 1996 na simulação da preia-mar após a construção dos molhes	101
Quadro 5.11- Cotas atingidas pela água na cheia de 2001 nas simulações da preia-mar e baixa-mar antes da construção dos molhes.....	105
Quadro 5.12- Cotas atingidas pela água na cheia de 2001 nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.....	109
Quadro 5.13- Simulações para diferentes caudais impostos em situação de preia-mar e baixa-mar	110
Quadro 5.14- Cotas atingidas pela água para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar antes da construção dos molhes.	115
Quadro 5.15- Cotas atingidas pela água para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.	118

Quadro 5.16- Cotas atingidas pela superfície livre na preia-mar e na baixa-mar para uma cheia com um caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes da construção dos molhes.	121
Quadro 5.17- Cotas atingidas pela água para o caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.	124
Quadro 5.18- Cotas atingidas pela superfície livre na preia-mar e na baixa-mar para uma cheia com um caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes da construção dos molhes.	128
Quadro 5.19- Cotas atingidas pela água para o caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.	131
Quadro 5.20- Cotas atingidas pela superfície livre na preia-mar e na baixa-mar para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes da construção dos molhes.	134
Quadro 5.21- Cotas atingidas pela água para o caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.	137

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

- $\hat{n}$ - versor perpendicular à fronteira e dirigido para o exterior.
- A- área da seção transversal
- C, C_f -coeficiente de Chézy
- d_f - profundidade de medição da velocidade da corrente no fundo
- d_m - profundidade de medição da velocidade da corrente a meia água
- f - fração de água doce
- Fm - número de Froude densimétrico
- g - aceleração gravítica
- h - profundidade
- K - coeficiente de Strickler
- k_s - rugosidade do fundo
- n - número global do ponto da fronteira
- P - volume do prisma de maré
- pH - indicador de acidez ou basicidade
- R - caudal descarregado
- R_T - volume de água doce durante um ciclo de maré
- S - salinidade em qualquer parte do estuário
- S_0 - salinidade do oceano
- S_h - termo de fonte ou dissipação de massa
- S_T - termo de fonte ou de dissipação na equação de conservação do traçador
- S_x, S_y - termos de fonte ou dissipação nas equações dinâmicas
- T - período de onda
- t - tempo
- T - traçador ativo
- u, v - médias na coluna de água das componentes horizontais da velocidade
- u_f - média transversal da média vertical da velocidade média
- U_s, U_m e U_f - velocidades da corrente na superfície na superfície, meia água e fundo
- V - volume total
- V_f - volume de água doce
- x, y - coordenadas espaciais horizontais
- Z - Elevação da superfície livre

ν , ν_T - coeficientes de difusão turbulenta da velocidade e dos traçadores, respetivamente

$\Delta\rho$ - Diferença de densidade entre a superfície e o fundo

λ - latitude média da área que se está a modelar

ρ - Densidade da água

ω - velocidade de rotação da Terra

2DH- Duas Dimensões Horizontais

APDL- Administração dos Portos do Douro e Leixões, S.A

CIIMAR- Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental

DEM- Modelo de Elevação do Terreno

DGPS- Sistema de Posicionamento Global em modo diferencial

EDP- Energias de Portugal

GEBCO- General Bathymetric Chart of the Oceans

LNHE- Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

Ne- rácio entre a descarga de caudal e o caudal da maré

NMA- Nível Médio da Água do Mar

NME- Nível Mínimo de Exploração

NO- Noroeste

NPA- Nível de Pleno Armazenamento

SE- Sudeste

UTC- Tempo Universal Coordenado

WGS84- World Geodetic System 1984

ZH- Zero Hidrográfico

Eq. - equação

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA

A presente dissertação foi realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, especialização em Hidráulica, e tem como tema central a modelação hidrodinâmica do estuário do Douro com especial foco nos cenários de cheia e na influência dos novos molhes. O trabalho realizado tem vindo a ser desenvolvido ao longo de um semestre, tendo início no dia 15 de Fevereiro e terminado no dia 22 de Junho de 2016.

Os estuários são corpos aquáticos costeiros em que ocorre a transição entre a água doce proveniente de um ou vários rios e a água do mar. Estão então sujeitos à influência de parâmetros meteo-oceanográficos e geomórficos, como o vento, a precipitação, a maré, as ondas, as correntes costeiras e estuarinas, os caudais fluviais e a própria configuração do estuário em termos de batimetria e configuração da margem.

Os estuários típicos podem ser divididos em três regiões: a zona mais a montante em que a influência fluvial é dominante e a água é doce, a zona intermédia em que ocorre a mistura entre a água doce e a água salgada, sendo essa água denominada salobra e a zona mais a jusante onde o estuário já se encontra em contacto com o mar aberto e a água é salgada.

Tanto o rio como o mar são os principais fornecedores de nutrientes e de sedimentos ao estuário. No caso dos sedimentos, a localização da sua deposição e o tipo de sedimento que se pode encontrar depende do regime dominante (fluvial ou marinho). Existem casos em que a sedimentação é tão grande que se cria mesmo uma barreira periódica entre o estuário e o mar que pode chegar a fechar-se quando ocorrem baixos regimes de caudais fluviais, impedindo o intercâmbio de água entre os dois meios.

O facto de os estuários resultarem da mistura da água doce com a água salgada torna-os únicos ao nível da fauna e da flora pois nem todas as espécies conseguem resistir a ambientes que sofrem variações tão grandes de salinidade. Os seres vivos que conseguem suportar estas variações são chamados de eurialinos. Os estuários são locais muito procurados por estas espécies para alimentação, refúgio e reprodução. Além disto, os estuários são dos ecossistemas mais produtivos em todo o mundo, devido à sua elevada taxa de conversão da energia solar em biomassa vegetal.

No entanto, os estuários não são apelativos apenas para a fauna e a flora. Muitas cidades estão historicamente localizadas nas proximidades das zonas estuarinas devido à sua situação privilegiada em termos de aportes pesqueiros, proteção de embarcações ou transporte fluvial-marítimo entre outras. O desenvolvimento urbano na costa junto a estes ecossistemas apresenta vantagens não só esteticamente mas também porque facilita a prática de atividades recreativas aquáticas, da pesca e do comércio, pois na maior parte dos estuários existe um canal de navegação cujo objetivo é desenvolver o comércio e o turismo.

Ora, verifica-se que as ações antropogénicas afetam a estabilidade física e ambiental dos estuários. A extração controlada ou incontrolada de inertes e a construção de quebra-mares ou medidas de proteção

face a ondas e/ou tempestades procedentes do mar podem alterar os padrões principais de circulação. Isto produz alterações nas áreas de erosão e acreção dos sedimentos e, portanto, alterações na configuração do estuário. Para além disso, nestes locais podem ser descarregadas águas residuais, tratadas ou não. A contaminação afeta a qualidade da água e a diversidade e quantidade de espécies nestes ambientes costeiros.

A ocupação massiva das margens dos estuários também apresenta as suas desvantagens. Nos meses de Inverno tendem a ocorrer cheias. Esse aumento do caudal é responsável pelo extravase do leito normal para os terrenos vizinhos, causando inundações. Quando a ocupação antropogénica se encontra nesses terrenos vizinhos as inundações são responsáveis por imensos estragos a nível económico e de património, além de colocarem em risco a vida da população.

É portanto crucial conhecer a hidrodinâmica das zonas estuarinas para prever o efeito de alterações antropogénicas e fazer planos de prevenção e de evacuação em casos de cheia para se evitar ao máximo os possíveis danos colaterais. Para isso é necessário recorrer à constante monitorização do meio para se poder prever atempadamente este tipo de eventos extremos. As técnicas de modelação numérica também devem ser utilizadas pois através da simulação de diferentes cenários é possível caracterizar completamente a área estuarina em termos da sua hidrodinâmica e de prever os locais que virão a ser atingidos no caso de eventos extremos como as cheias.

1.2 ÂMBITO E OBJETIVOS

O caso de estudo desta dissertação é o estuário do Douro. É um estuário com 21,6 km de comprimento cujo limite a montante se encontra marcado pela barragem de Crestuma-Lever, sendo consequentemente até aí que a influência marinha se propaga.

Na embocadura encontra-se a restinga do Cabedelo, um banco arenoso formado pela deposição de sedimentos provenientes quer da deriva litoral quer do rio. As restingas são estruturas extremamente dinâmicas, que sofrem erosão, acreção e perdas ou ganhos de área e volume devido à ação de vários fenómenos (agitação marítima, efeito dos ventos e caudais fluviais). Junto à restinga do Cabedelo encontra-se a Baía de São Paio onde fica localizada a Reserva Natural Local do Estuário do Douro cujos objetivos são a preservação da paisagem e a proteção do habitat das aves.

Para caudais da ordem dos $10000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a restinga do Cabedelo costumava ficar completamente ou parcialmente destruída, tornando a ganhar forma com o tempo. No entanto, a restinga ganhou a tendência de ir recuando para o interior do estuário, devido a fenómenos de extração de inertes, dragagens e escassez de fornecimento de sedimentos devido à construção das barragens, deixando a margem norte, especialmente, suscetível à agitação marítima.

O término da construção dos molhes em 2008 provocou a alteração da estrutura da restinga, produzindo um aumento da sua área e do seu volume, sendo que agora, em caso de cheias extremas, é pouco provável que a restinga rompa ou seja galgada, podendo produzir efeitos mais prejudiciais nas margens do estuário. Os molhes foram construídos para garantir a segurança do canal de navegação, que em situações de tempestade marítima apresentava enormes riscos para as viagens das embarcações. Este canal, frequentemente assoreado por sedimentos provenientes do mar, da restinga e do rio, foi protegido mediante a construção de um molhe na margem norte, cujo objetivo era impedir que a agitação marítima se fizesse sentir no canal, criando assim condições de segurança para as embarcações, e de um quebramar destacado, ligado à restinga através de uma obra de reforço de cota variável, cujo objetivo era fixar a posição da restinga e aumentar o seu assoreamento.

Tendo em conta que o estuário do Douro se encontra entre as cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia e as suas margens se encontram fortemente urbanizadas, especialmente nos últimos 8 km, é essencial proteger as suas margens. Assim, o objetivo desta dissertação consiste na análise da hidrodinâmica do estuário do Douro e na simulação de diferentes cenários de cheia antes e após a construção do molhe e do quebramar destacado de forma a avaliar se a sua construção realmente correspondeu às funções esperadas. Para tal escolheu-se o modelo numérico OpenTelemac, mais concretamente o seu módulo de modelação de superfície livre a duas dimensões, Telemac 2D, de forma a caracterizar o estuário do Douro e o seu comportamento em eventos extremos de cheias. Será analisado o possível galgamento da restinga de forma a compreender se realmente esta estrutura tem ficado mais forte após a construção do quebramar destacado e serão comparadas as cotas atingidas pela superfície livre no estuário com as cotas ao longo das margens, ficando-se assim com uma noção das zonas que poderão encontrar-se em risco.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é constituída por 6 capítulos, sendo este o primeiro funcionando como um capítulo de introdução à problemática estudada e aos objetivos pretendidos.

O segundo capítulo expõe o estado da arte sobre o estuário do Douro onde é feita a caracterização da bacia hidrográfica do rio Douro e a caracterização do estuário tendo em conta a restinga e as obras feitas para a sua estabilização, a dinâmica do estuário a nível de salinidade, estratificação e tempo de residência, a dinâmica sedimentar, a qualidade da água e as cheias.

O terceiro capítulo abrange a caracterização do modelo numérico a nível das equações resolvidas, dos ficheiros de entrada e de saída, das diferentes malhas utilizadas, das condições-fronteira e dos principais parâmetros físicos definidos.

No quarto capítulo encontram-se descritas a calibração e a validação feitas, incluindo os pontos em que se focou a calibração, tal como os resultados da validação da elevação da superfície livre e da corrente.

O quinto capítulo corresponde ao capítulo de análise de resultados onde são caracterizadas as simulações feitas, em termos de caudal e de nível de maré, e se apresentam os resultados obtidos através do modelo numérico, tal como é apresentada uma pequena discussão sobre esses mesmos resultados no fim do capítulo.

Finalmente, no sexto e último capítulo irão ser expostas as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e as propostas de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARATERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOURO

O rio Douro nasce em Espanha, na província de Sória, mais concretamente na serra de Urbión, a cerca de 1700 metros de altitude, e percorre 927 km até chegar à sua foz, entre as cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia, sendo 597 km desse percurso percorridos em Espanha, 122 km na fronteira e os últimos 208 km em solo portugueses. O seu comprimento faz dele o terceiro rio mais extenso na Península Ibérica.

A bacia hidrográfica possui uma área total de 97713 km², pertencendo 18854 km² a Portugal (19%) e 78859 km² a Espanha (81%). Esta área faz da bacia hidrográfica do Douro a maior da Península Ibérica (APA, 2015). A bacia hidrográfica apresenta a forma de um losango e encontra-se representada na Figura 2.1.

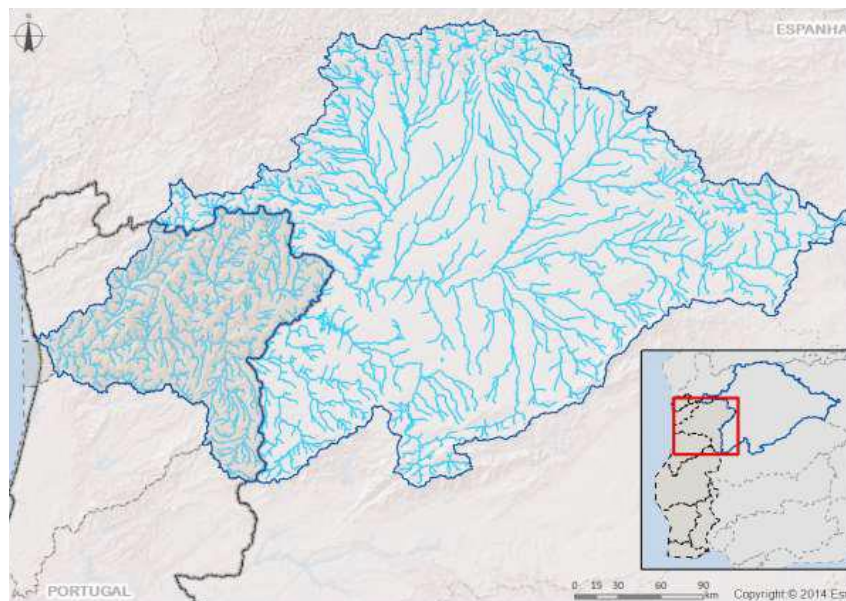


Figura 2.1- Bacia hidrográfica do rio Douro (Fonte: APA, 2015).

Em planta, o rio Douro apresenta alguma sinuosidade, sendo considerado um rio meandrizado. Normalmente esta sinuosidade está relacionada com assimetrias na seção transversal, uma vez que na zona das curvas a profundidade no lado exterior é superior à profundidade no lado interior. Isto acontece porque na margem côncava ocorre erosão e os sedimentos resultantes desse fenómeno depositam-se na margem convexa de seguida. O facto de um rio apresentar mais ou menos meandros está diretamente relacionado com a resistência que as margens oferecem a ser erodidas. Nesta circunstância, os rios são caracterizados por uma sucessão de rápidos e fundões. As características dos rios meandrizados

encontram-se representadas nas Figuras 2.2 e 2.3. A Figura 2.3 permite visualizar os meandros do rio Douro junto à barragem de Miranda.

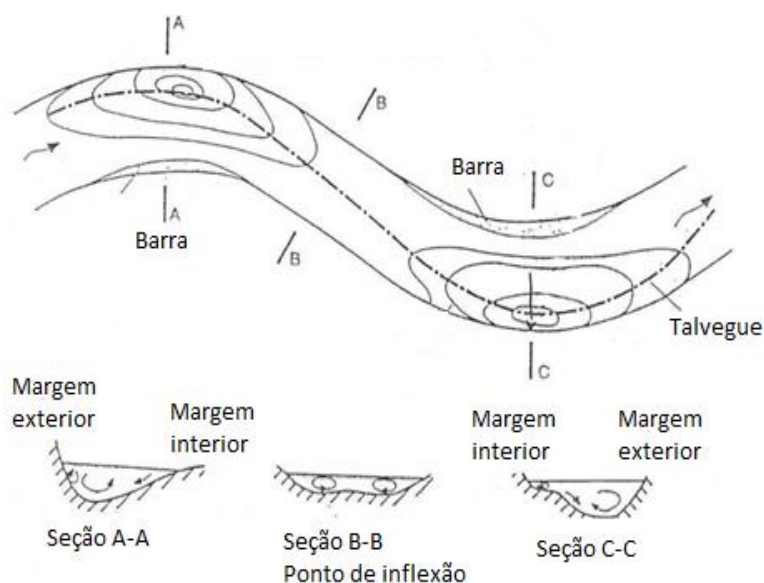


Figura 2.2- Planta de um meandro e seções transversais correspondentes aos pontos A, B e C.

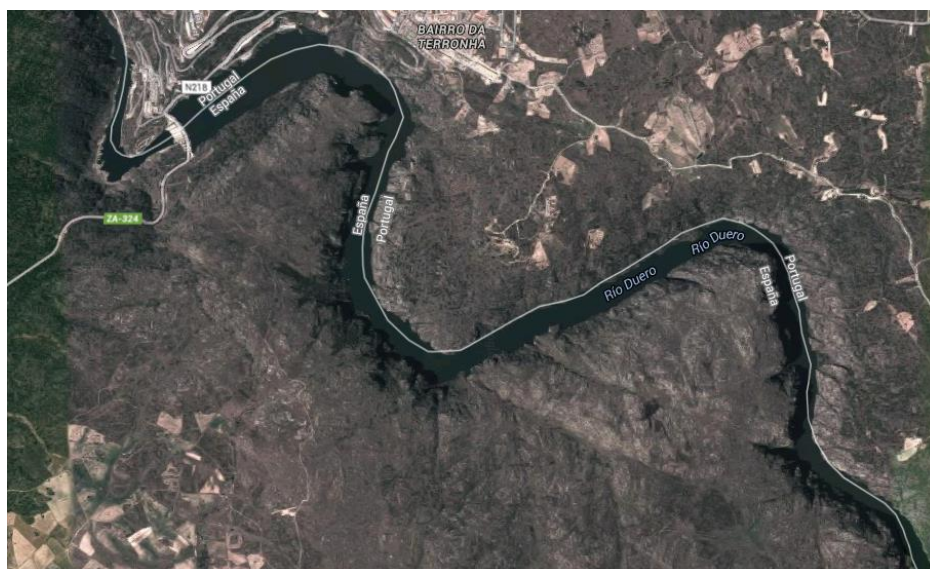


Figura 2.3- Meandros do Douro junto à barragem de Miranda (Fonte: Google Maps).

Ao longo do leito principal do rio desaguam vários cursos de água, uns na zona espanhola, outros ao longo da fronteira, conhecida como Douro Internacional, e outros já na parte portuguesa. No Quadro 2.1 encontram-se alguns desses afluentes principais e o concelho português ou a província espanhola onde desaguam.

Quadro 2.1- Afluentes do rio Douro e a localização da sua foz.

Rio	Foz	País
Esgueva	Valladolid	Espanha
Pisuerga	Valladolid	
Valderaduey	Zamora	
Esla	Zamora	
Riaza	Burgos	
Duraton	Valladolid	
Cega	Valladolid	
Adaja	Valladolid	
Guarena	Zamora	
Tormes	Zamora	Douro Internacional
Águeda	Figueira de Castelo Rodrigo	
Sabor	Torre de Moncorvo	
Tua	Carrazeda de Ansiães	Portugal
Corgo	Peso da Régua	
Tâmega	Penafiel	
Sousa	Mealhada	
Côa	Vila Nova de Foz Côa	
Távora	Tabuaço	
Paiva	Castelo de Paiva	

O interesse na água como força motriz surgiu por volta do século XIX a nível mundial. Em Portugal começou por ser utilizada em situações pontuais (alimentação de pequenas indústrias e iluminação pública) evoluindo depois para a construção de aproveitamentos de maior magnitude, tendo aqui especial destaque os aproveitamentos hidroelétricos construídos ao longo do curso do rio Douro em território português (ver Quadro 2.2). Os três primeiros aproveitamentos apesar de serem portugueses encontram-se na fronteira entre Portugal e Espanha dizendo-se que pertencem ao Douro Internacional.

Quadro 2.2- Aproveitamentos hidroelétricos do Douro português e a sua localização.

Aproveitamento Hidroelétrico	Concelho	Localização
Miranda	Miranda do Douro	Douro Internacional
Picote	Miranda do Douro	
Bemposta	Mogadouro	
Pocinho	Vila Nova de Foz Côa	Portugal
Valeira	São João da Pesqueira	
Régua	Peso da Régua	
Carrapatelo	Marco de Canaveses	
Crestuma-Lever	Vila Nova de Gaia e Gondomar	

É de frisar que em Portugal a construção destas obras hidráulicas não se destina unicamente à produção de energia, servindo em alguns casos para irrigação e para abastecimento de alguns locais.

O canal do Douro era a única forma de comunicação e de comércio existente até à conclusão da linha do caminho-de-ferro em 1887. No entanto, como o rio apresenta um declive bastante elevado, muita sinuosidade, com bastante rápidos e fundões, rochas salientes e caudais violentos o percurso era perigoso, tendo sido construídos os barcos rabelo de forma a ser possível fazer a viagem em segurança.

Com o desenvolvimento das comunicações ferroviárias e rodoviárias a utilização do rio regrediu brutalmente. Foi apenas com a construção dos aproveitamentos hidroelétricos do Douro Nacional e consequentemente com a existência das suas albufeiras que se criaram as condições necessárias para efetuar as viagens de barco. Nas barragens foram incluídas eclusas de navegação (ver Figura 2.4), que permitem às embarcações vencer os desníveis provocados pela construção das barragens.

Atualmente a via navegável existente possui cerca de 200 km de comprimento fazendo a ligação entre a barragem de Crestuma e a barragem do Pocinho.



Figura 2.4- Barragem da Régua com a sua eclusa de navegação (Fonte: EDP).

De forma a aumentar a potência disponível nas horas de ponta e recuperar energia que de outra forma seria perdida por descarregamentos, têm-se feito reforços de potência em alguns dos aproveitamentos. Os dois tipos principais de reforço de potência são reforço da capacidade de turbinamento e instalação de grupos turbina-bomba (grupos reversíveis).

No caso da bacia do Douro apenas se reforça a capacidade de turbinamento. Como a maioria das barragens se encontra em vales bastante encaixados, a capacidade de armazenamento é bastante limitada, não compensando a colocação de um grupo reversível. Outro motivo deve-se ao facto do rio Douro ser bastante caudaloso o que obriga a descargas frequentes. Desta forma, não seria financeiramente vantajoso colocar um grupo reversível visto que as barragens do Douro trabalham a fio-de-água.

O Quadro 2.3 permite fazer a comparação entre a capacidade útil dos aproveitamentos do Sistema Douro (Miranda, Pocinho, Valeira e Crestuma) e do Sistema Cávado-Rabagão-Homem (Caniçada e Alto Rabagão) em que as albufeiras têm a capacidade de regularização. Comprova-se que no Douro as

capacidades úteis são substancialmente inferiores, sendo a capacidade útil a diferença de cota entre o nível mínimo de exploração (NME) e o nível de pleno armazenamento (NPA).

Quadro 2.3- Capacidades úteis de algumas barragens do Sistema Douro e do Sistema Cávado-Rabagão-Homem (Fonte: EDP).

Barragem	Capacidade útil (hm ³)
Miranda	6.4
Pocinho	12
Valeira	13.04
Crestuma	22.5
Caniçada	144.4
Alto Rabagão	550.1

2.2 CARATERIZAÇÃO DO ESTUÁRIO DO DOURO

2.2.1 DEFINIÇÃO DE ESTUÁRIO

A definição de estuário sempre se revelou bastante difícil. Apesar de ao longo dos anos terem sido propostas várias definições, todas parecem incompletas ou apresentam incongruências.

Acima de tudo os estuários são ecossistemas muito ricos a nível biológico devido à sua água ser salobra. São também zonas onde as pessoas têm tendência a se fixar e a desenvolver as suas atividades.

Uma das definições mais conhecidas é a de Pritchard (1967) referido em Potter et al. (2010), onde é sugerido que um estuário é um corpo de água costeiro semifechado com uma ligação ao mar e onde ocorre a diluição da água do mar com água doce proveniente da drenagem terrestre. Esta definição parece correta relativamente a estuários do hemisfério Norte, mas falha na caracterização de alguns estuários nas regiões australianas e sul-africanas em que nos períodos de seca se forma um banco de areia que separa por completo o estuário do mar e em que a elevada evaporação o torna hipersalino.

Após alguns estudos no hemisfério sul foi proposta outra definição por Day (1980,1981) referido em Potter et al. (2010), que pretende corrigir a de Pritchard (1967) e que defende que um estuário é um corpo de água costeiro que pode estar permanentemente ou periodicamente aberto ao mar e onde existe uma variação de salinidade devido à mistura da água do mar com água doce. Esta última definição já considera que o estuário pode estar ou não ligado ao mar mas não tem em consideração as situações em que os estuários se tornam hipersalinos nem distingue a proveniência da água doce (descarga fluvial, precipitação ou escoamento localizado).

A Figura 2.5 (a) representa um estuário macrotidal no hemisfério Norte enquanto as Figuras 2.5 (b-e) representam estuários do sudoeste australiano. O que se verifica é que na maior parte dos estuários estudados na África e na Austrália, a desembocadura é muito pequena o que facilita o seu fecho através da deposição de sedimentos e os estuários são muito largos e pouco profundos o que auxilia a evaporação em períodos de seca ou de temperaturas elevadas. O facto de a maior parte destes estuários se encontrarem junto a costas microtidais faz com que a quantidade de água transferida entre o oceano e o estuário seja muito pequena. Surgiram portanto dúvidas acerca de estes sistemas serem considerados estuários ou não, até porque em alguns casos o período de seca era tão grande ou a salinidade se tornava tão elevada que o local se tornava inóspito. No entanto, estudos em estuários na América Central e do Sul e no Mediterrâneo comprovaram que realmente há estuários que ficam completamente separados do

oceano e se tornam hipersalinos, portanto continuou-se a considerar todos estes sistemas como estuários (Potter et al., 2010).

Surge outra definição que parece ainda mais completa, proposta por Potter et al. (2010), que considera que o estuário é um corpo de água costeiro semifechado que pode estar ou não ligado ao mar, recebendo periodicamente descargas de um rio, o que torna a sua salinidade inferior ao valor da água do mar e variável temporalmente ao longo da sua extensão, mas que em certos casos pode tornar-se hipersalino quando a evaporação é elevada e o caudal do rio e a influência das marés são desprezáveis.

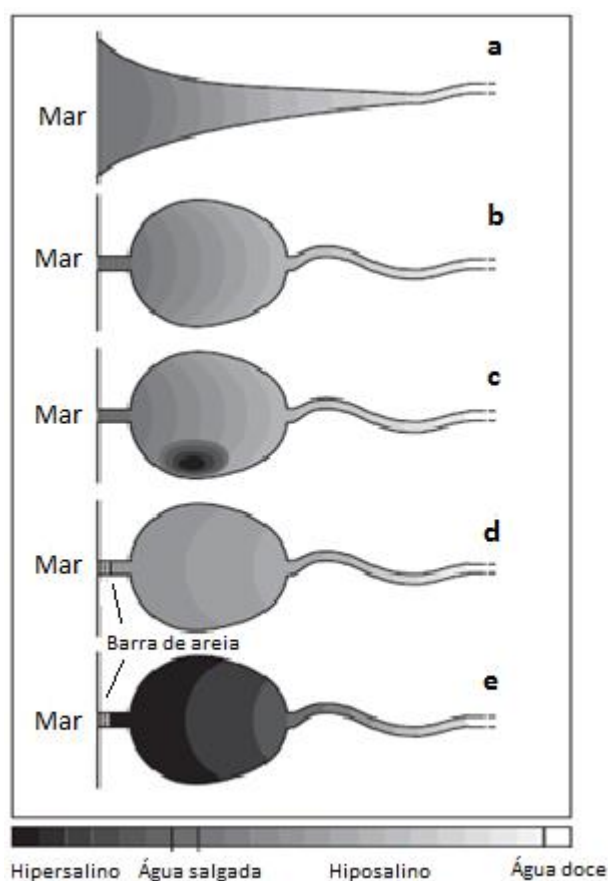


Figura 2.5- Relação entre a salinidade, forma e abertura de alguns tipos de estuário.

Apesar de ser interessante conhecer as características dos estuários africanos e australianos é de maior interesse conseguir definir estuários mais semelhantes ao Douro, visto ser esse o caso de estudo.

Dionne (1963), referido em Perillo (1995), propôs uma definição em que sugere que um estuário é uma reentrância de mar num vale fluvial, estendendo-se até ao limite de propagação da maré dinâmica que pode ser dividido em três sectores (Figura 2.6): o baixo estuário ou estuário marinho que se encontra em contacto com o mar; o estuário intermédio que se encontra sujeito a uma forte mistura da água doce e da água salgada e o estuário superior ou fluvial caracterizado por água doce mas que sofre a ação da maré (Perillo, 1995). Esta definição já é mais parecida com a dinâmica observada no Douro, que também pode ser dividido em três segmentos de acordo com a salinidade. Esse assunto será mais aprofundado no ponto 2.2.2.2.



Figura 2.6- Descrição das 3 partes do estuário segundo Dionne (1963) (Fonte: Perillo, 1995).

Por fim, talvez a definição mais completa seja a proposta por Perillo (1995) que defende que um estuário é um corpo costeiro semifechado que se estende até ao limite efetivo da influência da maré, dentro do qual a água salgada entra através de uma ou mais ligações ao oceano ou de outros corpos costeiros salinos, que se encontra significativamente diluído com água doce proveniente da drenagem terrestre e que consegue sustentar espécies eurialinas durante uma parte ou durante toda a sua vida.

Esta definição é diferente da anterior porque sugere que a mistura entre a água doce e a água salgada pode ocorrer desde a entrada do estuário até ao ponto onde se fizer sentir a influência da maré. Além disso a definição tem em consideração uma parte biológica, sendo as espécies eurialinas espécies capazes de aguentar grandes variações de salinidade.

No entanto, visto que cada estuário possui características diferentes dos outros, é muito difícil encaixá-lo na totalidade de uma definição. A solução foi ir criando vários critérios para definir cada estuário de acordo com as suas características.

Os quatro critérios mais utilizados dizem respeito à morfologia, salinidade, padrões de circulação e amplitude de maré. No entanto, os estuários também podem ser classificados de acordo com critérios de qualidade de água ou estéticos (da Silva, 2000).

2.2.2 O ESTUÁRIO DO DOURO

A construção da barragem de Crestuma-Lever veio condicionar a extensão do estuário, limitando-a a 21,6 km. Anteriormente a esta construção a influência da maré fazia-se sentir aproximadamente até 35 km a montante da foz (Portela, 2008). O estuário sofreu portanto uma redução de 40% no seu comprimento.

O estuário pode ser dividido em três segmentos (Figura 2.7) de acordo com a salinidade com base no estudo realizado por Vieira e Bordalo (2000): inferior, intermédio e superior. O estuário inferior prolonga-se até 3 km a partir da desembocadura com uma largura média de 645 m e uma profundidade média de 7,8 m. O estuário médio tem uma largura e profundidade médias de 271 e 10 m, respetivamente. Por último o estuário superior tem uma profundidade média de 7 m e uma largura média de 333 m. Como acabou de ser referido, a largura do estuário vai variando. Ao chegar ao estuário inferior ocorre um alargamento, atingindo o estuário a largura máxima de aproximadamente 1300 m. Já o local onde a largura é mínima é junto à ponte Luís I, a aproximadamente 6 km da foz.

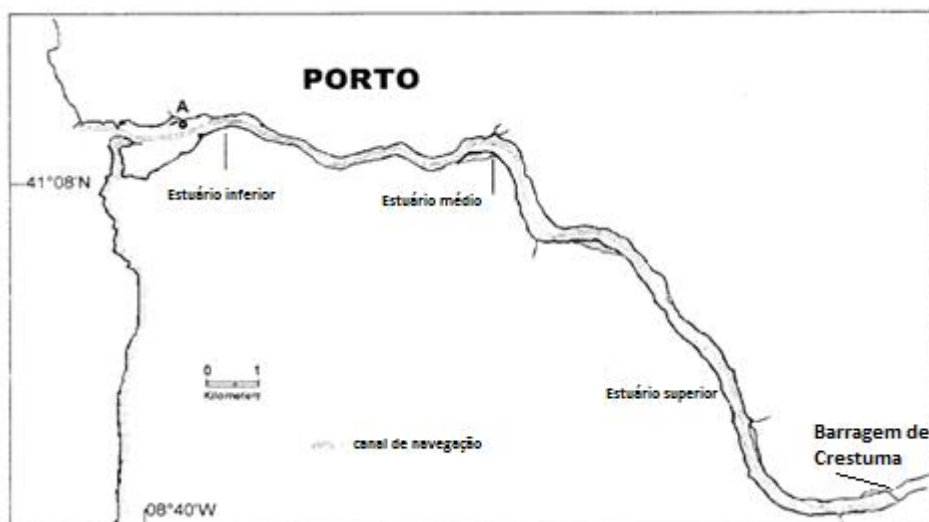


Figura 2.7- Representação dos 3 trechos em que se pode dividir o estuário (Fonte: Vieira e Bordalo, 2000).

Considerando os critérios expostos no ponto anterior para a definição dos estuários, quanto à morfologia o estuário do Douro será uma planície costeira, pois apresenta uma forma afunilada na aproximação à foz com o consequentemente aumento da sua secção transversal. O seu leito apresenta a forma de um V devido às suas margens serem muito íngremes. Finalmente, outra característica das planícies costeiras, e que é verificada no Douro, é notarem-se importantes zonas de sedimentação na secção transversal devido à erosão e acreção.

Relativamente à salinidade, o estuário pode ser considerado positivo, pois a precipitação e o escoamento superficial excedem a evaporação, fazendo com que o valor da salinidade seja sempre inferior ao valor da salinidade da água do mar (Dias, sem data).

2.2.2.1 A restinga do Cabedelo e a sua estabilização

A entrada do estuário encontra-se parcialmente obstruída por uma restinga de areia que após a construção dos molhes estabilizou a sua posição, concedendo segurança ao canal de navegação e servindo de abrigo à baía de São Paio.

Este corpo arenoso denominado Cabedelo está enraizado na margem esquerda do estuário sendo perpendicular ao seu eixo, tendo um comprimento médio de 800 m e uma largura média de 300 m, variando a sua área normalmente entre 220000 m² e 270000 m² e é constituído por sedimentos provenientes da bacia hidrográfica do Douro que se vão depositando ao chegar ao estuário devido à ação da maré e do rio (Santos et al., 2010) e por areias provenientes da deriva litoral. Apresenta um dinamismo muito elevado face a determinados fenómenos. Estes autores sugerem que as variações das características da restinga ocorrem sazonalmente de acordo com parâmetros naturais como é o caso da velocidade e direção do vento, dos caudais fluviais provenientes da barragem de Crestuma, da agitação marítima (considerando que toda a dinâmica oceânica é aqui englobada), a altura da maré e as cheias (Santos et al., 2010; Bastos et al., 2012). Além dos fenómenos naturais, as ações antropogénicas como é o caso da construção de estruturas de defesa costeira (como os quebramares), construção de barragens, extração de inertes e dragagens também têm influência nos processos de erosão/acreção da restinga devido à alteração na quantidade e tipo de sedimentos, alterações no fluxo do rio ou modificações nos padrões das correntes (Granja et al., 2011). A batimetria, que tem sofrido alterações nos últimos anos, também

afeta o seu processo de formação, pois é em águas pouco profundas que estes corpos arenosos se desenvolvem mais rapidamente (Teodoro et al., 2014).

O assoreamento no canal de navegação foi o responsável por alguns dos acidentes que aconteceram no Douro, pois criaram-se zonas com baixas profundidades para as embarcações passarem. Este assoreamento colocava também em risco a baía de São Paio, onde se encontra a Reserva Natural Local do Estuário do Douro, pois a profundidade, ao diminuir, colocava em risco a paisagem e o habitat das aves. Além do assoreamento, a intensa agitação marítima que se fazia sentir por vezes na embocadura do rio criava situações de perigo. De forma a resolver este problema recorriam-se frequentemente a dragagens (Veloso-Gomes et al., 2009) que se apresentavam como uma boa solução, mas claro, temporária, pois rapidamente o canal voltava a sofrer acreção. Como exemplo, aponta-se o período entre 1987 e 2001 em que o material dragado do estuário foi de aproximadamente $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ (Teodoro et al., 2014).

Quanto à extração de inertes, cujo destino na grande maioria dos casos é a construção civil, sabe-se que no ano de 1971 o volume extraído foi de cerca de 33700 m^3 e em 1973 o volume foi de cerca de 225000 m^3 . No entanto, existe muita extração ilegal de inertes não sendo possível conhecer na totalidade a extensão destes valores. (dos Santos, 2014).

A costa portuguesa pode ser considerada uma costa bastante energética observando-se com bastante frequência alturas significativas entre os 2 e os 3 m com períodos entre os 8 e os 12 s, que no Inverno em alturas de tempestade se podem transformar em alturas significativas de 8 m com períodos entre 16 e 18 s (dados obtidos pela boia ondógrafo de Leixões). (Teodoro et al., 2014). O caudal fluvial é controlado pela barragem de Crestuma e encontra-se dependente da procura de energia hidroelétrica havendo dias em que mais de $13000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ são descarregados (Azevedo et al., 2010). Os caudais encontram-se sujeitos a variações inter-anuais entre anos secos e anos húmidos. A variabilidade dos caudais ao longo de um ano vai de encontro ao esperado para esta latitude havendo caudais mais elevados no Inverno e caudais mais baixos no Verão de acordo com a precipitação que costuma ser superior nos meses entre Outubro e Maio e inferior entre Julho e Setembro (Gómez-Gesteira et al., 2011). Durante os meses de Verão verificam-se também fenómenos de ressurgência (Álvarez et al. 2008; deCastro et al. 2008). Todos estes fatores são responsáveis pelo enorme dinamismo da restinga.

Dados históricos corroboram a influência do caudal na dinâmica da restinga, pois antigamente para caudais superiores a $10000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ verificava-se a sua rotura ou destruição parcial (Bastos et al., 2012). Recentemente, após a construção dos molhes a restinga encontra-se mais robusta, não se conhecendo por completo o seu comportamento perante uma cheia histórica.

A título de exemplo surge a cheia de 1909 (ver Figura 2.8), em que para um caudal máximo de $16700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na Régua, a restinga sofreu alterações profundas, demorando aproximadamente um ano a recuperar a sua forma (dos Santos, 2014).

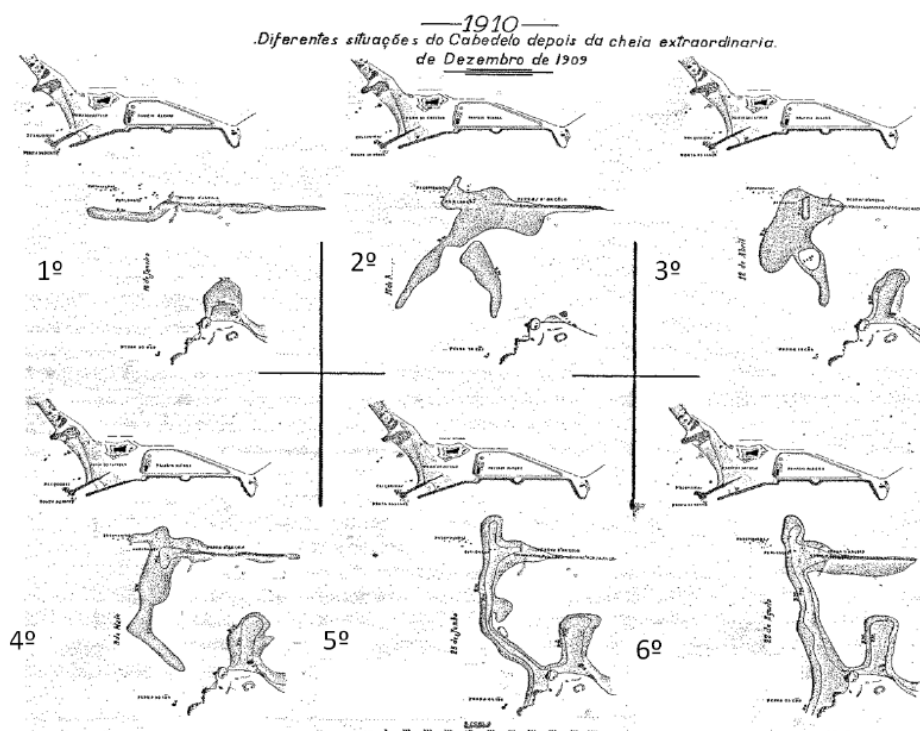


Figura 2.8- Alterações na morfologia da restinga após a cheia de 1909 (Fonte: dos Santos, 2014).

No exterior do estuário existe um banco de areia submerso cuja função conjuntamente com a restinga seria proteger as margens da agitação marítima, especialmente em casos de tempestade. No entanto, o recuo da restinga nas últimas décadas para o interior do estuário devido aos fenómenos referidos anteriormente deixou a margem direita completamente desprotegida e suscetível aos eventos meteorológicos (Bastos et al., 2012).

Com o objetivo de impedir o processo erosivo na restinga, proteger as margens e melhorar as condições do canal de navegação construíram-se nos séculos XIX e XXI várias obras principais de defesa costeira (ver Figura 2.9).

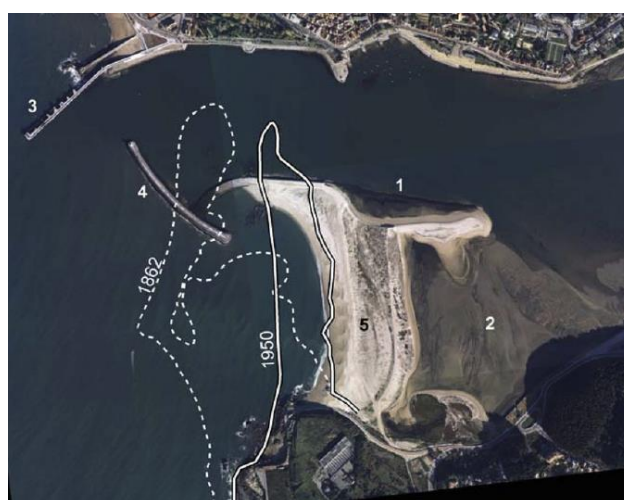


Figura 2.9- Evolução da restinga desde 1862. 1: Muro de Luís Gomes de Carvalho construído em 1820; 2: Baía de São Paio; 3: Molhe norte; 4: Quebramar destacado; 5: Estrada de acesso ao quebramar (Fonte: Bastos et al., 2012).

Em 1820 foi construído o muro de Luís Gomes de Carvalho com 600 m de comprimento com o objetivo de demarcar a separação entre a restinga e o canal de navegação (Santos et al., 2010). O molhe norte e o quebramar destacado foram construídos entre 2005 e 2008.

O molhe norte é uma estrutura enraizada, com paredes verticais que permite o acesso às pessoas, tendo sido assim construído com o objetivo de ser utilizado para atividades lúdicas. Tem 350 m de comprimento e fica orientado para sudoeste. É constituído por caixotões na zona mais profunda e por aduelas na menos profunda. Ambos se encontram solidarizados por uma superestrutura com cota de coroamento de +7 m (ZH). A sua construção decorreu entre 2005 e 2008 (Veloso-Gomes et al., 2009).

O quebramar destacado é um quebramar de taludes constituído por blocos cúbicos Antifer de betão de alta densidade, com núcleo de enrocamento e cota de coroamento de +6 m (ZH). Possui 450 m e o seu lado côncavo está a apontar para Leste. Foi construído entre 2005 e 2007 (Veloso-Gomes et al., 2009).

Além destas duas obras foi construída uma obra de reforço em enrocamento entre o quebramar destacado e a restinga com 460 m. Esta obra é perpendicular ao quebramar e a sua cota de coroamento é variável de forma a permitir o galgamento em caso de cheia além de mitigar o impacto visual (Veloso-Gomes et al., 2009).

O conhecimento das variações da restinga quer em termos de área, quer em termos de volume, é de extrema importância na medida em que aquelas condicionam o seu comportamento perante cheias ou tempestades. Isto é importante pois possibilita um maior controlo dos efeitos destes incidentes nas margens e nos bens que aí se encontram. Conhecer o caudal sólido que atinge a foz do rio é também importante visto que nos últimos anos a extensão que vai desde a embocadura do Douro até ao Cabo Mondego tem sofrido uma intensa erosão, em parte devido às atividades humanas que provocam a diminuição da quantidade de sedimentos, que são necessários para a alimentação das praias nessa zona (Veloso-Gomes et al., 2004).

Têm sido feitos inúmeros estudos com o objetivo de acompanhar as variações morfológicas da restinga, antes e depois da construção dos quebramares.

Na Figura 2.10 encontra-se uma foto tirada após a construção das duas obras com o pormenor dos blocos cúbicos utilizados no quebramar destacado e dos caixotões no molhe norte.



Figura 2.10- Embocadura do estuário do Douro com pormenores do quebramar destacado e do molhe Norte (Adaptado de Irmãos Cavaco S.A, 2016).

Bastos et al. (2012) fizeram um estudo da posição, forma e volume da restinga, desde 2001 até 2010. Nesse intervalo de tempo fizeram 33 levantamentos topográficos e 3 levantamentos apenas com o contorno da restinga. Estes levantamentos foram feitos com recurso ao Sistema de Posicionamento Global em modo diferencial (DGPS) que permite a criação de um modelo de elevação do terreno (DEM) a partir de perfis transversais e longitudinais obtidos nas medições. No início foi utilizado um sistema DGPS uni-antena transportado manualmente, depois utilizou-se um sistema DGPS multi-antena adaptado a um veículo tipo moto-quatro e por fim foi utilizado um sistema móvel equipado com duas antenas cinemáticas, equipamento de videogrametria e *data logger*.

Como já foi mencionado, a dinâmica da restinga depende do caudal do rio, da agitação marítima e das condições do vento. Valores máximos e extremos destes parâmetros foram relacionados com os fenómenos de acreção/erosão, variação da área e do volume, antes e após a construção dos quebramares. Em relação aos caudais, foram considerados os valores máximos dos caudais médios diários e o número de dias com caudais superiores a $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; quanto à energia das ondas foram considerados os valores máximos obtidos e o número de períodos de 3 h com valores acima de 200 kW m^{-1} ; por último foram considerados os valores máximos da energia do vento e o número de períodos de 6 h com valores acima de $2000 \text{ m}^3\text{s}^{-3}$.

A restinga foi dividida de acordo com 4 classes de cotas: 1-2 m, 2-4 m, 4-6 m, > 6 m, em relação ao zero hidrográfico além de ser dividida em quatro sectores, que se encontram representados nas Figuras 2.12 e 2.13 a tracejado.

Na Figura 2.11 encontram-se as alterações sofridas pela restinga no período entre campanhas. Apenas são evidenciadas as áreas que sofreram alterações de mais de 1 m de acreção ou de erosão.

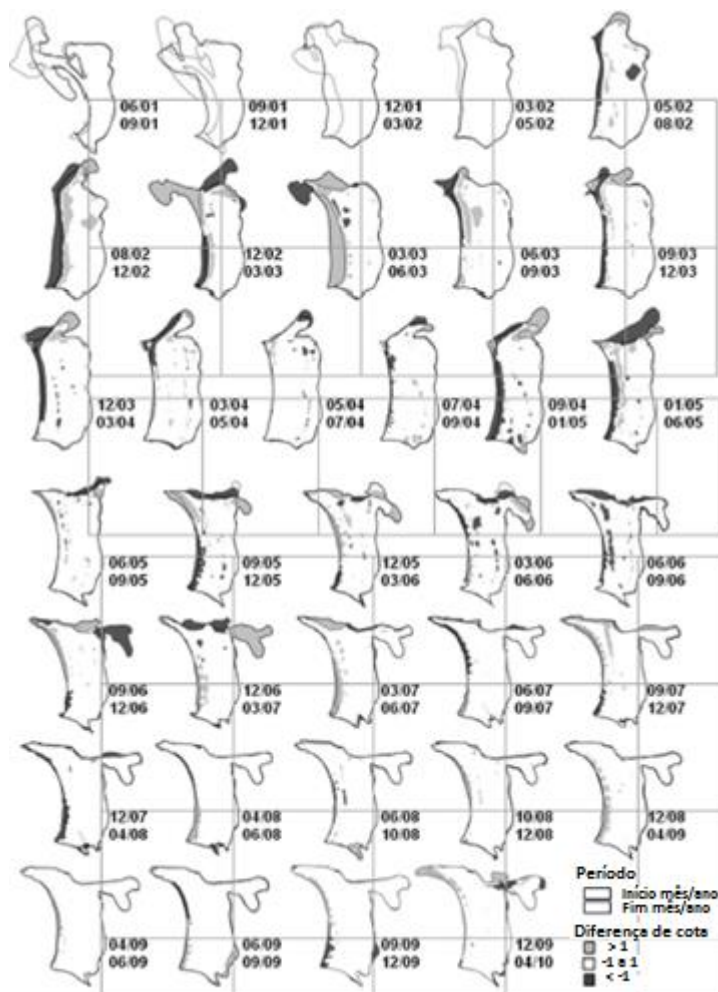


Figura 2.11-Alterações no contorno e altura da restinga entre as campanhas efetuadas (Fonte: Bastos et al., 2012).

Antes da construção do quebramar (ver Figura 2.12), o efeito dos caudais fluviais e do vento provocava erosão generalizada na restinga, sendo as ondas as únicas responsáveis pelo aumento da área e do volume entre as alturas 1-2 m (ZH).

A construção do quebramar destacado (ver Figura 2.13) fez com que a restinga fixasse a sua posição, adquirindo cada vez mais a forma de um T. Verifica-se que as maiores variações se dão ao nível da área e do volume.

No geral, toda a restinga parece agora menos suscetível a eventos extremos. A agitação marítima, o efeito do vento e os caudais descarregados parecem já não afetar a totalidade da restinga. No entanto, o sector sudeste parece estar mais vulnerável a estes fenómenos, colocando em perigo a zona da baía de São Paio. O formato em T com pequena extensão para norte parece não obstruir o canal de navegação, cumprindo o muro Luís Gomes de Carvalho o seu objetivo inicial. O único problema de a restinga estar a ficar fortalecida será criar uma barreira ao escoamento em caso de cheia e provocar inundações nas zonas adjacentes.

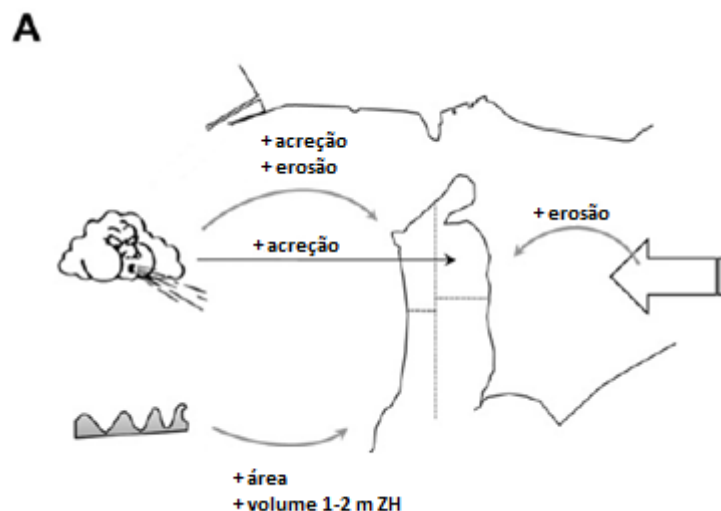


Figura 2.12- Efeito dos caudais, ondas e vento nos diferentes sectores da restinga (a tracejado) antes da construção do quebramar. As setas cinzentas destinam-se à totalidade da restinga e as pretas apenas ao setor indicado (Fonte: Bastos et al., 2012).

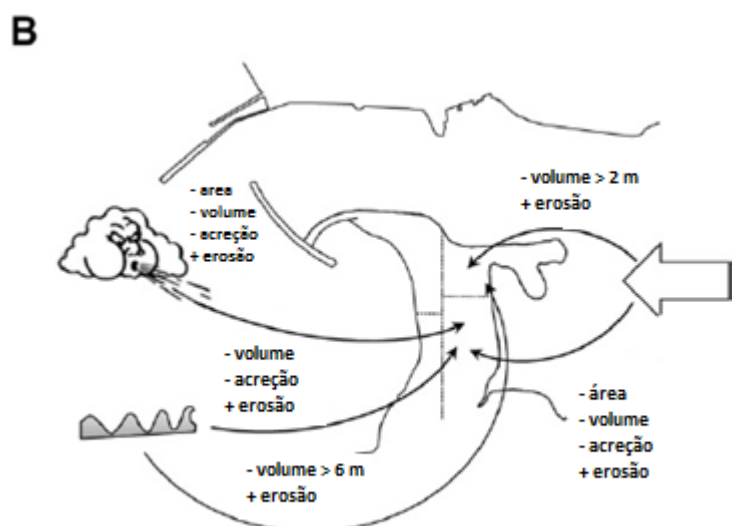


Figura 2.13- Efeito dos caudais, ondas e vento nos diferentes setores da restinga (a tracejado) após a construção do quebramar. As setas cinzentas destinam-se à totalidade da restinga e as pretas apenas ao setor indicado (Fonte: Bastos et al., 2012).

Como as técnicas DGPS exigem a recolha de informação *in situ*, Teodoro et al. (2011) fizeram um estudo sobre a extração da área do Cabedelo a partir de imagens do satélite IKONOS-2 através de técnicas de processamento de imagens.

2.2.2.2 Marés, salinidade, estratificação e tempo de residência

Uma boa gestão dos recursos hídricos exige um bom conhecimento acerca do funcionamento desses mesmos recursos. O estuário do Douro é considerado ser um estuário temperado, com uma temperatura

média de 14,4 °C (Bastos et al., 2012), e mesotidal apesar da intensa construção de barragens ao longo do seu curso e do dos seus afluentes (Vieira e Bordalo, 2000). Um estuário ser mesotidal significa que a amplitude de maré observada é intermédia, com valores entre os 2 m a 4 m (Dias, sem data).

As marés na costa portuguesa apresentam um carácter semidiurno. O prisma de maré, que corresponde ao volume de água trocado entre o estuário do Douro e o oceano, em cada ciclo de maré é cerca de $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ para a maré viva e $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ para a maré morta, sendo estes valores pequenos, o que se deve à morfologia do estuário (Portela, 2008).

Existem dois tipos de marés: meteorológicas e astronómicas. As marés meteorológicas resultam de variações de pressão e do efeito do vento e as astronómicas resultam da atração entre o Sol, a Lua e a Terra.

O período de uma maré semidiurna é 12.42 h (meio dia lunar). Em cada dia lunar ocorrem portanto duas preia-mares e duas baixa-mares (ver Figura 2.14). Esta componente harmónica da maré corresponde à constituinte lunar semidiurna (M2).

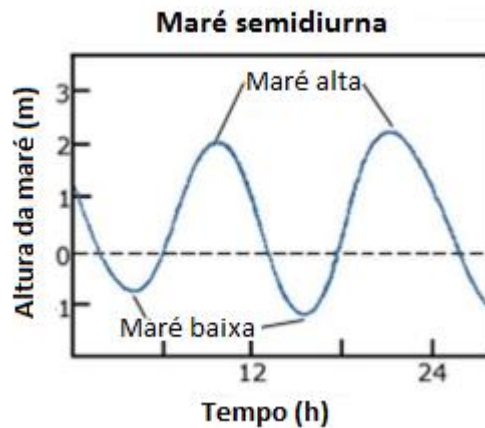


Figura 2.14- Maré semidiurna.

Quinzenalmente há uma alternância entre maré viva e maré morta. Isto é representado pela constituinte solar semi-diurna (S2), sendo o Sol o responsável por esta variação. Quando o Sol e a Lua estão em conjunção ou oposição as constituintes somam-se e surgem as marés vivas. Quando os astros estão em quadratura, as suas ações são perpendiculares e há uma compensação surgindo as marés mortas.

Todas as alturas que surgem no presente trabalho são em relação ao zero hidrográfico, que se encontra 2 metros abaixo do nível médio da água do mar (Portela, 2008).

A construção das barragens fez com que o caudal do rio deixasse de ser contínuo, para passar a ser descarregado consoante as necessidades de energia hidroelétrica, da precipitação na bacia e das descargas provenientes das barragens a montante. O caudal descarregado pode passar, numa questão de minutos, de $0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para mais de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Azevedo et al., 2008). Após a construção da barragem, o caudal anual médio passou a rondar os $450 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, atingindo no caso de anos mais húmidos cerca de $700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e em anos mais secos $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Dias, sem data). Estas variações afetam as características do estuário, desde a qualidade da água até à estratificação.

O estuário do Douro é considerado um estuário de cunha salina para baixos caudais descarregados. Para descargas muito elevadas o estuário é constituído apenas por água doce, comportando-se como um rio,

sendo a água do mar totalmente expelida mesmo na preia-mar da maré viva. Caudais fluviais muito baixos permitem que a cunha salina se desenvolva, chegando em alguns casos a cerca de 2/3 da extensão do estuário. Para caudais intermédios a cunha salina desenvolve-se na mesma num comprimento pequeno e há uma mistura vertical da água doce com a água salgada na zona intermédia do estuário (Vieira e Bordalo, 2000). Estes autores sugerem que a batimetria força a cunha salina a ocupar 3 posições preponderantes (ver Figura 2.15).

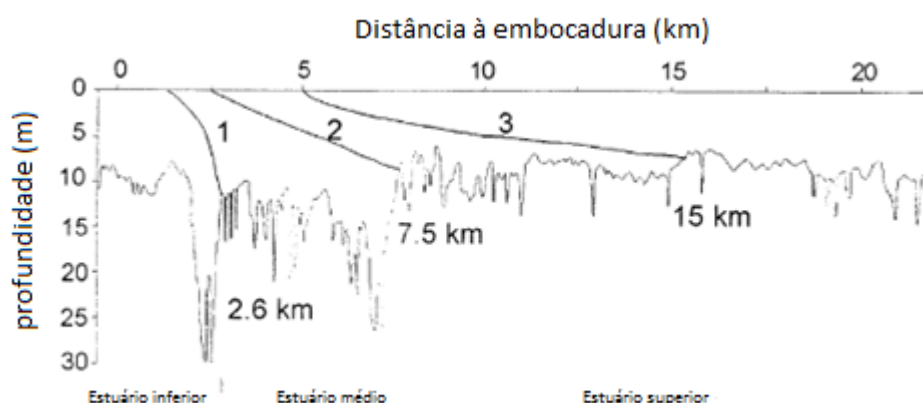


Figura 2.15- Posições predominantes da cunha salina e as suas distâncias relativamente à embocadura (Fonte: Vieira e Bordalo, 2000).

A intrusão da água salgada faz-se sentir por norma desde o início de Março até ao início de Dezembro. É de frisar que os autores definem a cunha salina como a massa de água salgada com salinidade igual ou superior a 30. As posições 1, 2 e 3 correspondem aos limites dessa massa de água com salinidade de 30. Quando a intrusão salina começa, os caudais ainda são elevados encontrando-se próximos dos $700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ sentindo-se a influência marinha até à posição 1 a 2,6 km da entrada do estuário e até aos 30 m de profundidade. Para descargas inferiores a $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a cunha salina avança até à posição 2 a 7,5 km da embocadura e atingindo 25 m de profundidade. A posição 3 é atingida para caudais descarregados muito baixos, inferiores a $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, e a cunha salina fica apenas a 6 km de distância de Crestuma. Este estudo foi feito para o ano de 1994. Posto isto, concluiu-se que as características da cunha salina são dominadas pelos caudais descarregados na barragem (Vieira e Bordalo, 2000).

Uma análise à cunha salina no estuário inferior para condições de baixo escoamento fluvial revelou que neste caso os esforços provocados pela maré têm influência na estratificação, ocorrendo estratificação durante a vazante e mistura durante a enchente (Vieira e Bordalo, 2000)

A reflexão da onda de maré na barragem de Crestuma conduz à formação de uma onda estacionária cujo comprimento de onda é dado pela equação 2.1:

$$L = T(gh)^{1/2} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde T é o período de onda, h é a profundidade e g é a aceleração gravítica.

No caso do estuário do Douro este comprimento de onda é de 97.6 km, considerando uma profundidade média de 7,8 m e um período de 12,4 h. Como o estuário tem 21,6 km é como se todo o estuário se

encontrasse na proximidade do ventre. Isto faz com que a subida do nível da água ocorra quase simultaneamente para todo o estuário, tanto na enchente como na vazante, esperando-se apenas alguma ressonância. No entanto, verifica-se que a amplitude de maré para a maré viva na embocadura é de cerca de 2,8 m e junto à barragem é de 2,6 m o que se deve a perdas por atrito. Além da falha na amplificação da onda também se verifica uma diferença de fase de 1 h entre a embocadura e Crestuma cuja responsabilidade é também atribuída ao atrito. Os estuários intermédio e superior apresentam larguras e profundidades muito parecidas, não criando convergência nem amplificação (Vieira e Bordalo, 2000).

Estuários com cunha salina estão normalmente associados a condições microtidais. No entanto, o Douro apresenta condições mesotidais e cunha salina (Azevedo et al., 2007). Isto é explicado pelo facto de a onda refletida em Crestuma ter uma amplitude inferior à onda incidente, devido a perdas por atrito, e a maré resultar da soma de uma onda estacionária, cujo transporte de energia é nulo, com uma onda progressiva com uma amplitude muito pequena e cuja energia também é insuficiente para provocar a mistura da coluna de água nos estuários médio e superior em situações de baixo caudal descarregado (Vieira e Bordalo, 2000).

A estratificação é avaliada com base no cálculo do número de estuário, Ne , que representa um rácio entre a descarga de caudal e o caudal da maré (Eq. 2.2):

$$Ne = \frac{P(F_m)^2}{TR} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde P é o volume do prisma da maré, F_m é o número de Froude densimétrico, T é o período da onda de maré, e R é o caudal descarregado.

O número de Froude densimétrico é calculado de acordo com a Equação 2.3:

$$Fm = \frac{uf}{\sqrt{gh(\frac{\Delta\rho}{\rho})}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde uf é a média transversal da média vertical da velocidade média, g é a aceleração gravítica, h é a profundidade, $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre a superfície e o fundo e ρ é a média vertical da densidade média.

A variável uf na equação 2.3 é calculada de acordo com a Equação 2.4:

$$uf = \frac{R_T}{AT} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Onde R_T é o volume de água doce durante um ciclo de maré, A a área da seção transversal e T o período de onda.

Quanto menor for o valor de Ne mais estratificada se encontra a coluna de água. Para valores de $Ne < 0.1$ a coluna encontra-se fortemente estratificada. Por outras palavras, para caudais inferiores a $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ocorre estratificação, como a função exponencial da Figura 2.16 indica (Azevedo et al., 2008).

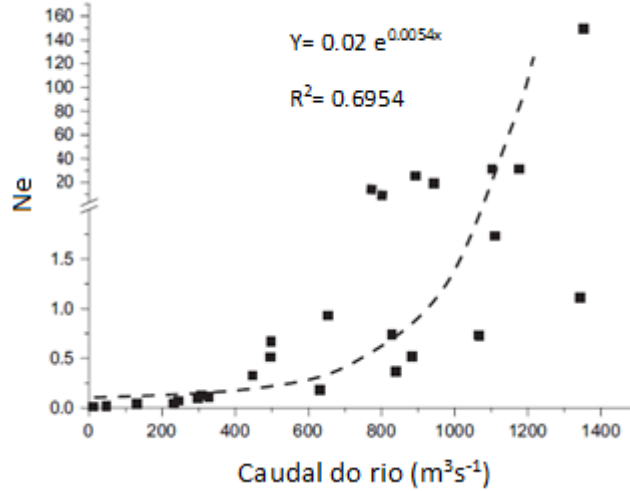


Figura 2.16- Ne como função do caudal do rio. Valores de Ne inferiores a 0,1 indicam condições fortes de estratificação (Fonte: Azevedo et al., 2008).

Azevedo et al. (2010) também estudaram a variação da salinidade, tempo de residência, quantidade de traçadores e estratificação fazendo variar não só a magnitude mas também a variabilidade dos caudais (horários, diários e constantes), encontrando-se as variáveis representadas na Figura 2.17.

O tempo de residência é o tempo que a água doce permanece no estuário antes da sua chegada ao mar. Pode ser calculado através de uma relação entre o volume de água doce e o caudal descarregado (Eq. 2.5).

$$Tr = \frac{V_f}{R} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Onde V_f é o volume de água doce e R é o caudal descarregado. O volume de água doce é calculado de acordo com a Equação 2.6:

$$V_f = fV \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde f é a fração de água doce e V o volume total. A fração de água doce é calculada com base na Equação 2.7:

$$f = \frac{S_0 - S}{S_0} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Onde S_0 é a salinidade do oceano e S a salinidade em qualquer parte do estuário.

Azevedo et al. (2010) concluíram que a salinidade é maior para qualquer uma das magnitudes dos caudais quando o regime utilizado é o horário, sendo dentro desse regime inferior para o maior caudal (ver Figura 2.17). Nos regimes diário e constante a salinidade tende a decrescer. Isto porque no regime horário nos períodos com menor caudal fluvial a intrusão marinha aumenta, tal como a salinidade ou nos regimes mais constantes o caudal não é suficiente para expulsar a água salgada.

A dispersão dos traçadores depende da ação da maré e dos caudais descarregados. Verificam-se maiores concentrações de traçadores para situações de caudais mais baixos ou maré baixa, devido ao facto de a diluição ser menor. O regime que provoca a maior diluição dos traçadores é o constante (ver Figura 2.17) e, indo de encontro ao exposto anteriormente dentro desse regime o caudal para o qual é apresentada a menor concentração de traçadores é o maior (Azevedo et al., 2010).

O maior tempo de residência verificou-se para o regime com menores valores de salinidade (regime constante). Dentro desse regime o menor tempo de residência surgiu associado ao maior caudal. O tempo de residência é portanto muito variável podendo encontrar-se entre menos de um dia (até menos do que um período de maré) e mais de duas semanas (Vieira e Bordalo, 2000). No estuário do Douro o tempo de residência é controlado pelo caudal descarregado e não pelas marés (Bordalo e Vieira, 2005).

Através da Figura 2.17 verifica-se que o número de estuário (N_e) aumenta com o caudal, seja em que regime for. Para valores mais altos de N_e a estratificação é menor, pois são inversos.

Através deste estudo concluiu-se que a variabilidade dos caudais também desempenha um papel importante na alteração das características do estuário, não bastando apenas fazer estudos a partir da variação da magnitude dos caudais.

Caudal	Horário				Diário				Constante			
	Salinidade	N_e	Tr	Traçador	Salinidade	N_e	Tr	Traçador	Salinidade	N_e	Tr	Traçador
Metade	10.29	0.41	3.95	4.54	10.27	0.39	3.95	4.64	10.06	0.42	3.98	4.16
Normal	8.93	0.63	2.08	3.19	8.67	0.57	2.10	3.26	8.28	0.55	2.13	2.86
Dobro	7.77	1.05	1.09	2.33	6.98	1.18	1.12	2.35	6.31	1.22	1.15	1.97

Figura 2.17- Variação da salinidade, N_e , tempo de residência (Tr) e concentração de traçadores para os diferentes caudais e regimes testados. Tempo de residência em dias e traçadores em μM (Fonte: Azevedo et al., 2010).

2.2.2.3 Dinâmica Sedimentar

O estuário do Douro encontra-se num vale estreito sendo o seu substrato rochoso constituído por granito e rochas metamórficas (maioritariamente xisto) (Mucha et al., 2003). As margens são íngremes e constituídas essencialmente por areia e cascalho (Portela, 2008).

No estuário superior, os sedimentos possuem dimensões maiores, sendo a maior parte cascalhos de areia ou areias de cascalho contendo uma quantidade ínfima de partículas finas (<1%); entre os 2 e os 9 km os sedimentos são mais finos, contendo algumas argilas e siltes e na embocadura os sedimentos são novamente areias grosseiras (Portela, 2008; IPTM, 2003). A espessura da camada de sedimentos sobre o substrato rochoso é de cerca de 40 m (Portela, 2008).

Quando ocorrem cheias, os sedimentos de granulometria mais fina são transportados até à plataforma continental, sendo o Douro o maior fornecedor com cerca de 79% (Dias et al., 2002; Araújo et al., 2002).

No estuário do Douro sempre se recorreu a dragagens e à extração de inertes, como já foi referido no tópico 2.2.2.1. Após a construção de Crestuma terminaram as atividades de extração de inertes no estuário mas continuaram na albufeira da barragem. Quanto a dragagens, desde 1987 que essas atividades decorrem apenas no estuário superior e inferior, pois o estuário médio é mais profundo. Entre 1987 e 2001 o volume anual dragado para efeitos de manutenção foi de cerca de $0.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ (Portela, 2008).

Através da comparação dos caudais médios diários descarregados em Crestuma e do volume dragado (ver Figura 2.18) verifica-se que entre os caudais e as dragagens se consegue estabelecer uma relação. Após grandes descargas não foram necessárias dragagens na entrada do estuário, o que permite concluir que as cheias ou caudais elevados fazem a manutenção do canal de navegação. Já no estuário superior esta relação não é verificada, sendo necessário recorrer a dragagens quando ocorrem grandes descargas (Portela, 2008).

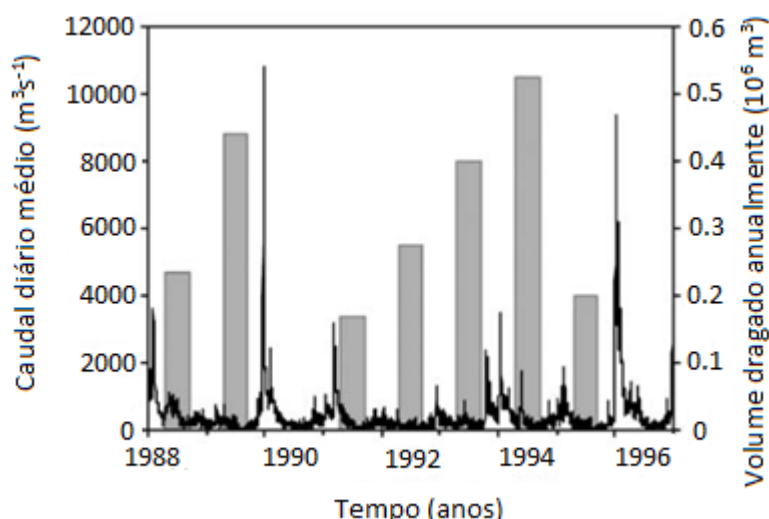


Figura 2.18- Caudais médios diários na barragem de Crestuma (linhas) e dragagens anuais na entrada do estuário (barra) entre 1988 e 1996 (Fonte: Portela, 2008).

A capacidade de transporte aumenta quando os grãos são mais finos comparativamente com grãos mais grosseiros. Junto à restinga a carga sedimentar aumenta e consequentemente a capacidade de transporte também (Portela, 2008).

Sendo o estuário mesotidal era de esperar que a maré fosse um importante mecanismo de transporte sólido. Isso não acontece porque o pequeno tamanho do estuário, em termos de largura, limita o prisma de maré e a descarga de água em Crestuma possui alguma expressão, sendo em algumas circunstâncias muito elevada. Desta forma, o transporte de sedimentos é controlado pelo rio (Portela, 2008).

A influência da maré vai diminuindo de jusante para montante no estuário. Através da Figura 2.19 observa-se que para uma distância à foz de 5 km em situação de enchente a capacidade de transporte sólido pode ser desprezada enquanto na vazante essa capacidade aumenta pois a velocidade da corrente aponta para jusante, tal como a velocidade do escoamento fluvial. Para uma distância de 18 km a influência da maré não se faz sentir, seja na enchente ou na vazante (Portela, 2008).

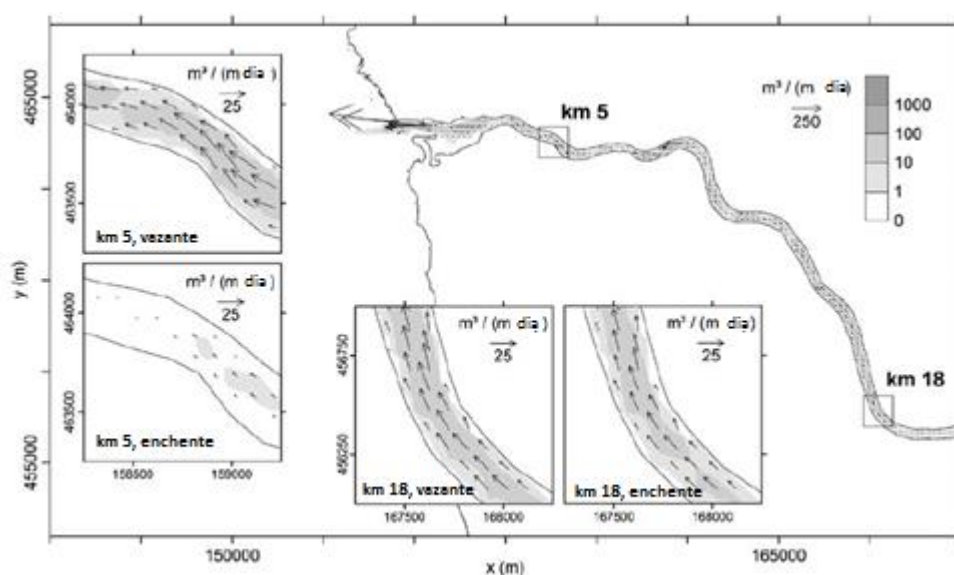


Figura 2.19- Simulação do transporte do caudal sólido para um caudal de $2036 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na enchente e na vazante a 5 e a 18 km da embocadura (fonte: Portela, 2008).

2.2.2.4 Qualidade da água

Conhecer a qualidade da água do rio Douro é de extrema importância visto que a água armazenada nas albufeiras pode ser utilizada para abastecimento da população, além de ser essencial garantir a melhor qualidade de água possível para a sobrevivência das espécies que se encontram no rio e no estuário. Neste caso, a água da albufeira de Crestuma é utilizada para o abastecimento das regiões do Grande Porto e do Vale do Sousa (AP, 2016).

Têm-se vindo a realizar inúmeros estudos de forma a avaliar a qualidade da água e a estabelecer relações entre as características do estuário e a magnitude dos caudais ou a presença de contaminantes, etc.

Um estudo feito por Bordalo et al. (2006) a três barragens portuguesas, sendo elas Miranda, Pocinho e Crestuma, comprovou que a qualidade da água aumenta de montante para jusante, tal como o caudal. A água proveniente de Espanha provou ser a de pior qualidade. Uma teoria para o aumento da qualidade da água seria o aumento do caudal a par do aumento da diluição. No entanto, os resultados obtidos neste estudo não foram suficientes para estabelecer essa relação. Verificou-se também que nos meses de Verão a qualidade da água tende a diminuir, embora não na mesma proporção que os caudais, em relação aos meses de Inverno.

Os parâmetros utilizados por estes autores para averiguar a qualidade da água e que são utilizados na maior parte dos casos foram temperatura, pH, condutividade, oxigénio dissolvido, quantidade de sólidos suspensos, carência bioquímica de oxigénio, carência química de oxigénio, coliformes fecais e amónio.

O tipo de produção nos estuários é outro aspeto a ter em conta. Os estuários são mais ou menos heterotróficos consoante a magnitude dos caudais, a presença de nutrientes, a luminosidade e a temperatura. A título de exemplo, o lançamento de águas residuais para os estuários é responsável pelo aumento da carga orgânica que vai ter influência na respiração, aumentando a sua taxa (Azevedo et al., 2006).

As descargas nos estuários das águas residuais ou de efluentes industriais não tratados (fenómeno que ainda é muito comum) são responsáveis pela contaminação por metais dos sedimentos e da macrofauna aí existente inibindo ou estimulando o desenvolvimento de inúmeras espécies, a sua diversidade e quantidade (Mucha et al., 2004a). A influência antropogénica pode ser conhecida através do estudo da variação vertical dos metais na amostra de sedimentos (Mucha et al., 2004b).

Avaliar as consequências das ações humanas, seja a nível da descarga de efluentes ou construção de barragens é essencial pois estas atividades provocam alterações no ecossistema que podem conduzir à sua biodegradação, além de porem em risco a saúde pública caso a qualidade da água não cumpra os requisitos mínimos.

2.3 AS CHEIAS NO DOURO

As cheias são fenómenos hidrológicos extremos e temporários cuja frequência é variável, sendo provocadas por causas naturais ou induzidas. São caracterizadas por um aumento do caudal no curso de água, provocando assim o extravase do leito normal e a inundação dos terrenos vizinhos (Ramos, 2014).

As cheias naturais têm origem em fenómenos meteorológicos tais como a precipitação, derretimento de gelo e tempestades tropicais conjuntamente com as características da bacia hidrográfica (relevo, inclinação, tipo de solo). Existem dois tipos de cheias fluviais: lentas e rápidas. As cheias lentas (ver Figura 2.20) estão associadas a precipitações mais moderadas (podendo ser intensas às vezes) durante um maior período de tempo, sobre uma área mais alargada, daí a resposta hidrológica ser mais lenta e permitir uma resposta mais rápida na evacuação e proteção, devido à previsão ser feita em tempo real. Estas cheias podem no entanto acarretar igualmente graves prejuízos nas infraestruturas e colocar em risco a segurança das pessoas (caso a evacuação não seja feita a tempo). Surgem normalmente na bacia dos grandes rios e devem-se a superfícies frontais e sazonais, desenvolvendo-se durante vários dias ou semanas. Já as cheias rápidas (ver Figura 2.21) surgem na sequência de precipitações muito intensas e localizadas, sendo a resposta hidrológica muito rápida e não permitindo pôr em prática planos de evacuação, pois não é possível fazer a sua previsão em tempo real. São chuvas do tipo convectivo normalmente em bacias médias/pequenas e ocorrem especialmente no Verão e no Outono, desenvolvendo-se numa questão de horas. As cheias provocadas por causas humanas devem-se à rotura de barragens ou de diques.

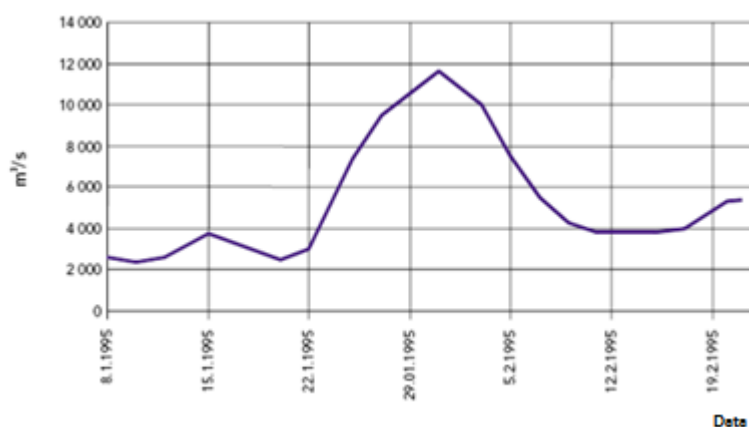


Figura 2.20- Hidrograma de uma cheia lenta no rio Reno em 1995.

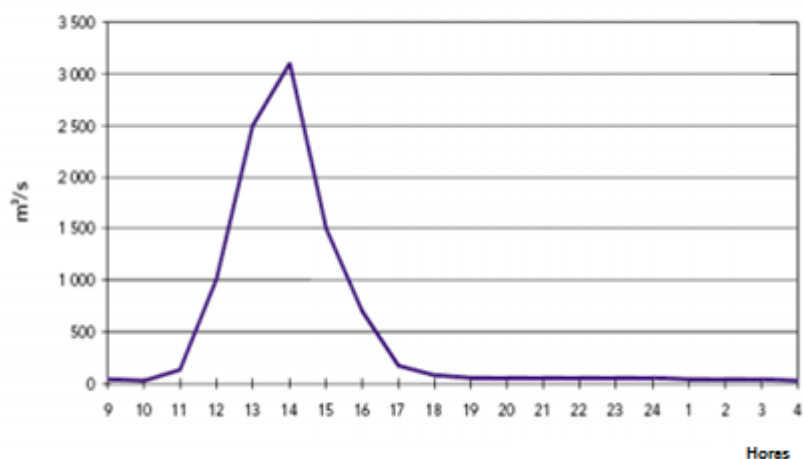


Figura 2.21- Hidrograma de uma cheia rápida no rio Almanzora (Espanha) em 1973.

Na Península Ibérica verifica-se a ocorrência dos dois tipos de cheia. Superfícies frontais associadas a núcleos de baixa pressão formam-se no Oceano Atlântico e atravessam o território (ver Figura 2.22), sendo a direção NO-SE a predominante. A incidência destas massas de ar nas cadeias montanhosas intensifica a precipitação. Além das superfícies frontais verificam-se fenómenos de origem convectiva que originam precipitações muito localizadas e difíceis de prever devido à sua rapidez.

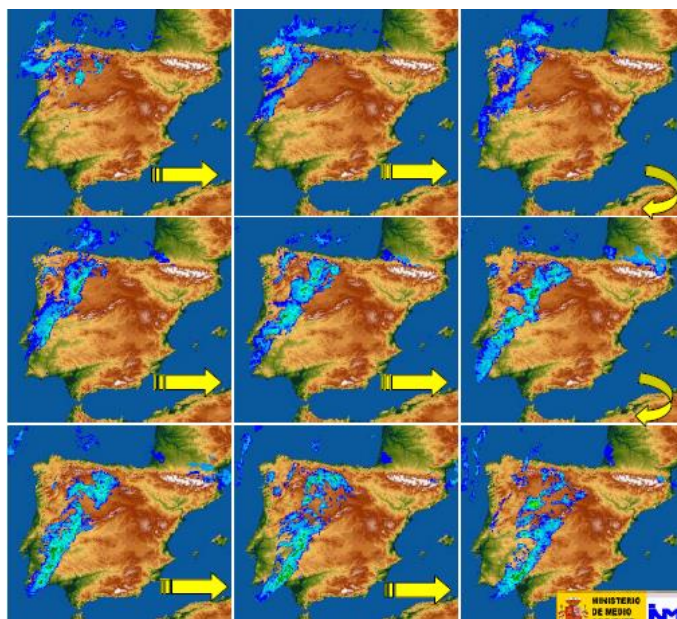


Figura 2.22- Propagação da superfície frontal na Península Ibérica associada à cheia de Dezembro de 2002 no Douro (Fonte: Rodrigues et al., 2003).

O rio Douro, como já foi referido, além de possuir a maior bacia hidrográfica da Península Ibérica é também um dos seus maiores rios em termos de extensão. Nos últimos 8 km do seu curso, as margens foram completamente alteradas pela construção de edifícios (habitação, lazer, serviços ou qualquer outro

tipo de infraestruturas). A ocorrência duma cheia, com a consequente inundação das margens, acarreta por isso imenso prejuízo, além de colocar em risco a população que aí se encontra.

No Inverno, os caudais são muito mais elevados do que no Verão, havendo por vezes descargas muito elevadas que por não provocarem grandes prejuízos não são tidas em consideração. As cheias tidas em conta na delimitação da zona inundável são as denominadas cheias extraordinárias. Para uma cheia pertencer a este grupo a altura da água medida na margem direita junto à ponte Luís I tem que atingir os 6 m (ZH), pois a cota da zona da ribeira encontra-se a 5.90 m (Dias, sem data).

No Quadro 2.4 encontram-se registadas algumas das cotas atingidas pela água (em relação ao ZH).

Quadro 2.4- Cotas atingidas pela água em algumas das cheias no estuário do Douro (Fonte: Dias, sem data).

Ano	Cota (m)
1739	10.59
1772	8.49
1779	9.54
1788	8.74
1821	7.14
1823	8.34
1825	8.6
1853	7.68
1855	6.99
1860	9.1
1865	6.19
1869	5.09
1876	6.84
1878	7.24
1880	5.19
1881	7.99
1900	5.6
1904	6.04
1909	10.08
1910	6.84
1936	5.6
1962	9.38
1966	8.46
1978	7.03
1979	6.34
1989	7.32
1996	6.34
2001	6.07
2002	5.34
2003	5.34
2003	6.66

As características da bacia hidrográfica também influenciam a formação das cheias. O Douro, sendo um rio que se localiza num vale muito encaixado possui margens muito íngremes, além da sua bacia ser pouco alongada em relação à dos seus afluentes e possuir pouca cobertura vegetal. A inclinação do canal em alguns trechos acaba por ser também importante, pois o aumento da inclinação obriga o escoamento a assumir velocidades muito maiores, aumentando a probabilidade de ocorrência de fenómenos de erosão e acreção. Nas margens junto ao estuário não existem muitas zonas de retenção de água, pois devido às ações antropogénicas a impermeabilização e as grandes inclinações favorecem o escoamento superficial, aumentando a possibilidade da ocorrência de inundações.

A construção das barragens à partida seria vantajosa, pois permitiria laminar as cheias, ou seja encaixar grande parte do volume de água da cheia nas albufeiras diminuindo o seu pico. Verifica-se que no caso do Douro, como as barragens funcionam a fio-de-água, possuem uma pequena capacidade útil, conseguindo controlar apenas as cheias com caudais até $9000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Araújo et al., 2013).

Visto que as margens do estuário do Douro foram fortemente alteradas, é de esperar efeitos nefastos aquando a ocorrência de cheias, efeitos esses muito piores do que num caso em que tudo se encontrasse naturalizado. É portanto crucial monitorizar a pluviosidade de forma a fazer a melhor gestão possível em tempo real, para que em caso de cheia se consigam evitar perdas humanas ou destruição de bens materiais.

3

MODELO NUMÉRICO: OPENTELEMAC

3.1 OPENTELEMAC

O OpenTelemac é um modelo numérico muito utilizado na modelação numérica de diversos processos morfo-hidrodinâmicos sendo constituído por vários módulos que se encontram representados na Figura 3.1.

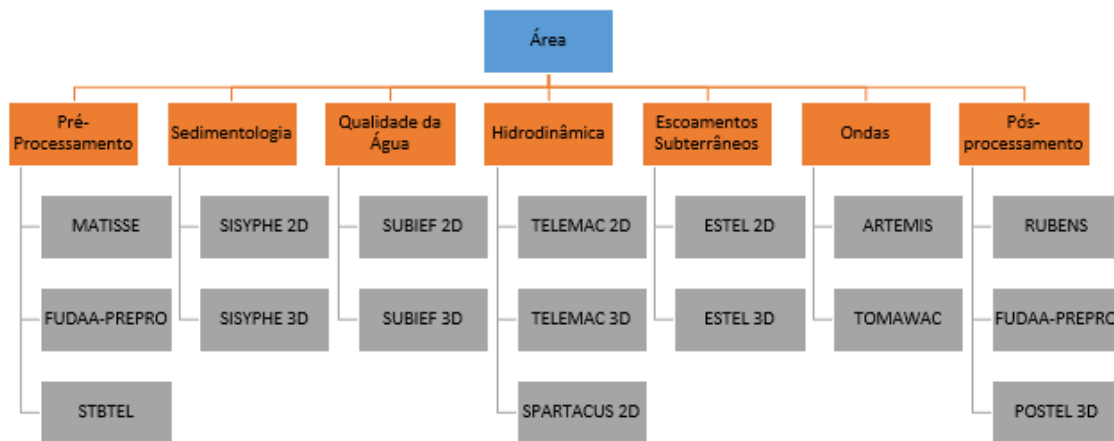


Figura 3.1- Módulos do OpenTelemac e as suas aplicações.

Tem sido largamente utilizado na simulação de escoamentos a nível fluvial e costeiro. Foi desenvolvido inicialmente em França pelo Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement – (LNHE), um departamento de pesquisa e desenvolvimento da companhia French Electricity Board.

Este modelo numérico foi utilizado por Corti e Pennati (2000) no estudo da hidrodinâmica do delta do rio Pó, tendo-se obtido bons resultados comparativamente com medições feitas. Neste caso o modelo permitiu fazer uma boa reprodução da hidrodinâmica do delta e da intrusão da cunha salina. Outro exemplo de aplicação do OpenTelemac foi a lagoa dos Patos em que se estudou a pluma produzida pela lagoa e o efeito produzido pelo vento, marés, descargas fluviais e rotação da terra (Monteiro et al., 2011). Em todos os exemplos de aplicação do OpenTelemac, este revelou ser um modelo apropriado.

3.2 TELEMAC 2D

3.2.1 APRESENTAÇÃO DO TELEMAC 2D

O Telemac 2D é um dos módulos do OpenTelemac que permite a modelação hidrodinâmica em superfície livre a duas dimensões espaciais horizontais (2DH). Adicionalmente consegue também simular o transporte de traçadores dissolvidos. Isto é possível através da resolução das equações de águas pouco profundas, também conhecidas como equações de Saint-Venant (eq. 3.1 a 3.4), equações diferenciais às derivadas parciais, baseadas na equação da continuidade e nas duas equações da conservação da quantidade de movimento, sendo que estas são integradas na vertical e deduzidas diretamente a partir das equações de Navier-Stokes, correspondendo a Equação (3.1) à equação de continuidade, as Equações (3.2) e (3.3) às equações de conservação do momento segundo Ox e Oy, respetivamente, e a Equação (3.4) à equação de conservação dos traçadores (ATA et al., 2014, Lang, 2010).

As equações a 2DH são então:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \operatorname{div}(\vec{u}) = S_h \quad (\text{Eq. 3.1})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h_{v_t} \vec{\nabla} u) \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h_{v_t} \vec{\nabla} v) \quad (\text{Eq. 3.3})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h_{v_T} \vec{\nabla} T) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde h é a profundidade da água, u e v são médias na coluna de água das componentes horizontais da velocidade, T é um traçador ativo (salinidade ou temperatura), g é a aceleração gravítica, v_t e v_T são os coeficientes de difusão turbulenta da velocidade e dos traçadores, respetivamente, t é o tempo, x e y são as coordenadas espaciais horizontais, Z é a elevação da superfície livre, S_h é um termo de fonte ou dissipação de massa, S_x e S_y são termos de fonte ou dissipação nas equações dinâmicas e S_T é um termo de fonte ou de dissipação na equação de conservação do traçador.

No módulo 2DH a velocidade vertical é considerada desprezável e o fundo e a superfície livre são considerados impermeáveis.

Os termos S_x e S_y das equações representam os termos fonte ou dissipadores como o vento, a força de Coriolis, o atrito no fundo, etc. Os diferentes termos das equações são processados em um ou mais passos: 1) solução dos termos advectivos; 2) solução dos termos de propagação, difusão e termos fontes nas equações dinâmicas; 3) solução dos termos de propagação e termos fontes na equação dos traçadores.

O modelo resolve as equações através de algoritmos baseados no método dos elementos finitos ou no método dos volumes finitos, sobre malhas triangulares não estruturadas. No caso em concreto utilizou-se o método dos elementos finitos tendo a equação da continuidade sido substituída por uma equação de onda, obtida conforme descrito em Lynch e Gray (1979).

A vantagem da utilização de malhas não estruturadas triangulares reside na facilidade de criação da malha em geometrias complexas e a possibilidade de obter uma maior resolução, através da colocação de um maior número de elementos em zonas que não sejam homogéneas, facilitando assim a perceção

da hidrodinâmica dessas zonas em que à partida uma análise correta seria difícil, além de o tempo computacional ser diminuído. Os nós de cada elemento representam pontos de cálculo caracterizados por coordenadas planimétricas (x,y) e altimétricas (z), atuando a gravidade na vertical. Posto isto, no fim de cada simulação, o Telemac 2D fornece principalmente para cada ponto da malha o valor da profundidade da água, das duas componentes da velocidade média na vertical e dos traçadores escolhidos.

O Telemac 2D apresenta um grande interesse prático pois permite ter em consideração inúmeros fenómenos tais como:

- propagação de ondas longas, incluindo efeitos não lineares;
- atrito no fundo;
- efeito da força de Coriolis;
- efeito de fenómenos meteorológicos como pressão atmosférica, precipitação, evaporação ou vento;
- turbulência;
- escoamentos subcríticos ou supercríticos;
- influência de gradientes horizontais da temperatura e salinidade na densidade;
- coordenadas cartesianas ou esféricas para largos domínios;
- áreas secas na zona da computação tais como planícies de maré;
- arrastamento e difusão de um traçador pelas correntes;
- rastreamento de partículas;
- tratamento de singularidades como barragens, açudes ou diques;
- rotura de diques ou barragens;
- forças de arrastamento criadas por estruturas verticais;
- porosidade;
- correntes induzidas pela maré;
- transporte de sedimentos;
- qualidade da água.

O Telemac 2D tem portanto um campo muito vasto de aplicações. No âmbito dos trabalhos marítimos, auxilia no dimensionamento de estruturas portuárias, na análise dos efeitos da construção de diques e outras estruturas submersas ou dragagens, na análise do impacto de descargas de águas de esgoto ou no estudo da pluma. Quanto às aplicações fluviais é útil no estudo do impacto da construção de barragens e açudes, bem como das suas roturas, e no estudo das cheias.

3.2.2 FICHEIROS DE ENTRADA E FICHEIROS DE SAÍDA

De forma a obter os ficheiros de saída passíveis de serem analisados é necessário criar um conjunto de ficheiros de entrada, sendo alguns obrigatórios e outros opcionais, consoante as necessidades e objetivos pretendidos.

Os ficheiros obrigatórios consistem no ficheiro de direção (.cas), no ficheiro da geometria (.slf) e no ficheiro das condições fronteira (.cli).

A acrescentar a estes ficheiros, embora não obrigatórios e variando de caso para caso, encontram-se o ficheiro dos caudais, o ficheiro com a elevação da superfície livre provocada pela maré, o ficheiro fortran e um ficheiro onde são indicados os pontos que pertencem à fronteira oceânica.

3.2.2.1 Ficheiro de direção

O ficheiro de direção é o primeiro ficheiro a ser lido e funciona como uma espécie de painel de controlo de todo o cálculo. Pode ser feito a partir de um editor de texto ou através do programa FUDAA-PREPRO. É neste ficheiro que se encontram todos os parâmetros associados aos fenómenos que se encontram aplicados no modelo e que foram referidos no tópico 3.2.1. Cada parâmetro pode ser definido pelo utilizador ou, caso não o seja, o programa assume um valor por defeito.

3.2.2.2 Ficheiro da geometria

É um ficheiro binário que contém toda a informação respeitante à malha, como o número de nós e elementos, o número de nós por elemento, matrizes com as coordenadas x e y de cada nó da malha e matrizes de conectividade que indicam para cada elemento quem são os elementos vizinhos. Esta matriz de conectividade só é necessária devido à malha ser não estruturada e não haver forma de conhecer os elementos vizinhos através de cálculos algébricos básicos. Além desta informação pode conter a topografia do fundo e o coeficiente de atrito em cada nó.

3.2.2.3 Ficheiro das condições-fronteira

Este ficheiro é gerado automaticamente pelo programa BlueKenue e pode ser modificado através de um editor de texto. Cada linha é dedicada a um ponto da fronteira da malha. O primeiro nó a surgir neste ficheiro é o ponto com coordenadas mais baixas, ou seja o ponto no canto inferior esquerdo e a ordem dos pontos no ficheiro segue o sentido anti-horário.

3.2.2.4 Ficheiro fortran

O Telemac fornece previamente ao utilizador um conjunto de sub-rotinas programadas em Fortran que podem ser aplicadas no modelo. Se o modelo em questão necessitar de alguma sub-rotina extra o utilizador pode acrescentá-la. Este ficheiro é depois compilado de forma a gerar um programa executável para a simulação.

3.2.2.5 Ficheiro das fronteiras líquidas

Este ficheiro permite que o utilizador especifique valores para as condições-fronteira dependentes do tempo, seja em termos de caudal, profundidade, velocidade ou concentração de traçadores. Neste caso em concreto o ficheiro continha informação acerca da variação dos caudais descarregados em Crestuma ao longo do tempo. Como apenas existiam caudais médios diários para 1994 tiveram que se utilizar os dados fornecidos pela EDP para os meses de Outubro posteriores a 1998 (só a partir deste ano é que se encontram disponíveis caudais horários) de forma a encontrar um padrão horário de descarga, em função do dia da semana e do caudal médio diário*. Este padrão foi posteriormente aplicado à distribuição de caudais médios diários de 1994 para a simulação ser o mais próxima possível da realidade.

3.2.2.6 Ficheiro das marés

Este ficheiro também é feito com recurso ao Matlab e o modelo de marés utilizado foi o TPXO.2 (Egbert et al., 1994). Este modelo fornece o valor da elevação da superfície livre tendo em conta 8 constituintes

harmónicos primários, dois constituintes harmónicos de longo período e 3 constituintes harmónicos não lineares. A variação da elevação da superfície livre foi considerada igual em todos os pontos da fronteira.

3.2.2.7 Ficheiro dos pontos oceânicos que pertencem à fronteira

Este ficheiro é constituído pelos nós da fronteira da malha que pertencem ao oceano. É a este ficheiro que o Telemac associa o ficheiro das marés, fazendo com que a variação da maré ocorra nesses pontos.

3.2.2.8 Ficheiro de saída

O ficheiro de saída tem o formato selafin (.slf) e pode ser aberto com qualquer um dos módulos de pós-processamento, mas também com o Matlab. Fornece ao utilizador os resultados das variáveis escolhidas no modelo para serem representadas. Algumas destas variáveis são a profundidade, velocidade em x ou y e traçadores. Este ficheiro contém a variação destes parâmetros nas escalas espacial e temporal, permitindo analisar a variação desses parâmetros ao longo do espaço e do tempo da simulação.

3.2.3 MALHA

A construção da malha é o primeiro passo na implementação de qualquer modelo numérico. Como foi referido no ponto 3.2.1 a malha utilizada na modelação do estuário do Douro é uma malha triangular não estruturada. Foram utilizadas duas malhas neste trabalho, sendo uma com a geometria anterior à construção dos molhes, e com a batimetria de 2002 em toda a extensão do estuário e zona costeira adjacente e outra posterior à construção dos molhes com a batimetria de 2009 na zona do estuário inferior e a batimetria de 2002 no estuário médio e superior. Para a zona costeira foi utilizado o Modelo Batimétrico do Douro, com uma resolução de 100 m x 100 m disponibilizado no *site* do Instituto Hidrográfico (www.hidrografico.pt). A batimetria foi obtida através de levantamentos hidrográficos feitos pelo Instituto Hidrográfico. Para os pontos mais afastados da costa foram utilizados dados de levantamentos feitos pelo GEBCO (Becker et al., 2009). As cartas militares também foram utilizadas de forma a ser feita uma melhor transição entre a zona terrestre e a oceânica/fluvial. É de frisar que o limite oceânico considerado se encontra a cerca de 10 km da embocadura do estuário do Douro.

Os levantamentos batimétricos concretizam-se através da emissão e receção de sinais acústicos originados por sondas acopladas a embarcações georreferenciadas, sendo os sinais refletidos pelo fundo aquático. Normalmente utilizam-se dois tipos de sinais: feixe simples em que o sinal é enviado na vertical da embarcação e multifeixe em que o sinal abrange uma faixa de fundo cuja largura se encontra dependente da profundidade. O último permite um melhor conhecimento da batimetria pois consegue captar com melhor resolução as saliências do fundo.

Após a recolha de informação batimétrica utilizou-se o programa DraftSight® para fazer o tratamento das sobreposições de levantamentos. Nestas zonas foi omitida a informação proveniente de levantamentos com menor resolução. Nas zonas de sobreposição de levantamentos de igual resolução, foi utilizada a batimetria de levantamentos mais recentes.

Com a batimetria correta construiu-se a malha utilizando o programa Triangle (Shewchuk, 1996). Seguidamente, de forma a ser possível conhecer a profundidade de todos os nós recorreu-se a um algoritmo de Krigagem (Krig, 1951, Matheron, 1963) existente no programa Tecplot®. A krigagem é um método utilizado na interpolação de dados em que a partir de valores conhecidos de uma variável

*Paulo Avilez-Valente (2016). Comunicação privada

em determinados pontos se consegue conhecer o valor dessa mesma variável em outros pontos através da relação entre a variância da variável e a distância entre os vários pontos da amostra. Após todos estes processos a malha fica completa.

A malha da Figura 3.2 corresponde à situação pré-molhes e foi a malha utilizada na calibração e validação do modelo. Apesar de os dados utilizados para a validação do modelo pertencerem ao ano de 1994 essa batimetria não se encontrava disponível, tendo sido usada a batimetria existente mais próxima dessa data (2002). Como à data ainda não tinham sido construídos os molhes, a restinga possuía uma forma diferente da que é observada nos dias de hoje. A malha possui 31123 nós e 60400 elementos.

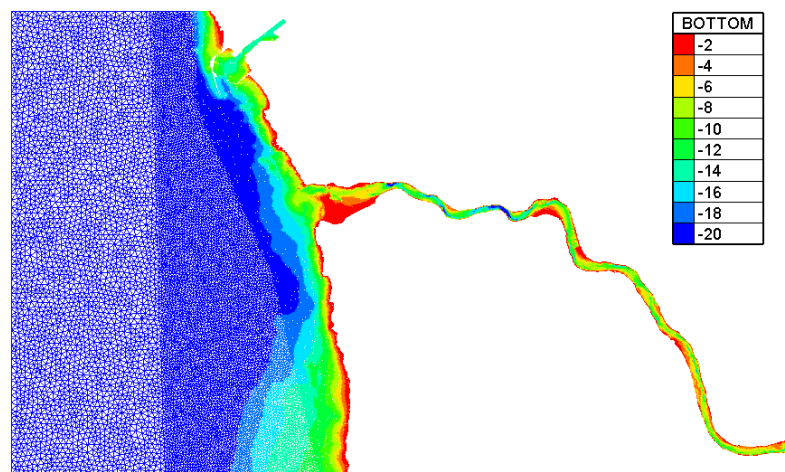


Figura 3.2- Malha anterior à construção dos molhes com batimetria de 2002.

A topografia da restinga nesta malha encontra-se na Figura 3.3.

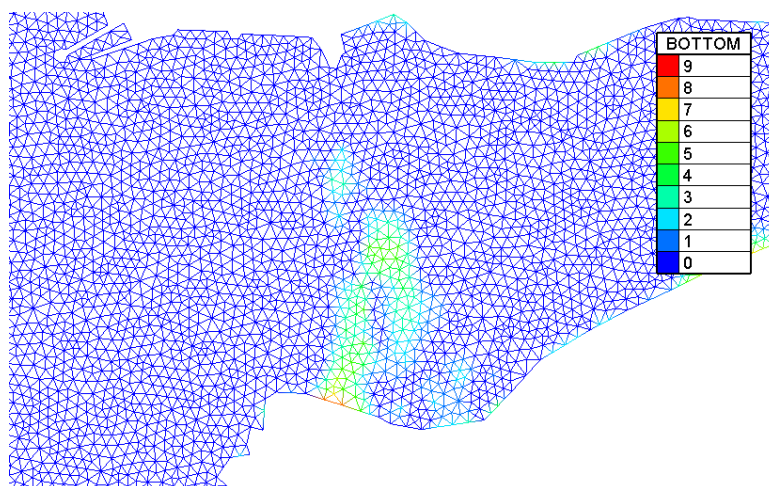


Figura 3.3-Topografia da restinga na malha sem molhes.

A malha da Figura 3.4 corresponde à situação pós-construção dos molhes. A topografia da restinga resultou dum levantamento levado a cabo pelo CIIMAR em Setembro de 2015. A batimetria do estuário inferior é resultado de um levantamento do IH de 2009.

Esta malha possui 31325 nós e 60757 elementos. Esta malha será utilizada para estudar o efeito da restinga e dos quebramares nas cheias e comparar com o comportamento do estuário prévio à construção dos molhes.

Como foi utilizado um gerador de malhas que não pertence ao Telemac foi necessário converter o ficheiro final de cada uma das malhas para o formato Selafin de forma a conseguir ser lido pelo Telemac.

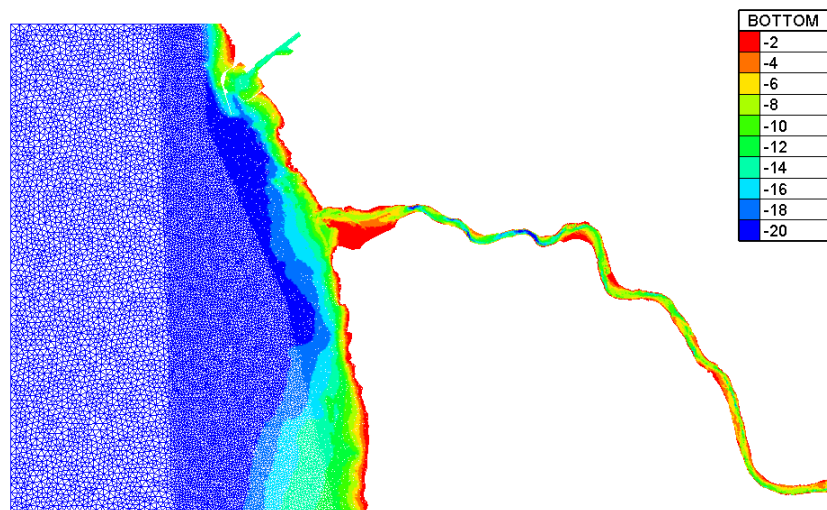


Figura 3.4-Malha posterior à construção dos molhes com batimetria de 2002 e 2009.

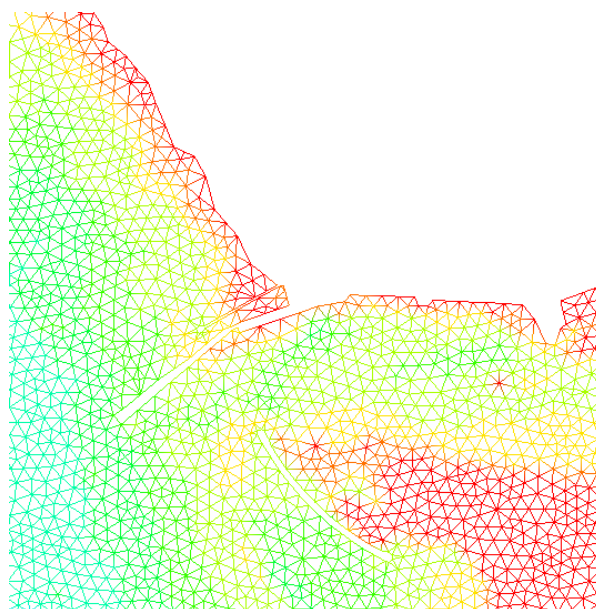


Figura 3.5- Pormenor do quebramar destacado e do molhe norte da malha da Figura 3.4.

A topografia da restinga nesta malha encontra-se na Figura 3.6.

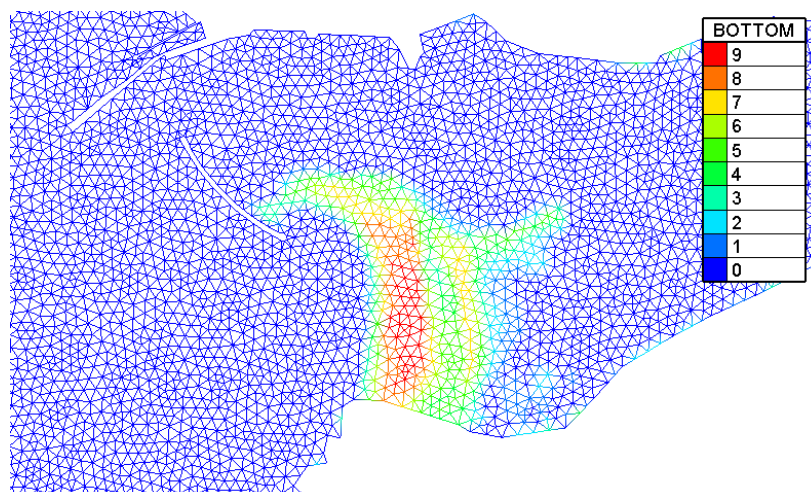


Figura 3.6- Topografia da restinga na malha pós-molhes.

3.2.4 CONDIÇÕES-FRONTEIRA E TRAÇADORES

A fase seguinte da construção do modelo consiste na definição das condições fronteira. Estas são definidas diretamente a partir do BlueKenue que cria o ficheiro necessário para a execução da simulação.

As fronteiras podem ser líquidas ou sólidas, funcionando as sólidas como muros. Quanto às fronteiras líquidas existe a possibilidade de o utilizador definir os parâmetros que pretende prescrever posteriormente ou simplesmente deixá-los como parâmetros livres, pertencendo a esses parâmetros o caudal, profundidade da água, a velocidade em u e v , o valor dos traçadores e as ondas incidentes. A fronteira neste caso é considerada aberta e o utilizador pode optar por prescrever apenas um dos parâmetros ou pode prescrever mais do que um simultaneamente.

O tipo de condição fronteira para cada nó encontra-se definido no ficheiro final (.cli) através de 4 números inteiros chamados LIHBOR, LIUBOR, LIVBOR e LITBOR, cujos valores variam entre 0 e 6. No Quadro 3.1 encontram-se as condições-fronteira possíveis com os números inteiros respetivos.

Quadro 3.1- Condições-fronteira para cada um dos parâmetros.

Parâmetros	Condição fronteira
Profundidade	Fronteira aberta com profundidade prescrita: LIHBOR=5
	Fronteira aberta com profundidade livre: LIHBOR=4
	Fronteira fechada: LIHBOR=2
Caudal/velocidade	Fronteira aberta com caudal prescrito: LIUBOR/LIVBOR=5
	Fronteira aberta com velocidade prescrita: LIUBOR/LIVBOR=6
	Fronteira aberta com velocidade livre: LIUBOR/LIVBOR=4
	Fronteira fechada com escorregamento ou atrito: LIUBOR/LIVBOR=2
	Fronteira fechada com uma ou duas componentes da velocidade nulas: LIUBOR e/ou LIVBOR=0
Traçadores	Fronteira aberta com traçador prescrito: LITBOR=5
	Fronteira aberta com traçador livre: LITBOR=4
	Fronteira fechada: LITBOR=2

O ficheiro final é criado pelo BlueKenue mas pode ser alterado posteriormente através de um editor de texto. Cada linha do ficheiro é dedicada a um nó da fronteira da malha, o que implica que o número de

linhas do ficheiro seja igual ao número de pontos localizados na fronteira. Os pontos no ficheiro aparecem de acordo com uma ordem geométrica específica em que o primeiro ponto a ser representado é o ponto com coordenadas mais baixas em x e em y e os restantes seguem o sentido anti-horário.

É através da ordem neste ficheiro que fica definida a numeração das fronteiras sólidas e líquidas.

Para cada ponto são dados valores ao LIHBOR, LIUBOR, LIVBOR, LITBOR, HBOR, VBOR, AUBOR, TBOR, ATBOR, BTBOR, N e K, o que permite definir por completo a fronteira.

O LIHBOR, LIUBOR, LIVBOR e LITBOR já se encontram descritos no quadro 3.1. o HBOR representa a profundidade prescrita no caso de o LIHBOR ser igual a 5; o UBOR representa a velocidade em u prescrita no caso de LIUBOR ser igual a 6; o VBOR representa a velocidade em v prescrita no caso de o LIVBOR ser igual a 6. AUBOR representa o coeficiente de atrito na fronteira se LIUBOR ou LIVBOR forem iguais a 2. Nesse caso a lei de atrito escreve-se como:

$$\nu_t \frac{\partial u}{\partial \hat{n}} = AUBOR * u \quad (\text{Eq. 3.5})$$

$$\nu_t \frac{\partial v}{\partial \hat{n}} = AUBOR * v \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Onde ν_t é o coeficiente de difusão turbulenta da velocidade, u e v são as médias na coluna de água das componentes horizontais da velocidade e $\hat{n}$ é o versor perpendicular à fronteira e dirigido para o exterior.

O coeficiente AUBOR é aplicado ao segmento entre o nó considerado e o nó seguinte, tendo em conta o sentido anti-horário. O valor por defeito é 0.

O coeficiente TBOR representa o valor prescrito do traçador quando o LITBOR é igual a 5. Os coeficientes ATBOR e BTBOR representam os coeficientes da relação do caudal. O coeficiente N representa o número global do ponto e o coeficiente K representa o número do ponto tendo em conta a ordem do ficheiro.

No caso do estuário do Douro foram definidas duas fronteiras sólidas e duas fronteiras líquidas. Tendo em conta a numeração do ficheiro das condições fronteira a primeira fronteira líquida é a fronteira oceânica e a segunda é a barragem de Crestuma. Quanto às fronteiras sólidas a primeira corresponde à linha de costa a sul do Douro e à margem esquerda do Douro até Crestuma e a segunda estende-se desde a barragem de Crestuma até à praia de Leça da Palmeira (ver Figura 3.7).

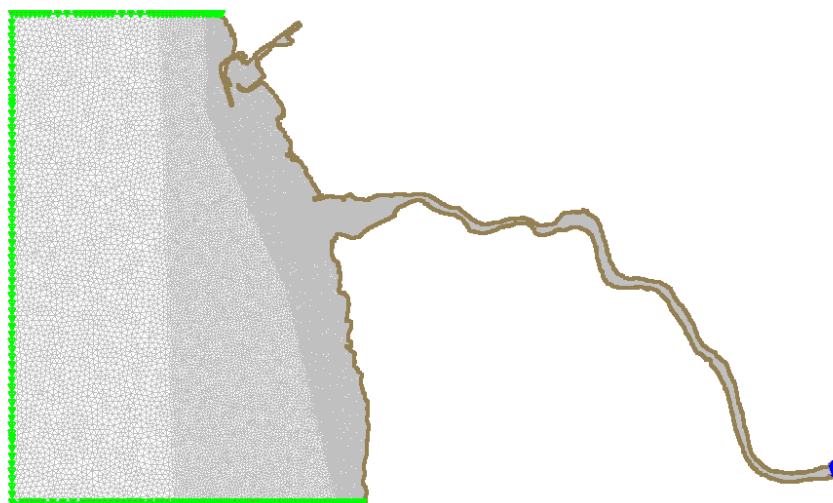


Figura 3.7- Delimitação das fronteiras no estuário do Douro.

A fronteira a verde corresponde à fronteira oceânica em que o único parâmetro prescrito foi a elevação da superfície livre. Os valores escolhidos para LIHBOR, LIUBOR e LIVBOR foram então 544. A fronteira a azul corresponde à barragem de Crestuma e aqui foi o caudal a ser prescrito, originando a sequência 455 para LIHBOR, LIUBOR e LIVBOR.

As fronteiras sólidas foram consideradas como sendo fechadas dando origem a uma sequência LIHBOR, LIUBOR e LIVBOR de 222. Como a elevação da superfície livre no oceano e os caudais em Crestuma são constantes ao longo da fronteira mas variáveis ao longo do tempo foi necessário criar ficheiros próprios para essa função (ficheiro das marés e das fronteiras líquidas) não se colocando portanto nenhum valor no ficheiro das condições-fronteira para HBOR, VBOR, UBOR, AUBOR, ATBOR e BTBOR. No caso do coeficiente AUBOR, apesar de as fronteiras serem consideradas sólidas considera-se que não existe aí atrito, daí o valor considerado para esse coeficiente ter sido 0.

Os traçadores utilizados para a melhor compreensão da dinâmica do estuário do Douro foram a temperatura e a salinidade. Estes traçadores são considerados traçadores ativos pois alteram a densidade da água, não se limitando apenas a ser transportados.

A salinidade e a temperatura apresentam uma grande influência na dinâmica das massas de água. No caso de um estuário o seu estudo revela-se importante para o melhor conhecimento dos fenómenos de mistura e estratificação e para melhor compreender as causas de algumas correntes de circulação.

Os únicos locais da fronteira do estuário onde o valor dos traçadores necessita de ser prescrito são a barragem de Crestuma e a fronteira oceânica, tendo nesses locais o coeficiente LITBOR valor 5. Tendo em conta que em todos os nós pertencentes a cada uma das fronteiras líquidas o valor dos traçadores é constante ao longo do tempo e do espaço optou-se por prescrever estes valores diretamente no FUDAA-PREPRO, deixando o coeficiente TBOR com o valor de 0 no ficheiro das condições fronteira.

Sendo assim, para a fronteira oceânica considerou-se uma salinidade de 35,8, com base em informação obtida pelo satélite Aquarius (<http://www.astronoo.com/pt/artigos/aquarius.html>) e uma temperatura da água do mar de 17 °C para o mês de Outubro tendo como base um estudo prévio feito por deCastro et al.(2008) onde se representou a temperatura superficial média do mar para a costa oeste da Península Ibérica. Para Crestuma, como é a fronteira do rio onde a água ainda não está misturada com o mar, tomou-se uma salinidade de 0 e uma temperatura de 8 °C tendo como base os resultados apresentados por Pinto.(2007) para medições feitas entre Fevereiro e Março de 2006.

No entanto, o Telemac 2D não consegue representar com fiabilidade estes traçadores pois como apresenta um valor médio na vertical, esse valor não consegue representar o que se passa ao longo da coluna de água. No caso da salinidade, dependendo do caudal descarregado pode-se formar a cunha salina, criando assim grandes variações de salinidade na vertical. O Telemac 2D ao fornecer um valor médio na vertical não permite a representação da variação real da salinidade ao longo da coluna de água.

3.2.5 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS GERAIS E FÍSICOS

A definição dos parâmetros é feita através do FUDAA-PREPRO. O programa fornece um conjunto de palavras-chave e o utilizador preenche consoante as necessidades da simulação.

Por exemplo, aparece a palavra-chave “*initial depth*” e se o modelo tiver uma profundidade inicial prescrita o utilizador coloca aí o valor pretendido.

É essencial definir o *time step*, ou seja, o tempo que separa dois instantes consecutivos da simulação e o *number of time steps* que permite ao utilizador escolher o número de vezes que quer que o *time step* se repita. A multiplicação entre os dois dá a duração total da simulação. É importante definir estas palavras-chave com algum cuidado porque é através destes valores que se pode obter resultados mais ou menos pormenorizados.

Optou-se por um *time step* de 6 s enquanto o *number of time steps* foi variando de acordo com as diferentes simulações a ser realizadas.

3.2.5.1 Lei e coeficiente de atrito no fundo

O movimento do escoamento provoca uma tensão de atrito no fundo do rio. Existem várias leis que permitem o cálculo dessa tensão, sendo umas baseadas em casos reais, as empíricas e outras baseadas em fundamentos teóricos (Machiels et al., 2009).

Para o caso 2DH a tensão de atrito atua na direção da corrente (embora no sentido contrário) e possui duas componentes (Hervouet, 2007):

$$\tau_{xz} = -\frac{u}{2} \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

$$\tau_{yz} = -\frac{v}{2} \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Onde u e v são as médias na coluna de água das componentes horizontais da velocidade, ρ é a densidade da água e C_f é o coeficiente de Chézy.

O coeficiente C_f que surge nas fórmulas não é muito utilizado. Normalmente utiliza-se o coeficiente de Chézy (C). Ambos os coeficientes se encontram relacionados pela seguinte fórmula (Hervouet, 2007):

$$C = \sqrt{\frac{2g}{C_f}} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Onde g é a aceleração gravítica e C_f é o coeficiente de Chézy.

No entanto, o coeficiente de Chézy é de difícil utilização por depender da rugosidade e da profundidade.

A lei empírica de Strickler permite ultrapassar este problema estabelecendo um coeficiente de atrito independente da profundidade. O coeficiente de Chézy segundo Strickler passou a ser:

$$C = Kh^{1/6} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Onde K é coeficiente de Strickler e h a profundidade.

O coeficiente de Strickler encontra-se relacionado com a rugosidade do fundo através da fórmula de Ramette, referido por Hervouet (2007):

$$K = 8.2 \frac{\sqrt{g}}{k_s^{1/6}} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Onde g é aceleração gravítica e k_s a rugosidade do fundo.

A lei de atrito utilizada no caso do estuário do Douro foi a de Strickler. Dado que para um canal os valores normais para o coeficiente de Strickler se encontram entre 20 e 40 $\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$, a calibração realizada apontou como aceitável o valor de 30 $\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$.

3.2.5.2 Atrito nas paredes laterais

Normalmente na modelação 2DH não é considerado o atrito nas paredes laterais, sendo os resultados obtidos bastante lógicos independentemente dessa escolha. No caso da modelação 2DH do estuário do Douro esse atrito também foi considerado nulo, sendo igualmente esse o valor por defeito assumido pelo Telemac.

3.2.5.3 Turbulência

A modelação da turbulência é um problema delicado. No presente caso optou-se por um coeficiente de viscosidade constante em todo o domínio, representando este coeficiente simultaneamente a viscosidade molecular, a viscosidade turbulenta e a dispersão.

Este coeficiente apresenta uma grande influência na extensão e forma da recirculação. Um valor muito baixo permite apenas a dissipação de pequenos vórtices enquanto um valor mais elevado possibilita a dissipação de sistemas de recirculação.

O Telemac assume por defeito o valor de $10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ para o coeficiente que se aproxima ao valor da viscosidade molecular da água. Mas este coeficiente foi calibrado.

Para a escolha do valor óptimo foram feitas várias simulações fazendo variar apenas o seu valor e verificou-se que o que melhor se ajustava aos resultados utilizados para a validação do modelo era o coeficiente com valor $1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Esse assunto será novamente retomado no capítulo 4.

3.2.5.4 Força de Coriolis

Quando se está a modelar grandes áreas é necessário ter também em consideração o efeito da inércia provocado pela força de Coriolis. O coeficiente de Coriolis é dado por:

$$f_c = 2 \times \omega \times \sin(\lambda) \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Onde $\omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ é a velocidade de rotação da Terra, λ é a latitude média da área que se está a modelar e f_c é o coeficiente de Coriolis.

A latitude média considerada foi $41^\circ 08' \text{ N}$ que corresponde à zona do Oceano Atlântico onde o rio Douro desagua.

É de frisar que esta latitude se encontra em coordenadas geográficas do WGS84. O Telemac trabalha com coordenadas militares do Datum Lisboa e o Google Earth que também será utilizado na análise de resultados trabalha com coordenadas geográficas do Datum WGS84.

O coeficiente de Coriolis utilizado foi $9.56 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$.

3.2.6 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS NUMÉRICOS

3.2.6.1 Número de Courant

Este valor é bastante importante porque representa o número de células da malha atravessadas por uma partícula de água durante um *time step*. Quanto maior for este valor maior é a instabilidade criada e menor é a qualidade dos resultados.

Utilizou-se como limite o valor $Cr=1$, ou seja, em cada *time step* as partículas atravessam apenas uma célula o que permitirá obter resultados mais corretos. O *time step* utilizado $\Delta t=6$ s permitiu garantir que $Cr < 1$ em praticamente todos os pontos do domínio, exceto nas zonas de planície de maré (*tidal flats*).

3.2.6.2 Tidal flats

A restinga foi considerada como sendo uma *tidal flat*, uma zona de deposição de sedimentos e detritos animais em que grande parte dos sedimentos depositados se encontra na zona entremarés, estando submersos quando a maré se encontra alta e ficando expostos quando a maré está baixa.

O tratamento das profundidades negativas é feito pelo Telemac, que deteta os sítios definidos como *tidal flats* e corrige o gradiente da superfície livre.

4

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO**4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO**

A calibração e validação são dois passos fundamentais a efetuar para garantir a fiabilidade dos resultados obtidos com um modelo numérico. A calibração consiste no acerto sucessivo dos vários parâmetros físicos e numéricos até os resultados obtidos irem de encontro ao esperado. A validação abrange a comparação dos resultados obtidos através do modelo com resultados obtidos em campanhas reais cuja informação é procedente de recolhas *in-situ* e, caso os resultados sejam semelhantes, com erros que possam ser desprezáveis ou que possam ser justificados, o modelo servirá como ferramenta para representar estados presentes e futuros da hidrodinâmica da área de estudo.

No caso do modelo 2DH do estuário do Douro, foram feitas numerosas simulações no sentido de acertar os parâmetros e obter os melhores resultados possíveis. Para a realização destes processos de calibração e validação utilizou-se a malha sem quebramares.

As primeiras simulações serviram para detetar um erro na malha na proximidade de Crestuma devido a confusões com as cotas da estrada que passa no coroamento da barragem. Também se detetou um problema nos pontos de interseção entre a fronteira oceânica e a fronteira sólida já que surgiam velocidades com intensidades e sentidos que não eram esperados. Isto está relacionado com a forma como o Telemac define as fronteiras, porque entre dois pontos cuja condição-fronteira está definida e é diferente o Telemac não permite definir nenhum tipo de fronteira, sendo uma incógnita a forma como ele assume a fronteira desse segmento. Foi necessário fazer novas simulações para encontrar a melhor forma de definir a fronteira desses pontos sem que surgissem velocidades fisicamente inconsistentes.

Após as correções, e tendo já alguns dos parâmetros físicos bem definidos, como é o caso do coeficiente de Coriolis e do atrito no fundo e nas paredes laterais, faltava apenas definir o modelo de turbulência e a viscosidade turbulenta.

Comprovou-se que na modelação 2DH um modelo de turbulência com viscosidade constante é suficiente para obter bons resultados. Assim sendo, foi esse o modelo utilizado. Para a definição da viscosidade turbulenta foram necessárias várias simulações de forma a escolher o valor mais adequado. Testaram-se as viscosidades turbulentas de 1000, 100, 10, 1, 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} e $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Os valores obtidos para a elevação da superfície livre correspondente à viscosidade de $1000 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ não seguiam os padrões esperados e no caso da de $100 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ a elevação era um pouco mais elevada do que as restantes e do que os dados de campanha, tendo ambas as viscosidades sido excluídas. As restantes não apresentam grandes variações entre si, sendo a de $10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ a que talvez apresentasse maior disparidade. A viscosidade escolhida foi então $1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ porque é a que melhor permite representar o estuário do Douro.

Todas as simulações feitas no âmbito da calibração pertenceram ao período de tempo entre as 00:00 h do dia 18 de Setembro de 1994 e as 24:00 h do dia 21 de Setembro de 1994. Algumas percorreram os 4 dias, outras apenas um ou dois, consoante as necessidades. O *time step* utilizado foi de 6 s ainda que

para alguns testes iniciais também se tenha utilizado um *time step* de 12 s. Os resultados destas simulações permitiram obter informação acerca da elevação da superfície livre e das duas componentes da velocidade média na vertical.

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

A recolha de dados para comparação com os resultados obtidos através do Telemac foi feita em diferentes localizações e com recurso a instrumentos diferentes (ver Figura 4.1). Estas medições foram efetuadas numa Campanha Hidromorfológica para o estudo da Barra do Douro efetuada a pedido da Administração dos Portos do Douro e Leixões (APDL) entre Setembro e Outubro de 1994. Esta campanha foi feita com o intuito de avaliar a possível construção dos molhes, daí a necessidade de conhecer na totalidade o comportamento do estuário de forma a ser mais fácil avaliar o impacto provocado pela construção das obras marítimas.

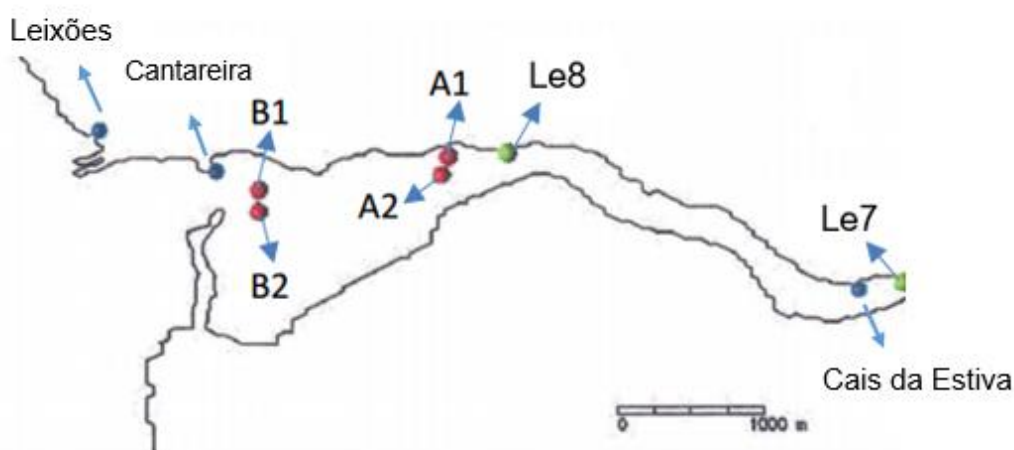


Figura 4.1-Localização dos pontos das medições.

Na Figura 4.1 os três pontos a azul correspondem aos marégrafos, instrumentos onde são registadas as variações do nível da maré ao longo do tempo. O marégrafo da Cantareira é o que se encontra junto à restinga do Cabedelo e o marégrafo de Cais da Estiva é o que se encontra mais a montante, junto ao cais da Ribeira. O marégrafo que se encontra fora do estuário é o marégrafo do Porto de Leixões localizado no interior do porto e constituído por um marégrafo de flutuador e contrapeso com registo analógico e por um marégrafo de registo digital (Almeida et al., 2009). O marégrafo de flutuador regista as oscilações de um flutuador junto à superfície devido às ações da maré através da ligação do flutuador a um sistema de pesos e contrapesos.

Nos pontos a verde (Le7 e Le8) foram colocados correntómetros que têm como principal objetivo medir a intensidade e a direção da corrente. Estas medições foram feitas em dois pontos da coluna vertical: superfície e fundo. Nos pontos a vermelho, denominados como A1, A2, B1 e B2 foram efetuadas as mesmas medições que nos pontos Le7 e Le8 e além disso foram utilizados nefelómetros para medir a quantidade de sedimentos em suspensão na água. Os dados de correntes obtidos foram medidos em três pontos da coluna de água: superfície, meio e fundo.

No Quadro 4.1 encontram-se as coordenadas geográficas e militares Datum Lisboa para cada um dos pontos onde se efetuaram as medições.

Quadro 4.1- Coordenadas dos pontos de medição.

Local	Coordenadas			
	Militares		Geográficas	
	M	P	Latitude	Longitude
Leixões	152183	468699	41° 11' 03.974"	-08° 42' 06.501"
Cantareira	155200	464283	41° 08' 41.457"	-08° 39' 55.898"
Cais da Estiva	159674	463552	41° 08' 18.607"	-08° 36' 43.885"
A1	156845.99	464388.51	41° 08' 45.198"	-08° 38' 45.347"
A2	156786.86	464273.69	41° 08' 41.465"	-08° 38' 47.853"
B1	155546.58	464171.23	41° 08' 37.903"	-08° 39' 41.008"
B2	155524.09	464024.61	41° 08' 33.146"	-08° 39' 41.934"
Le7	159997.74	463531.49	41° 08' 18.000"	-08° 36' 30.000"
Le8	157271	464382	41° 08' 45.068"	-08° 38' 27.121"

A validação da elevação da superfície livre e da velocidade da corrente foi feita para duas simulações sendo que uma começou às 00:00 h do dia 18 de Setembro e terminou às 24:00 h do dia 19 (dois dias de duração) e a outra começou às 00:00 h do dia 25 de Setembro e terminou às 24:00 h do dia 4 de Outubro (10 dias de duração). Em ambas as simulações o *time step* utilizado foi 6 s. Os gráficos com a comparação dos valores da elevação da superfície livre entre os resultados obtidos no modelo do Telemac 2D e os três marégrafos para a simulação de 18 a 19 de Setembro encontram-se nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

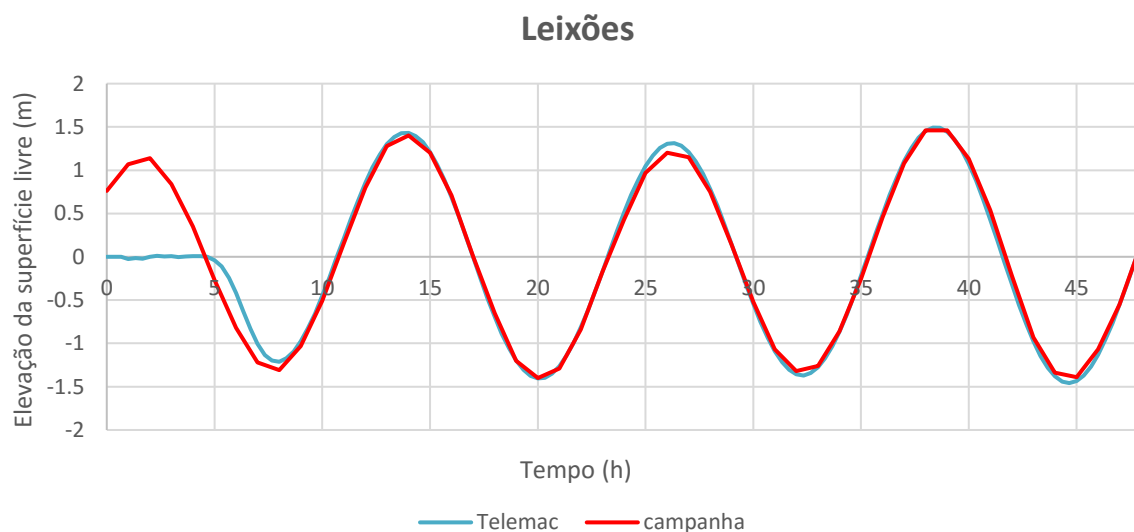


Figura 4.2- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.

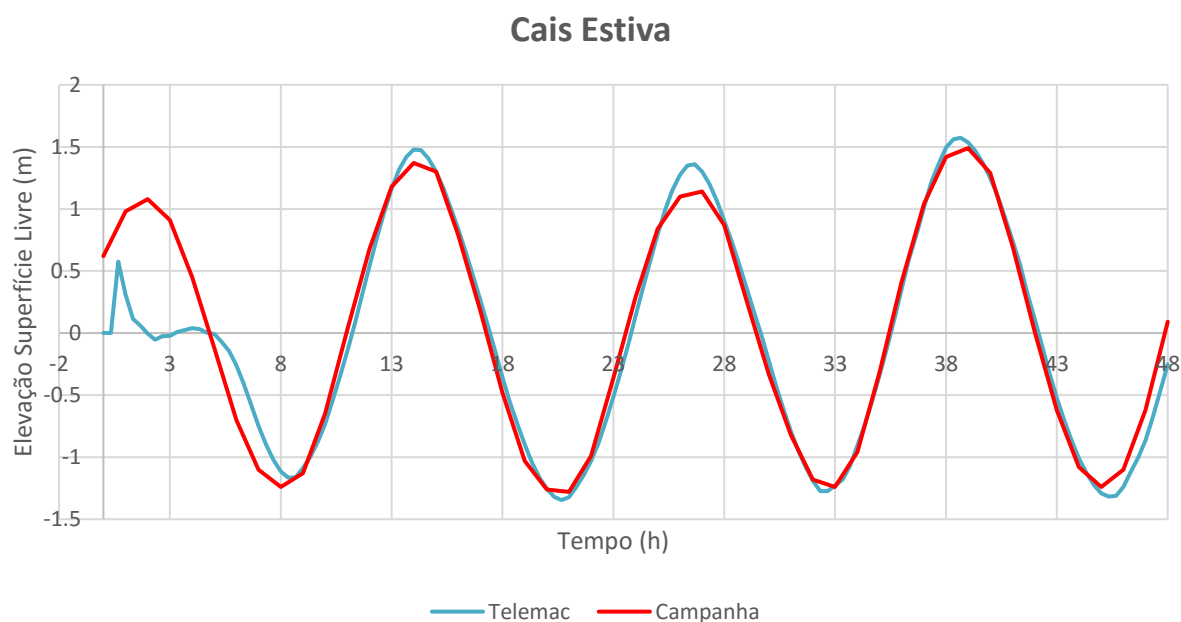


Figura 4.3- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.

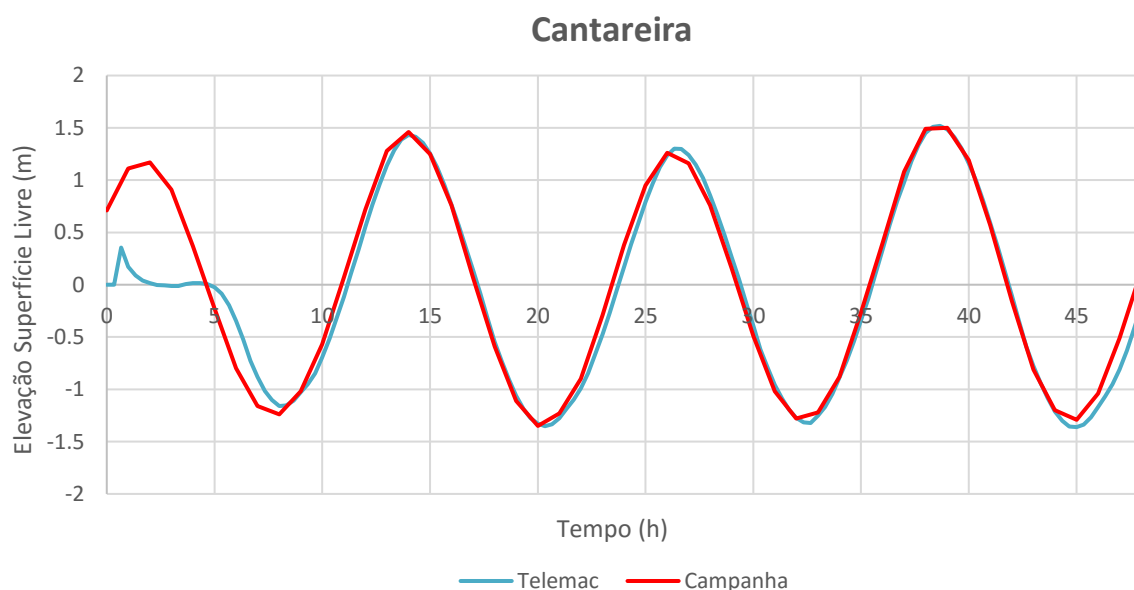


Figura 4.4- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.

Até cerca dos 20000 s de simulação os resultados do modelo numérico não acompanham os registos dos marégrafos. Isto deve-se às condições iniciais escolhidas (elevação da superfície livre e velocidade nulas) e a uma rampa inicial de 6 h nas condições fronteira de maré e de caudal fluvial. Quando a simulação começa a ter o comportamento esperado verifica-se que em Leixões os resultados são muito parecidos com os de campanha, no Cais da Estiva as marés cheias e vazas acontecem simultaneamente

na simulação e em campanha, verificando-se apenas no modelo uma pequena sobre-elevação nas marés cheias que pode estar relacionada com diferenças entre a batimetria e os contornos reais do estuário nas datas de realização da campanha e as condições introduzidas na malha do modelo. Na Cantareira os resultados do modelo apresentam-se muito semelhantes aos dados de campanha.

Os gráficos com a comparação dos valores da elevação da superfície livre entre os resultados obtidos no modelo do Telemac 2D e os três marégrafos para a simulação de 25 de Setembro a 4 de Outubro encontram-se representados nas Figuras 4.5 a 4.13.

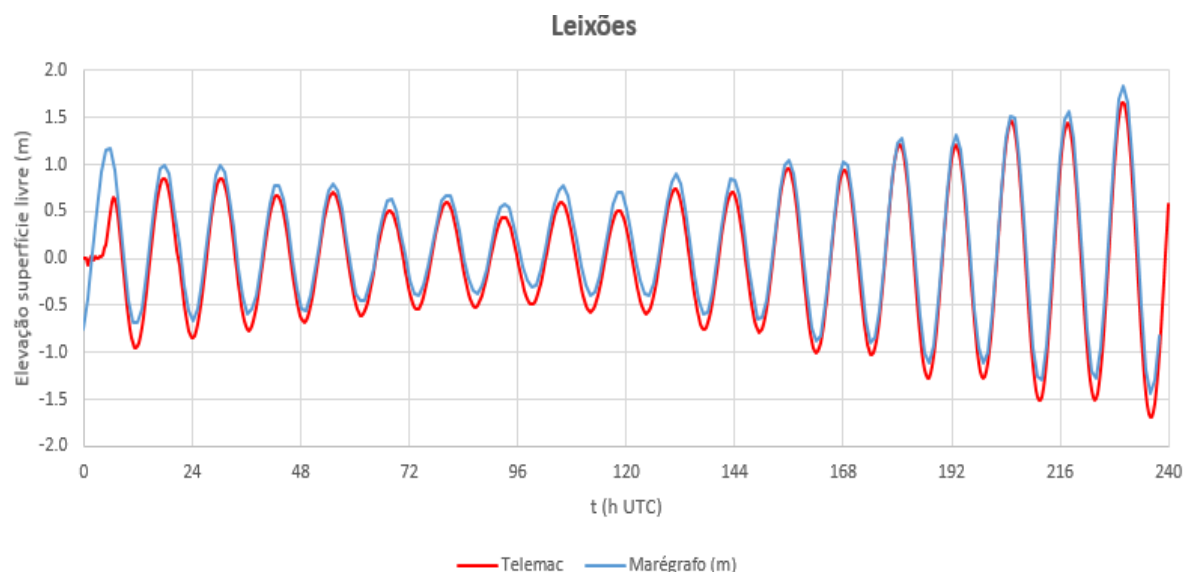


Figura 4.5- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões no período entre 25 de Setembro e 4 de Outubro de 1994.

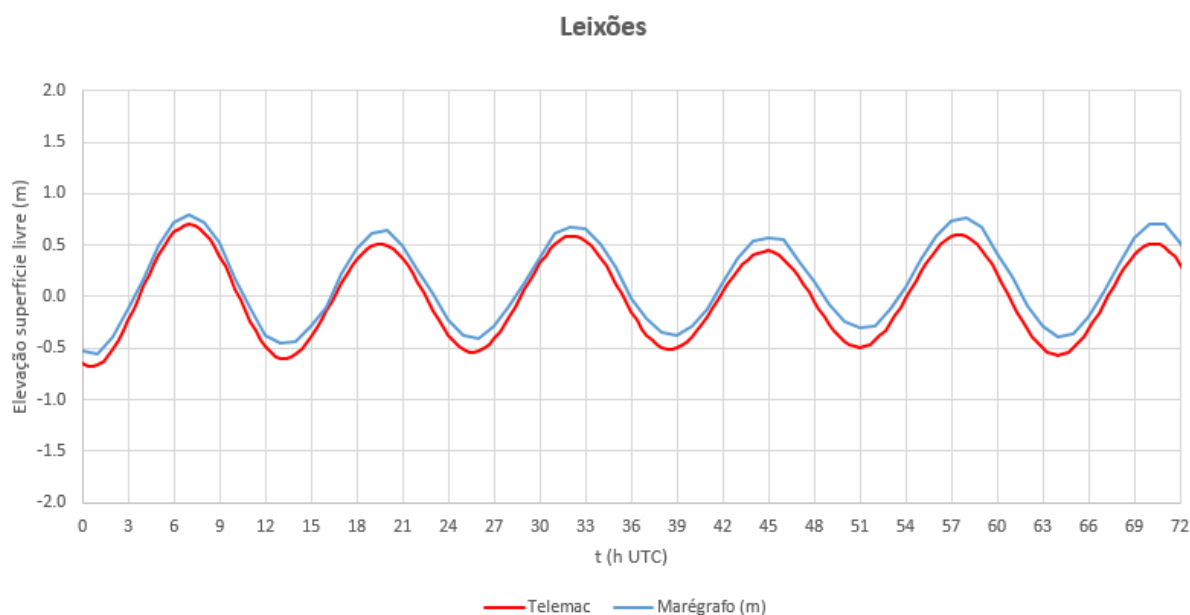


Figura 4.6- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões no período entre 27 e 29 de Setembro de 1994.

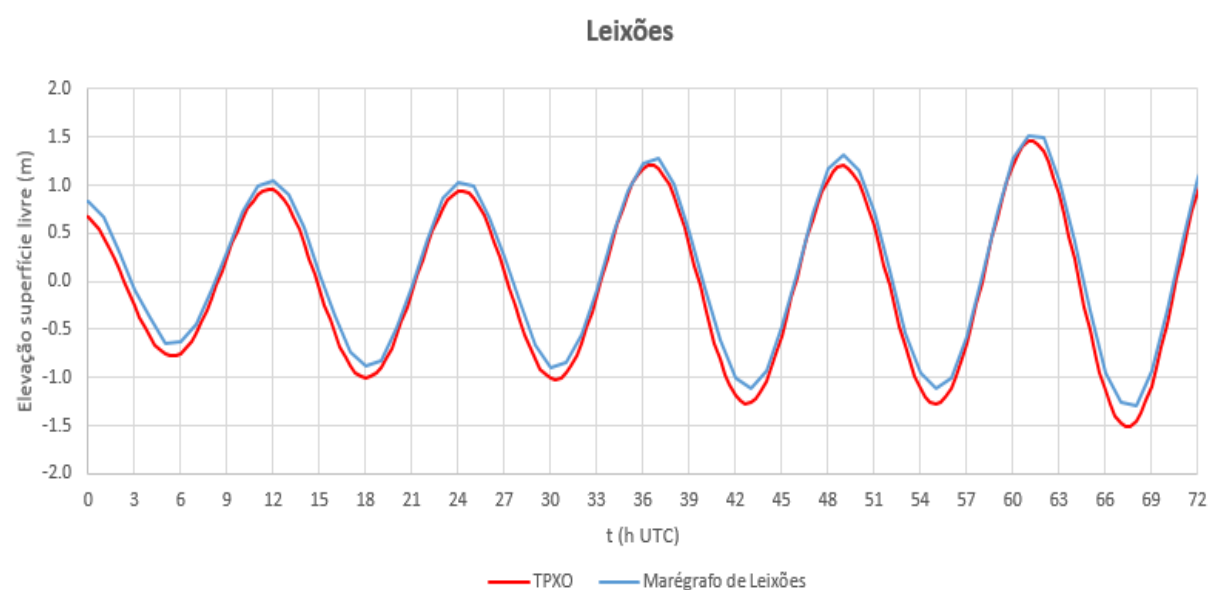


Figura 4.7-Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões no período entre 1 e 3 de Outubro de 1994.

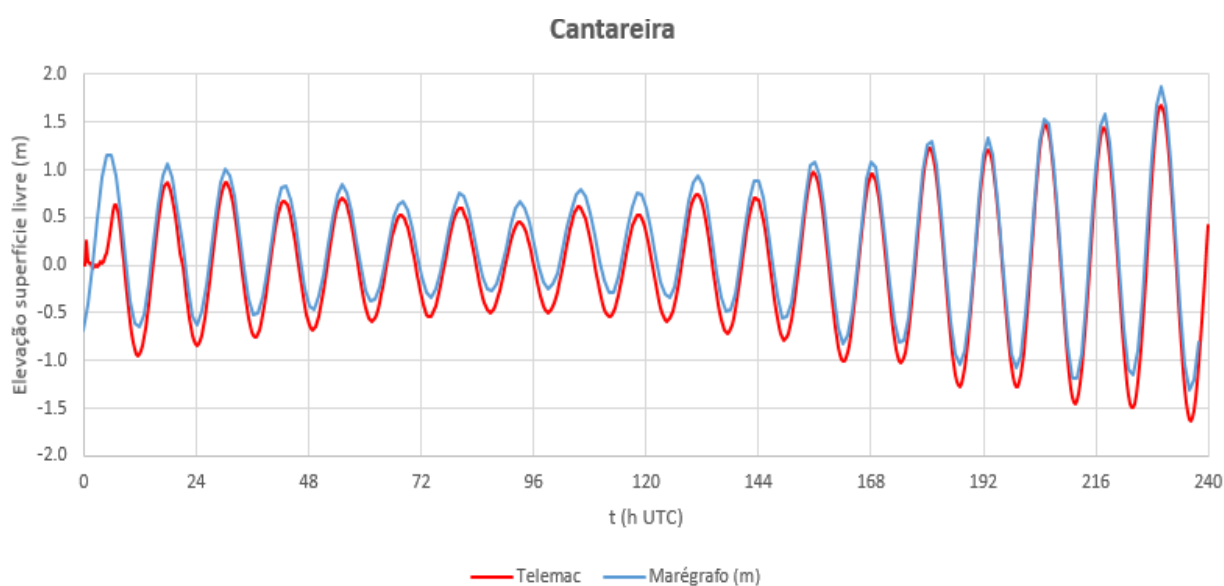


Figura 4.8-Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 25 de Setembro e 4 de Outubro.

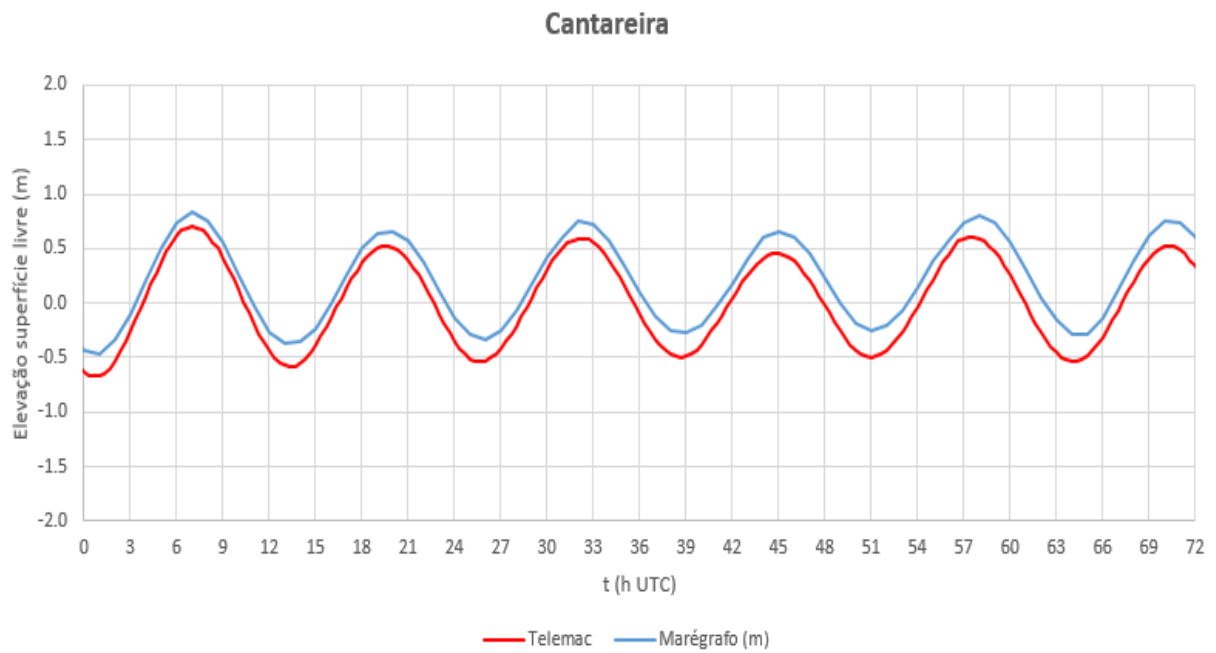


Figura 4.9- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 27 e 29 de Setembro de 1994.

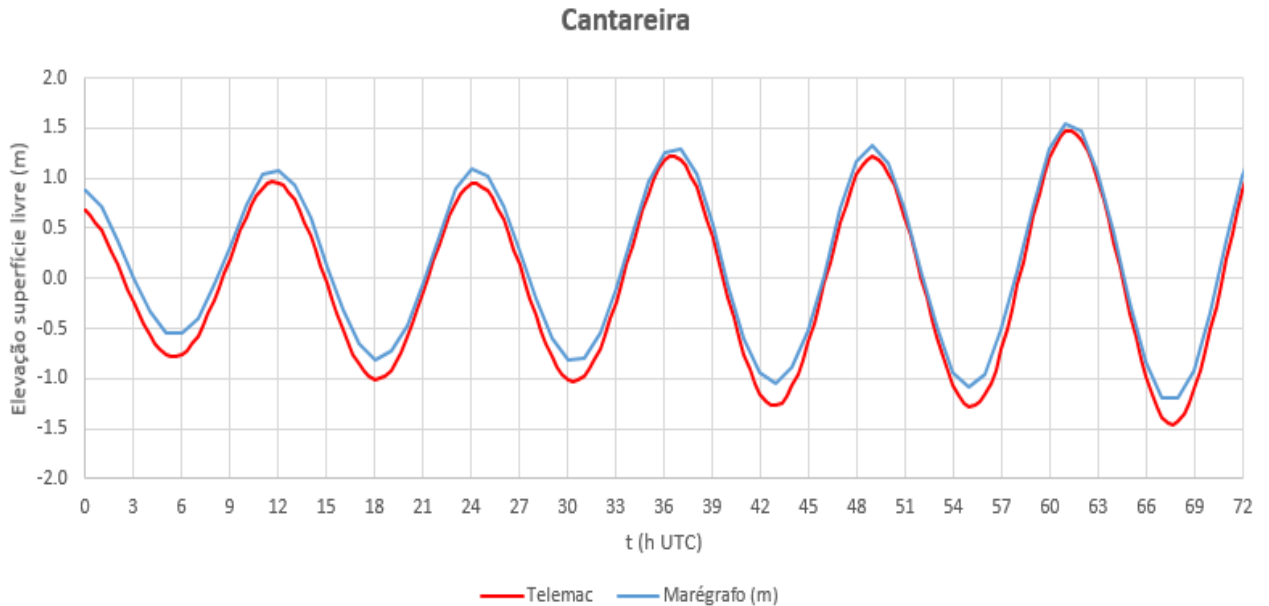


Figura 4.10- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cantareira no período entre 1 e 3 de Outubro de 1994.

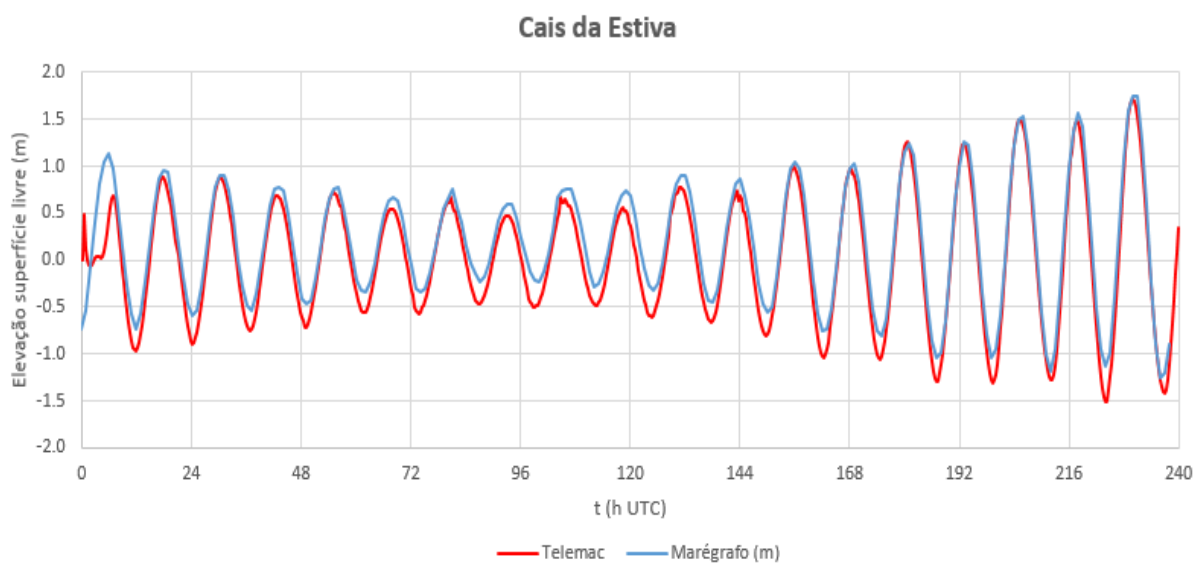


Figura 4.11- Elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 25 de Setembro e 4 de Outubro de 1994.

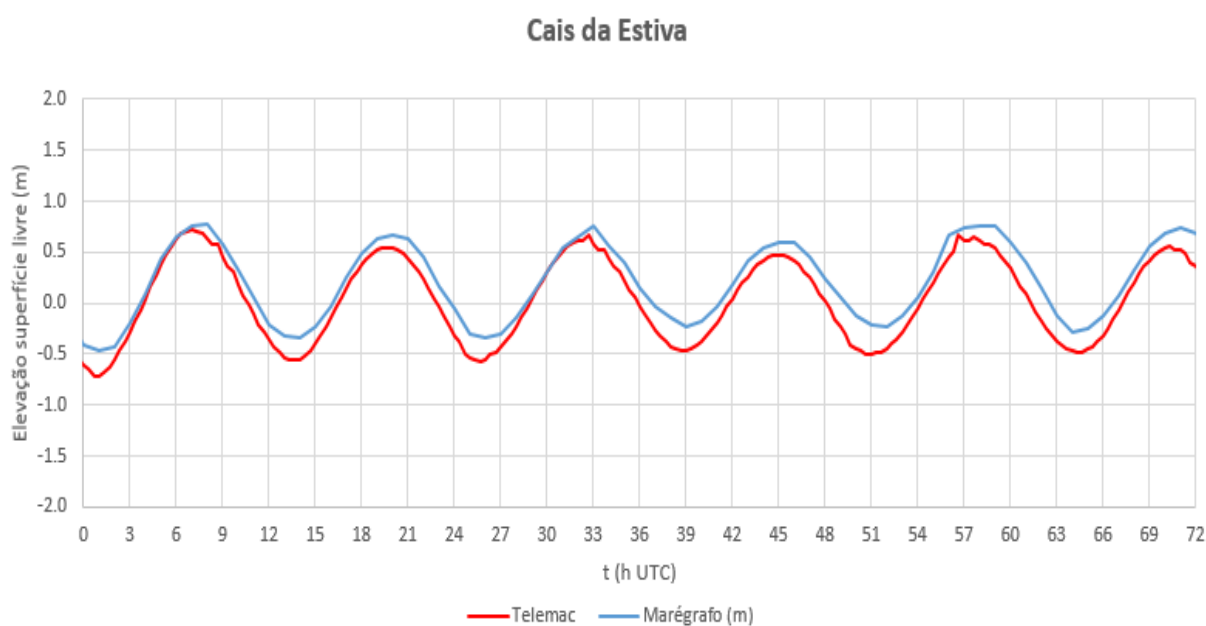


Figura 4.12- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 27 e 29 de Setembro de 1994.

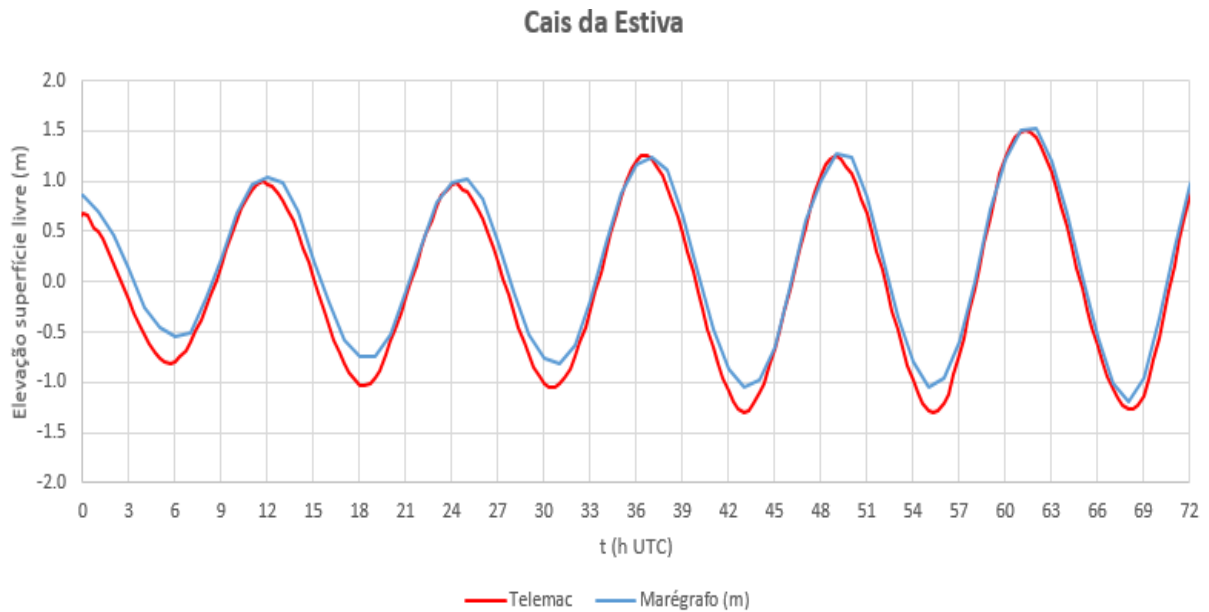


Figura 4.13- Pormenor da elevação da superfície livre registada no marégrafo de Cais da Estiva no período entre 1 e 3 de Outubro de 1994.

Como se pode verificar parece existir uma subestimação sistemática da elevação da superfície livre calculada pelo modelo, que poderia ser explicada por alguma falha nas condições iniciais assumidas na construção da simulação ou pela falta de consideração na modelação de fenómenos meteorológicos como o vento ou as variações de pressão que também influenciam a maré. Para explicar esta diferença fez-se uma comparação entre a elevação da superfície livre medida no marégrafo de Leixões e a elevação provocado pelo modelo de marés TPXO.2 utilizado como condição fronteira do modelo para verificar se o problema seria do modelo de marés ou de algum fenómeno de baixas pressões (ver Figura 4.14).

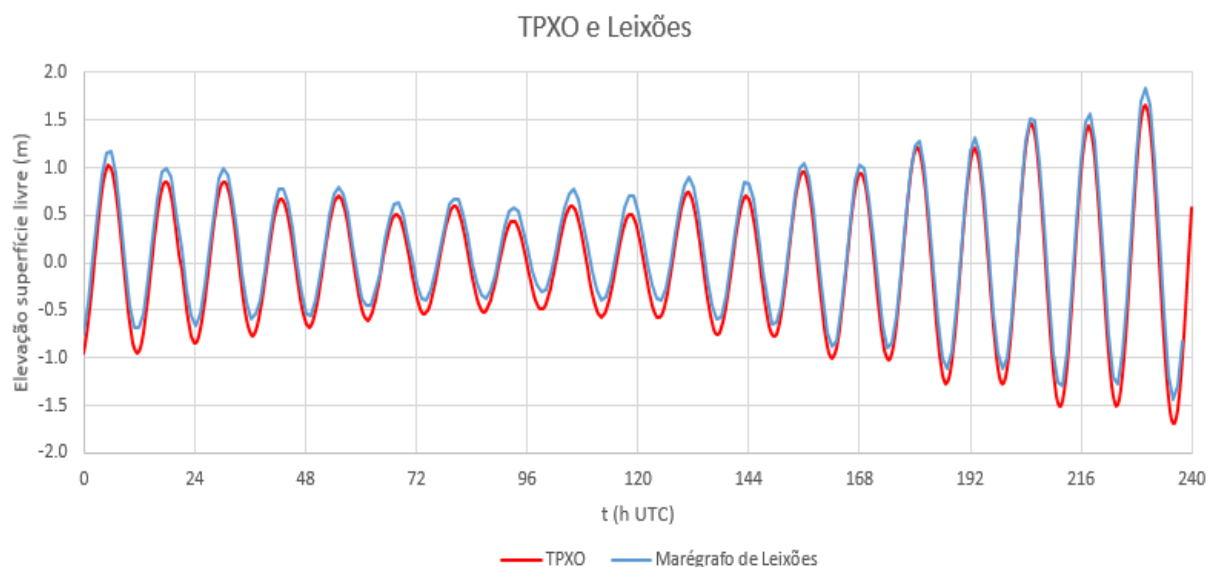


Figura 4.14- Comparação entre a elevação da superfície livre registada no marégrafo de Leixões e a maré criada pelo modelo de marés TPXO.2 e introduzida no modelo para o período entre 25 de Setembro e 4 de Outubro de 1994.

A Figura 4.14 mostra que a subestimação sistemática da superfície livre continua a existir. A informação meteorológica existente não regista a ocorrência de nenhuma zona de baixa pressão na região pelo que será de admitir alguma falha no modelo de marés extraído para a zona em estudo, podendo ser, por exemplo, a falta de uma constituinte harmónica importante.

Ao estar a utilizar a versão 2DH do OpenTelemac, os resultados da velocidade procedentes do modelo correspondem, para cada ponto, à média vertical da velocidade horizontal. Para poder comparar com os resultados procedentes das campanhas de amostragem é necessário tratar estes dados antes de os comparar. Como nos pontos Le7 e Le8 as medições são feitas em dois pontos da coluna vertical, superfície e fundo, a velocidade da corrente resulta da média das velocidades das duas profundidades. Nos pontos A1, A2, B1 e B2 as velocidades da corrente foram medidas em três pontos: superfície, meia água e fundo. A média vertical escalar das velocidades horizontais no caso desses pontos foi calculada como sendo:

$$\bar{U} = \frac{U_s \frac{0.25 + d_m}{2} + U_m \frac{d_f - 0.5}{2} + U_f \left(\frac{d_f - d_m}{2} + 0.5 \right)}{d_f + 0.5} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde U_s , U_m e U_f são as velocidades da corrente na superfície, na superfície, meia água e fundo, d_m é a profundidade de medição da velocidade da corrente a meia água e d_f é a profundidade de medição da velocidade da corrente no fundo (m)

A velocidade superficial foi medida a 0.5 m da superfície e a velocidade do fundo a 0.5 m do fundo.

No caso do Telemac 2D o valor da velocidade da corrente resulta da raiz quadrada da soma dos quadrados das duas componentes (Eq. 4.2) e o sentido da corrente é igual ao sentido da componente u devido à sua orientação Oeste-Este, sendo essa a componente longitudinal no estuário. Quando o sentido da corrente é positivo isso significa que a água se desloca da embocadura para montante (situação de enchente) e quando o sentido é negativo a corrente desloca-se no sentido contrário (situação de vazante).

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde u e v são as médias na coluna de água das componentes horizontais da velocidade.

A validação da corrente foi feita para os dias indicados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2- Dias para os quais foi feita a validação da corrente e os pontos correspondentes.

Pontos	Período validação
Le7	18 a 19 Setembro
Le8	18 a 19 Setembro
A1	18 a 19 Setembro 1 Outubro 27 Setembro
A2	18 a 19 Setembro 1 Outubro 27 Setembro
B1	3 Outubro 21 Setembro 29 Setembro
B2	29 Setembro 3 Outubro 21 Setembro

A comparação das correntes obtidas através do Telemac 2D e das medições feitas em campanha para os pontos Le7 e Le8 encontra-se nas Figuras 4.15 e 4.16.

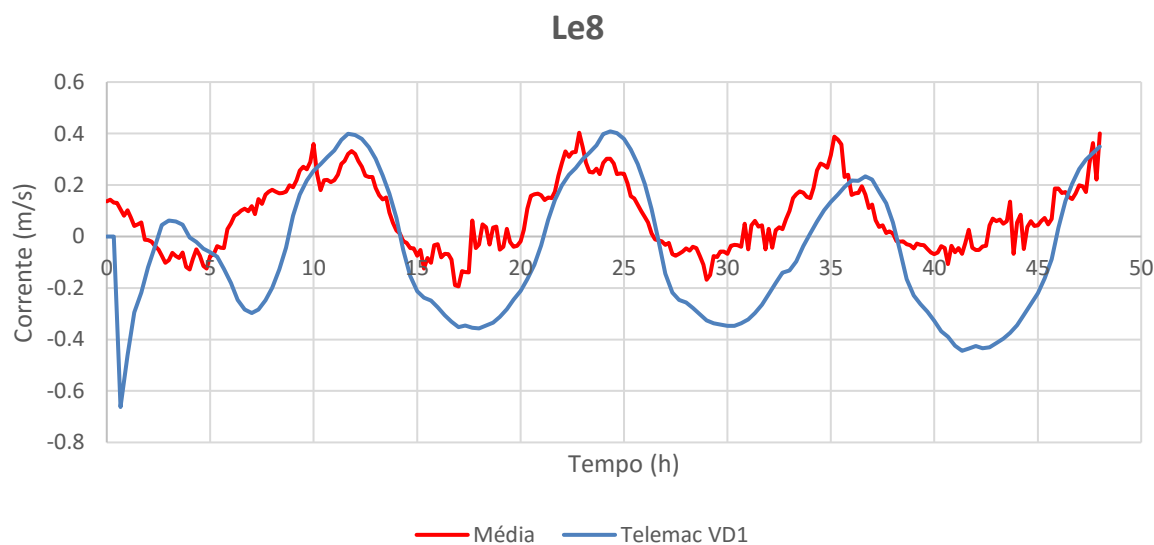


Figura 4.15- Corrente registada no ponto Le8 no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.

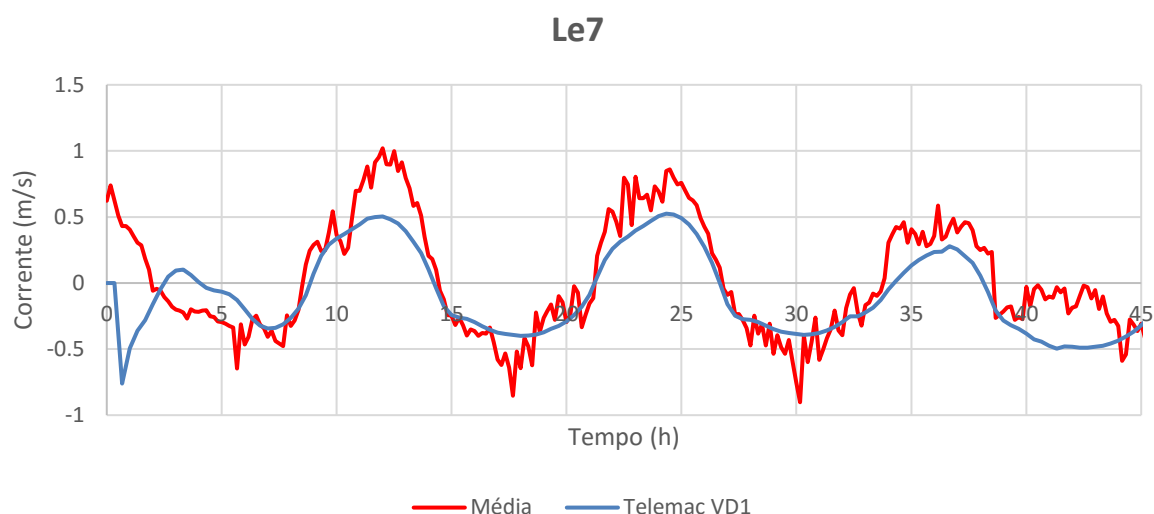


Figura 4.16- Velocidade da corrente registada no ponto Le7 no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.

No ponto Le8 verifica-se que existe um desfasamento de aproximadamente duas horas entre o pico da velocidade da corrente entre a campanha e o modelo. As velocidades da corrente negativas são superiores no modelo, chegando em alguns casos a ser 0.4 m/s superiores. No ponto Le7 não se verifica desfasamento entre os picos. Continua no entanto a verificar-se alguma diferença entre os picos da velocidade da corrente entre o modelo e a campanha. Neste caso é a campanha que apresenta sempre valores mais elevados.

As diferenças nas velocidades medidas e simuladas nos pontos Le7 e Le8 podem ser devidas à configuração da malha adotada no estudo. Estes pontos estão muito próximos da margem do estuário, o que faz com que pequenas diferenças entre a batimetria real e a simulada possam produzir essas alterações. Além disso, a medida das velocidades nos pontos de medição foi calculada utilizando unicamente dois pontos da coluna de água. Esta falta de informação pode alterar o valor médio medido e dar lugar a estas discrepâncias.

Os resultados das Figuras 4.17 e 4.18 correspondem a períodos específicos da simulação centrados por volta das 31 h devido ao período curto de amostragem realizado nos pontos A1 e A2.

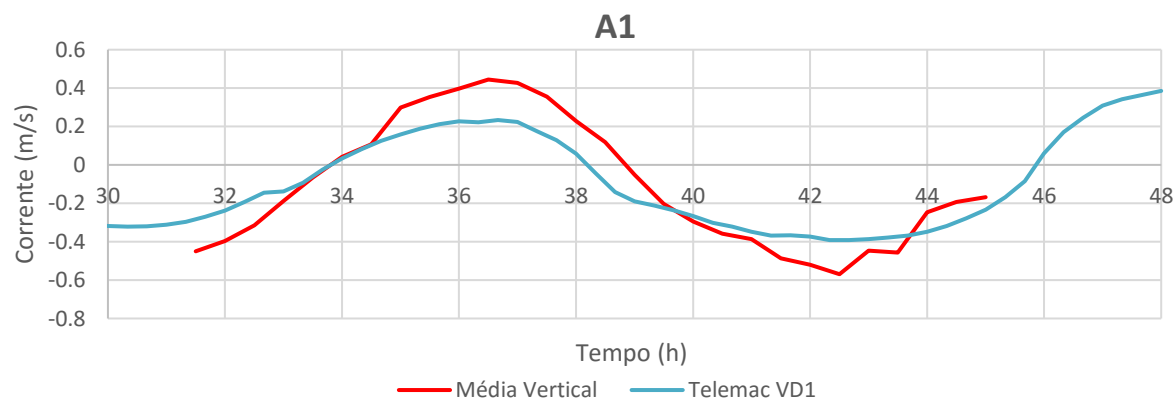


Figura 4.17- Corrente registada no ponto A1 no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.

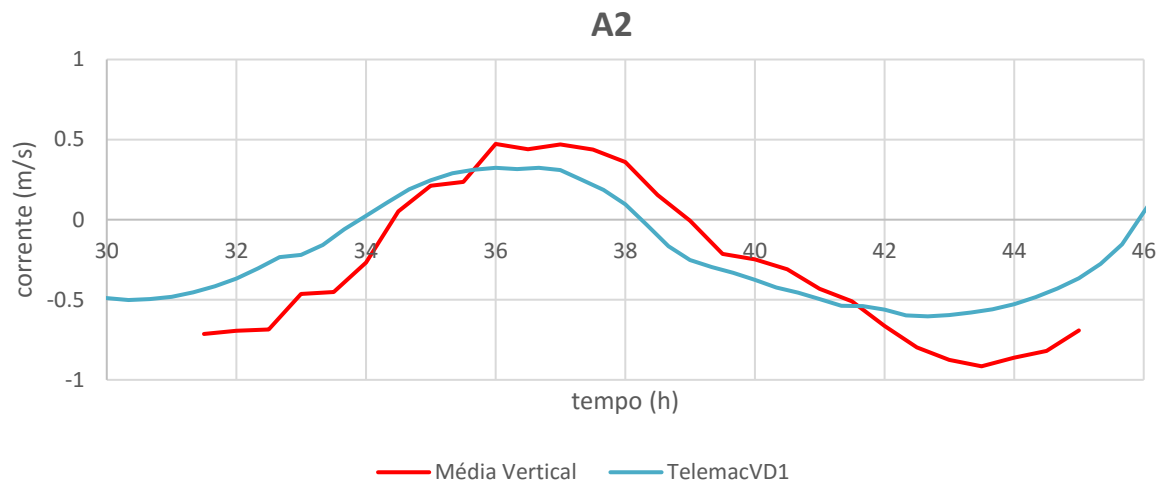


Figura 4.18- Corrente registada no ponto A2 no período entre 18 e 19 de Setembro de 1994.

Os picos ocorrem quase simultaneamente no modelo e na campanha. Verificam-se novamente algumas diferenças entre os valores, chegando no ponto A2 a ocorrer uma diferença de 0.4 m/s. O facto de a campanha ter sido realizada em 1994 e a batimetria utilizada no modelo ser de 2002 pode ter provocado estas diferenças. Além disso, como os caudais utilizados no modelo seguiram padrões horários de 1998 podem existir pequenas variações responsáveis também por algumas diferenças.

Além do cálculo da velocidade da corrente através da Equação 4.2 também foi necessário aplicar uma correção no fuso horário, pois em 1994 a hora de Inverno encontrava-se uma hora adiantada (UTC+1) e a hora de Verão duas horas adiantada (UTC+2). Foram transformadas todas as horas em UTC para ser possível estabelecer uma comparação.

Da Figura 4.19 à Figura 4.28 encontram-se os restantes gráficos de comparação entre a corrente obtida pelo modelo e as medições nos correntómetros para diversos períodos nos pontos A1, A2, B1 e B2.

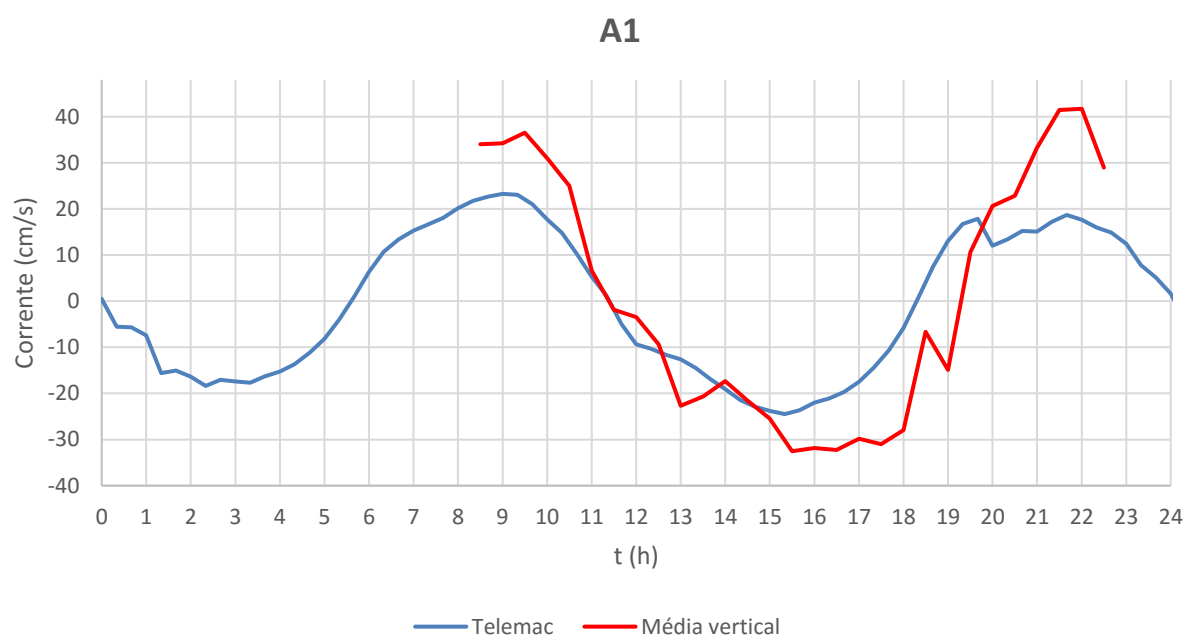


Figura 4.19- Corrente no ponto A1 no dia 1 de Outubro de 1994.

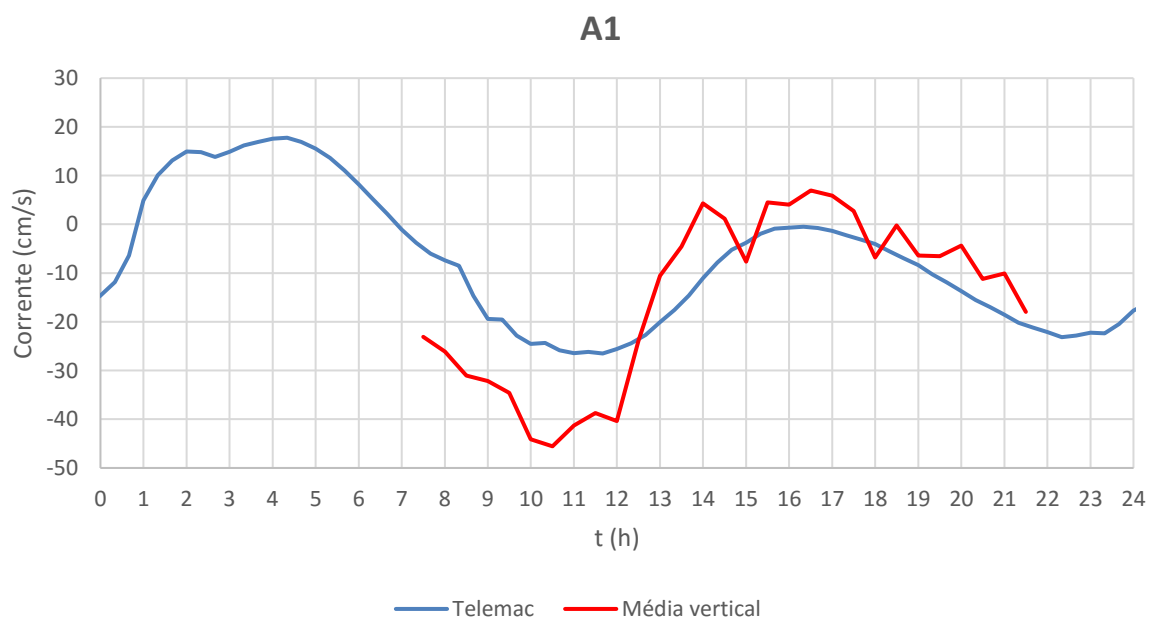


Figura 4.20- Corrente no ponto A1 no dia 27 de Setembro de 1994.

A2

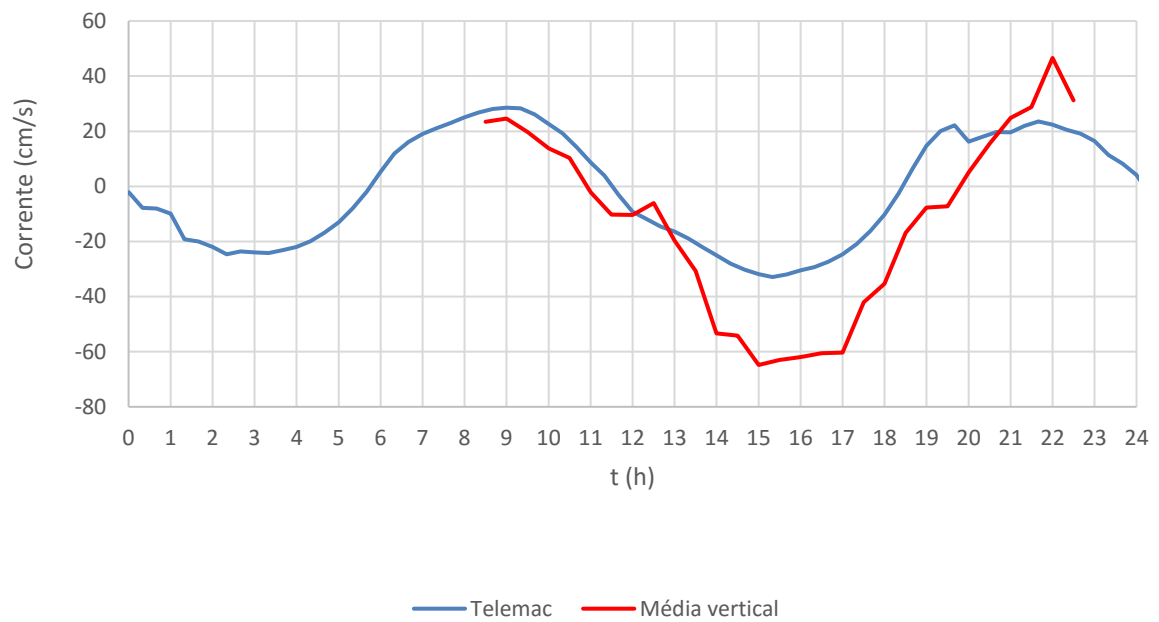


Figura 4.21- Corrente no ponto A2 no dia 1 de Outubro de 1994.

A2

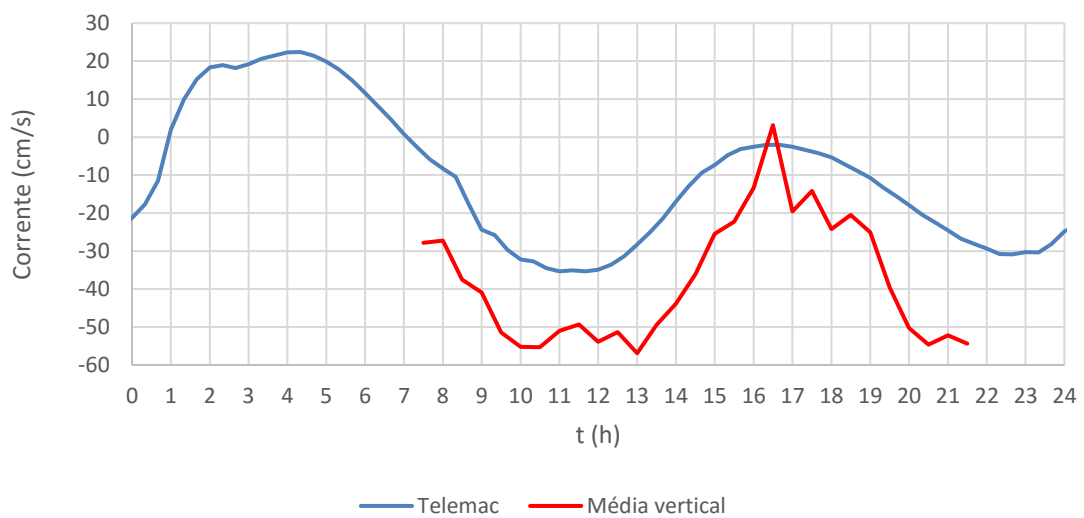


Figura 4.22- Corrente no ponto A2 no dia 27 de Setembro de 1994.

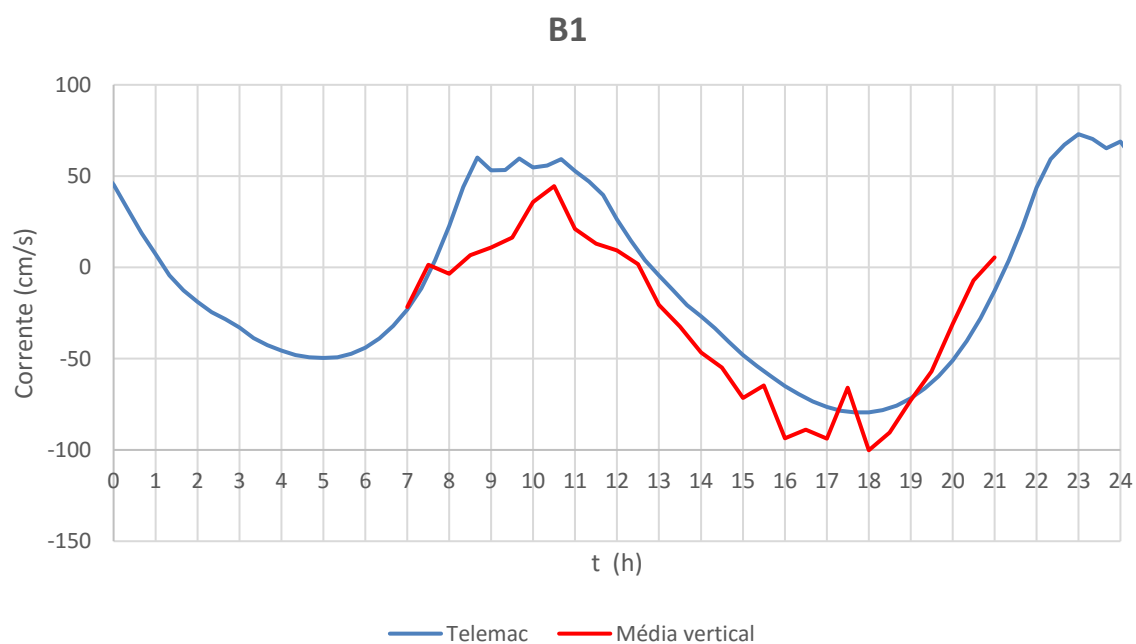


Figura 4.23- Corrente no ponto B1 no dia 3 de Outubro de 1994.

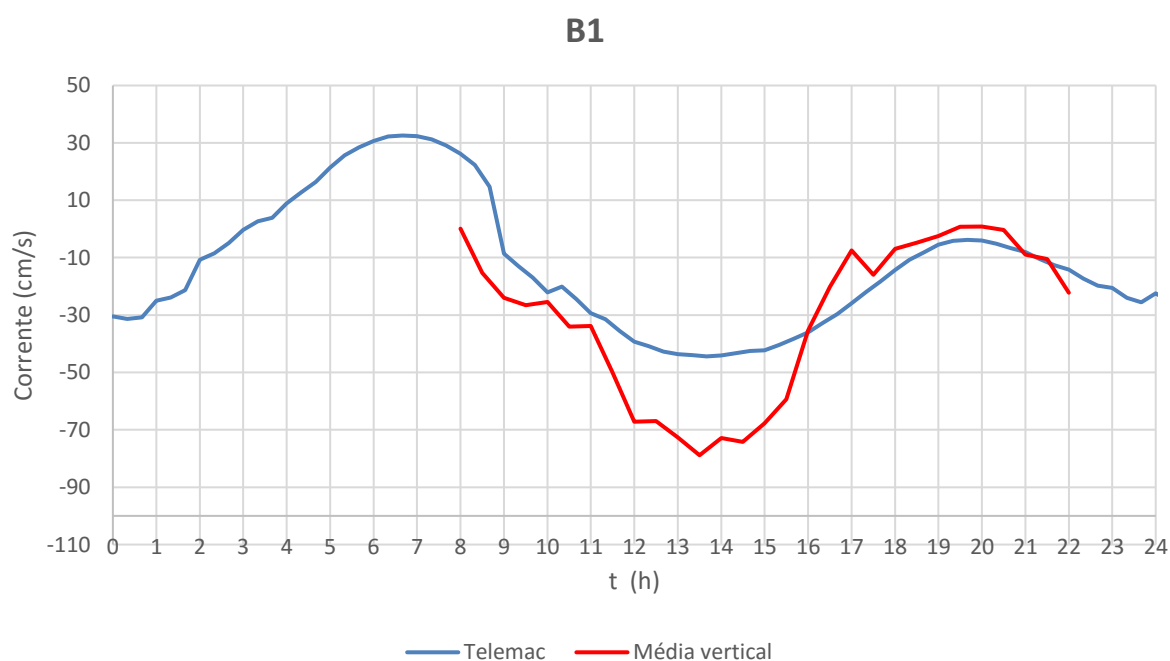


Figura 4.24- Corrente no ponto B1 no dia 29 de Setembro de 1994.

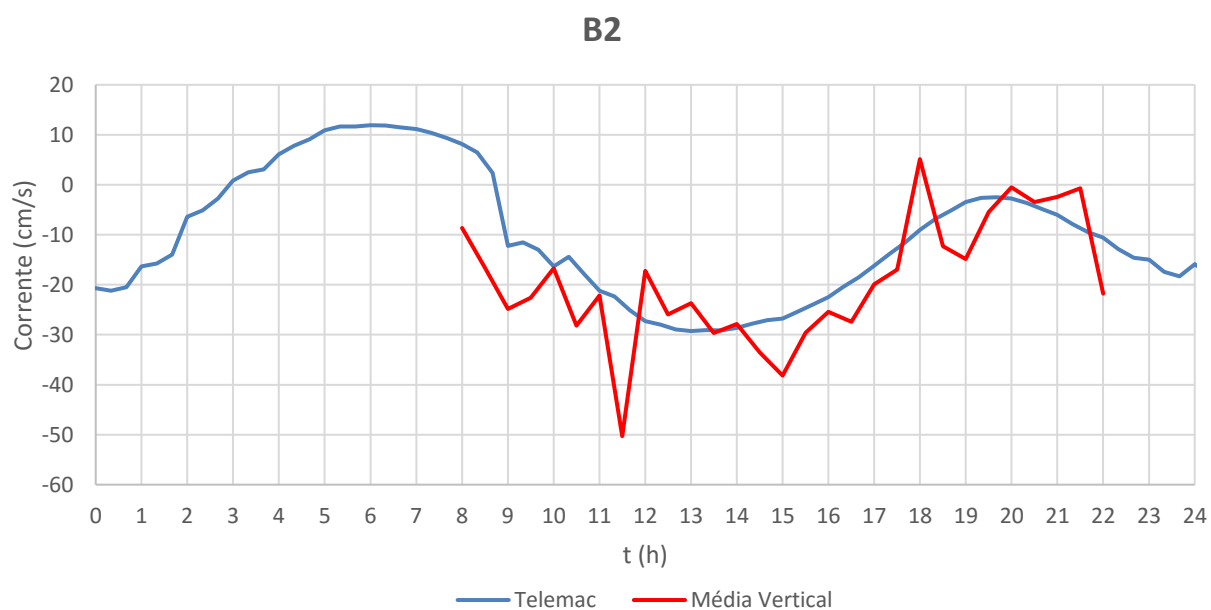


Figura 4.25- Corrente no ponto B2 no dia 29 de Setembro de 1994.

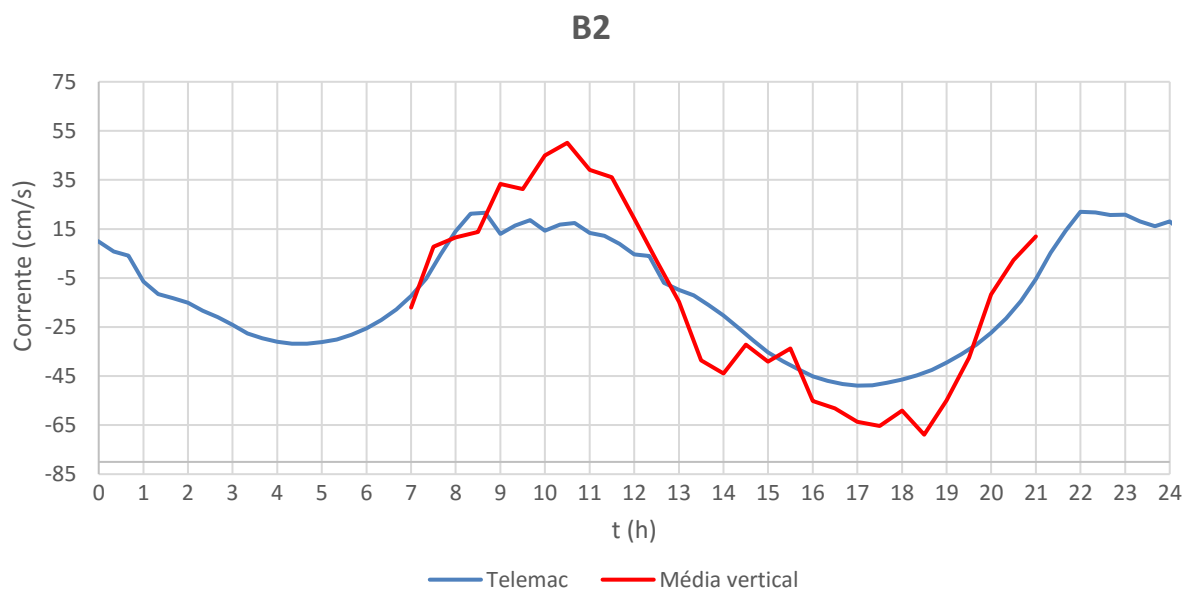


Figura 4.26- Corrente no ponto B2 no dia 3 de Outubro de 1994.

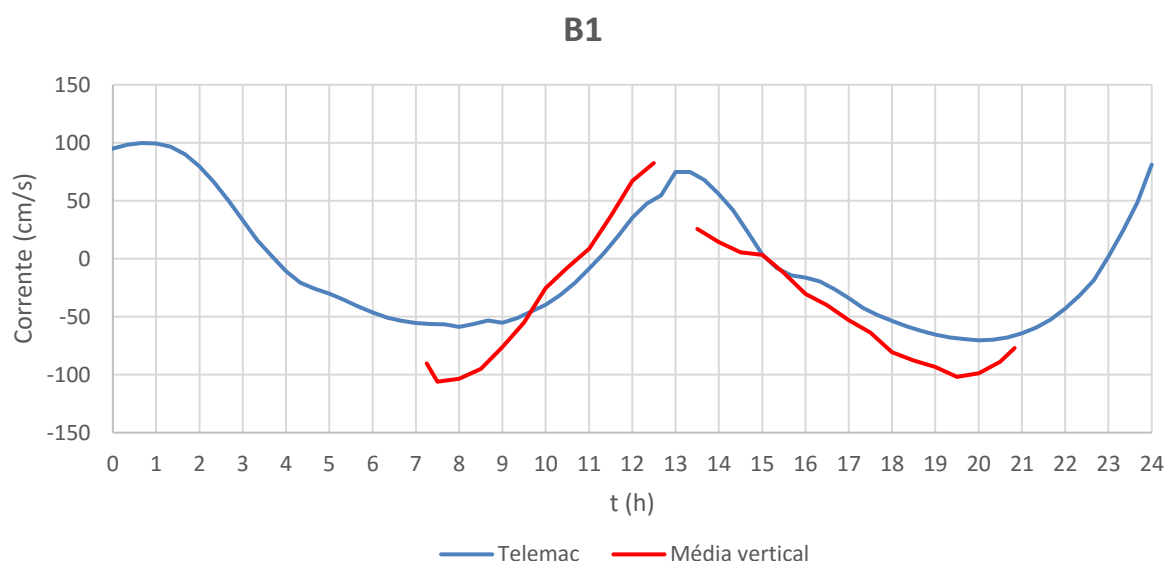


Figura 4.27- Corrente no ponto B1 no dia 21 de Setembro de 1994.

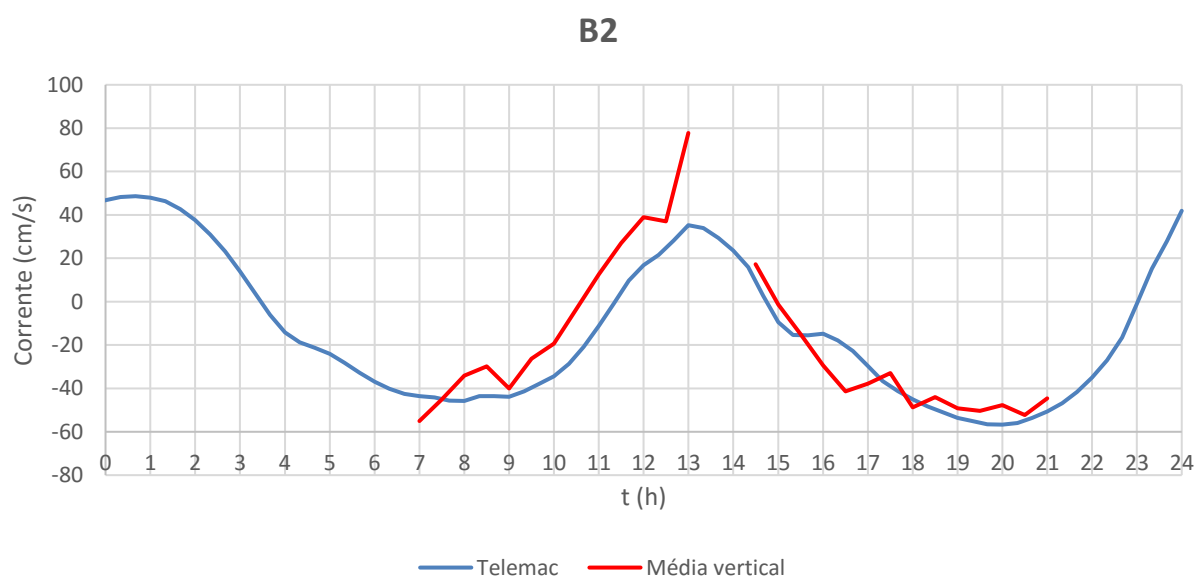


Figura 4.28- Corrente no ponto B2 no dia 21 de Setembro de 1994.

No ponto A1 (ver Figuras 4.19 e 4.20) verifica-se que os resultados do modelo acompanham bastante bem as medições da campanha. A diferença máxima entre os resultados é de cerca de 0.20 m/s em ambos os gráficos. No ponto A2 (ver Figuras 4.21 e 4.22), os resultados do modelo também acompanham bastante bem as medições, embora a diferença máxima encontrada seja um bocado mais alta do que para o ponto A1, sendo neste caso de 0.3 m/s. O ponto B1 (ver Figuras 4.23 e 4.24), nos dias 3 de Outubro e 29 de Setembro de 1994 mostra também uma boa concordância dos dados medidos com os resultados modelados. No ponto B2 (ver Figuras 4.25 e 4.26), existem certas diferenças que podem estar relacionadas com diferenças entre as batimetrias e configuração da restinga assumidas na malha do

modelo e as reais durante a realização das campanhas. Os resultados obtidos para o ponto B1 e B2 (ver Figuras 4.27 e 4.28) no dia 21 de Setembro também mostram concordância entre os dados procedentes das campanhas e dos modelos, embora exista uma falha na amostragem.

Verifica-se que todos os picos da velocidade da corrente ocorrem ao mesmo tempo entre os dados obtidos através do modelo e os dados obtidos em campanha. Os valores das velocidades são um pouco diferentes, embora a diferença não seja muito elevada (a diferença máxima é de cerca de 0.30 m/s).

4.3 DISCUSSÃO

Na validação dos resultados do modelo numérico verificaram-se algumas subestimações sistemáticas quando as simulações foram comparadas com os resultados dos três marégrafos. Sugeriu-se que esse erro fosse causado por algum problema no modelo de marés TPXO.2, pois os resultados do marégrafo foram posteriormente comparados com os resultados da elevação da superfície livre obtidos através do modelo de marés e continuava-se a verificar a mesma subestimação, descartando portanto a possibilidade de haver algum problema com o modelo Telemac 2D, tendo em conta que não se registou a ocorrência de nenhum fenómeno de baixas pressões.

Na validação das velocidades foi possível observar algumas pequenas diferenças, mas no geral os picos ocorriam quase simultaneamente entre o modelo e as medições dos correntómetros, verificando-se apenas algumas diferenças nos valores. Pensa-se que estas diferenças possam estar relacionadas com a diferença entre a batimetria real e a simulada. Como no modelo foi preciso realizar uma interpolação entre vários levantamentos batimétricos para a construção da malha cujos anos não correspondiam com a data das simulações e da campanha é provável que alguns dos erros fossem causados por diferenças na batimetria considerada face à batimetria real.

5

SIMULAÇÃO DE CHEIAS. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 SIMULAÇÃO DE CHEIAS HISTÓRICAS

As cheias são fenómenos considerados extremos porque, apesar de não serem muito recorrentes, as suas consequências são nefastas. São mais frequentes durante os meses com maior precipitação, que correspondem principalmente à estação de Inverno. No caso de uma cheia, o aumento do caudal no leito dos rios origina a inundação dos terrenos e das áreas vizinhas. No caso do Douro verifica-se que nos últimos 8 km do seu curso as margens foram severamente alteradas pela ação antropogénica, encontrando-se fortemente habitadas, repletas de infraestruturas e com imensos pontos de comércio e turismo. As inundações nessas zonas provocam grandes prejuízos económicos além de colocarem em risco a vida humana. É então de extrema importância conhecer as zonas de risco no caso de cheia de forma a ser mais fácil a criação de planos de prevenção e evacuação.

Neste trabalho foi feito um estudo das zonas mais vulneráveis às inundações. Para definir essas zonas foram analisadas ambas as margens localizando os locais em que as habitações se encontravam mais próximas do leito do rio e cujas cotas eram baixas o suficiente para ficarem facilmente submersas. No Quadro 5.1 encontram-se definidas a distância à embocadura e a cota necessária para ocorrer inundação nos vários locais escolhidos. As cotas e as distâncias foram retiradas do Google Earth, sendo todas as cotas referentes ao nível médio da água do mar (NMA). Além dessa informação colocou-se também o concelho a que pertencem essas localidades. A localização geográfica dos pontos está representada a amarelo nas Figuras 5.1 a 5.5.

Quadro 5.1- Distância à embocadura e cota (NMA) dos locais com maior suscetibilidade à ação das cheias

Local	Distância à entrada do estuário (km)	Cota (NMA)	Concelho
Cantareira	1.3	3	Porto
São Pedro da Afurada	2.5	3	Vila Nova de Gaia
Massarelos	3.5	3	Porto
Alfândega	4.5	8	Porto
Cais de Gaia	5.0	4	Vila Nova de Gaia
Cais da Ribeira	6.0	4	Porto
Marina do Freixo	9.0	6	Porto
Gramido	12.0	5	Gondomar
Aldeia Nova	17.0	8	Gondomar
Arnelas	17.6	6	Vila Nova de Gaia
Zebreiros	18.0	5	Gondomar
Crestuma	20.4	8	Vila Nova de Gaia



Figura 5.1- Cantareira e São Pedro da Afurada. Encontram-se também assinalados a Restinga do Cabedelo, a Reserva Natural Local do Estuário do Douro e o Miradouro do Estuário do Douro.



Figura 5.2-Massarelos, Alfândega, Cais da Ribeira e Cais de Gaia.



Figura 5.3- Marina do Freixo e Gramido.



Figura 5.4- Aldeia Nova, Arnelas e Zebreiros.



Figura 5.5- Crestuma.

A restinga encontra-se assinalada na Figura 5.1 pois tem um papel fulcral na vazão das cheias e dependendo do caudal e da cota atingida pela superfície livre pode ficar parcialmente ou completamente submersa ou até mesmo ser destruída, o que afeta as inundações nas zonas adjacentes. Para além de se ter localizado as zonas de risco também se estudou o comportamento da restinga quando ocorrem cheias para tentar perceber o efeito da restinga atual perante o caudal de uma cheia histórica.

Foram realizadas então simulações para analisar a hidrodinâmica do estuário para 5 das cheias históricas no Douro. No Quadro 5.2 encontram-se as informações sobre as simulações.

Quadro 5.2- Características das cheias simuladas no Telemac 2D. (BM-Baixa-mar PM-Preia-mar).

Cheias	Período simulado (24h)	Situação	Nível maré imposto (m)	Caudal (m ³ /s)
1962	3 a 4 Janeiro	sem quebramar	-1.071 (BM)	17000
		sem quebramar	1.071 (PM)	17000
		com quebramar	-1.071 (BM)	17000
		com quebramar	1.071 (PM)	17000
1966	21 a 22 Fevereiro	sem quebramar	-1.397 (BM)	14600
		sem quebramar	1.397 (PM)	14600
		com quebramar	1.397 (PM)	14600
		com quebramar	-1.397 (BM)	14600
1979	7 a 8 Fevereiro	sem quebramar	-0.831 (BM)	12525
		sem quebramar	0.831 (PM)	12525
		com quebramar	-0.831 (BM)	12525
		com quebramar	0.831 (PM)	12525
1996	9 a 10 Janeiro	sem quebramar	-1.315 (BM)	10500
		sem quebramar	1.315 (PM)	10500
		com quebramar	1.315 (PM)	10500
		com quebramar	-1.315 (BM)	10500
2001	6 a 7 Janeiro	sem quebramar	-1.249 (BM)	9812
		sem quebramar	1.249 (PM)	9812
		com quebramar	-1.249 (BM)	9812
		com quebramar	1.249 (PM)	9812

A informação sobre as cheias de 1962 e 1966 foi retirada do Boletim Trimestral de Informação, Direção Geral dos Serviços Hidráulicos (1966) correspondendo o valor do caudal à estação de Atães, que se encontra a jusante da barragem de Crestuma. O caudal da cheia de 1979 foi o caudal obtido no Peso da Régua (Rodrigues et al., 2003) e o de 1996 foi obtido a jusante da barragem de Crestuma pelo centro de prevenção e previsão de cheias. Para a cheia de 2001 os dados foram fornecidos pela EDP.

Todas as cheias apresentadas no Quadro 5.2 ocorreram anteriormente à data de construção dos molhes. No entanto, repetiram-se as simulações com a malha que representava os molhes de forma a analisar a influência dos mesmos durante a ocorrência das cheias. Foram realizadas simulações, de 24 h, com caudal constante e nível de maré constantes. Foram utilizadas condições iniciais de repouso e rampa de 6 h e 3 h, respetivamente para o caudal e para o nível de maré. Os gráficos apresentados de seguida correspondem ao último segundo de simulação. Dessa forma a dinâmica do estuário é analisada para um momento em que o caudal máximo já foi atingido há algum tempo e já se encontra estável, não se esperando variações. Todas as elevações da superfície livre obtidas através do Telemac 2D são relativas ao nível médio da água do mar.

Para o cálculo do perfil longitudinal da superfície livre foi utilizado o programa FUDAA-PREPRO que permitiu definir um caminho de extração dos dados das simulações desde a embocadura até ao ponto mais a montante, correspondendo esse ponto à barragem. A localização do ponto inicial está representada a cor-de-rosa na Figura 5.6.

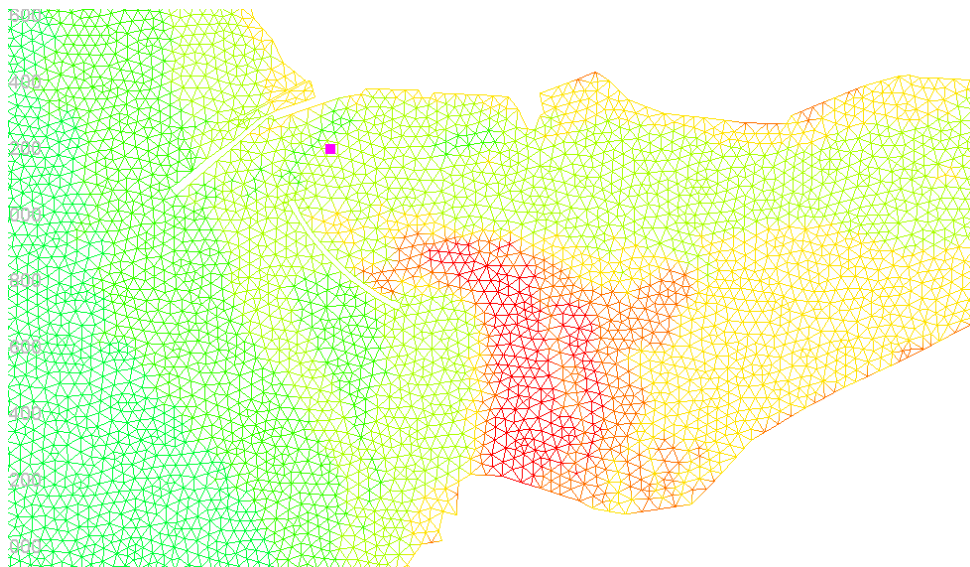


Figura 5.6- Ponto inicial a partir do qual foi definido o caminho para traçar os perfis espaciais da elevação da superfície livre.

5.1.1 CHEIA DE JANEIRO DE 1962

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 encontram-se representados os perfis longitudinais da elevação da superfície livre para a cheia de 1962 em situação de preia-mar e de baixa-mar antes da construção dos molhes. Os gráficos estão divididos de forma a facilitar a visualização, correspondendo, aproximadamente ao estuário inferior (ver Figura 5.7), médio (ver Figura 5.8) e superior (ver Figura 5.9).

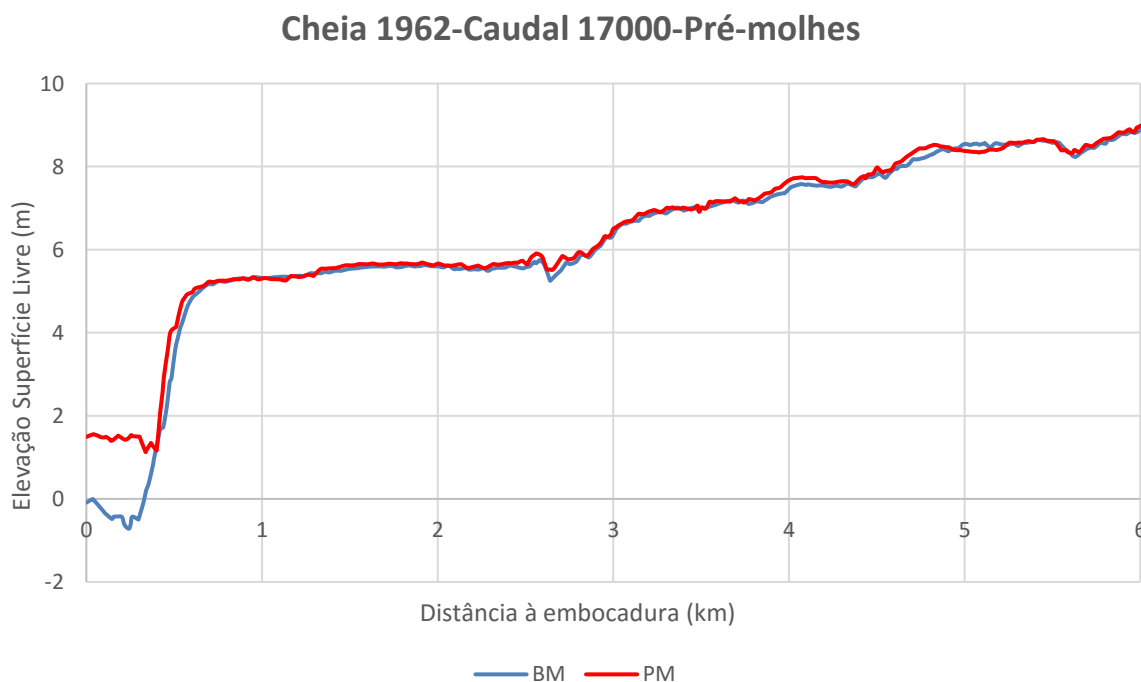


Figura 5.7- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior para a cheia de 1962 antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

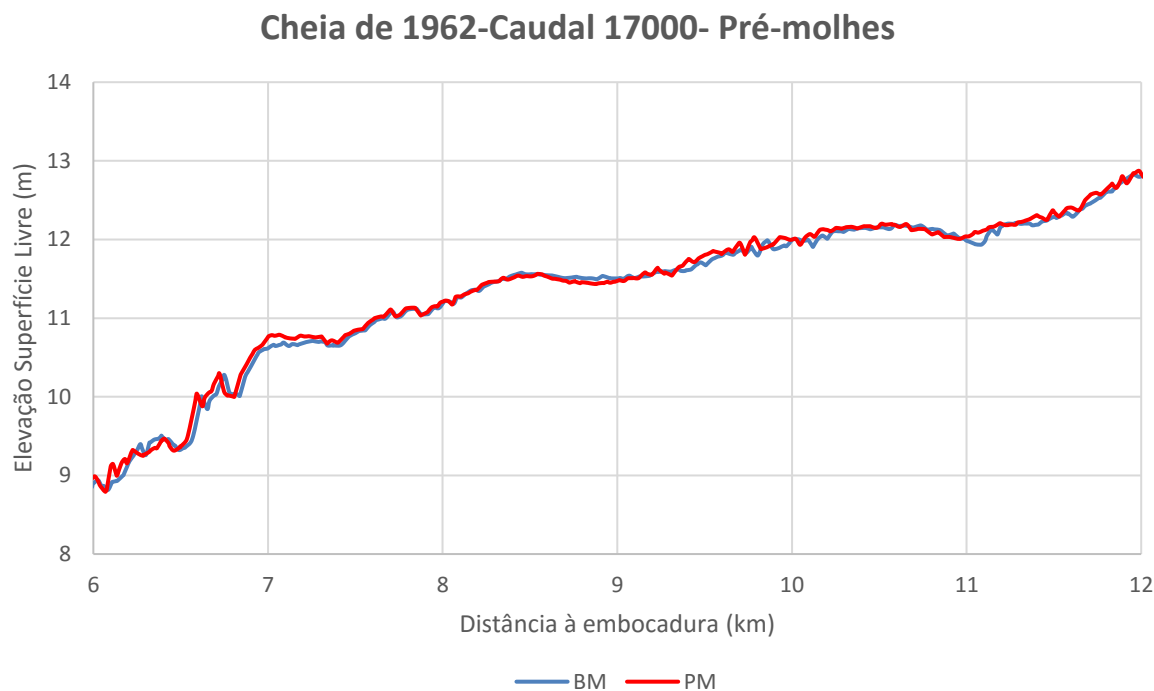


Figura 5.8- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio para a cheia de 1962 antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

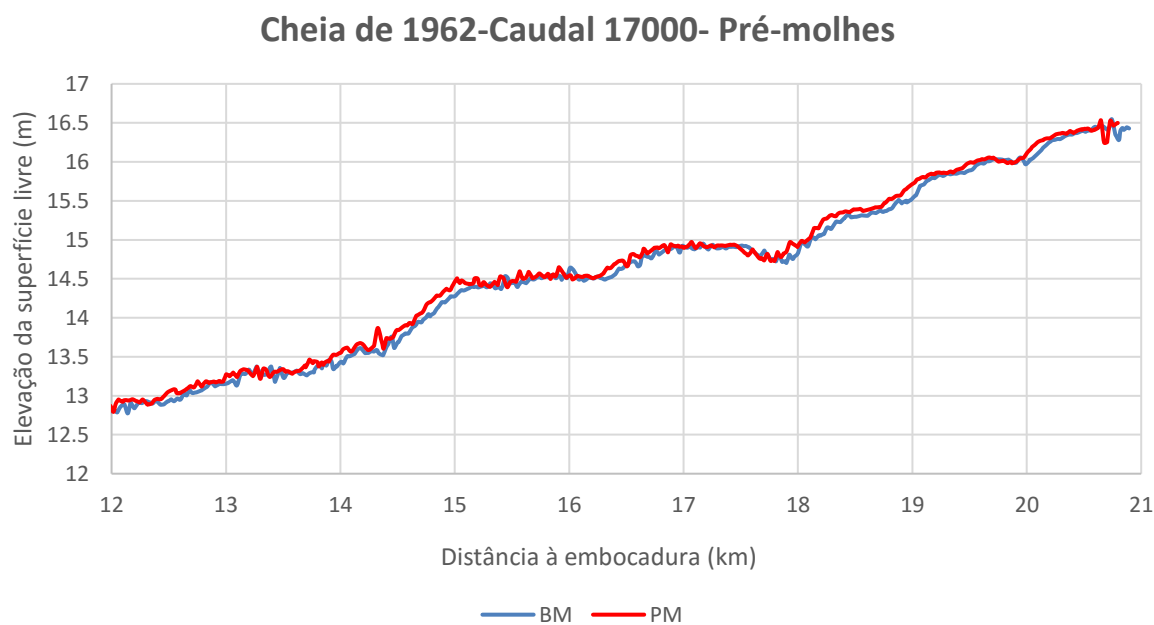


Figura 5.9- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior para a cheia de 1962 antes da construção dos molhes em preia-mar e baixa-mar.

Verifica-se que as diferenças nas cotas da superfície livre entre a preia-mar e a baixa-mar são muito pequenas. Na zona da embocadura, que é a zona mais crítica, não se verifica grande diferença entre as duas, só mesmo nos primeiros 500 m onde uma diferença de 2 m é observada, o que sugere que como o caudal é tão elevado o estuário se comporta como um rio não sofrendo grande influência da maré.

Quando a elevação da superfície livre é de aproximadamente 5 m, o que corresponde já a uma zona muito próxima da embocadura, o escoamento proveniente do estuário encontra-se com o mar. Ambos os escoamentos são lentos com número de Froude inferior à unidade em praticamente toda a área da embocadura como se mostra na Figura 5.10, mas como a elevação da superfície livre do mar é inferior ocorre a descida brusca da elevação da superfície livre da água proveniente do estuário.

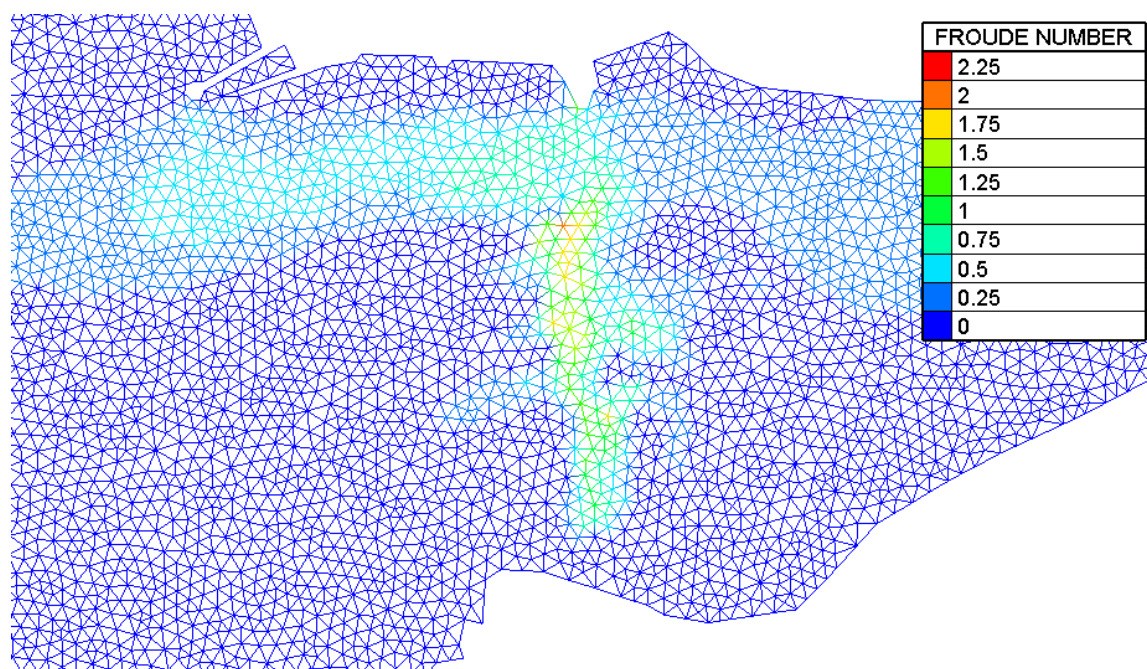


Figura 5.10- Número de Froude na embocadura na cheia de 1962 antes da construção dos molhes, na preia-mar.

No canal de navegação o escoamento é lento, com número de Froude inferior a 1. Existem apenas alguns pontos na zona da restinga que possuem números de Froude superiores a 1. Isto deve-se ao galgamento da restinga e à pouca profundidade da água sobre a mesma.

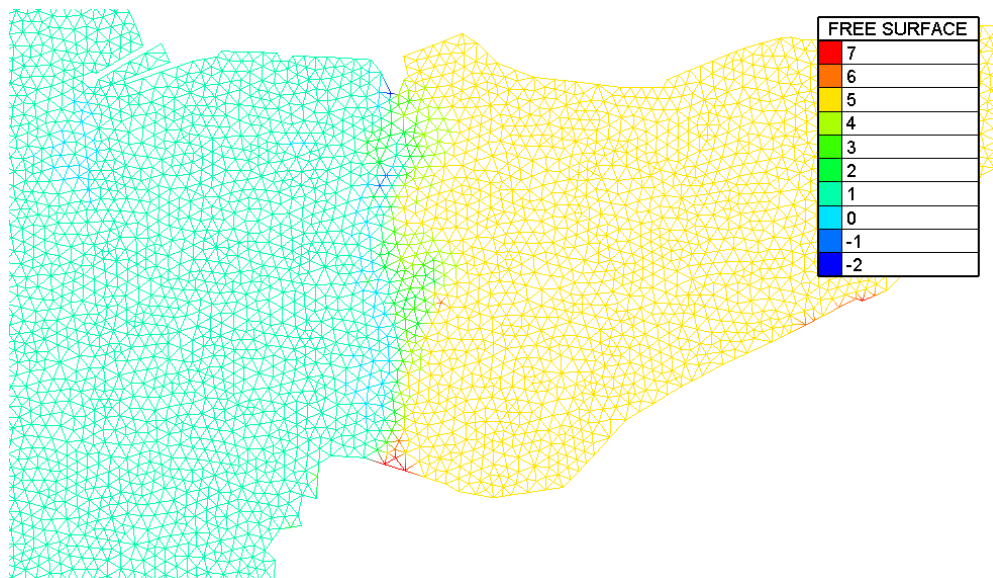


Figura 5.11- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1962 antes da construção dos molhes.

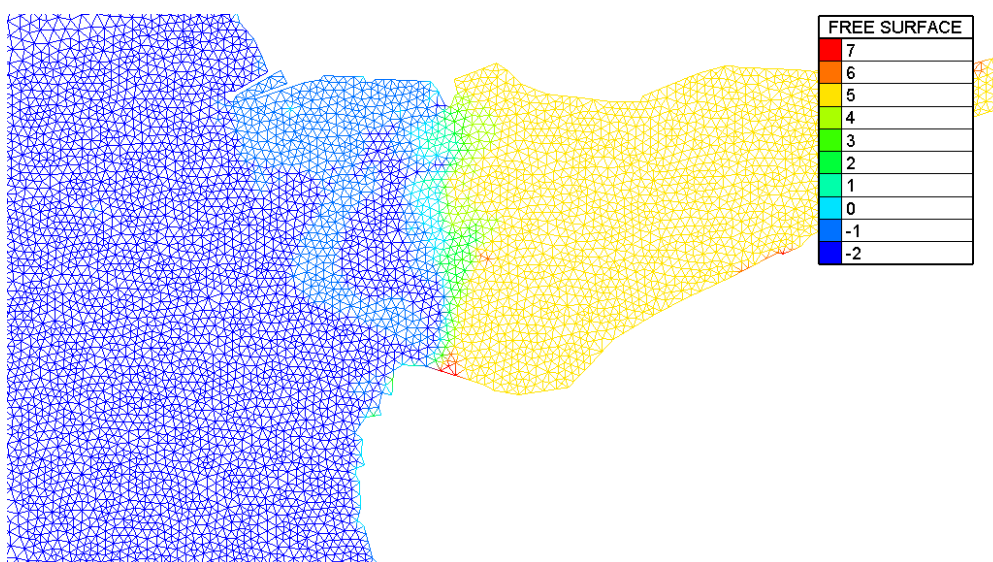


Figura 5.12- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de baixa-mar na cheia de 1962 antes da construção dos molhes.

As Figuras 5.11 e 5.12 servem para ter a perceção do limite da influência fluvial. Verifica-se que a descida da superfície livre ocorre para ambas as situações, preia-mar e baixa-mar, aproximadamente no mesmo local como se consegue observar nas Figuras 5.7, 5.11 e 5.12.

Além desta análise também é importante conhecer como se comporta a restinga quando ocorre um evento deste tipo. Na Figura 5.13 encontram-se as suas cotas para a malha antes da construção dos molhes.

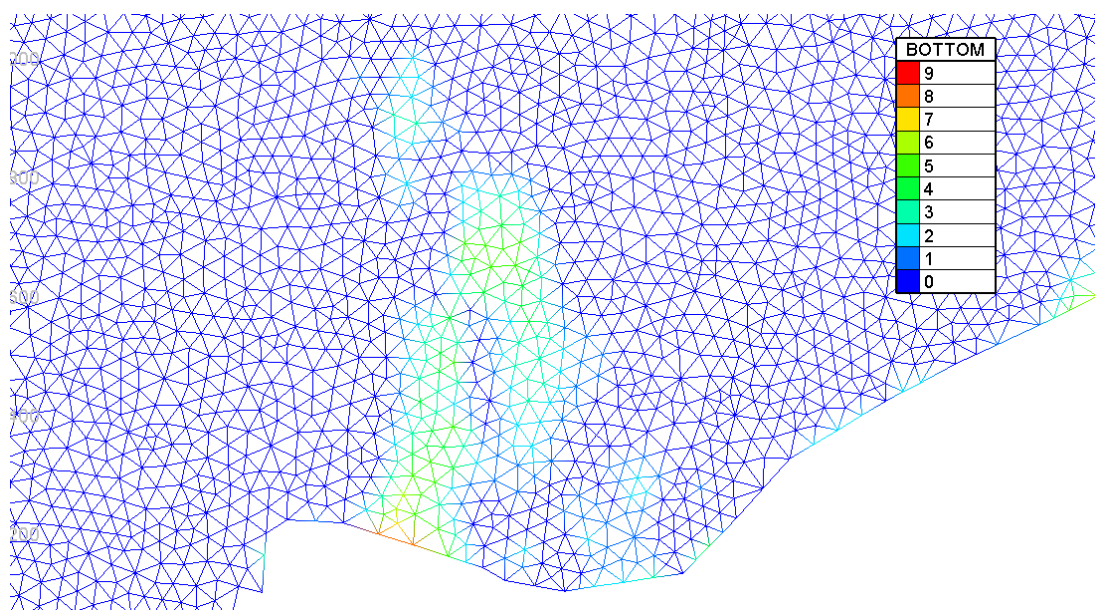


Figura 5.13- Cotas da restinga na malha sem os molhes.

Nas Figuras 5.14 e 5.15 encontram-se as profundidades da água na zona da embocadura para a preia-mar e a baixa-mar. A profundidade é dada a partir da cota dos vários pontos da restinga e do fundo do rio no caso dos pontos que não pertencem à restinga. Para a cheia de 1962 verifica-se que a restinga ficou submersa quase na sua totalidade embora se verifiquem algumas diferenças pontuais entre a baixa-mar e a preia-mar. O modelo Telemac 2D não permite saber se a restinga é destruída ou não, mas permite saber se ela sofre galgamentos, fenómeno que é importante saber se ocorre, pois ao ser galgada a restinga vai sofrer alterações a nível de transporte sedimentar, além de o seu comportamento influenciar as consequências da cheia nas zonas a montante.

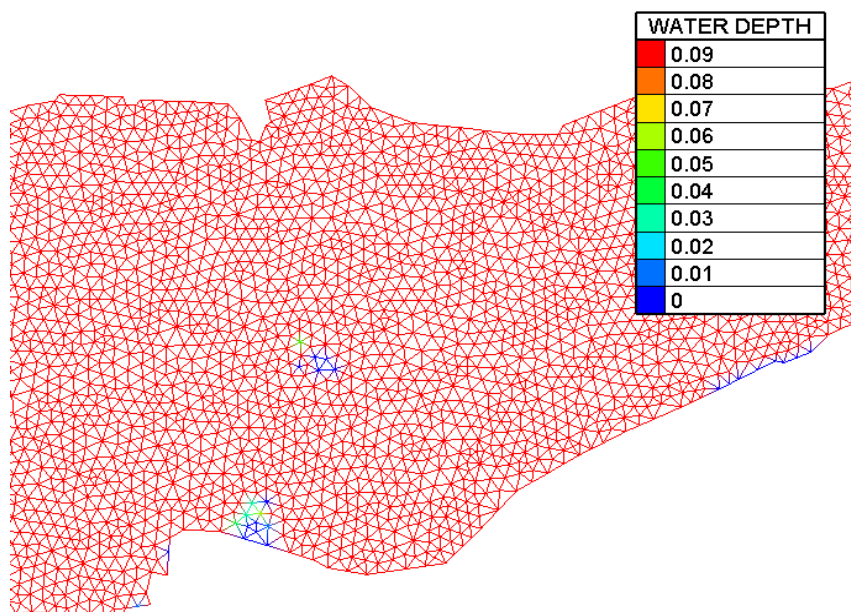


Figura 5.14- Profundidades da água na zona da restinga na cheia de 1962 antes da construção dos molhes e na preia-mar.

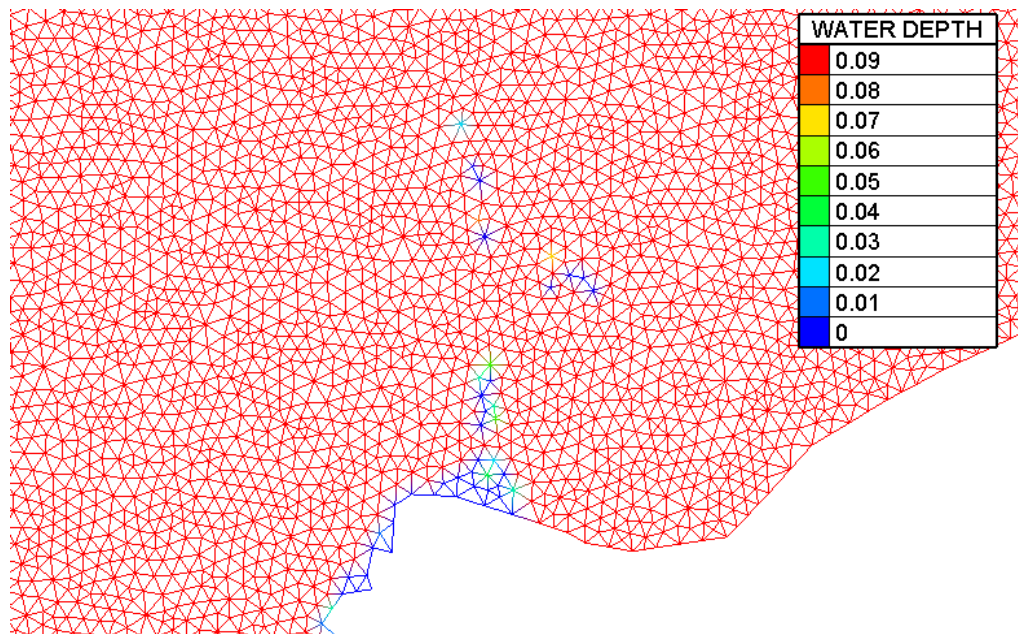


Figura 5.15- Profundidades da água na zona da restinga na cheia de 1962 antes da construção dos molhes e na baixa-mar.

No Quadro 5.3 encontra-se informação acerca das cotas atingidas pela superfície livre em todos os locais escolhidos como sendo os mais vulneráveis.

Quadro 5.3- Cotas atingidas pela água na cheia de 1962 na simulação da baixa-mar e da preia-mar antes da construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação	Cota Telemac BM	Inundação
Cantareira	1.3	3	5.5	SIM	5.4	SIM
Afurada	2.5	3	5.6	SIM	5.6	SIM
Massarelos	3.5	3	7.0	SIM	7.0	SIM
Alfândega	4.5	8	8.0	NÃO	7.8	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	8.4	SIM	8.5	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	8.8	SIM	8.9	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	11.5	SIM	11.5	SIM
Gramido	12.0	5	12.8	SIM	12.8	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	14.9	SIM	14.9	SIM
Arnelas	17.6	6	14.9	SIM	14.9	SIM
Zebreiros	18.0	5	14.9	SIM	14.8	SIM
Crestuma	20.4	8	16.3	SIM	16.4	SIM

Da análise do Quadro 5.3 conclui-se que a diferença de cotas para os locais escolhidos entre a baixa-mar e a preia-mar não é muito elevada. Como é de esperar, os locais mais próximos da barragem são onde as cotas atingidas pela água são mais elevadas. O único local onde não se verificou uma inundação foi a Alfândega.

Nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 encontram-se os perfis longitudinais da preia-mar e da baixa-mar para a cheia de 1962 simulados agora com a malha com os molhes. Tal como no caso anterior, o perfil da elevação da superfície livre é representado em três gráficos distintos correspondendo, respetivamente, ao estuário inferior, médio e superior.

Cheia de 1962-Caudal 17000 - Pós-molhes

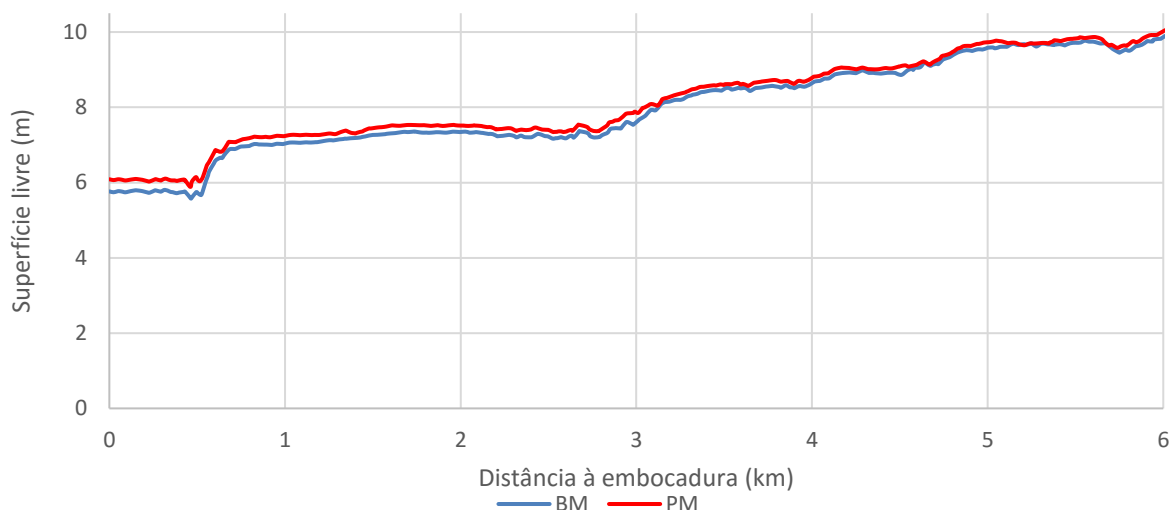


Figura 5.16- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior para a cheia de 1962 após a construção dos molhes em preia-mar e baixa-mar.

Cheia de 1962-Caudal 17000 - Pós-molhes

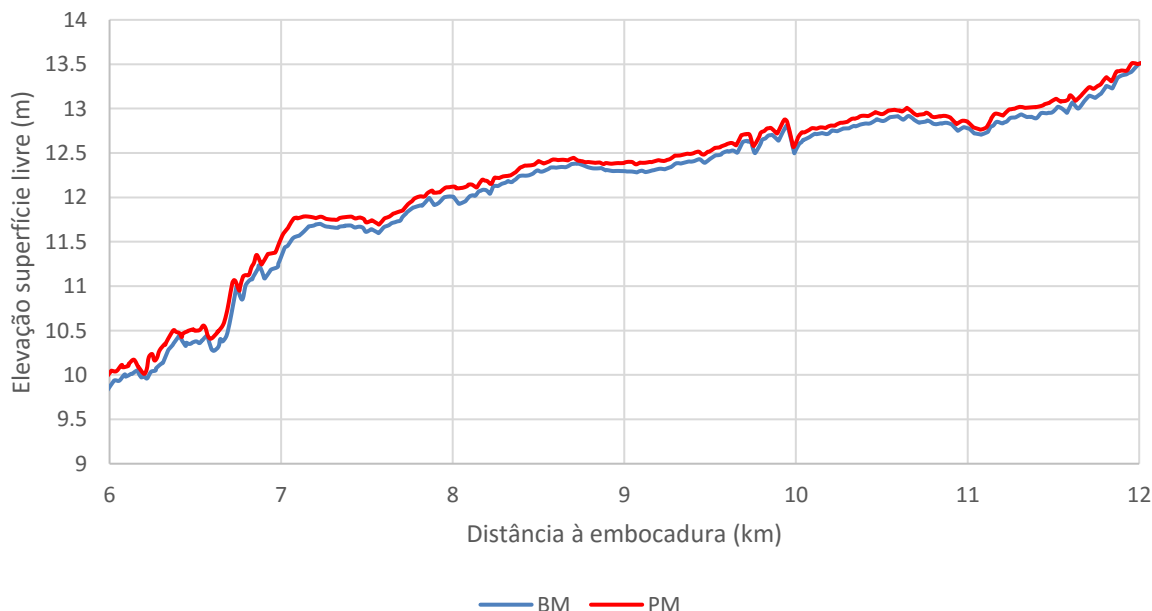


Figura 5.17- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio para a cheia de 1962 após a construção dos molhes em preia-mar e baixa-mar.

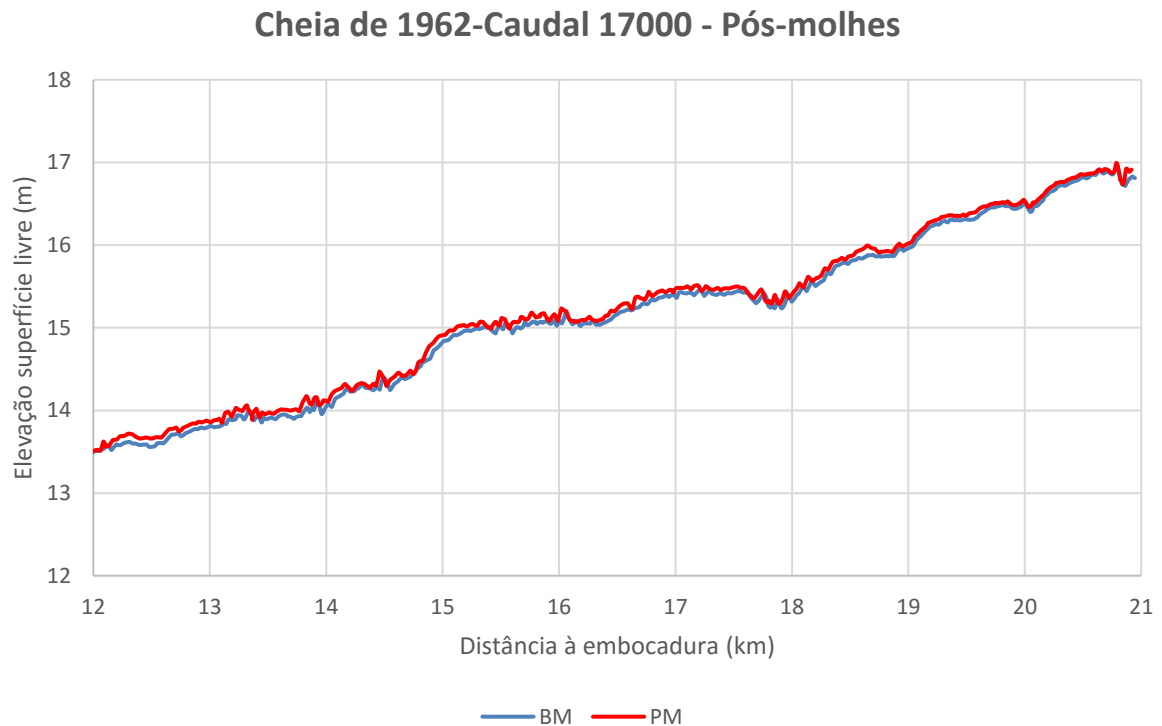


Figura 5.18- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior para a cheia de 1962 após a construção dos molhes em preia-mar e baixa-mar.

Verifica-se que até aos 12 km existem algumas diferenças entre a maré cheia e a maré baixa o que sugere uma influência mínima da maré. Dos 12 km até aos 21,6 km a diferença entre as marés já não se faz notar devendo o estuário comportar-se nitidamente como um rio. Verifica-se que neste caso a descida da superfície livre até ao nível do mar ocorre mais a jusante.

De forma a comprovar se os molhes têm realmente a capacidade de direccionar o caudal foi traçado um novo caminho ao longo do estuário em que o ponto inicial começava no seu exterior (ver Figura 5.19) e seguidamente fez-se o perfil longitudinal da elevação da superfície livre (ver Figura 5.20). O perfil foi feito para a preia-mar porque a água salgada tem tendência a entrar no estuário, daí ser mais difícil a propagação da influência fluvial. É de frisar que este ponto foi apenas utilizado neste caso, para efeito de explicar o que acontece quando se tem em consideração os molhes.

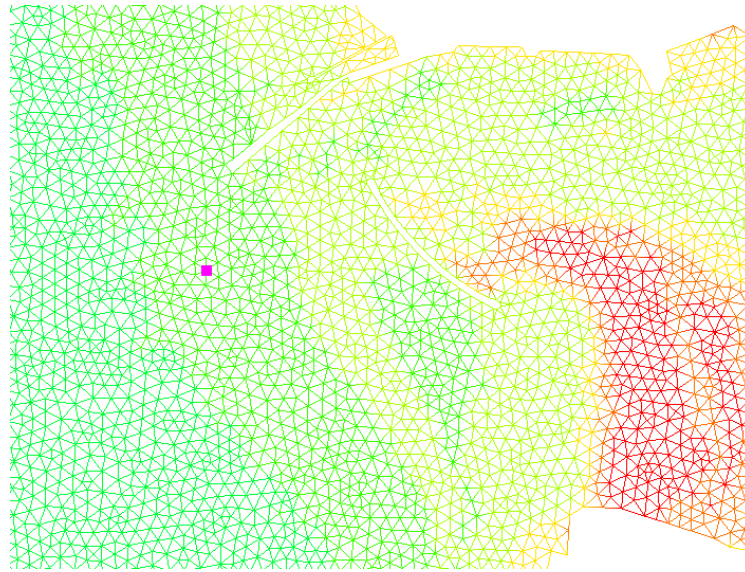


Figura 5.19- Localização do ponto fora do estuário para traçar o novo perfil.

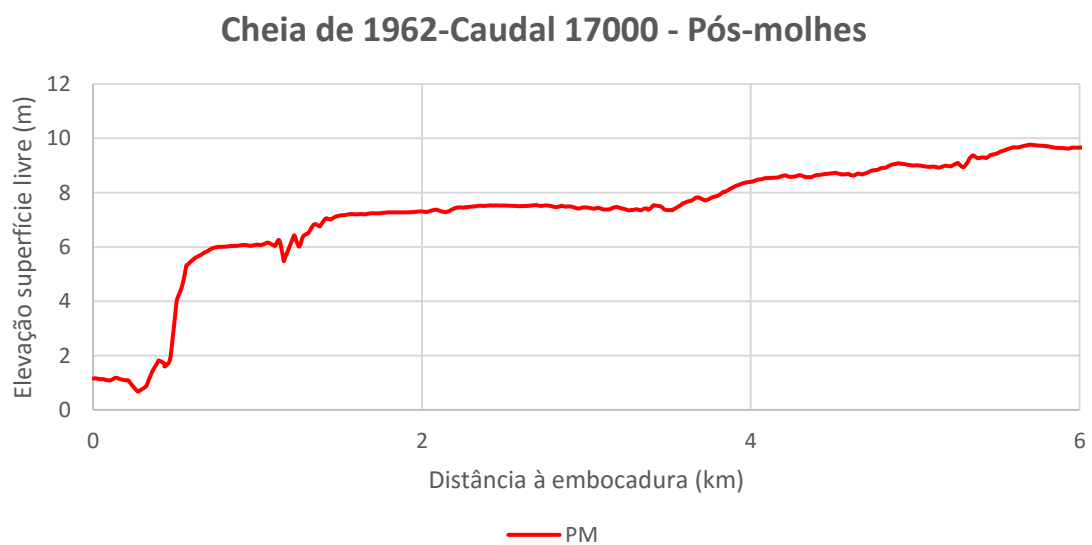


Figura 5.20- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para a cheia de 1962 na preia-ma, após construção dos molhes.

Verifica-se que realmente a descida da superfície livre ocorre, embora mais a jusante, o que mostra que a influência fluvial se consegue propagar um pouco mais do que nos casos em que os molhes não existem.

Também neste caso ambos os escoamentos são lentos como se mostra na Figura 5.21.

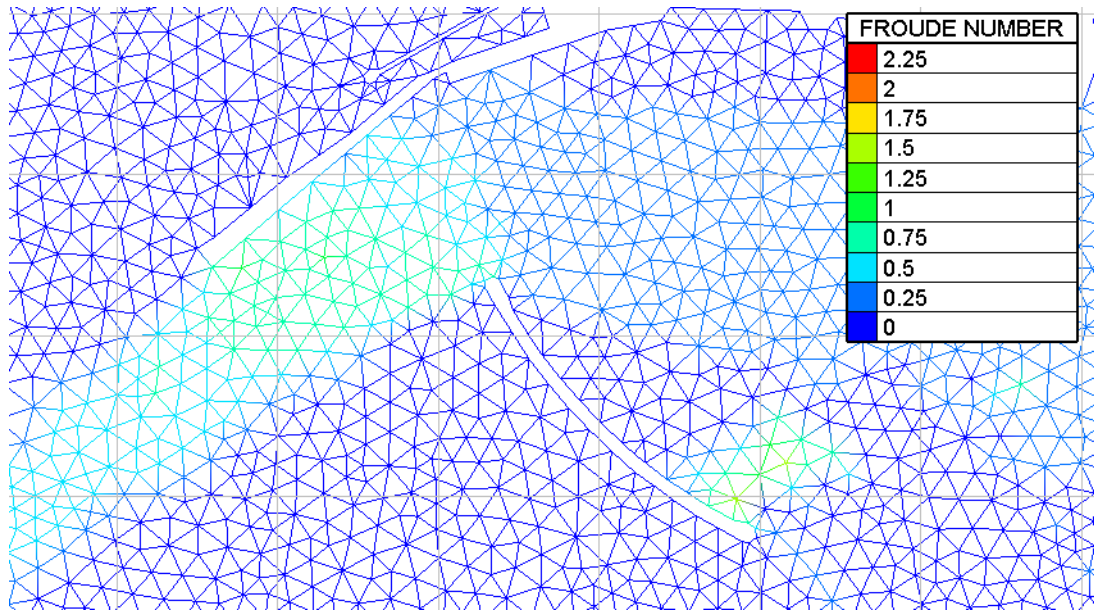


Figura 5.21-Número de Froude junto à embocadura na cheia de 1962 após a construção dos molhes, na preia-mar.

Retiraram-se também para o último segundo da simulação os resultados da elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar de forma a comprovar se de facto o comportamento fluvial se prolongava para jusante (ver Figura 5.22). A existência dos molhes permite a propagação da influência fluvial até uma zona mais a jusante da que ocorre quando não existem molhes. Isto porque a orientação dos molhes impede que a influência da maré se faça sentir. Verifica-se que a elevação da superfície livre já vem diminuindo, possuindo entre 2 m a 4 m junto ao fim do comprimento do molhe norte que passam a ser 1 m na zona marítima (área em azul-escuro na Figura 5.22).

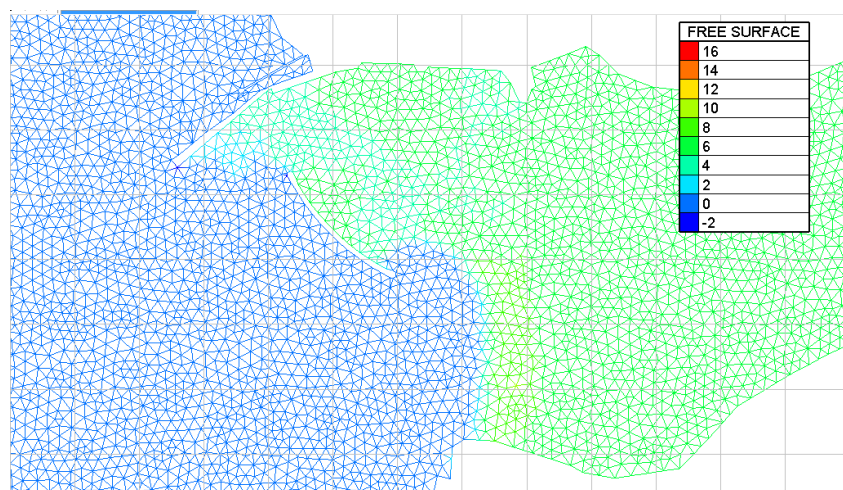


Figura 5.22- Elevação da superfície livre junto à embocadura do estuário para a cheia de 1962, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.

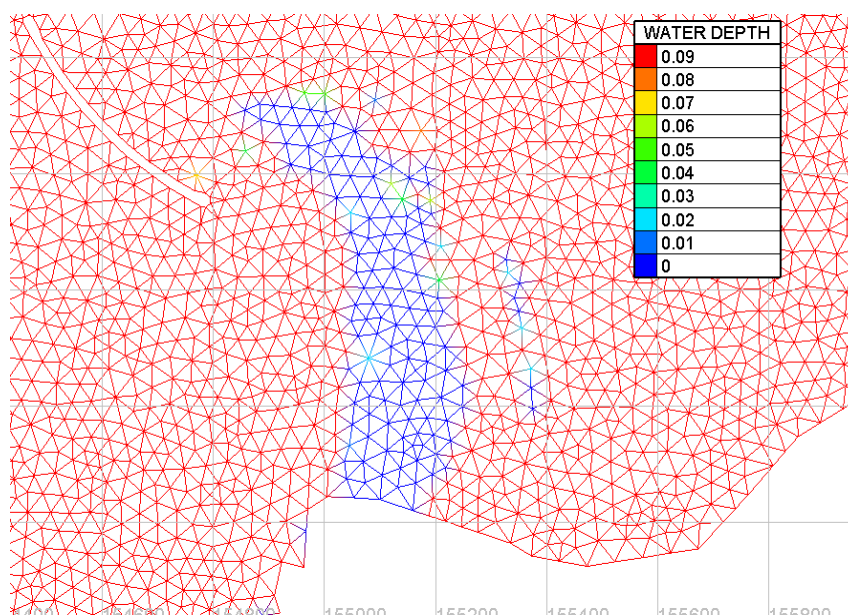


Figura 5.23- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1962, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.

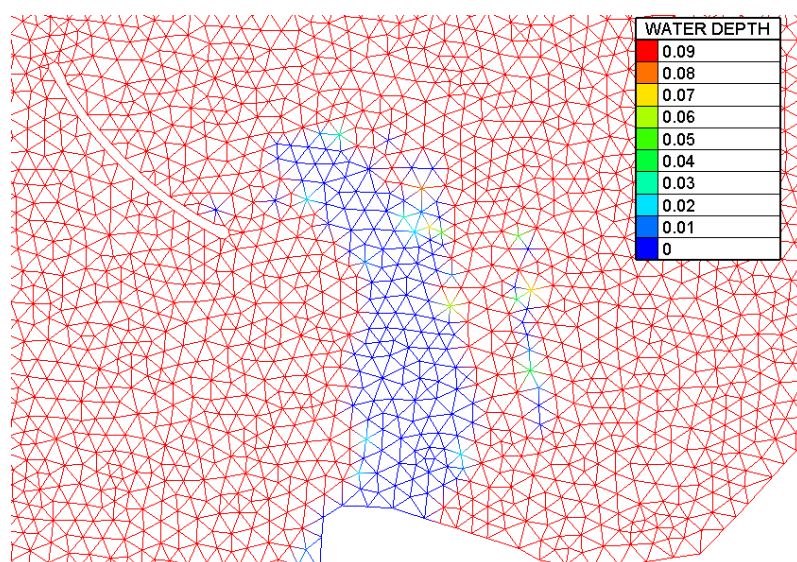


Figura 5.24- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1962, contando com a presença dos molhes e na situação de baixa-mar.

As Figuras 5.23 e 5.24 mostram que tanto para a preia-mar como para a baixa-mar a restinga não é galgada. Existem alguns pontos submersos mas grande parte do corpo central encontra-se emersa. Isto vai influenciar a cota da superfície livre nas zonas mais a montante, pois ao criar-se aqui um obstáculo ao escoamento as alturas de água a montante vão aumentar (ver Quadro 5.4).

Quadro 5.4- Cotas atingidas pela água de 1962 na simulação da baixa-mar e da preia-mar na presença dos molhes

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	7.3	SIM	7.1	SIM
Afurada	2.5	3	7.4	SIM	7.2	SIM
Massarelos	3.5	3	8.6	SIM	8.4	SIM
Alfândega	4.5	8	9.0	SIM	8.9	SIM
Cais de Gaia	5.0	4	9.7	SIM	9.6	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	10.0	SIM	9.8	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	12.4	SIM	12.3	SIM
Gramido	12.0	5	13.5	SIM	13.5	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	15.5	SIM	15.4	SIM
Arnelas	17.6	6	15.5	SIM	15.4	SIM
Zebreiros	18.0	5	15.4	SIM	15.3	SIM
Crestuma	20.4	8	16.8	SIM	16.8	SIM

Verifica-se que após a construção dos molhes, devido ao facto de a restinga não ser galgada, a altura de água a montante aumenta. Junto à barragem a elevação da superfície livre atinge quase os 17 metros e nesta situação até a Alfândega fica inundada, sendo a Alfândega já um ponto alto tendo em conta a sua proximidade à foz do rio Douro. Comparando o Quadro 5.3 com este verifica-se que realmente após a construção dos molhes as cotas da água para este caudal são sempre superiores.

Cheia de 1962-Caudal 17000

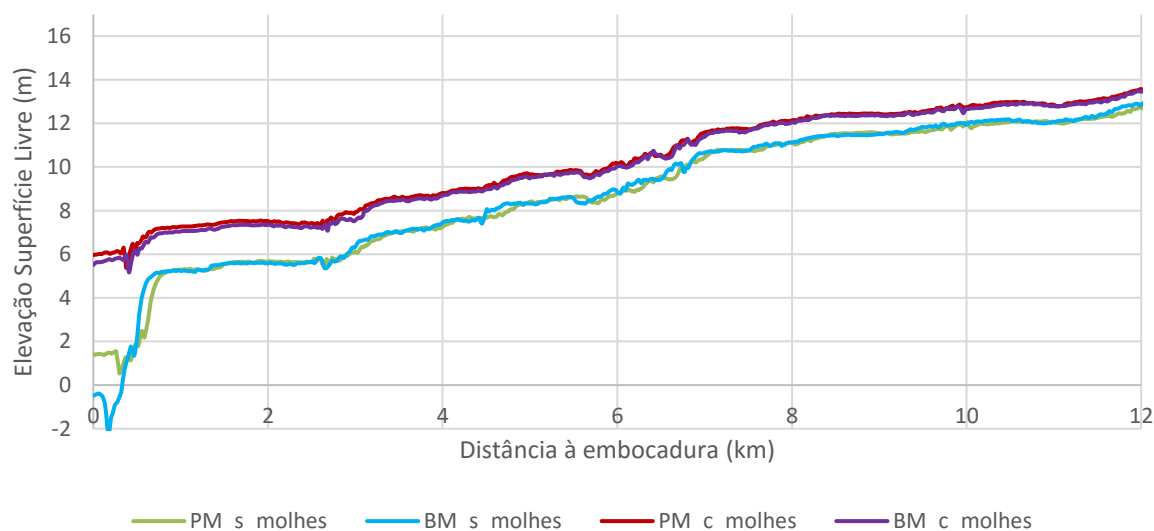


Figura 5.25- Elevação da superfície livre junto à embocadura para a cheia de 1962 antes e após a construção dos molhes para a preia-mar e baixa-mar.

A Figura 5.25 torna mais fácil a comparação entre as simulações com e sem molhes. Verifica-se que após a construção dos molhes a elevação da superfície livre é superior à elevação da superfície livre antes da construção.

5.1.2 CHEIA DE FEVEREIRO DE 1966

A cheia seguinte a ser alvo de estudo foi a de 1966 com um caudal de $14600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nas figuras 5.26, 5.27 e 5.28 encontram-se os perfis longitudinais da superfície livre para a preia-mar e para a baixa-mar antes da construção dos molhes.

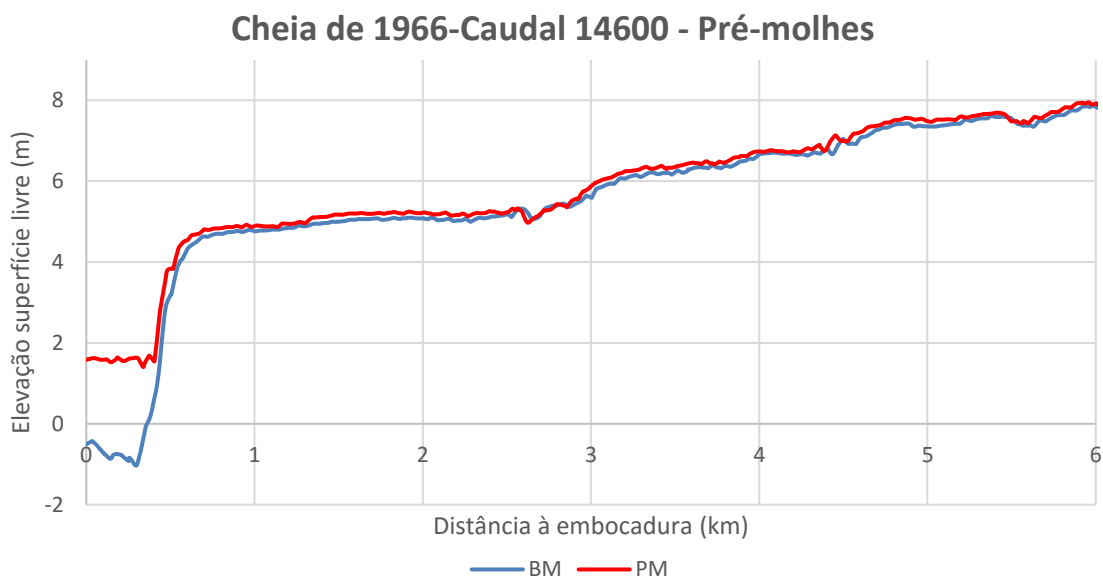


Figura 5.26- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

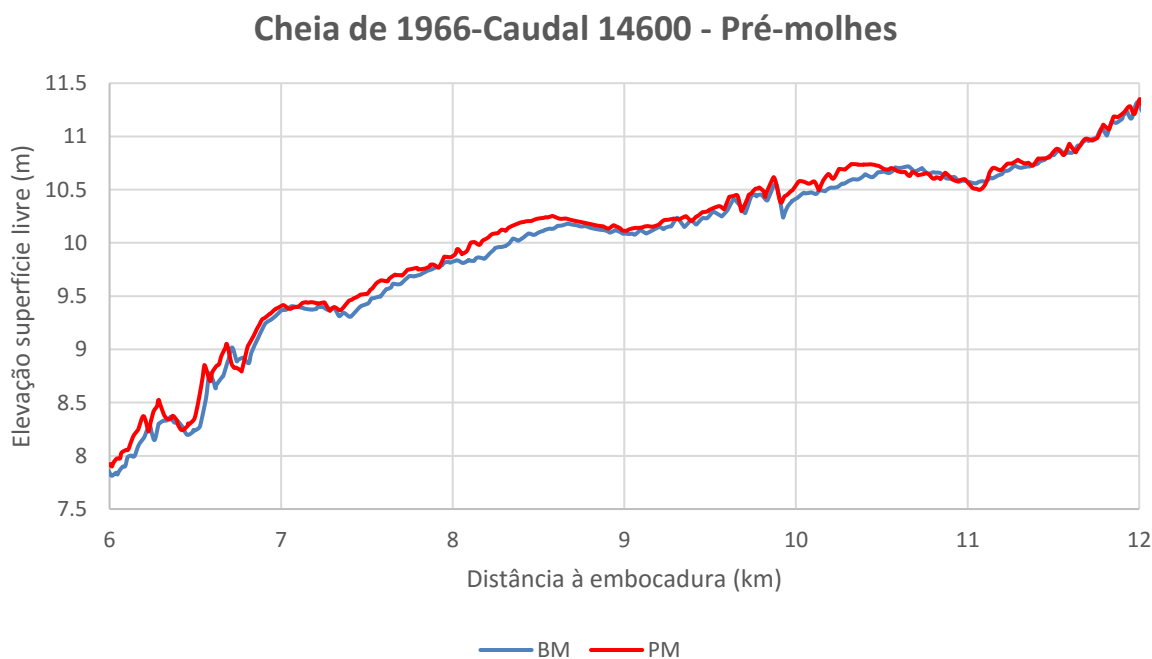


Figura 5.27- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

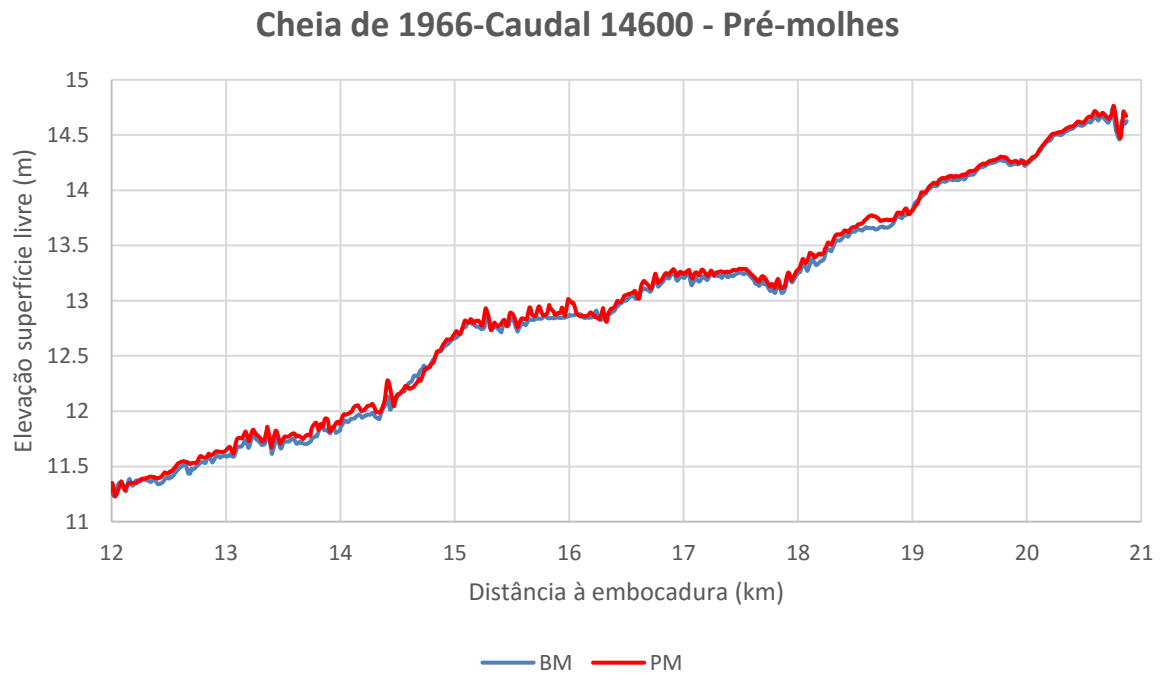


Figura 5.28- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

Verifica-se uma vez mais que aproximadamente até aos 12 km existem diferenças entre a preia-mar e a baixa-mar e isso deve-se ao facto da influência marinha se fazer sentir embora de uma forma residual. A partir dos 12 km até atingir Crestuma não se verificam grandes variações entre os perfis da maré alta e da maré baixa o que pode significar que o estuário se comporta como um rio.

A figura 5.29 tem como objetivo a perceção do limite da influência fluvial. Esse limite encontra-se na fronteira que divide as duas cores, sendo as alturas à direita de aproximadamente 5 m e as alturas à esquerda de até 2 m, considerando que se utilizou a preia-mar para esta verificação.

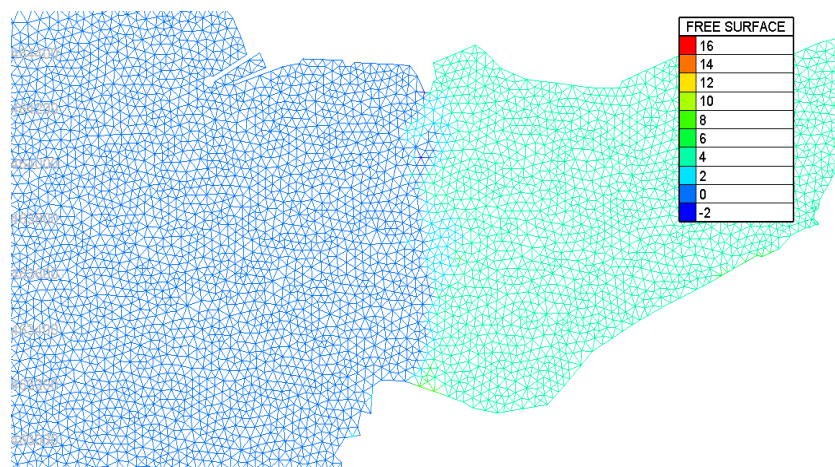


Figura 5.29- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1966 antes da construção dos molhes.

Na figura 5.30 verifica-se que para o caudal desta cheia, que não é muito diferente do caudal da cheia de 1962, a restinga também fica quase completamente submersa, com exceção dos locais que se encontram a azul-escuro na figura.

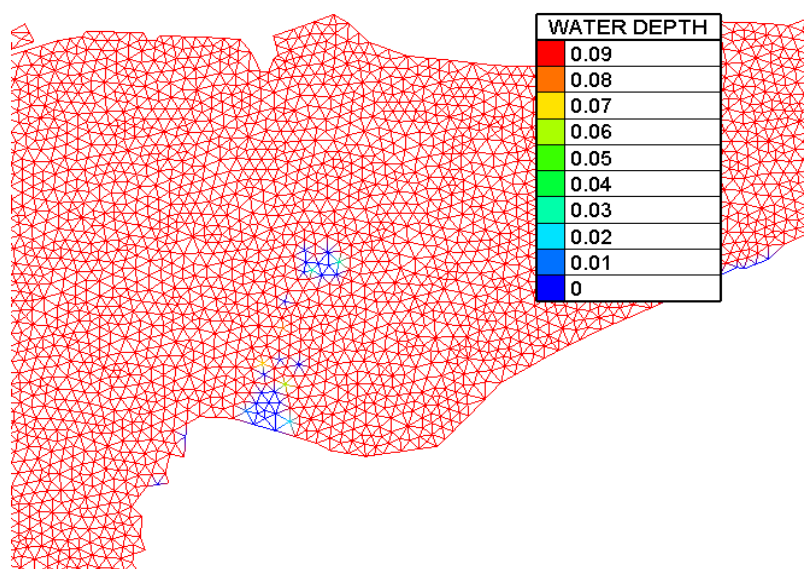


Figura 5.30- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1966, antes da construção dos molhes e na situação de preia-mar.

Comparando as cotas da água nos locais escolhidos verifica-se que as cotas são inferiores às de 1962 antes da construção dos molhes pois o caudal é agora inferior em cerca de $2500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a diferença entre os níveis da maré também é pequena. Já quando comparadas com as cotas obtidas em 1962 após a construção dos molhes verifica-se que as cotas de 1966 são inferiores, como seria de esperar. Apesar de serem cotas inferiores às cotas atingidas em 1962, o único local que continua livre de inundações é a Alfândega (ver Quadro 5.5).

Quadro 5.5- Cotas atingidas pela água na cheia de 1966 na simulação da baixa-mar e da preia-mar antes da construção dos molhes

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	5.0	SIM	4.9	SIM
Afurada	2.5	3	5.3	SIM	5.2	SIM
Massarelos	3.5	3	6.4	SIM	6.2	SIM
Alfândega	4.5	8	7.0	NÃO	7.0	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	7.5	SIM	7.4	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	7.9	SIM	7.8	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	10.0	SIM	10.0	SIM
Gramido	12.0	5	11.4	SIM	11.3	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	13.2	SIM	13.2	SIM
Arnelas	17.6	6	13.2	SIM	13.2	SIM
Zebreiros	18.0	5	13.3	SIM	13.3	SIM
Crestuma	20.4	8	14.6	SIM	14.6	SIM

Nas figuras 5.31, 5.32 e 5.33 encontra-se o perfil longitudinal da elevação da superfície livre obtido na simulação de 1966 após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

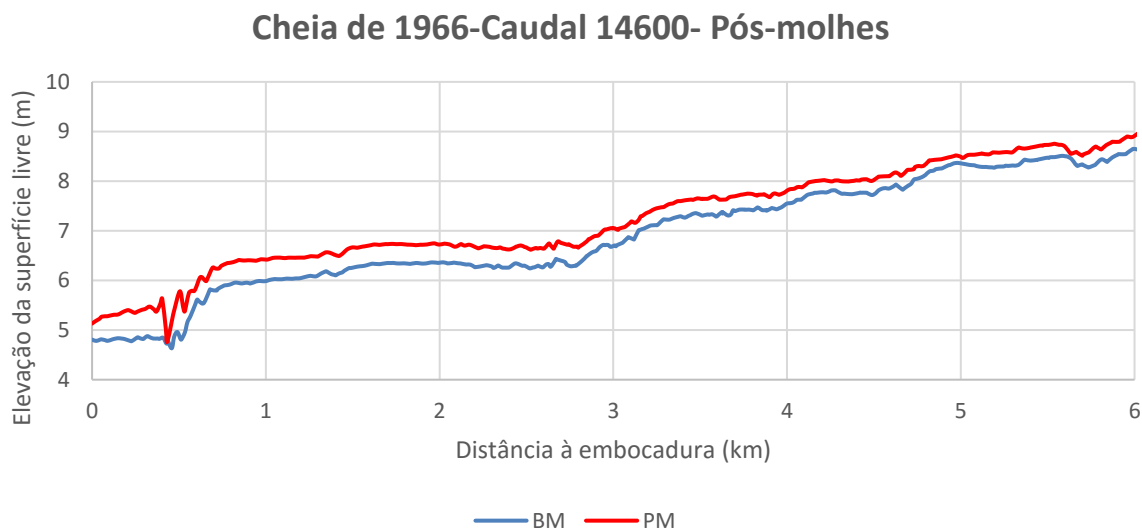


Figura 5.31- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar após a construção dos molhes.

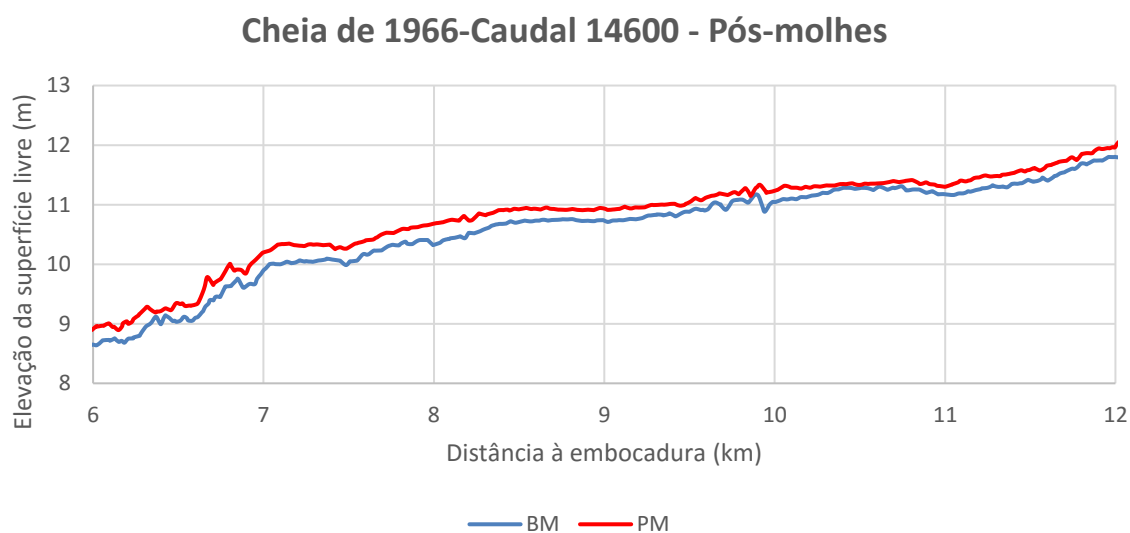


Figura 5.32- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar após a construção dos molhes.

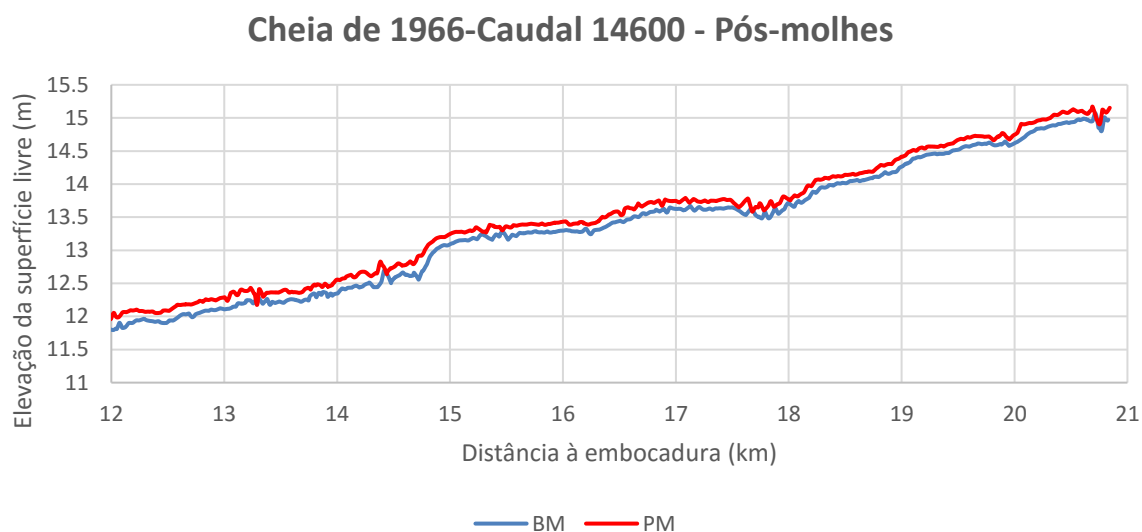


Figura 5.33- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1966 em preia-mar e em baixa-mar após a construção dos molhes.

Após a análise das figuras referidas verifica-se que a influência da maré se faz sentir ao longo de todo o estuário pois existe uma diferença entre a simulação da preia-mar e a da baixa-mar.

No ponto inicial da representação do estuário a altura de água é de cerca de 5 m dando a entender que a influência fluvial ainda se propaga mais para jusante. Isto é claramente visível na Figura 5.34.

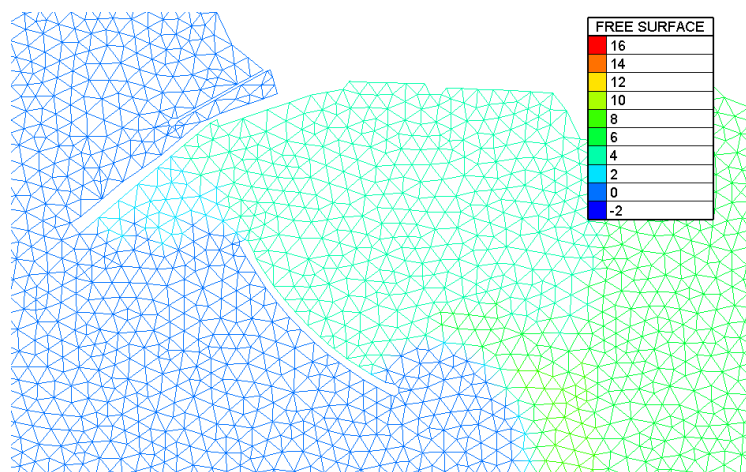


Figura 5.34- Elevação da superfície livre junto à embocadura do estuário para a cheia de 1966, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.

Mais uma vez fica comprovado que os molhes conduzem o escoamento fluvial até mais longe, tornando mais difícil a entrada da água do mar dentro do estuário. Na zona a azul claro as alturas encontram-se entre 4 e 6 m diminuindo até atingir a zona azul escura onde as alturas se encontram entre 0 e 2 m e domina por completo a influência oceânica.

Neste caso a construção dos molhes também parece ter tornado a restinga mais robusta pois para este caudal ela fica com algumas zonas submersas mas não é galgada (ver Figura 5.35).

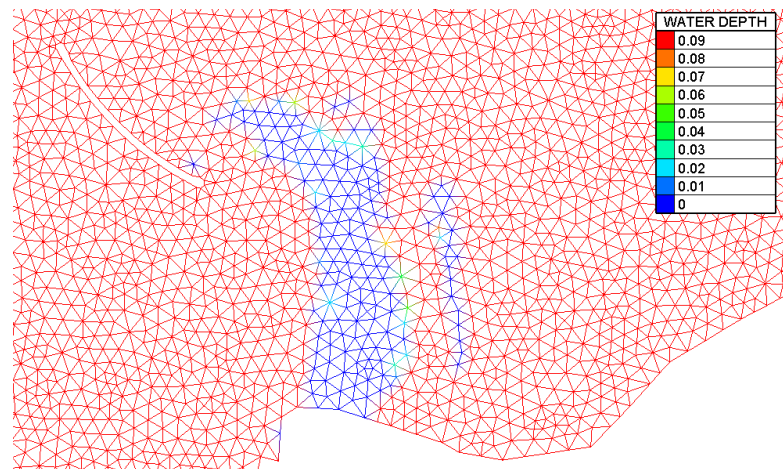


Figura 5.35- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1966, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.

Apesar de junto à barragem de Crestuma a superfície livre ter cotas muito similares antes e após a construção dos molhes, no primeiro caso a descida da superfície ao longo do comprimento é muito superior, acabando por se verificar que após a construção dos molhes no interior do estuário a cota da superfície livre é superior à que existiria se não tivessem sido construídos os molhes. Após a construção dos molhes todos os pontos escolhidos para controlo se encontram inundados o que sugere que a construção não apresenta vantagens a nível da proteção contra as cheias (ver Quadro 5.6).

Quadro 5.6- Cotas atingidas pela água na cheia de 1966 na preia-mar e na baixa-mar, na presença de molhes

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	6.5	SIM	6.1	SIM
Afurada	2.5	3	6.7	SIM	6.3	SIM
Massarelos	3.5	3	7.6	SIM	7.3	SIM
Alfândega	4.5	8	8.0	NÃO	7.7	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	8.5	SIM	8.4	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	8.9	SIM	8.6	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	10.9	SIM	10.7	SIM
Gramido	12.0	5	12.0	SIM	11.8	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	13.7	SIM	13.6	SIM
Arnelas	17.6	6	13.7	SIM	13.6	SIM
Zebreiros	18.0	5	13.8	SIM	13.7	SIM
Crestuma	20.4	8	15.0	SIM	14.9	SIM

Os valores registados confirmam que a elevação da superfície livre é superior no caso da preia-mar relativamente à baixa-mar. No entanto, todos os locais se encontram inundados com exceção da zona da Alfândega.

Como a restinga não é galgada, ocorre uma elevação da superfície livre a montante que não aconteceria caso ela fosse destruída, aumentando a vazão do caudal de cheia. Sendo assim, a elevação da superfície livre para as simulações feitas considerando a construção dos molhes é superior à elevação da superfície livre antes da construção dos molhes, como se consegue observar na Figura 5.36.

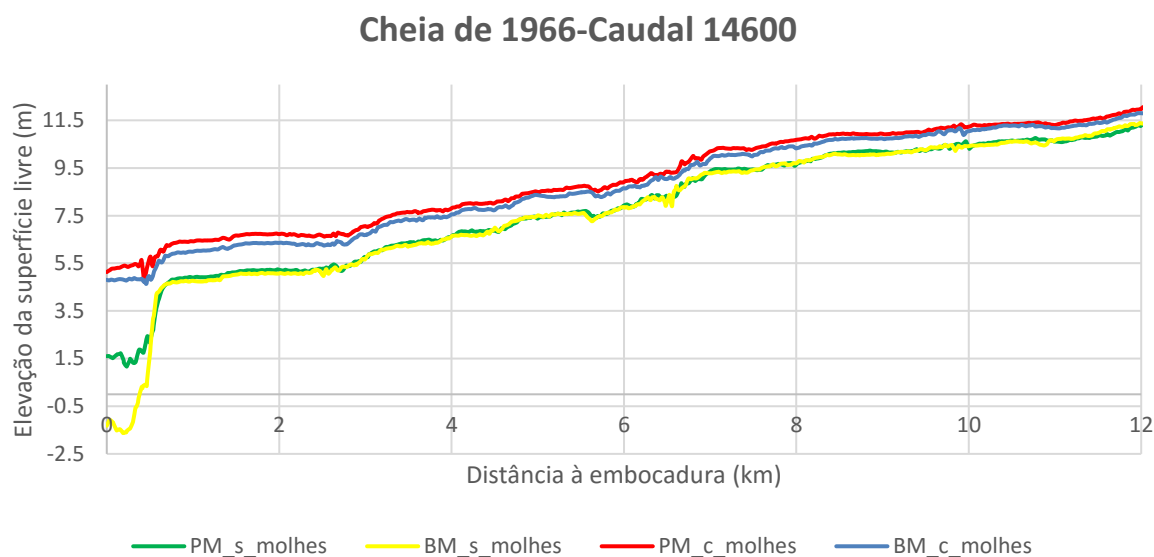


Figura 5.36- Elevação da superfície livre para a cheia de 1966 antes e após a construção dos molhes para a BM e para a PM.

5.1.3 CHEIA DE FEVEREIRO DE 1979

A elevação da superfície livre para a cheia de 1979, com um caudal de $12525 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes da construção dos molhes encontra-se representada nas figuras 5.37, 5.38 e 5.39.

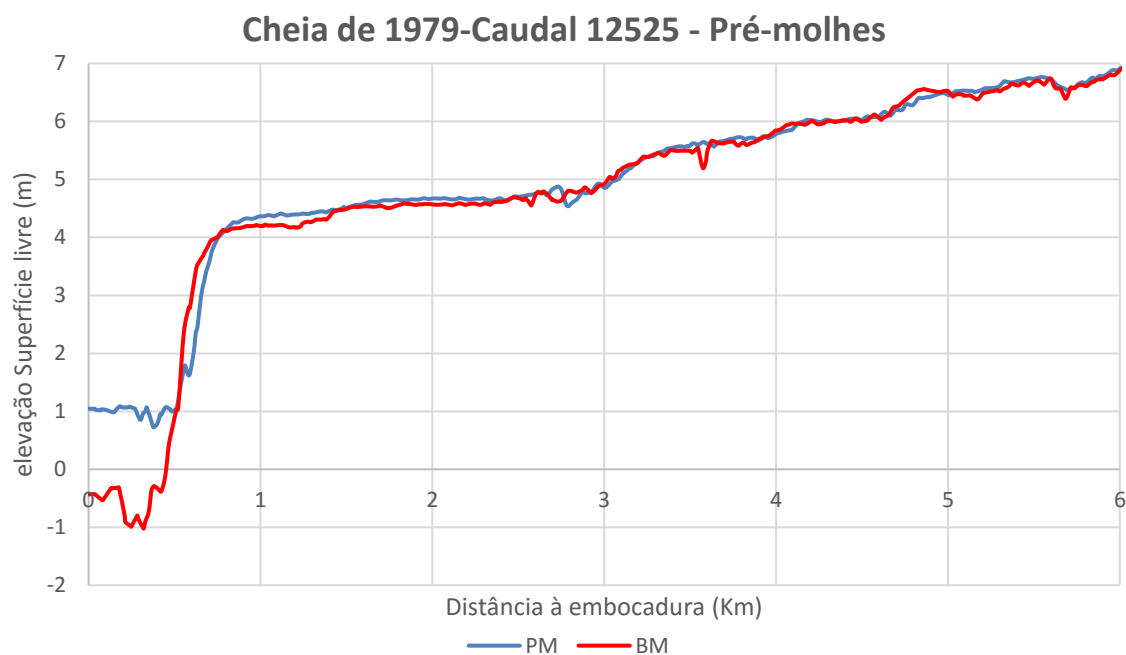


Figura 5.37- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

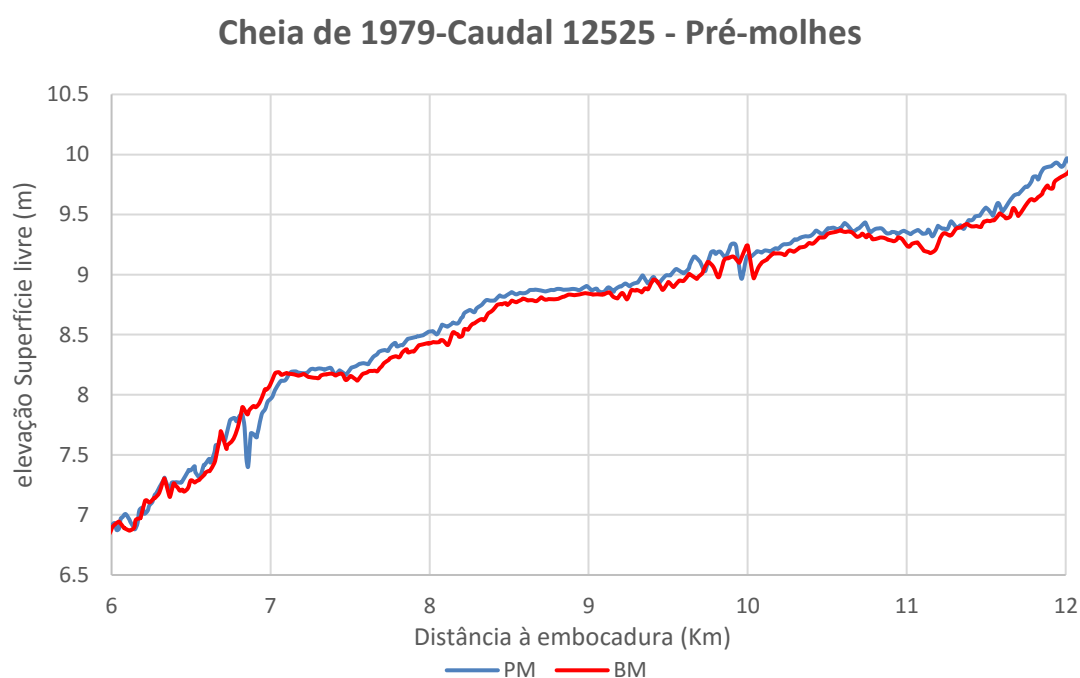


Figura 5.38- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

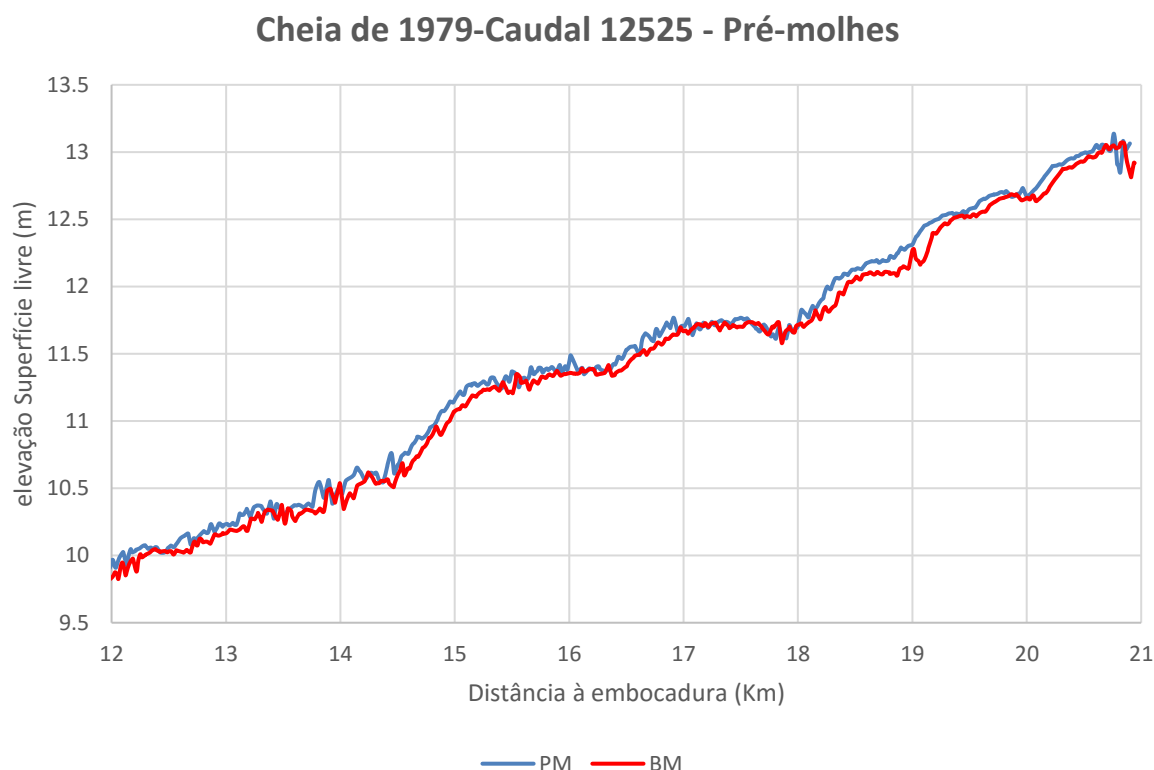


Figura 5.39- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

No caso da cheia de 1979 a influência da maré faz-se sentir com alguma relevância pois a superfície livre entre a baixa-mar e a preia-mar apresenta sempre diferenças ao longo de todo o domínio.

Parece existir um caudal crítico que faz com que o efeito da maré se comece a fazer sentir no estuário médio e superior. Esse caudal deve-se localizar entre o caudal da cheia de 1966 e o da cheia de 1979 pois em 1966 nos estuários médio e superior a influência da maré não se fazia sentir, sendo a diferença entre a preia-mar e a baixa-mar desprezável, mas no caso de 1979 para todas as zonas dos estuários existem claras diferenças entre as marés.

Verifica-se que uma vez mais a influência fluvial se faz sentir até junto da restinga, sendo o seu limite marcado como a fronteira entre os dois tons de azul (ver Figura 5.40). Com este caudal a grande parte da restinga foi galgada (ver Figura 5.41).

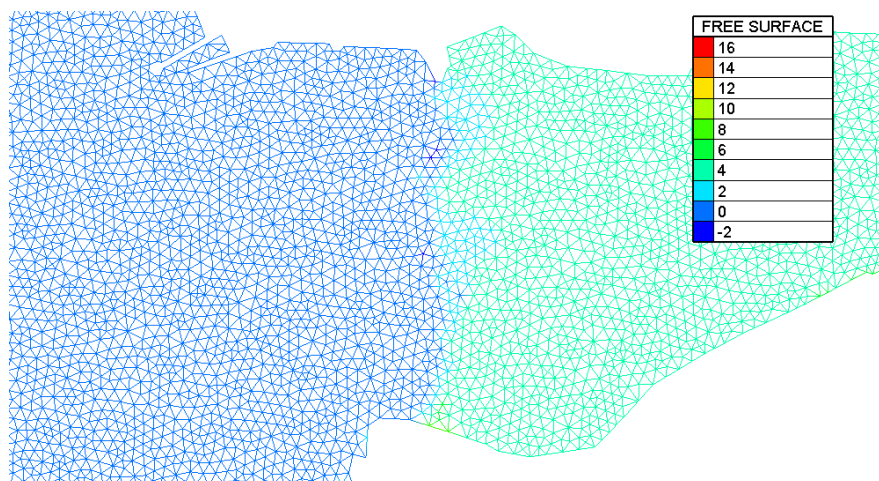


Figura 5.40- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1979 antes da construção dos molhes.

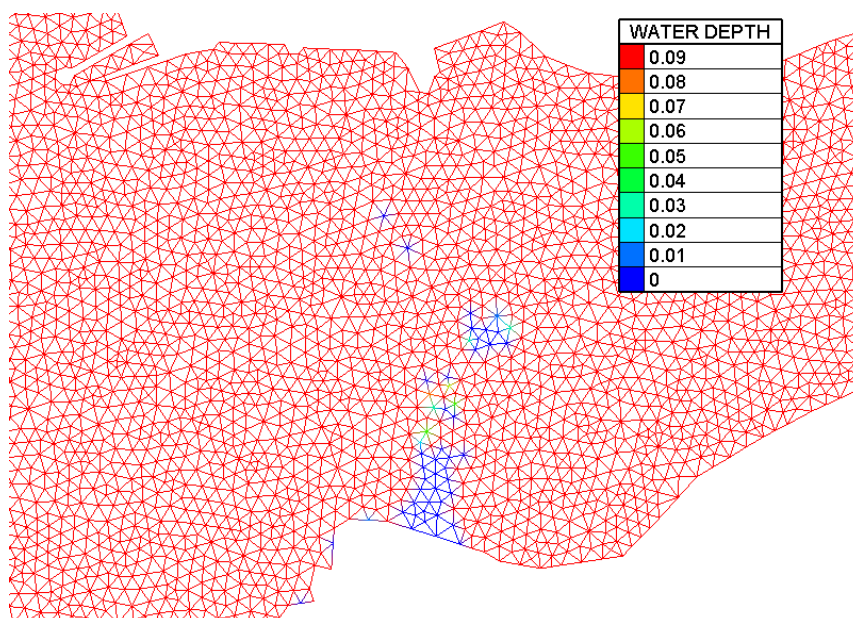


Figura 5.41- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1979, antes da construção dos molhes e na situação de preia-mar.

Verifica-se que nestas simulações as elevações da superfície livre ao longo do estuário são um pouco inferiores às das cheias de 1962 e 1966 por causa do caudal ser um pouco inferior. A maior diferença verifica-se entre 1962 e 1979, entre 1979 e 1966 não se nota uma diferença tão relevante porque os caudais se encontram mais próximos. Apesar de o caudal ser inferior, a Alfândega continua a ser o único sítio que não sofreu inundação (ver Quadro 5.7).

Quadro 5.7- Cotas atingidas pela água na cheia de 1979 na simulação da baixa-mar e da preia-mar antes da construção dos molhes

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	4.4	SIM	4.3	SIM
Afurada	2.5	3	4.7	SIM	4.7	SIM
Massarelos	3.5	3	5.6	SIM	5.5	SIM
Alfândega	4.5	8	6.0	NÃO	6.0	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	6.5	SIM	6.5	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	6.9	SIM	6.9	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	8.9	SIM	8.8	SIM
Gramido	12.0	5	9.9	SIM	9.8	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	11.7	SIM	11.7	SIM
Arnelas	17.6	6	11.7	SIM	11.7	SIM
Zebreiros	18.0	5	11.7	SIM	11.7	SIM
Crestuma	20.4	8	13.0	SIM	12.9	SIM

A elevação da superfície livre para a cheia de 1979 para a situação de preia-mar e de baixa-mar encontra-se nas figuras 5.42 a 5.44.

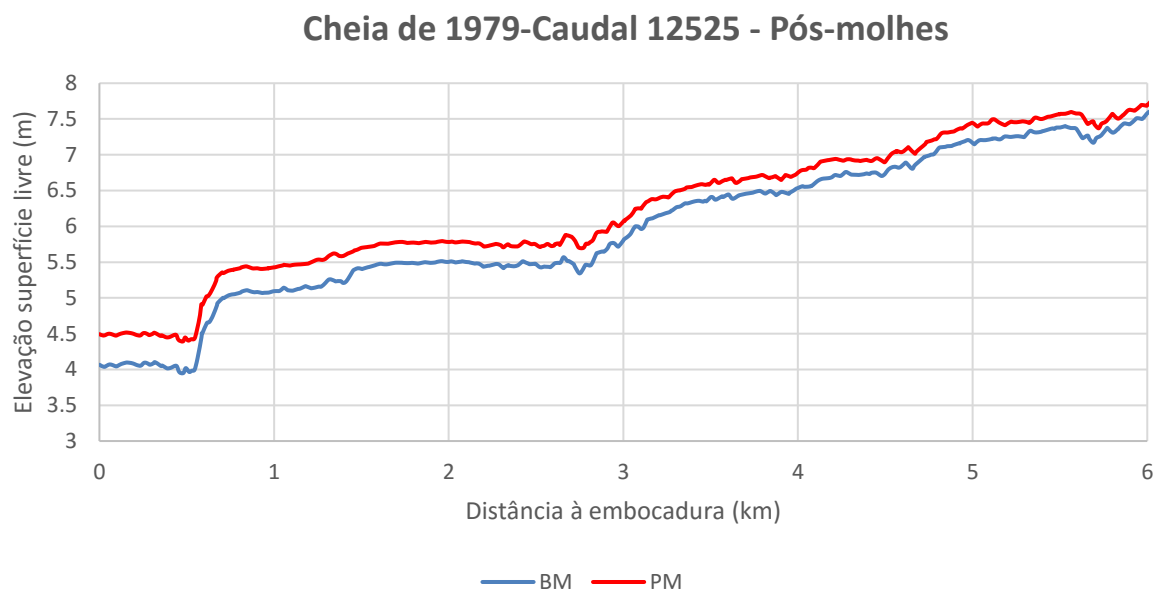


Figura 5.42- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.

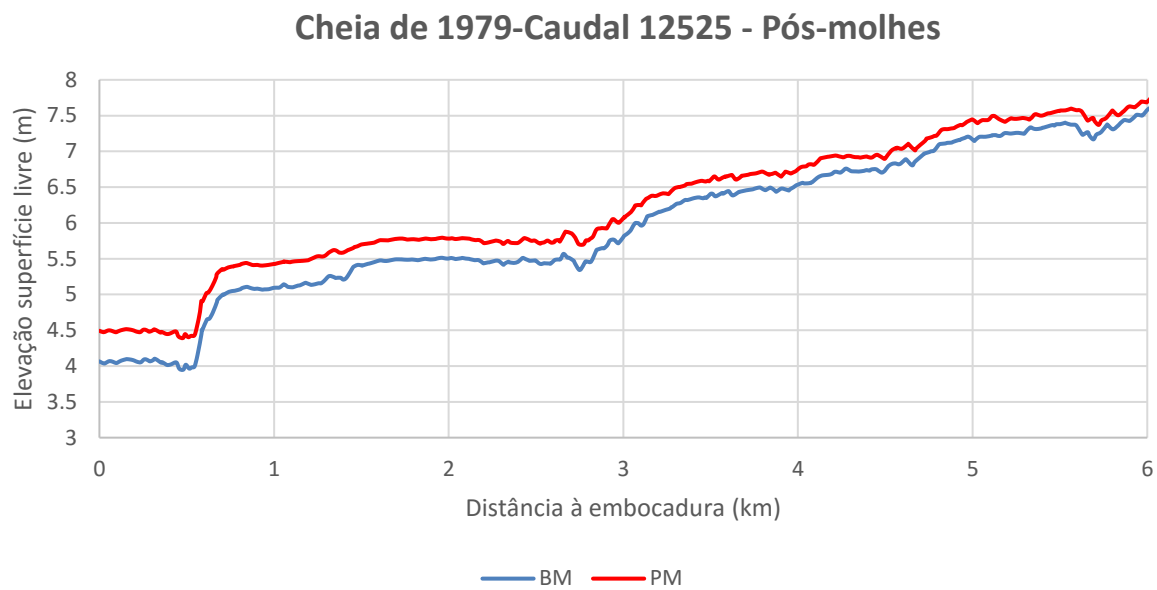


Figura 5.43- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes

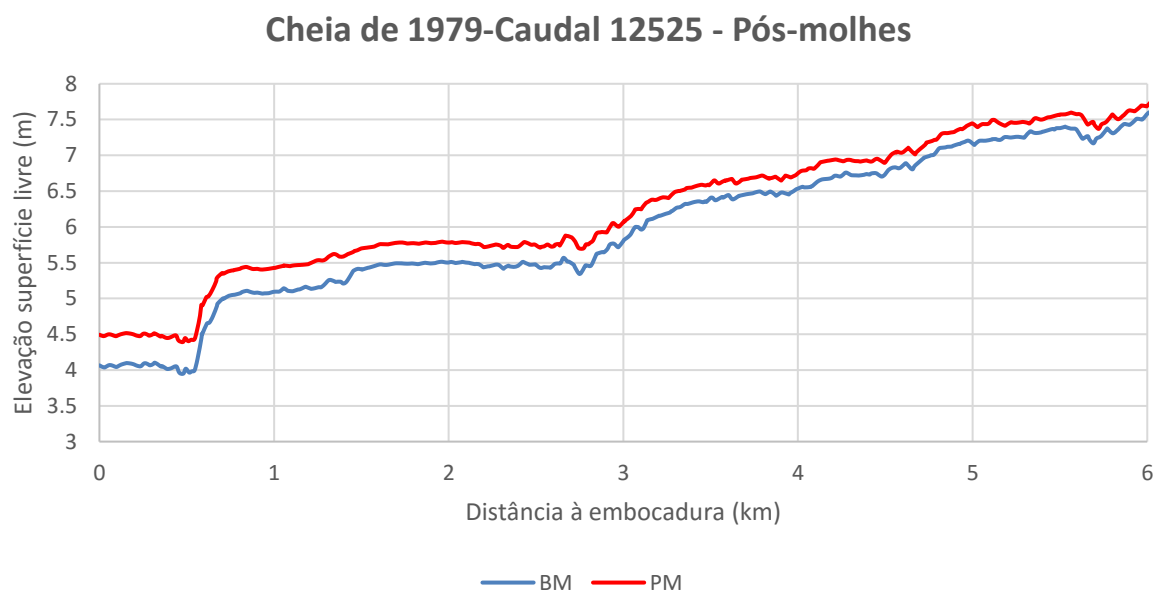


Figura 5.44- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1979 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.

Após a análise das figuras verifica-se que a influência da maré se faz sentir ao longo de todo estuário, embora com mais relevância no estuário inferior.

Para a preia-mar da cheia de 1979, verifica-se que a presença dos molhes permite que o escoamento fluvial se consiga propagar mais para jusante da embocadura. A elevação da superfície livre passa então de 4 m para entre 1 e 2 m (zona azul) onde a influência oceânica é completa (ver Figura 5.45).

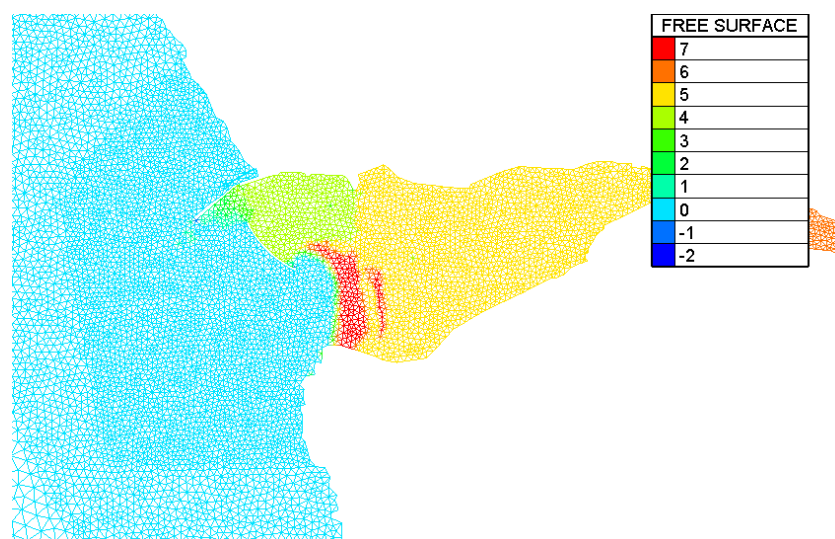


Figura 5.45- Elevação da superfície livre na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1979 após a construção dos molhes.

Com este caudal também se observa que a restinga não é galgada (ver Figura 5.46).

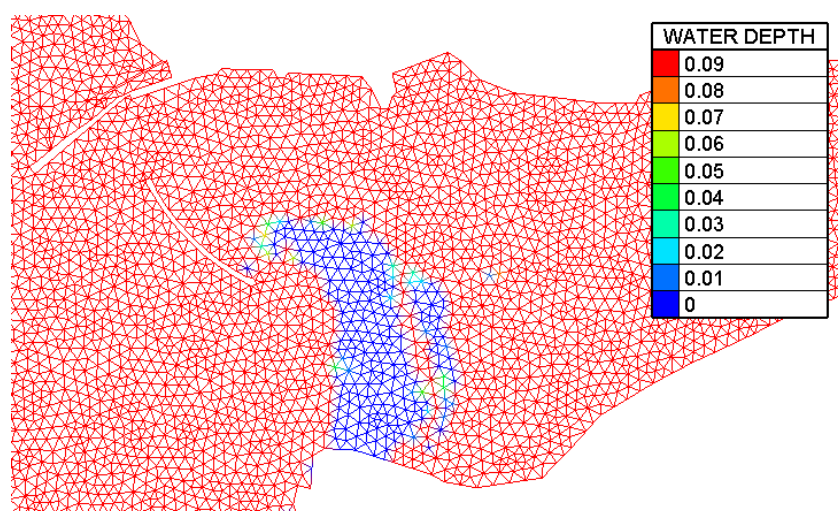


Figura 5.46- Profundidade da água na zona da embocadura para a situação de preia-mar na cheia de 1979 após a construção dos molhes.

As cotas da superfície livre para os locais escolhidos encontram-se registadas no Quadro 5.8.

Quadro 5.8- Cotas atingidas pela água na cheia de 1979 na simulação de baixa-mar e da preia-mar após a construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	5.5	SIM	5.2	SIM
Afurada	2.5	3	5.7	SIM	5.5	SIM
Massarelos	3.5	3	6.6	SIM	6.4	SIM
Alfândega	4.5	8	6.9	NÃO	6.7	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	7.4	SIM	7.1	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	7.7	SIM	7.6	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	9.5	SIM	9.3	SIM
Gramido	12.0	5	10.4	SIM	10.3	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	12.0	SIM	12.0	SIM
Arnelas	17.6	6	12.1	SIM	12.0	SIM
Zebreiros	18.0	5	12.1	SIM	12.1	SIM
Crestuma	20.4	8	13.3	SIM	13.2	SIM

Verifica-se que mais uma vez a Alfândega é o único local que não se encontra inundado. A Figura 5.47 serve para estabelecer a comparação entre as simulações antes da construção dos molhes e após a sua construção para a cheia de 1979.

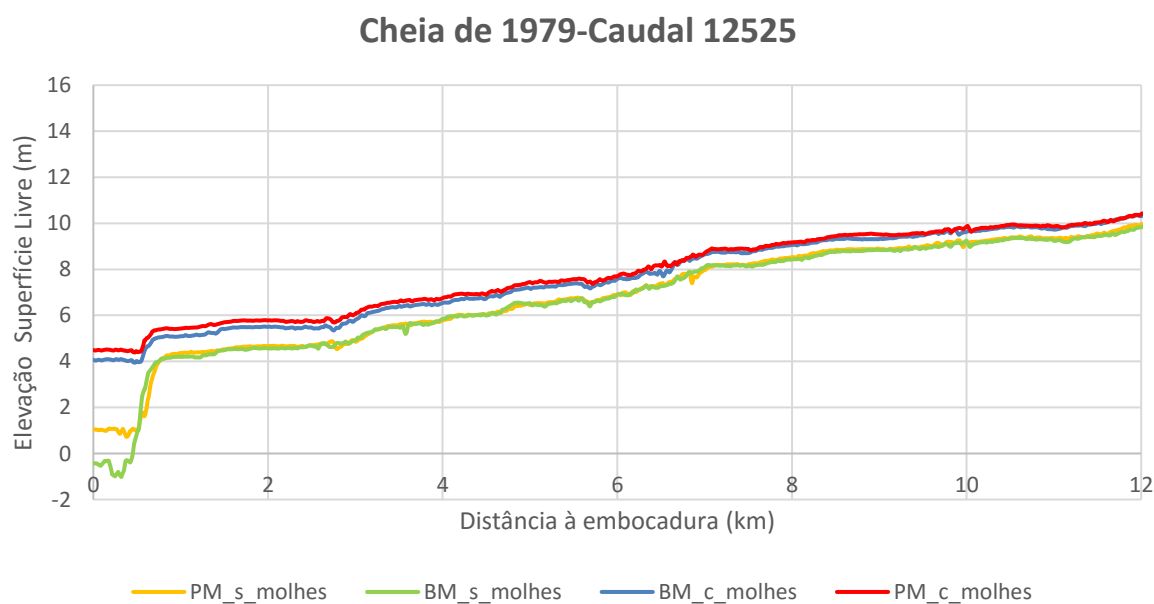


Figura 5.47- Elevação da superfície livre para a cheia de 1979 antes e após a construção dos molhes para a baixa-mar e preia-mar.

Como a restinga não é galgada a elevação da superfície livre é maior para as simulações em que os molhes são considerados na área de estudo.

5.1.4 CHEIA DE JANEIRO DE 1996

Os perfis longitudinais da superfície livre para a cheia de 1996 quando ocorre maré cheia e maré baixa encontram-se nas Figuras 5.48, 5.49 e 5.50.

Cheia de 1996-Caudal 10500 - Pré-molhes

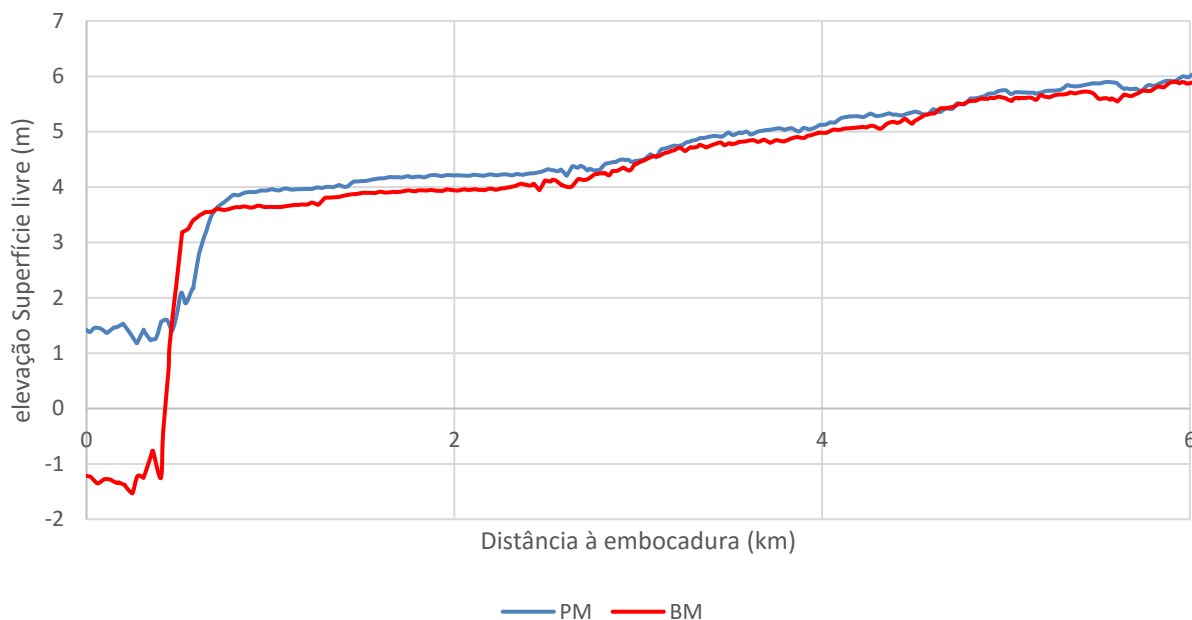


Figura 5.48- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário inferior antes da ocorrência da cheia de 1996 em preia-mar e em baixa-mar, sem a presença dos molhes.

Cheia de 1996-Caudal 10500 - Pré-molhes

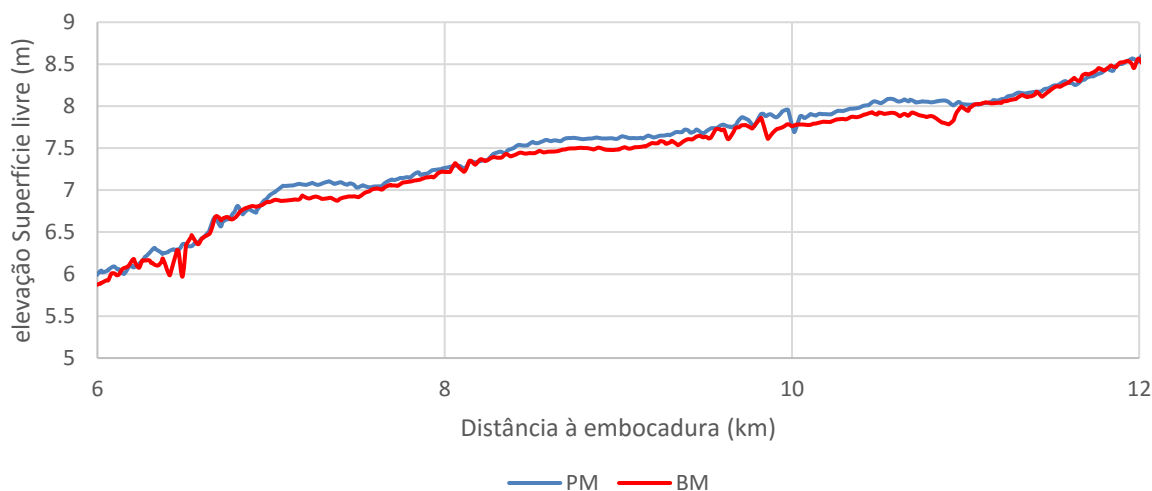


Figura 5.49- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário médio antes da ocorrência da cheia de 1996 em preia-mar e em baixa-mar, sem a presença dos molhes.

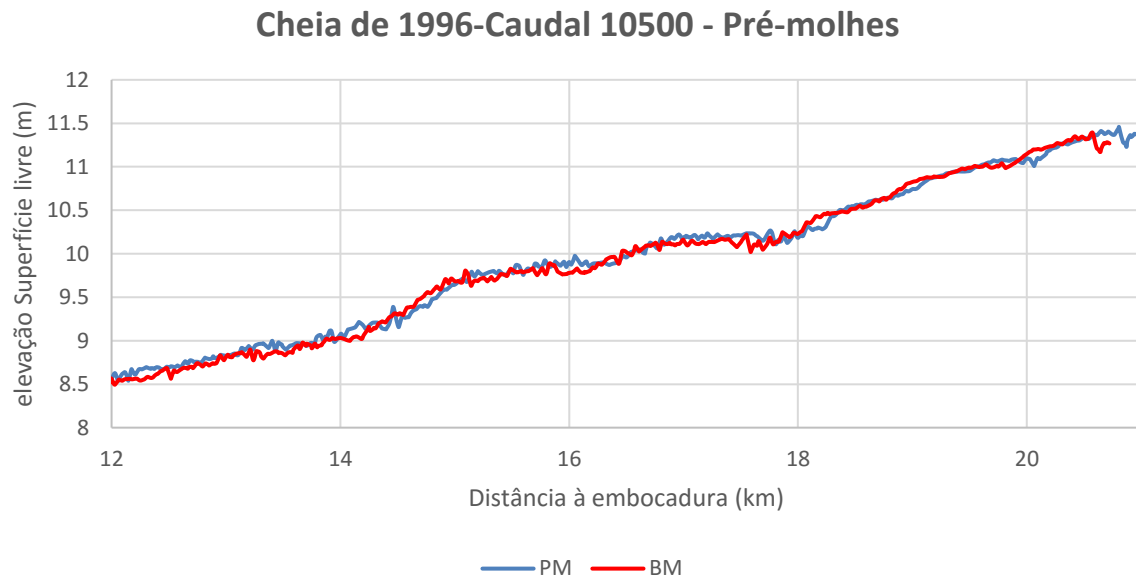


Figura 5.50- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário superior antes da ocorrência da cheia de 1996 em preia-mar e em baixa-mar, sem a presença dos molhes.

Após a análise das três figuras compreende-se que a influência da maré se faz sentir em todo o estuário, sendo a elevação da superfície livre sempre diferente entre a preia-mar e a baixa-mar.

Ao chegar à embocadura o controlo de jusante típico do escoamento lento, força a cota da superfície livre a diminuir drasticamente num curto espaço, sendo isso que se verifica imediatamente antes de se atingir 1 km a partir do ponto inicial. A fronteira de transição é a mesma que nas cheias de 1962, 1966 e 1979, passando a cota da superfície livre de aproximadamente 4 m para 1 m no caso representado que corresponde ao da preia-mar (ver Figura 5.51).

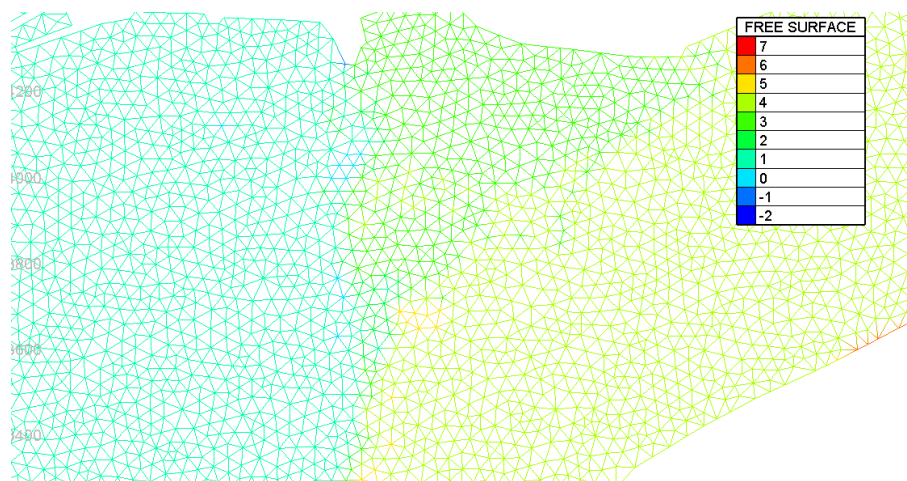


Figura 5.51- Elevação da superfície livre junto à embocadura do estuário para a cheia de 1996, sem a presença dos molhes e na situação de preia-mar.

Neste caso a restinga também não é completamente galgada, continuando-se a encontrar algumas zonas emersas (ver Figura 5.52).

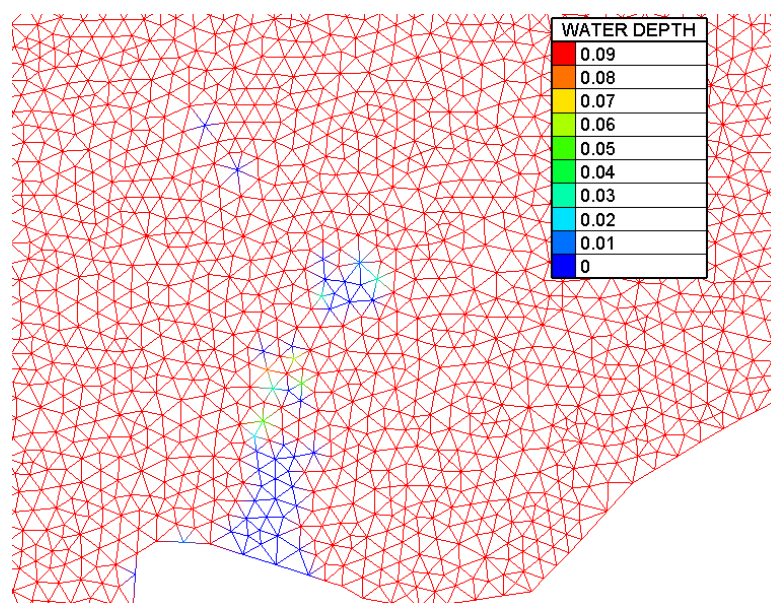


Figura 5.52- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1996, antes da construção dos molhes e na situação de preia-mar.

No Quadro 5.9 encontram-se representadas as cotas obtidas para cada local na preia-mar e na baixa-mar e a sua comparação com a cota do local de forma a perceber se os locais se encontram inundados.

Quadro 5.9- Cotas atingidas pela água na cheia de 1996 na simulação da baixa-mar e da preia-mar antes da construção dos molhes

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	4.0	SIM	3.7	SIM
Afurada	2.5	3	4.4	SIM	4.0	SIM
Massarelos	3.5	3	4.9	SIM	4.7	SIM
Alfândega	4.5	8	5.4	NÃO	5.2	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	5.7	SIM	5.4	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	6.0	SIM	5.9	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	7.6	SIM	7.5	SIM
Gramido	12.0	5	8.5	SIM	8.4	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	10.2	SIM	10.1	SIM
Arnelas	17.6	6	10.2	SIM	10.1	SIM
Zebreiros	18.0	5	10.3	SIM	10.3	SIM
Crestuma	20.4	8	11.3	SIM	11.3	SIM

Todos os locais se encontram inundados com exceção da Alfândega. Comparando esta tabela com a tabela relativa à cheia de 1962 já se consegue verificar que apesar de todos os locais se encontrarem inundados as cotas já são muito inferiores, sendo a extensão da inundação muito menor e provocando menos estragos. Isto para apenas uma diferença de $6500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (comparativamente com a cheia de 1962). A maior diferença entre as cotas da superfície livre encontra-se junto à barragem de Crestuma, em que em relação à cheia de 1962 já existem 5 m de diferença.

As Figuras 5.53, 5.54 e 5.55 apresentam o perfil longitudinal da elevação da superfície livre para a cheia de 1996 após a construção dos molhes, na preia-mar e na baixa-mar.

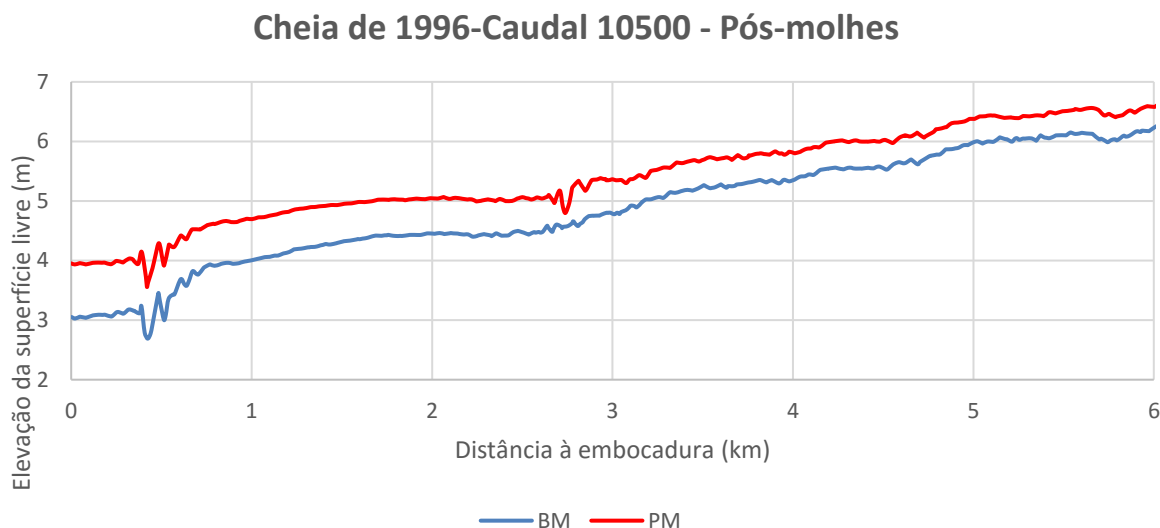


Figura 5.53- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 1996, na preia-mar e na baixa-mar.

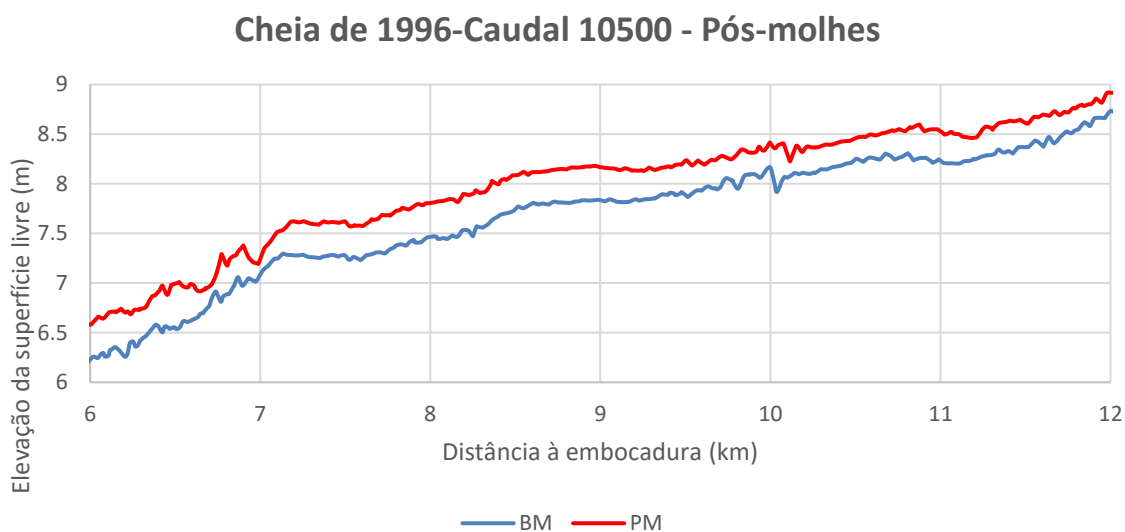


Figura 5.54-Perfil longitudinal da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 1996, na preia-mar e na baixa-mar.

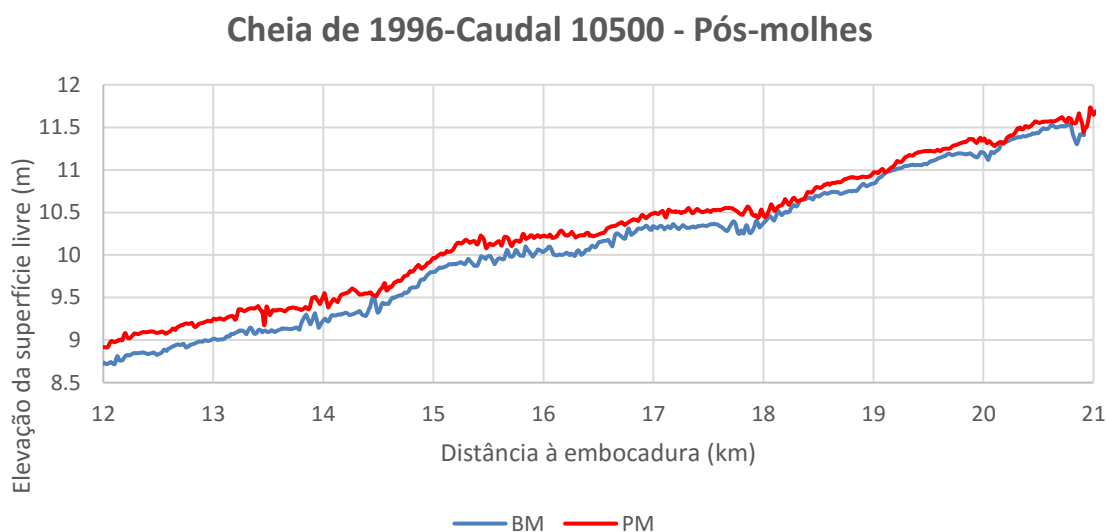


Figura 5.55- Perfil longitudinal da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 1996 em preia-mar e baixa-mar, contando com a presença dos molhes.

Verifica-se que a cota da superfície livre junto à barragem de Crestuma já é muito mais baixa, sendo de aproximadamente 11,5 m, enquanto para o caudal de $17000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ essa cota rondava os 17 m. A diferença de caudais aqui já se faz notar, embora apesar de menor, a cheia de 1996 também pode ser responsável por inúmeros estragos.

Verifica-se uma diferença com o nível da maré entre a elevação da superfície livre ao longo de toda a extensão do estuário, o que significa que a influência da maré se faz sentir.

Na entrada do estuário a cota encontra-se por volta dos 4 m mas a Figura 5.56 permite verificar que o caudal do rio é direcionado até mais longe em direção ao oceano, como já se havia verificado nos outros casos.

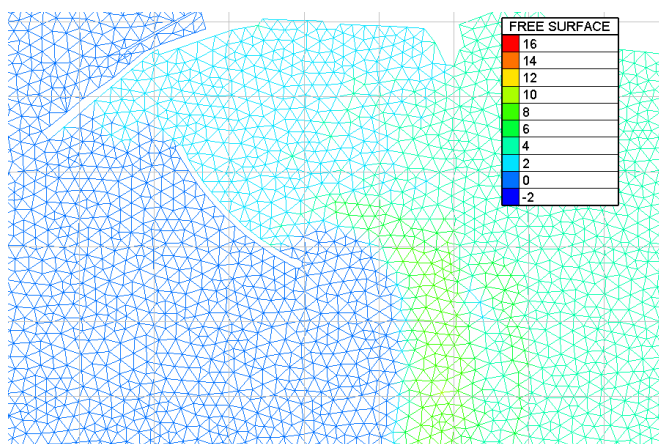


Figura 5.56- Elevação da superfície livre junto à embocadura do estuário para a cheia de 1996, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.

A influência fluvial faz-se sentir até quase ao fim do comprimento do molhe norte sendo aí que se nota a quebra nas cotas da superfície livre que antes eram de cerca de 2 ou 3 m e de repente passam a ser de 1 m aproximadamente.

Para o caudal de $10500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a maior parte do corpo central da restinga encontra-se emerso. Apenas a zona mais próxima do canal de navegação ficou submersa (ver Figura 5.57).

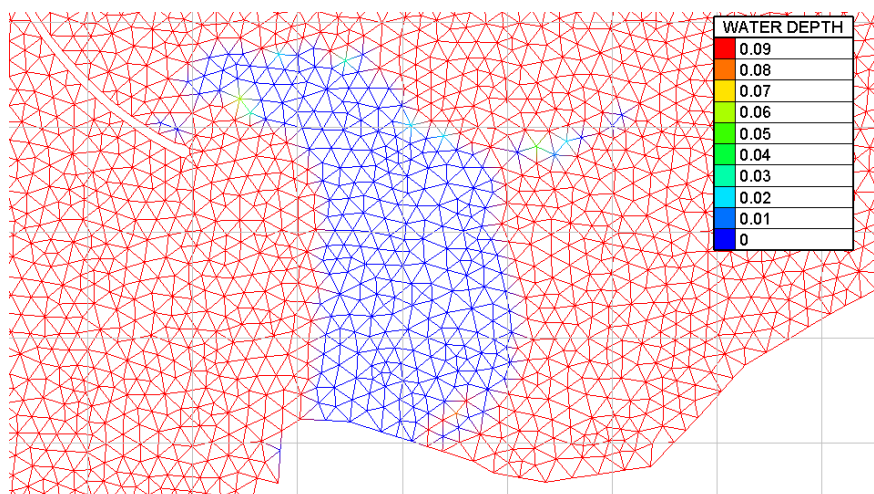


Figura 5.57- Profundidade da água na zona da restinga na cheia de 1996, contando com a presença dos molhes e na situação de preia-mar.

É importante dar relevância ao facto de que foi para o menor caudal de cheia histórica que, após a construção dos molhes, se verificou que a maior parte da restinga se manteve emersa.

A cota da água nas zonas escolhidas como vulneráveis encontra-se no Quadro 5.10.

Quadro 5.10- Cotas atingidas pela água na cheia de 1996 na simulação da preia-mar após a construção dos molhes

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	4.9	SIM	4.2	SIM
Afurada	2.5	3	5.1	SIM	4.5	SIM
Massarelos	3.5	3	5.7	SIM	5.3	SIM
Alfândega	4.5	8	6.0	NÃO	5.5	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	6.4	SIM	6.0	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	6.6	SIM	6.3	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	8.2	SIM	7.8	SIM
Gramido	12.0	5	8.9	SIM	8.7	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	10.5	SIM	10.3	SIM
Arnelas	17.6	6	10.5	SIM	10.3	SIM
Zebreiros	18.0	5	10.4	SIM	10.4	SIM
Crestuma	20.4	8	11.5	SIM	11.4	SIM

Todos os locais continuam submersos exceto a Alfândega. No entanto, como se pode verificar, as cotas da superfície livre já não são muito elevadas comparativamente com as registadas nas simulações

anteriores. Verifica-se também que existem sempre diferenças ao longo de toda a extensão do estuário na elevação da superfície livre entre a baixa-mar e a preia-mar, embora com uma maior diferença nas zonas mais a jusante.

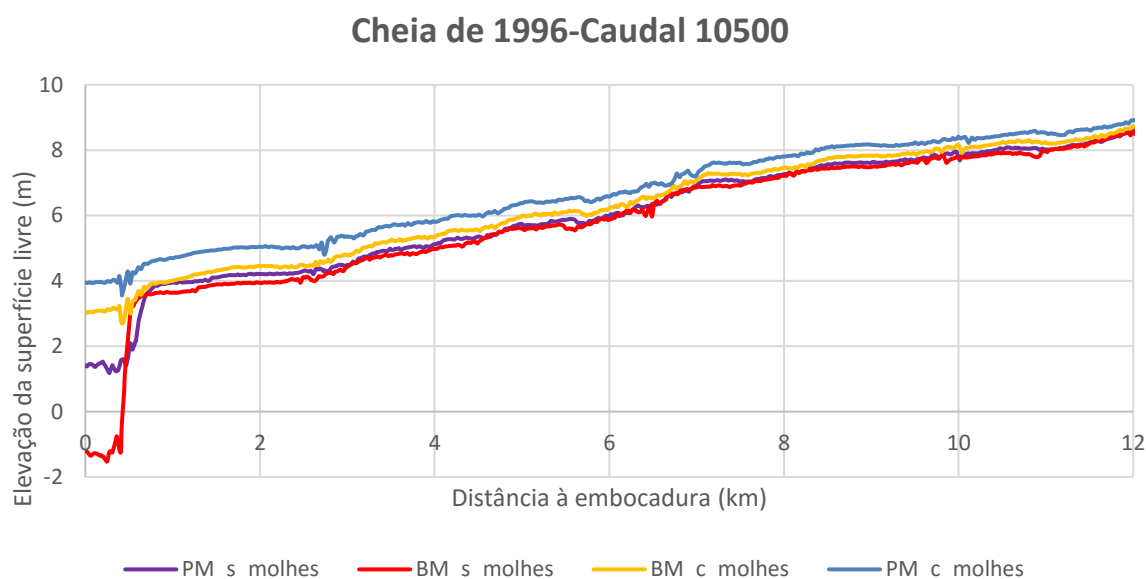


Figura 5.58- Elevação da superfície livre para a cheia de 1996 antes e após a construção dos molhes para a baixa-mar e preia-mar.

Após analisar a Figura 5.58, verifica-se que a elevação da superfície livre para a condição de existência de molhes em preia-mar é superior às simulações da preia-mar e de baixa-mar quando ainda não tinham sido construídos os molhes. Já para a baixa-mar antes da construção dos molhes verifica-se que a diferença entre a sua elevação da superfície livre e a dos casos pós-molhes não é tão significativa.

5.1.5 CHEIA DE JANEIRO DE 2001

As últimas simulações, relativamente a cheias históricas, foram feitas para a cheia de 2001. Esta cheia é aquela que apresenta o menor caudal: $9812 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Os perfis longitudinais da superfície livre para a preia-mar e baixa-mar antes da construção dos molhes encontram-se nas figuras 5.59, 5.60 e 5.61.

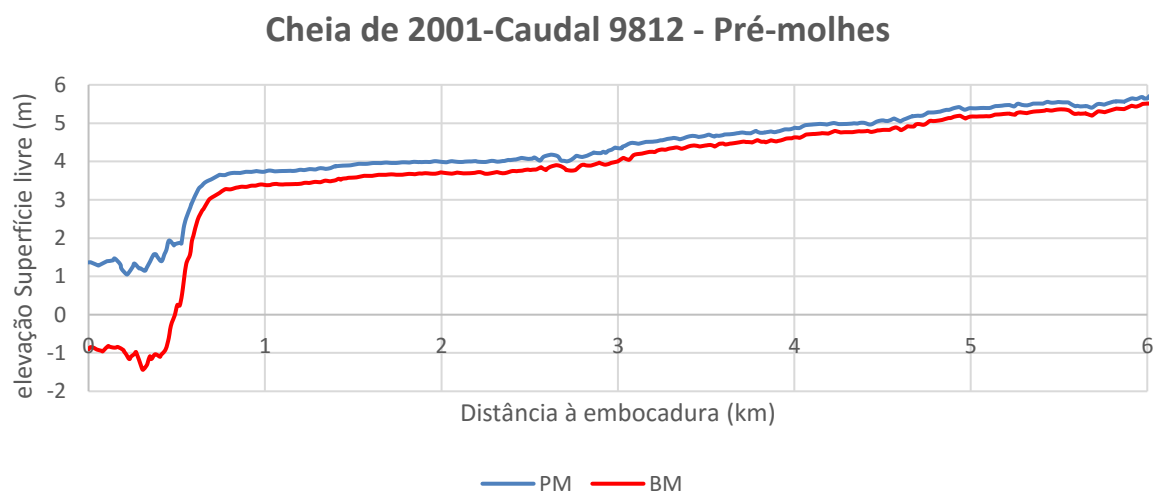


Figura 5.59- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

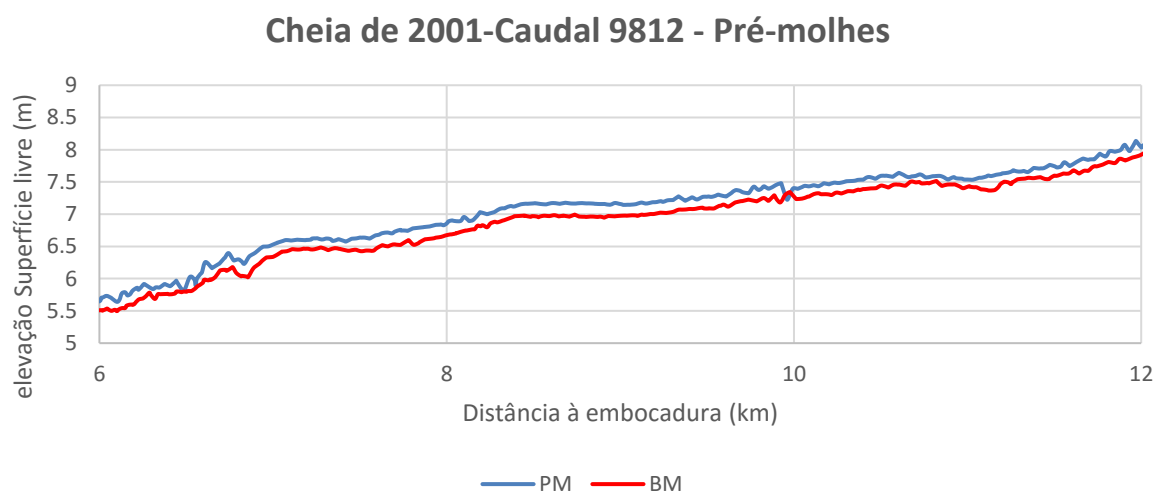


Figura 5.60- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

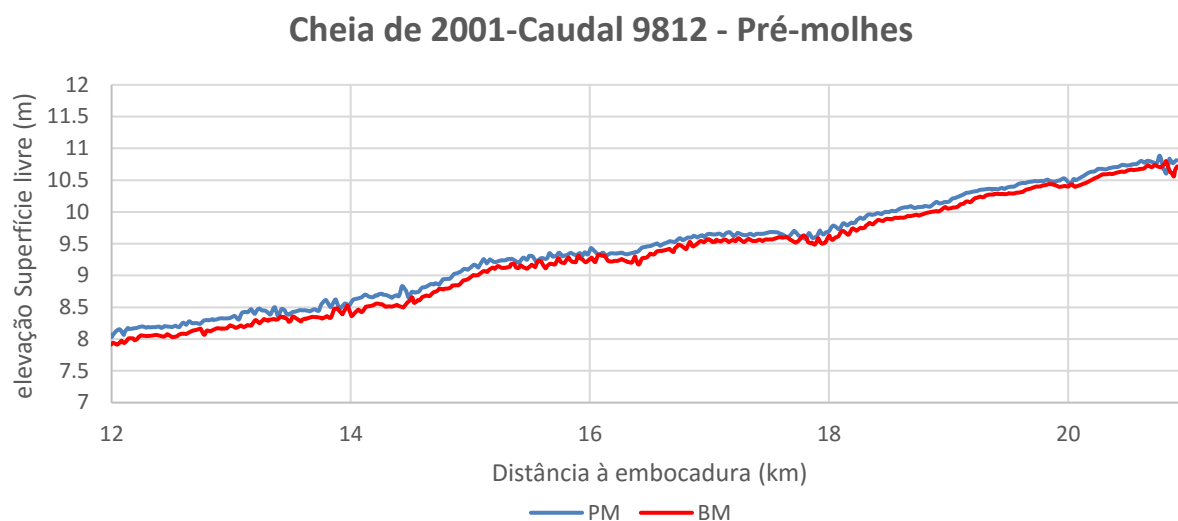


Figura 5.61- Perfis longitudinais da elevação da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

Para este caudal surgem as maiores diferenças entre as simulações da preia-mar e da baixa-mar. É mais clara a influência da maré. Isto deve-se a este ser o menor caudal de todas as simulações.

Na Figura 5.62 encontra-se a superfície livre da zona da embocadura e consegue-se verificar mais uma vez que a influência fluvial se faz sentir até à fronteira entre o verde e o azul claro, com valores da elevação da superfície livre descendo dos 4 m a 1 m.

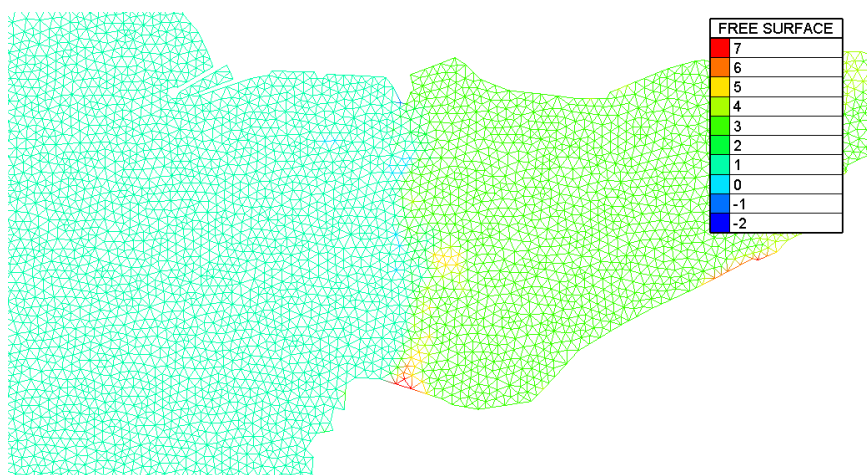


Figura 5.62- Elevação da superfície livre na embocadura para a cheia de 2001, na situação de preia-mar antes dos molhes.

Na Figura 5.63 representa-se a profundidade da água na embocadura, mais concretamente junto à restinga. As zonas a azul significam que a profundidade da água é nula, ou seja, não existe água sobre a restinga. Verifica-se que, para uma fase anterior à construção dos molhes, este caudal foi aquele que permitiu que uma maior parte da restinga se mantivesse emersa.

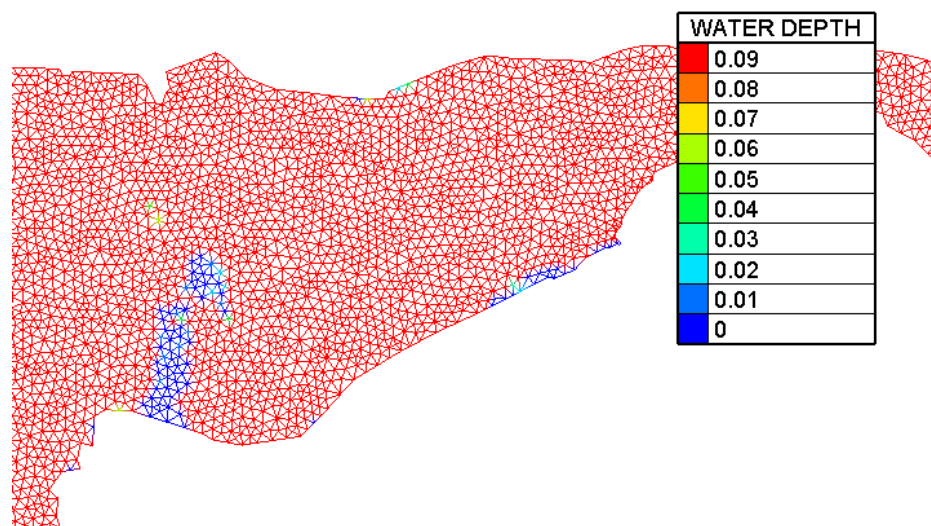


Figura 5.63- Profundidade da água na embocadura para a cheia de 2001 em situação de preia-mar antes da construção dos molhes.

Para esta cheia, todos os locais se encontram inundados, com exceção da Alfândega (ver Quadro 5.11). As cotas atingidas pela água são as mais baixas encontradas em todas as simulações feitas, o que vai de encontro ao facto de o caudal ser também o mais baixo.

Quadro 5.11- Cotas atingidas pela água na cheia de 2001 nas simulações da preia-mar e baixa-mar antes da construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação	Cota Telemac BM	Inundação
Cantareira	1.3	3	3.8	SIM	3.5	SIM
Afurada	2.5	3	4.0	SIM	3.8	SIM
Massarelos	3.5	3	4.7	SIM	4.4	SIM
Alfândega	4.5	8	5.1	NÃO	4.8	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	5.4	SIM	5.2	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	5.7	SIM	5.5	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	7.2	SIM	7.0	SIM
Gramido	12.0	5	8.0	SIM	7.9	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	9.7	SIM	9.6	SIM
Arnelas	17.6	6	9.6	SIM	9.6	SIM
Zebreiros	18.0	5	9.7	SIM	9.6	SIM
Crestuma	20.4	8	10.7	SIM	10.6	SIM

Por fim, as últimas simulações feitas foram relativamente à cheia de 2001 após a construção dos molhes, para uma situação de preia-mar e outra de baixa-mar. Os perfis longitudinais da superfície livre de ambas as simulações podem ser analisados nas Figuras 5.64 a 5.66.

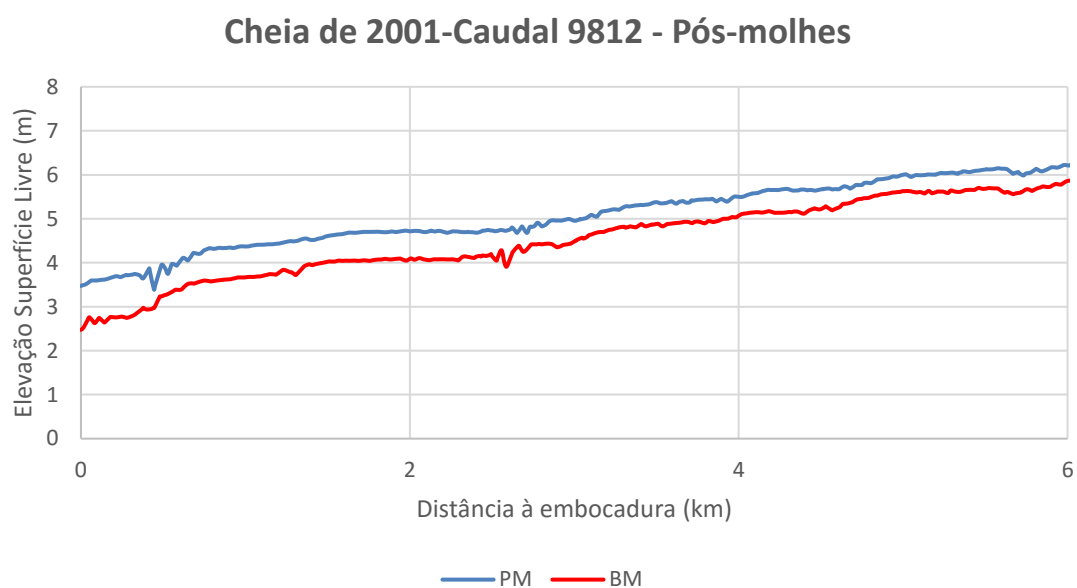


Figura 5.64- Perfis longitudinais da superfície livre no estuário inferior após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.

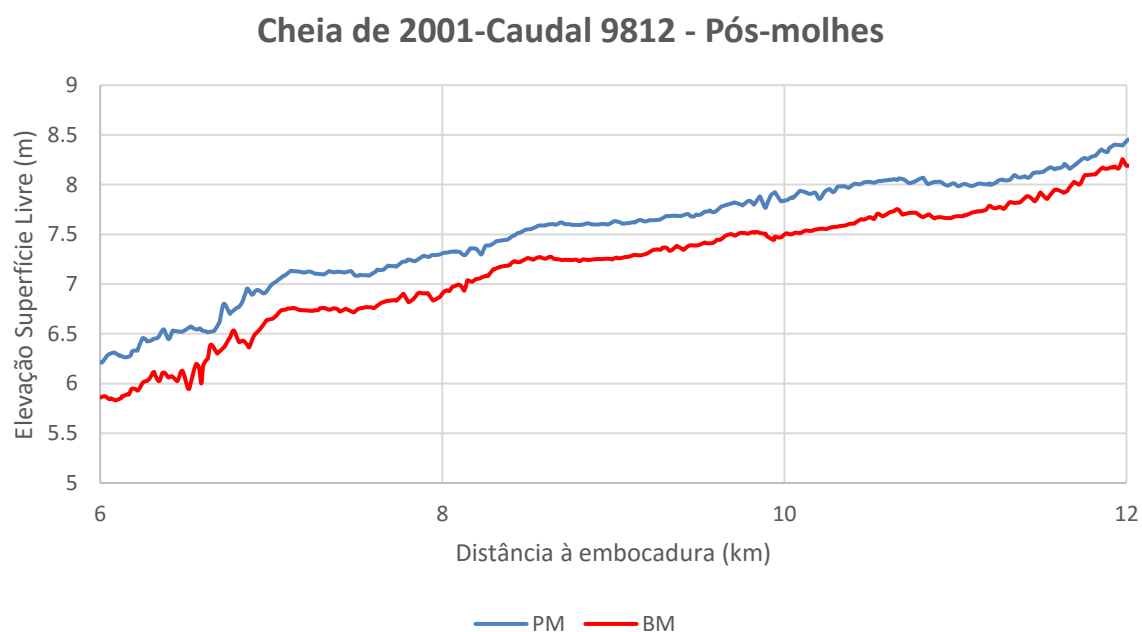


Figura 5.65- Perfis longitudinais da superfície livre no estuário médio após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.

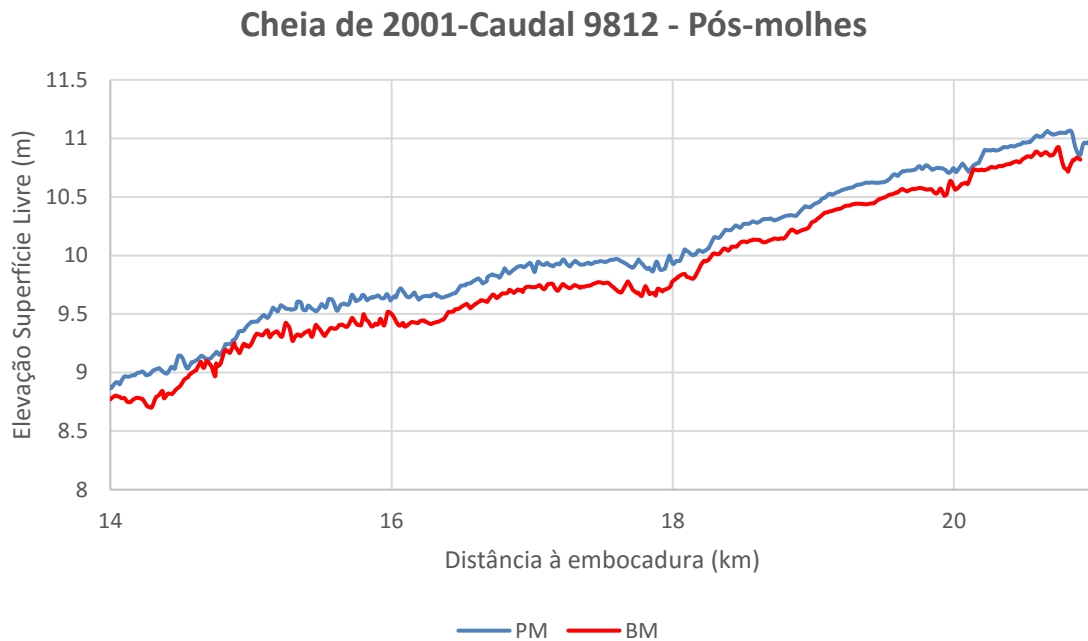


Figura 5.66- Perfis longitudinais da superfície livre no estuário superior após a ocorrência da cheia de 2001 em preia-mar e em baixa-mar, após a construção dos molhes.

Para este caudal de $9812 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, verifica-se que a influência da maré se faz sentir ao longo de todo o estuário criando diferentes perfis de superfície livre para a preia-mar e a baixa-mar. Verifica-se que a altura de água junto à barragem de Crestuma é de aproximadamente 11 m, tal como antes da construção dos molhes.

Após a análise das Figuras 5.67 e 5.68 verifica-se que o molhe conduz o caudal fluvial até ao exterior do estuário. Verifica-se que no caso da preia-mar a diminuição da superfície livre começou apenas junto à restinga enquanto na baixa-mar essa diminuição começou um pouco mais a montante.

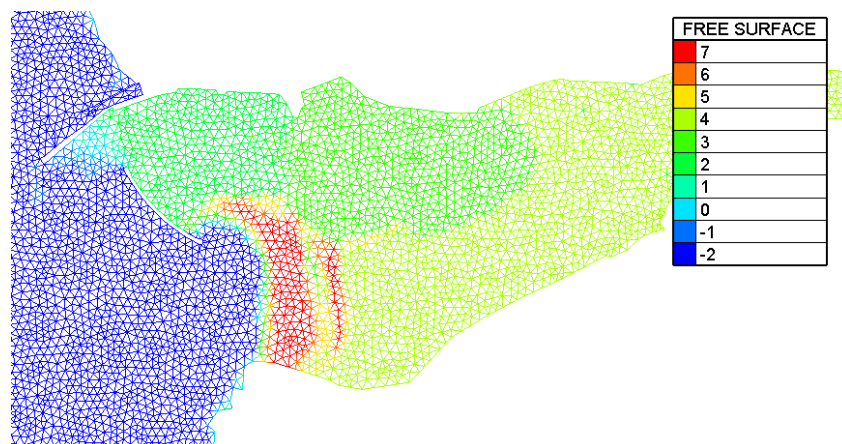


Figura 5.67- Elevação da superfície livre na embocadura para a cheia de 2001, na situação de baixa-mar após a construção dos molhes.

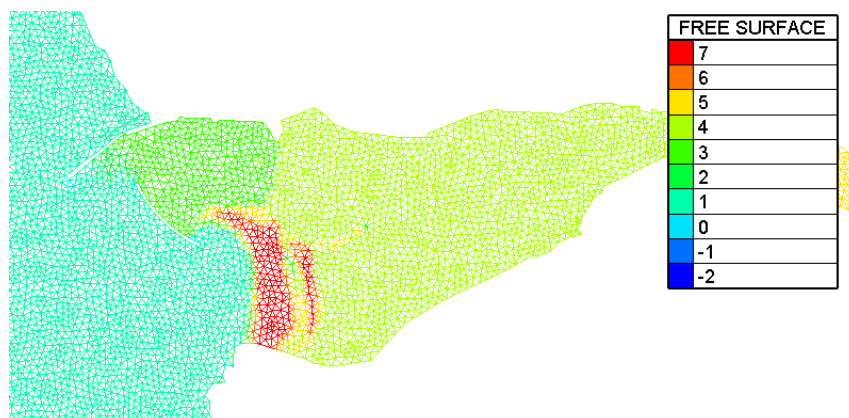


Figura 5.68- Elevação da superfície livre na embocadura para a cheia de 2001, na situação de preia-mar após a construção dos molhes.

As Figuras 5.69 e 5.70 ilustram que para esta cheia a quase totalidade da restinga se manteve emersa e, portanto, não ocorreu galgamento, tanto na preia-mar como na baixa-mar.

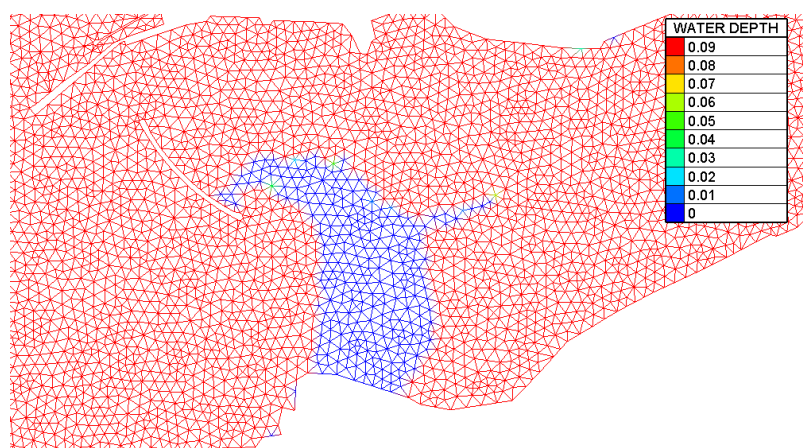


Figura 5.69- Profundidade da água na embocadura para a cheia de 2001 em situação de preia-mar após a construção dos molhes.

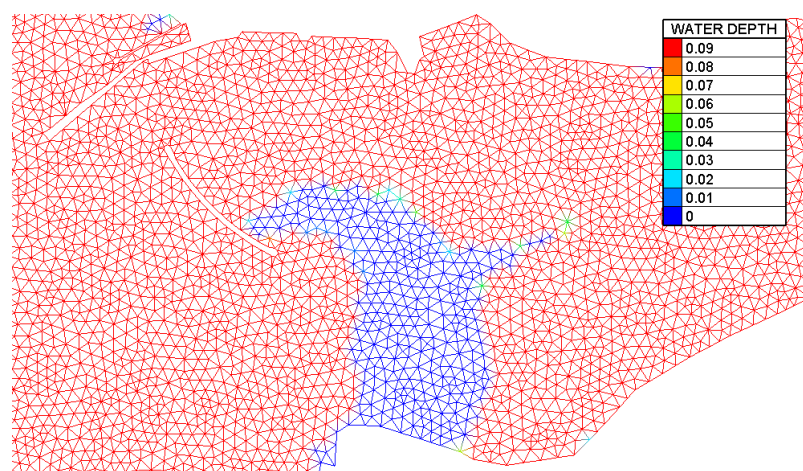


Figura 5.70- Profundidade da água na embocadura para a cheia de 2001 em situação de baixa-mar após a construção dos molhes.

Todos os locais se encontram inundados apesar das cotas serem já baixas. O único local que não se encontra inundado é a Alfândega, como já seria esperado. No entanto, analisando o Quadro 5.12 verifica-se que nos locais mais próximos da embocadura se a superfície livre se encontrasse aproximadamente 2 m abaixo o local já não se encontrava em risco.

Quadro 5.12- Cotas atingidas pela água na cheia de 2001 nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação	Cota Telemac BM	Inundação
Cantareira	1.3	3	4.5	SIM	3.7	SIM
Afurada	2.5	3	4.7	SIM	4.2	SIM
Massarelos	3.5	3	5.4	SIM	4.9	SIM
Alfândega	4.5	8	5.6	NÃO	5.2	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	6.0	SIM	5.6	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	6.2	SIM	5.8	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	7.6	SIM	7.3	SIM
Gramido	12.0	5	8.4	SIM	8.2	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	9.9	SIM	9.7	SIM
Arnelas	17.6	6	10.0	SIM	9.7	SIM
Zebreiros	18.0	5	9.9	SIM	9.8	SIM
Crestuma	20.4	8	10.9	SIM	10.8	SIM

Comparando as cotas da cheia de 2001 antes e após a construção dos molhes verifica-se que após a construção dos molhes as alturas nos mesmos locais são mais elevadas. Isto explica-se com o fortalecimento da restinga que como não permite que ocorram galgamentos cria um obstáculo ao escoamento aumentando as cotas a montante (ver Figura 5.71).

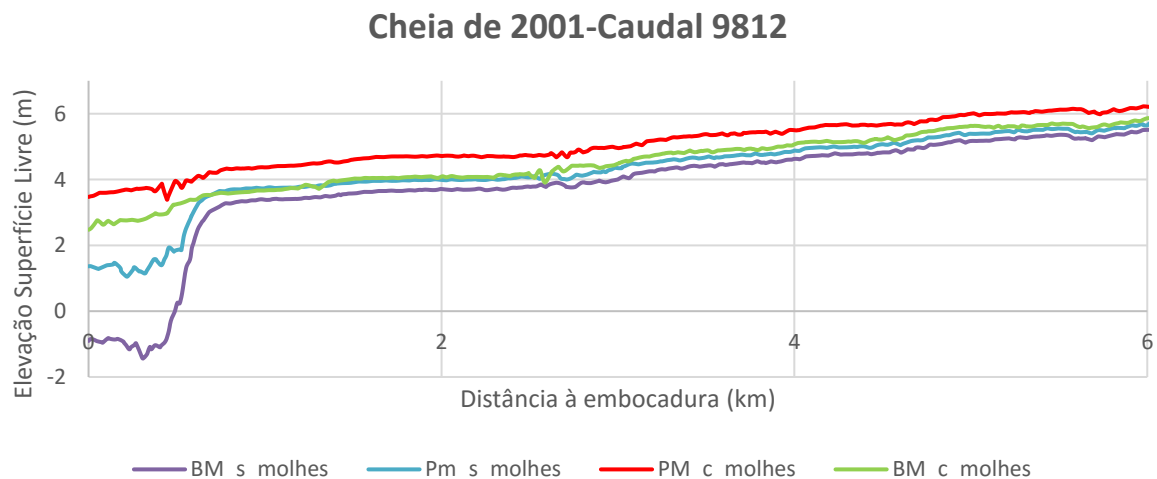


Figura 5.71- Elevação da superfície livre para a cheia de 1996 antes e após a construção dos molhes para a preia-mar.

A elevação da superfície livre após a construção dos molhes é superior à elevação da superfície livre antes da sua construção. Verifica-se que mais a montante, junto à barragem de Crestuma a diferença entre as elevações da superfície livre das duas situações (BM e PM) já não é tão relevante como junto à

embocadura. Isto deve-se ao facto de junto à embocadura a restinga não ser galgada e provocar um aumento na elevação da superfície livre, mas, como o caudal é o mais baixo de todos essa influência não se propaga tanto para montante.

5.2 SIMULAÇÃO DE CHEIAS EXTREMAS

Considerando que o caudal máximo descarregável em Crestuma é de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ foram feitas novas simulações com quatro caudais diferentes impostos em situação de preia-mar e baixa-mar para analisar de uma forma mais completa o limite da influência da maré de acordo com os caudais.

No Quadro 5.13 encontram-se as informações acerca destas simulações.

Quadro 5.13-Simulações para diferentes caudais impostos em situação de preia-mar e baixa-mar

Caudal imposto (m^3/s)	Período simulado	Situação	Nível maré imposto (m)
20000	24 horas	sem quebramar	-1.86 (BM)
		sem quebramar	1.90 (PM)
		com quebramar	-1.86 (BM)
		com quebramar	1.90 (PM)
23000	24 horas	sem quebramar	-1.86 (BM)
		sem quebramar	1.90 (PM)
		com quebramar	1.90 (PM)
		com quebramar	-1.86 (BM)
26000	24 horas	sem quebramar	-1.86 (BM)
		sem quebramar	1.90 (PM)
		com quebramar	-1.86 (BM)
		com quebramar	1.90 (PM)
1000	24 horas	sem quebramar	1.90 (PM)
		sem quebramar	-1.86 (BM)
		com quebramar	1.90 (PM)
		com quebramar	-1.86 (BM)

Os níveis de maré impostos utilizados foram provenientes de previsões para 2016 do Instituto Hidrográfico da preia-mar máxima e da baixa-mar mínima em Leixões.

5.2.1 SIMULAÇÃO PARA O CAUDAL DE $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

Os perfis longitudinais da elevação da superfície livre para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ antes da construção dos molhes encontram-se nas Figuras 5.72, 5.73 e 5.74. Este caudal foi escolhido por representar um período de retorno de 218 anos. A partir do valor de alguns dos caudais de ponta de cheia, dos períodos de retorno associados a esses mesmos caudais (APA, 2012) e da lei de Gumbel recorreu-se a uma extrapolação para conseguir associar ao caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ este período de retorno.

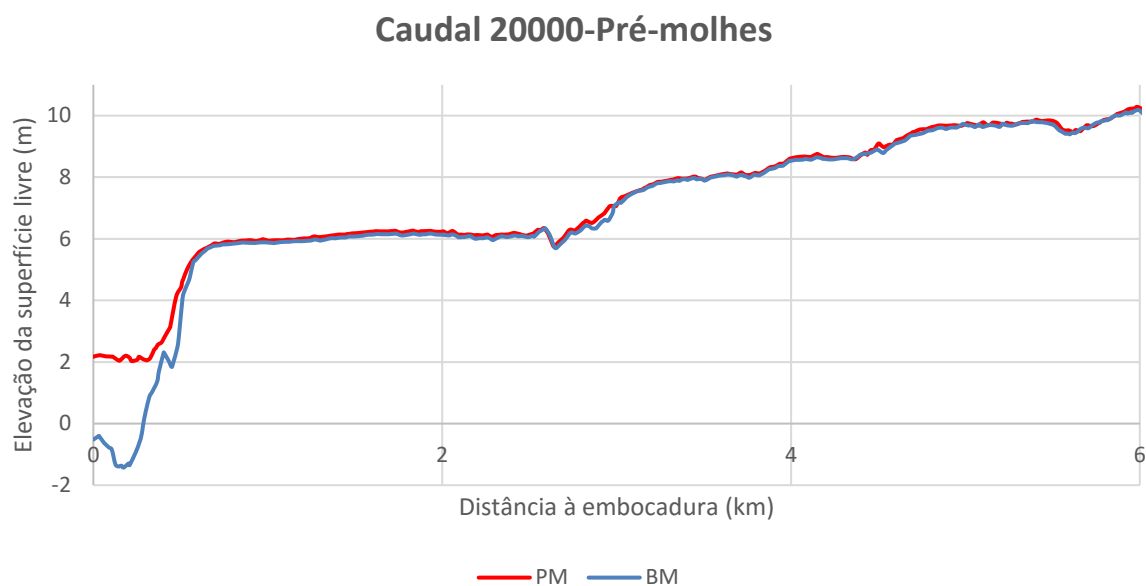


Figura 5.72- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário inferior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

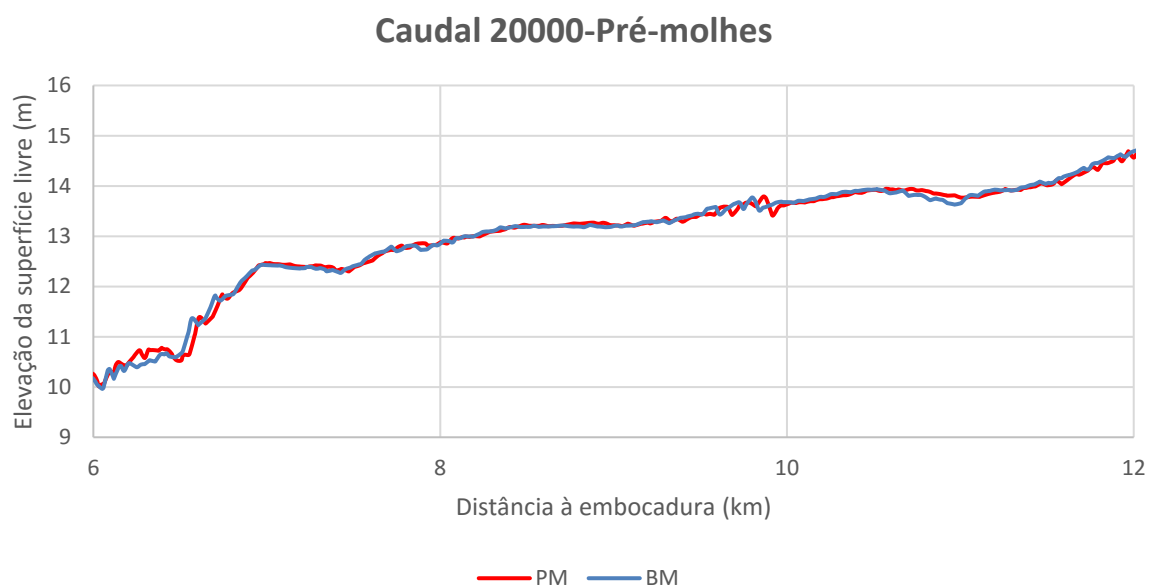


Figura 5.73- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário médio antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

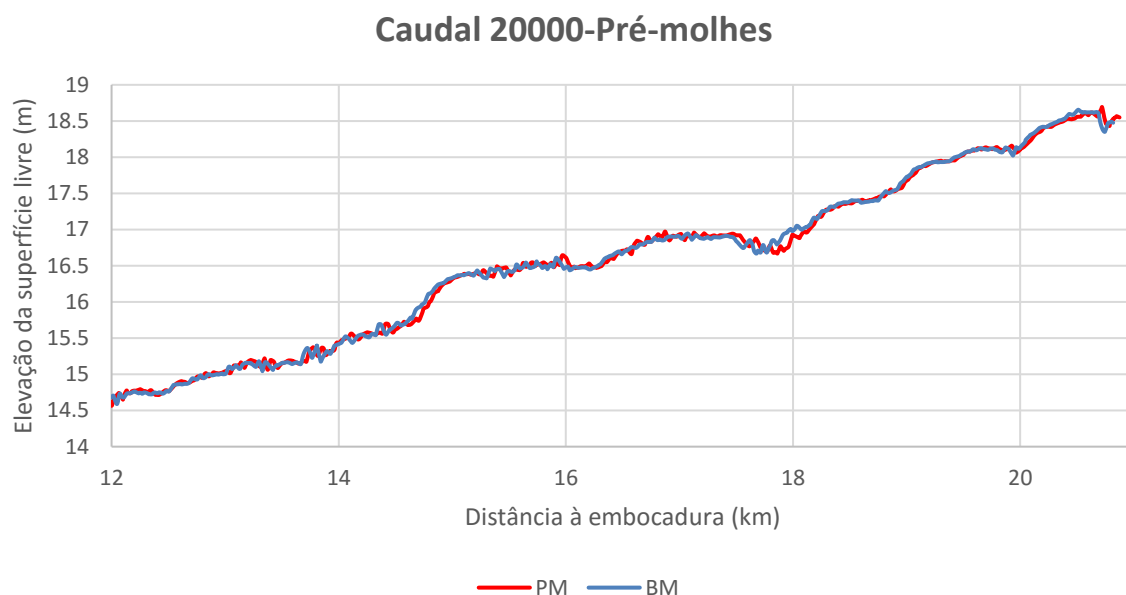


Figura 5.74- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário superior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

Verifica-se que a influência da maré se limita à embocadura do rio pois é apenas aí que se observa a diferença entre a baixa-mar e a preia-mar. A superfície livre encontra-se aproximadamente nos 6 m em ambos os casos e depois desce para os 2 m no caso da preia-mar e para aproximadamente -2 m na baixa-mar. Na restante extensão do estuário não se verificam diferenças muito relevantes entre a preia-mar e a baixa-mar.

Nas Figuras 5.75 e 5.76 encontram-se as elevações da superfície livre junto à embocadura para a preia-mar e a baixa-mar, respetivamente.

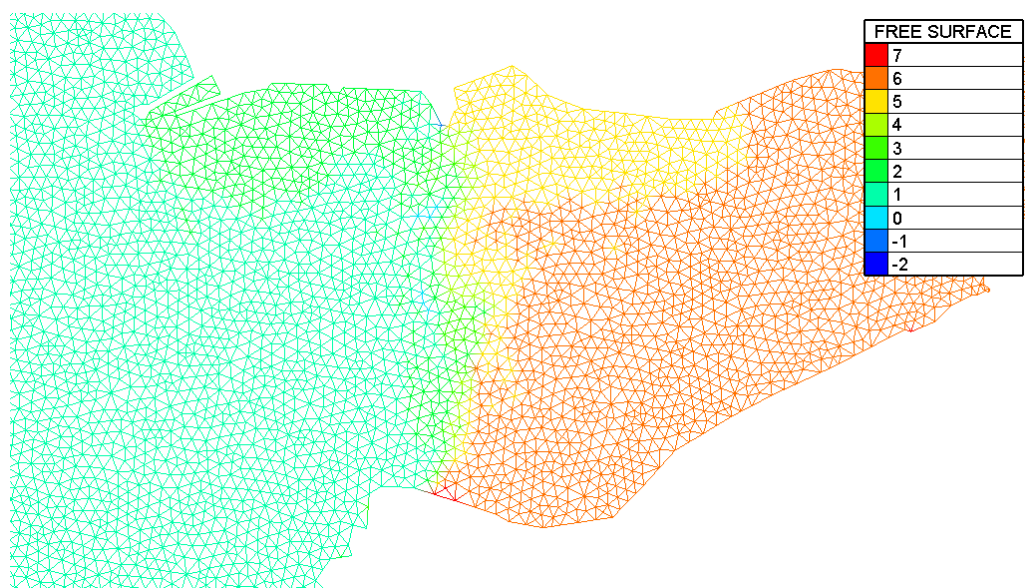


Figura 5.75- Elevação da superfície livre para um caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na preia-mar antes da construção dos molhes, junto à embocadura do rio Douro.

Verifica-se no caso da preia-mar que a elevação da superfície livre passa de 6 m para aproximadamente 2 m. A grande descida da superfície livre ocorre na fronteira entre a cor amarela e a cor verde. Vê-se que até aos molhes junto à margem Norte a elevação da superfície livre se encontra entre os 2 e os 3 m. Na zona a azul mais claro a elevação da superfície livre encontra-se entre 1 m e 2 m, sendo aí que se faz sentir por completo a influência oceânica.

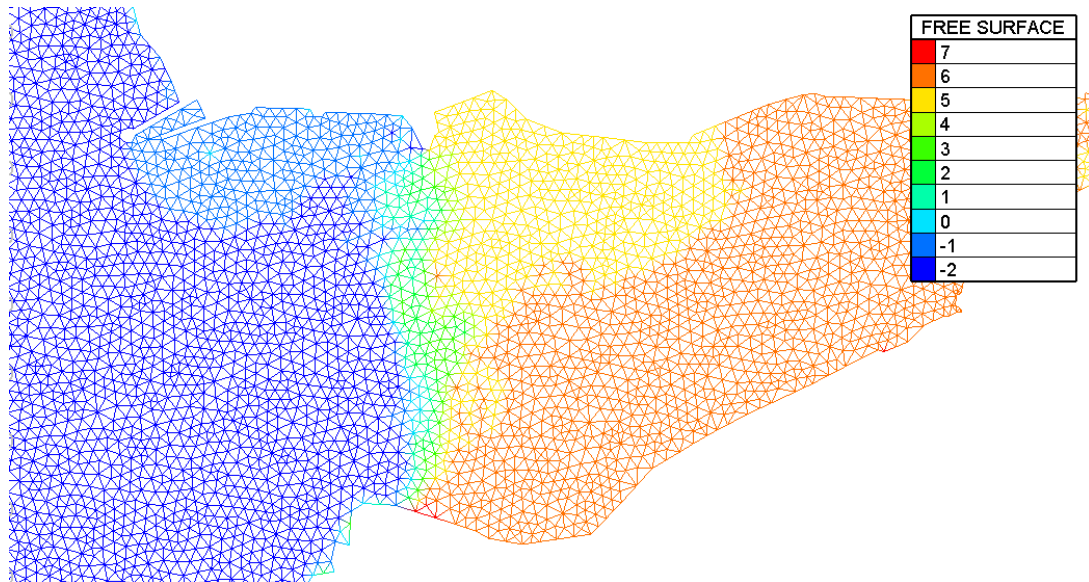


Figura 5.76- Elevação da superfície livre para um caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na baixa-mar antes da construção dos molhes, junto à embocadura do rio Douro.

Verifica-se que mais uma vez a elevação da superfície livre passa de 6 m para aproximadamente -2 m. Junto à margem norte a diminuição da elevação da superfície livre não é tão brusca, existindo uma zona com alturas entre 0 e -2 m.

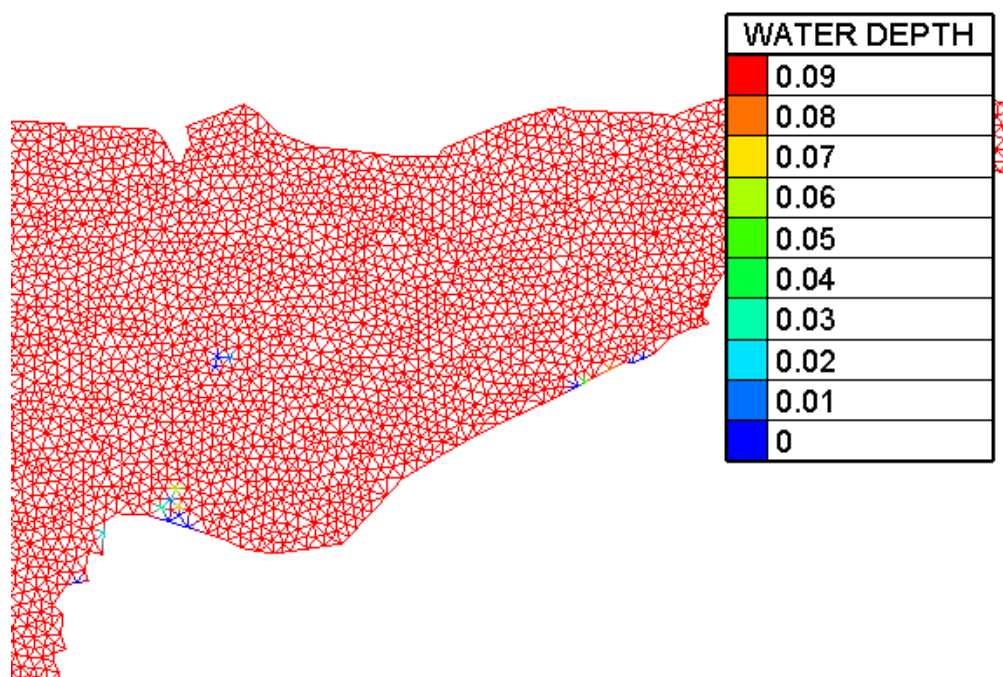


Figura 5.77- Profundidade da água na embocadura para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em situação de preia-mar antes da construção dos molhes.

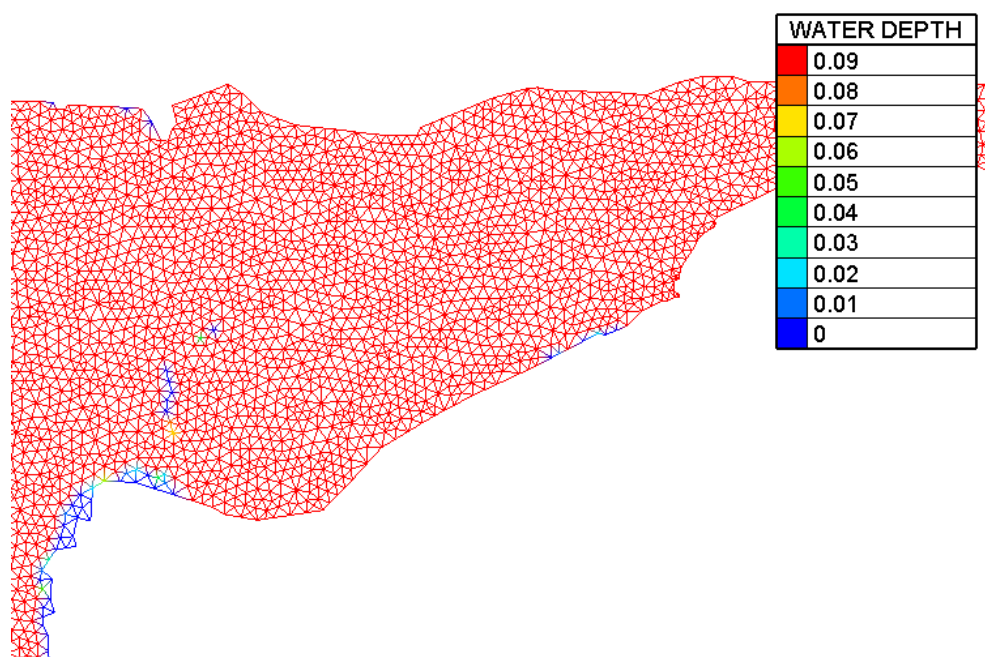


Figura 5.78- Profundidade da água na embocadura para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em situação de baixa-mar antes da construção dos molhes.

Para este caudal a grande parte da restinga encontra-se submersa embora existam ainda alguns pontos emersos como se encontra representado nas Figuras 5.77 e 5.78, para a preia-mar e a baixa-mar, respetivamente.

No Quadro 5.14 encontram-se as cotas atingidas pela água em todos os locais de referência.

Quadro 5.14- Cotas atingidas pela água para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar antes da construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	6.1	SIM	5.9	SIM
Afurada	2.5	3	6.2	SIM	6.1	SIM
Massarelos	3.5	3	7.9	SIM	7.9	SIM
Alfândega	4.5	8	9.1	SIM	8.9	SIM
Cais de Gaia	5.0	4	9.8	SIM	9.7	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	10.2	SIM	10.1	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	13.2	SIM	13.2	SIM
Gramido	12.0	5	14.6	SIM	14.7	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	16.9	SIM	16.9	SIM
Arnelas	17.6	6	16.8	SIM	16.8	SIM
Zebreiros	18.0	5	16.9	SIM	17.0	SIM
Crestuma	20.4	8	18.5	SIM	18.5	SIM

Todos os locais se encontram inundados em ambos os casos. Não se verificam grandes diferenças entre as cotas na baixa-mar e na preia-mar.

Nas Figuras 5.79, 5.80 e 5.81 encontram-se os perfis longitudinais com as elevações da superfície livre do caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, desta vez após a construção dos molhes.

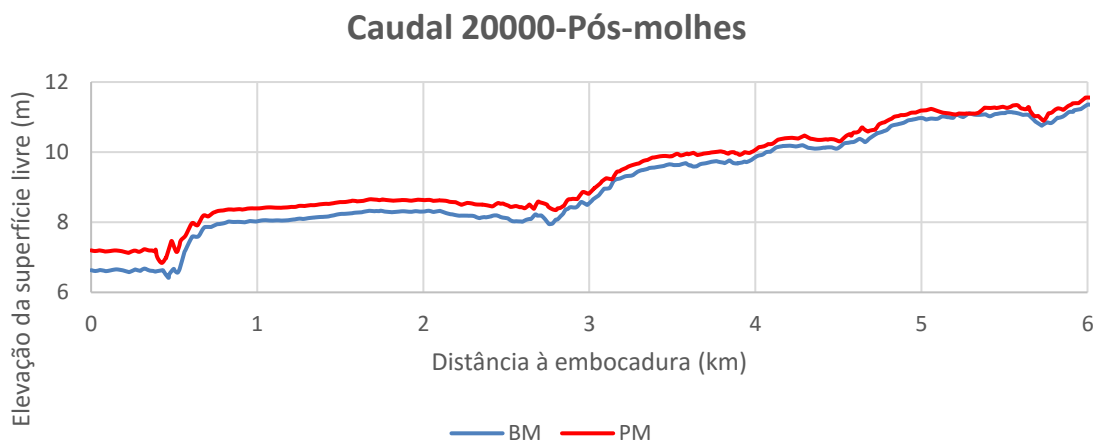


Figura 5.79- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário inferior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

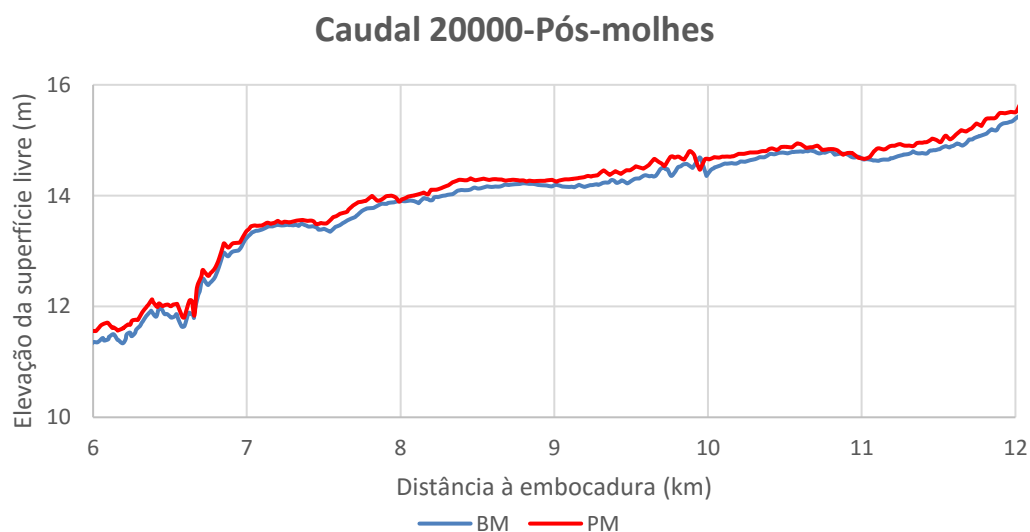


Figura 5.80- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário médio após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

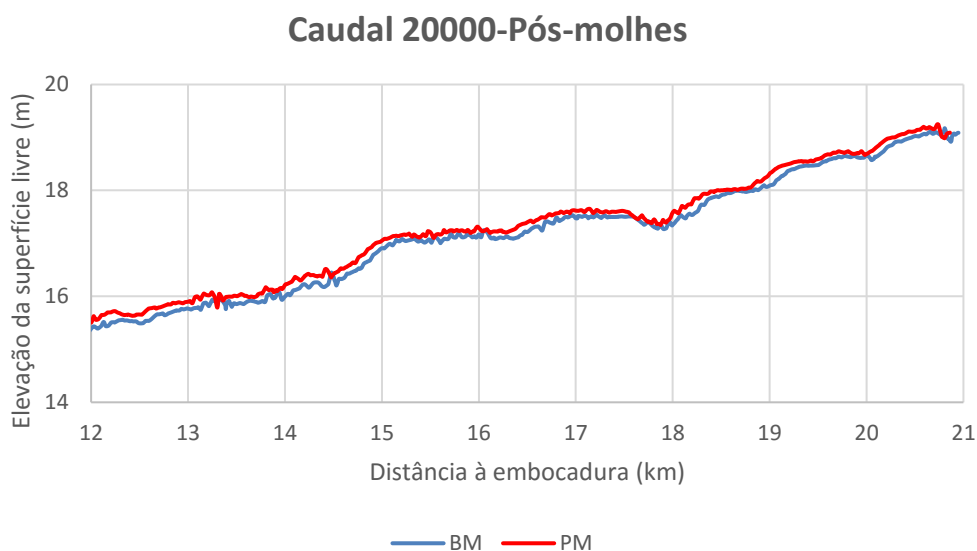


Figura 5.81- Perfil longitudinal da elevação da superfície livre para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário superior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

A influência da maré é mais notória no estuário inferior do que nos estuários médio e superior. No ponto inicial as alturas encontram-se a 6 e 8 m na baixa-mar e na preia-mar respetivamente. Como ainda não existiu nenhuma descida é de esperar que a influência fluvial se propague um pouco mais para jusante. Na Figura 5.82 é representada a elevação da superfície livre no caso da preia-mar de forma a compreender como tal se processa.

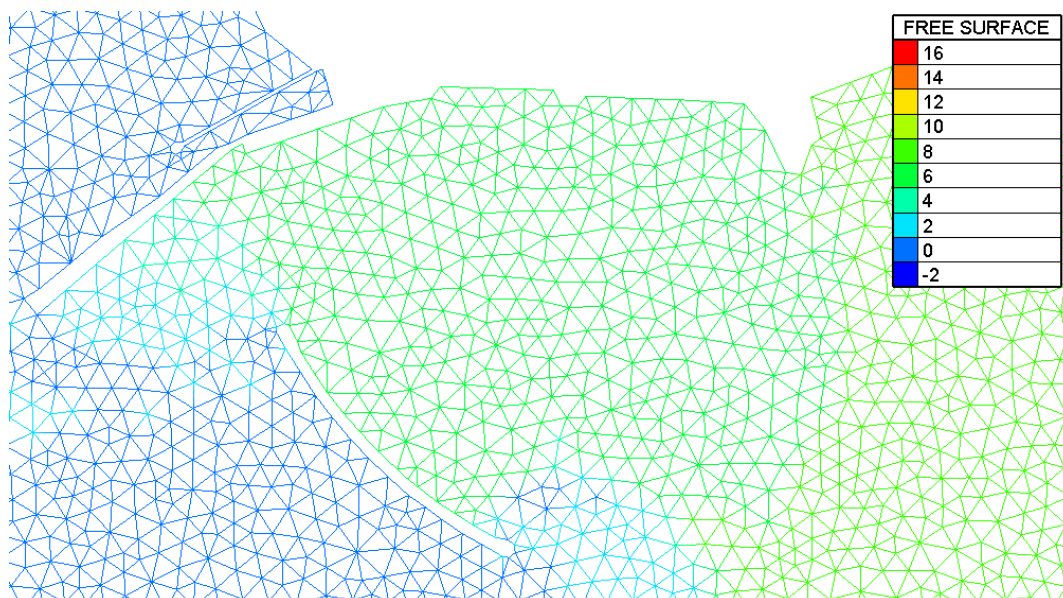


Figura 5.82- Elevação da superfície livre para um caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na preia-mar após a construção dos molhes, junto à embocadura do rio Douro.

A elevação da superfície livre encontra-se aproximadamente nos 7 m e vai descendo até atingir uma elevação entre 1 m e 2 m, onde se faz sentir apenas a influência oceânica.

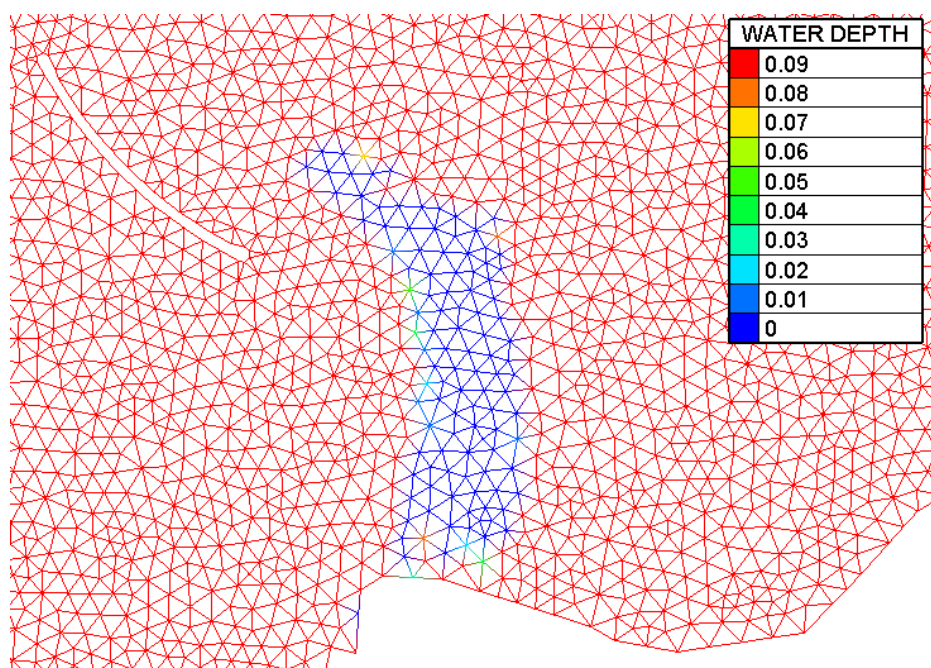


Figura 5.83- Profundidade da água na embocadura para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em situação de preia-mar após a construção dos molhes.

Após a construção dos molhes mesmo com o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a restinga não fica submersa (ver Figura 5.83).

A comparação entre as cotas atingidas na preia-mar e na baixa-mar para a malha após a construção dos molhes encontra-se no Quadro 5.15.

Quadro 5.15- Cotas atingidas pela água para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	8.5	SIM	8.1	SIM
Afurada	2.5	3	8.5	SIM	8.1	SIM
Massarelos	3.5	3	9.9	SIM	9.6	SIM
Alfândega	4.5	8	10.3	SIM	10.1	SIM
Cais de Gaia	5.0	4	11.2	SIM	11.0	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	11.6	SIM	11.4	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	14.3	SIM	14.2	SIM
Gramido	12.0	5	15.5	SIM	15.4	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	17.6	SIM	17.5	SIM
Arnelas	17.6	6	17.5	SIM	17.5	SIM
Zebreiros	18.0	5	17.6	SIM	17.4	SIM
Crestuma	20.4	8	19.0	SIM	19.0	SIM

Verifica-se que todos os locais se encontram inundados e que a elevação da superfície livre junto à barragem de Crestuma atinge valores muito elevados, por volta dos 19 m. Este valor é inferior à cota do coroamento da barragem que está a 25,5 m. Entre a preia-mar e a baixa-mar verifica-se que a diferença de cotas é superior mais a jusante do que a montante.

Na Figura 5.84 encontra-se a comparação entre todas as simulações feitas para o caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de forma a perceber a influência da construção dos molhes.

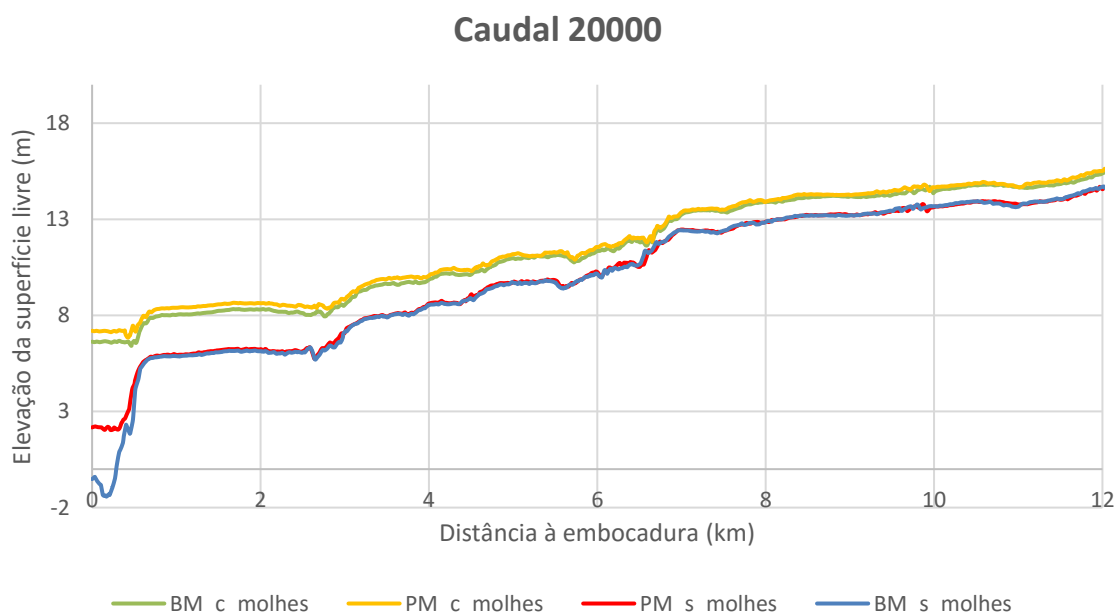


Figura 5.84-Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ antes e após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

Tanto para o caso da preia-mar como da baixa-mar verifica-se que a elevação da superfície livre é sempre superior após a construção dos molhes relativamente ao período anterior à sua construção. Tendo em

conta que a restinga continua a não ser galgada para este caudal isso significa que a altura de água a montante aumenta provocando piores inundações.

5.2.2 SIMULAÇÃO PARA O CAUDAL DE $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

Seguidamente, será feita a análise dos perfis longitudinais para o caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ antes da construção dos molhes para a situação de preia-mar e de baixa-mar (ver Figuras 5.85 a 5.87). Este caudal foi simulado por representar um período de retorno de 585 anos (este período de retorno foi obtido da mesma forma que o da simulação anterior).

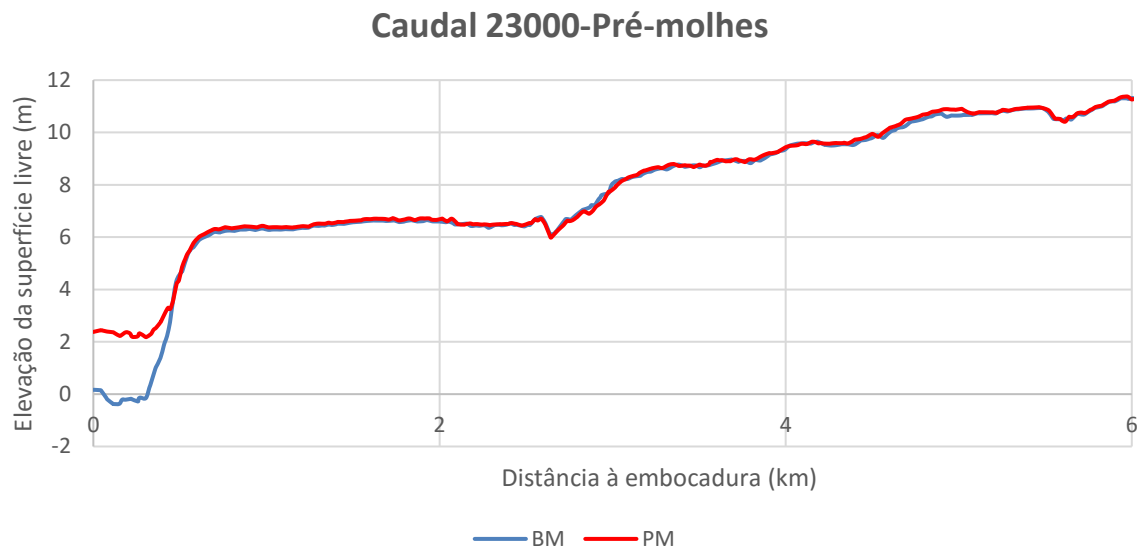


Figura 5.85- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário inferior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

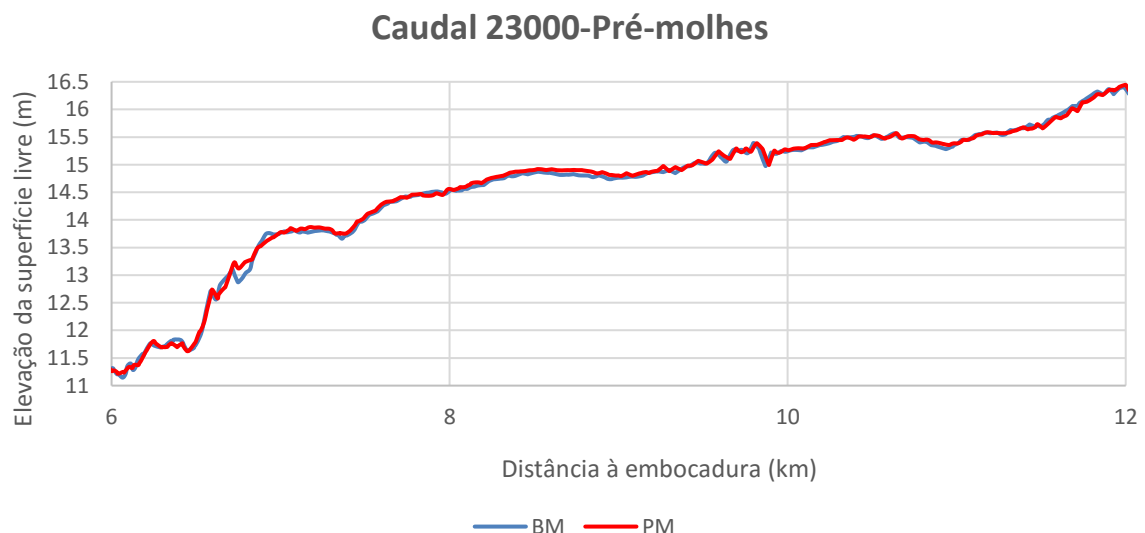


Figura 5.86- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário médio antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

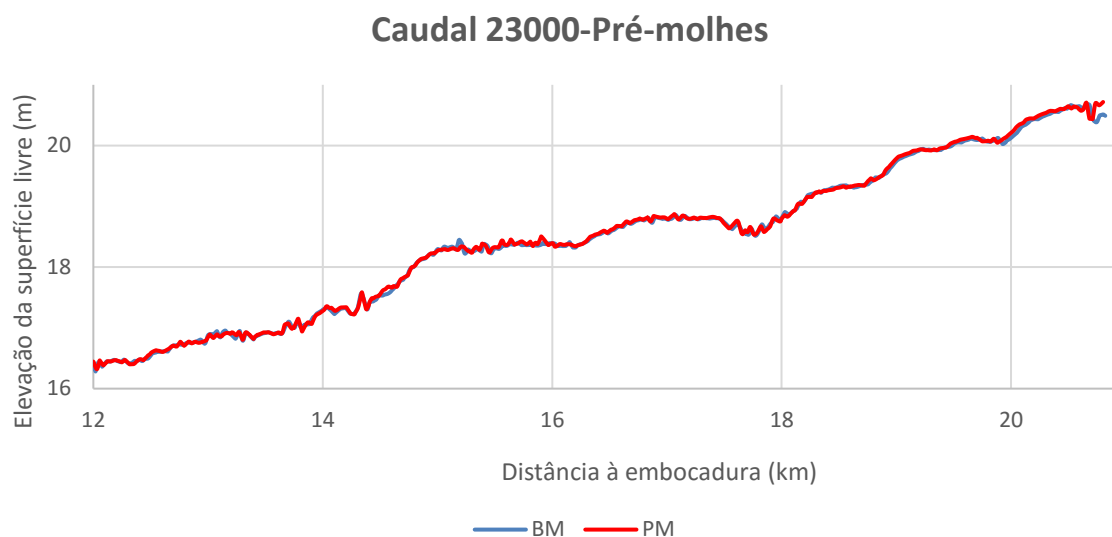


Figura 5.87- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário superior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

Verifica-se que não existem grandes diferenças entre a baixa-mar e a preia-mar exceto na zona da embocadura do rio em que a elevação da superfície livre diminui em ambos os casos, atingindo valores finais diferentes. O estuário à partida comporta-se como um rio para este caudal.

Na Figura 5.88 encontra-se representada a elevação da superfície livre para este caudal e para a preia-mar antes da construção dos molhes. A fronteira amarela separa uma elevação da superfície livre de cerca de 6 m de uma elevação de cerca de 2 m.

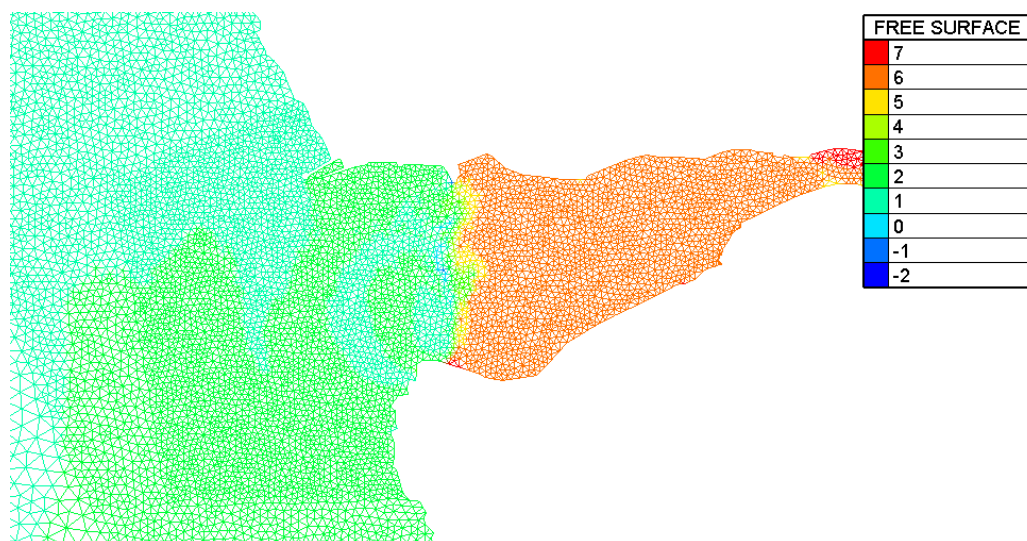


Figura 5.88- Elevação da superfície livre na embocadura para um caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ antes da construção dos molhes, em preia-mar.

Para este caudal toda a restinga é gálgada com exceção de um ponto no seu corpo central e de alguns pontos junto ao seu enraizamento (ver Figura 5.89).

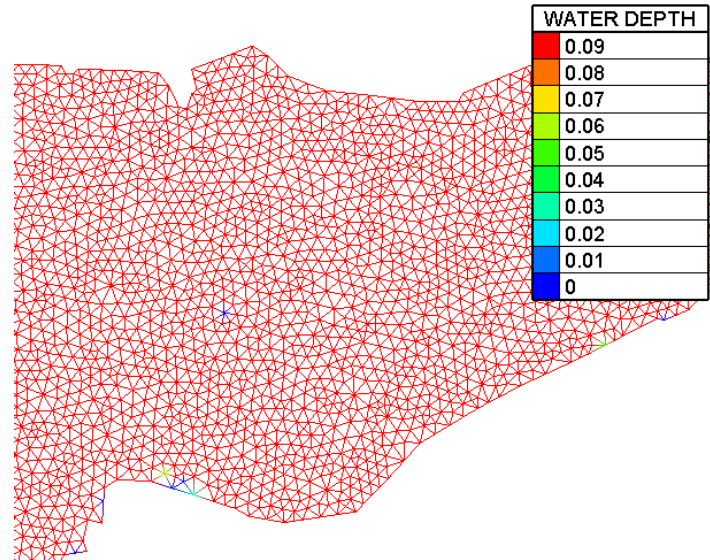


Figura 5.89- Profundidade junto à embocadura para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, em preia-mar e antes da construção dos molhes.

Com recurso ao Quadro 5.16 é possível comparar as cotas atingidas nos mesmos locais para a preia-mar e a baixa-mar. Comprova-se que a diferença entre ambas é muito pequena e que a influência da maré não se faz sentir com muita relevância. A elevação da superfície livre junto à barragem de Crestuma é muito elevada, atingindo aproximadamente os 21 m. Para uma cheia deste tipo todos os locais ficariam inundados.

Quadro 5.16- Cotas atingidas pela superfície livre na preia-mar e na baixa-mar para uma cheia com um caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes da construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	6.5	SIM	6.4	SIM
Afurada	2.5	3	6.5	SIM	6.4	SIM
Massarelos	3.5	3	8.8	SIM	8.7	SIM
Alfândega	4.5	8	9.9	SIM	9.8	SIM
Cais de Gaia	5.0	4	10.9	SIM	10.6	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	11.3	SIM	11.3	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	14.8	SIM	14.8	SIM
Gramido	12.0	5	16.4	SIM	16.4	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	18.8	SIM	18.8	SIM
Arnelas	17.6	6	18.7	SIM	18.7	SIM
Zebreiros	18.0	5	18.8	SIM	18.8	SIM
Crestuma	20.4	8	20.6	SIM	20.6	SIM

Seguidamente irá ser feito o estudo de uma cheia com um caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, em situação de preia-mar e de baixa-mar, desta vez após a construção dos molhes. Os perfis longitudinais com a elevação da superfície livre ao longo do estuário encontram-se nas Figuras 5.90, 5.91 e 5.92.

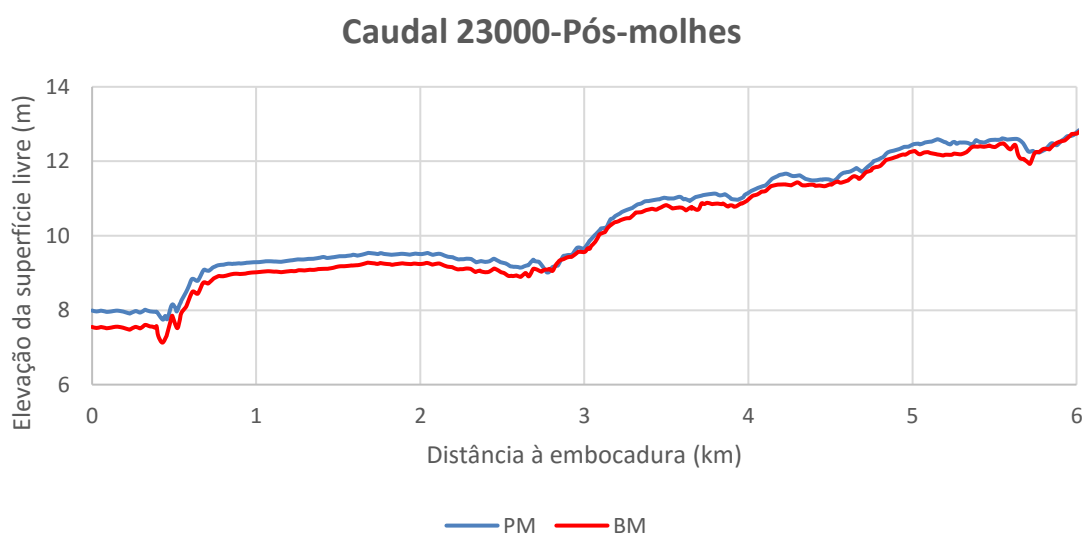


Figura 5.90- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário inferior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

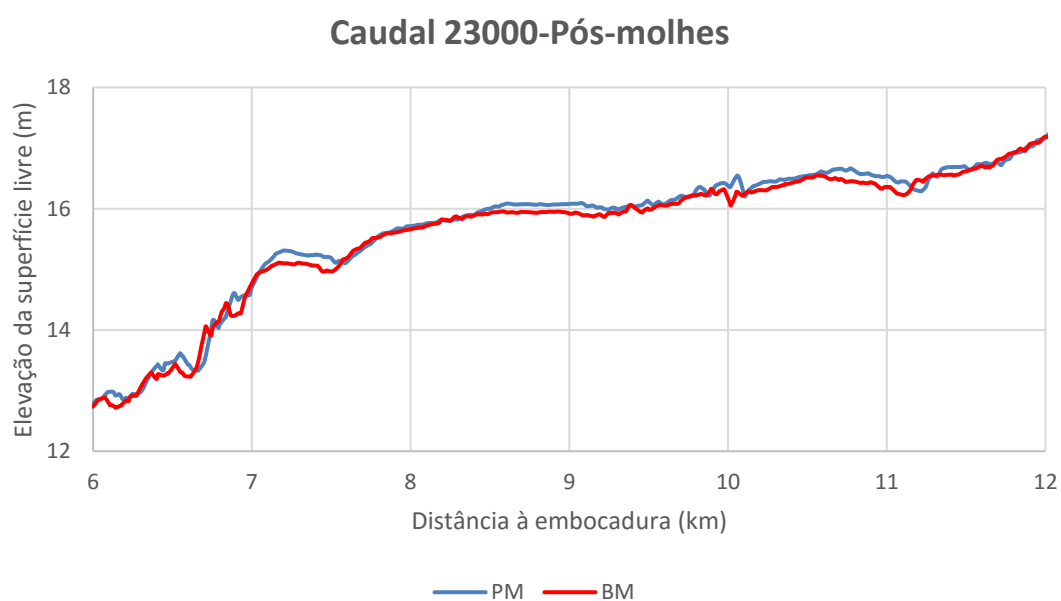


Figura 5.91- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário médio após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

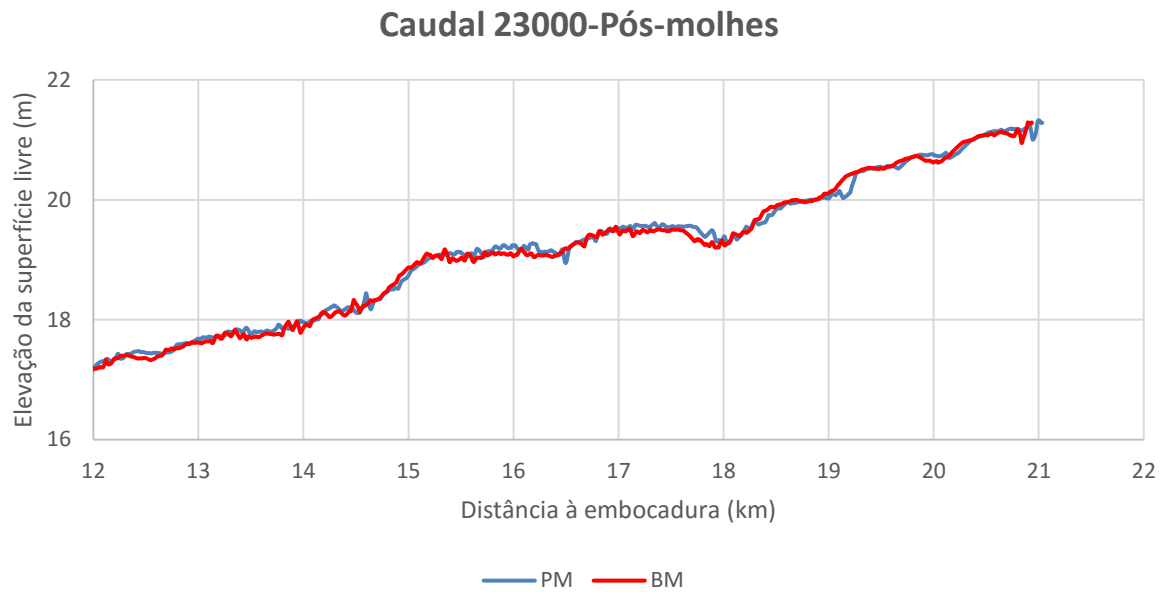


Figura 5.92- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário superior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

Verifica-se que a influência da maré é pequena no estuário inferior e médio. No estuário superior a diferença entre a preia-mar e a baixa-mar não é praticamente perceptível.

Na Figura 5.93 verifica-se que para o caso da preia-mar a elevação da superfície livre se encontra aproximadamente nos 7 m ocorrendo a diminuição para aproximadamente 2 m junto à cabeça do molhe norte.

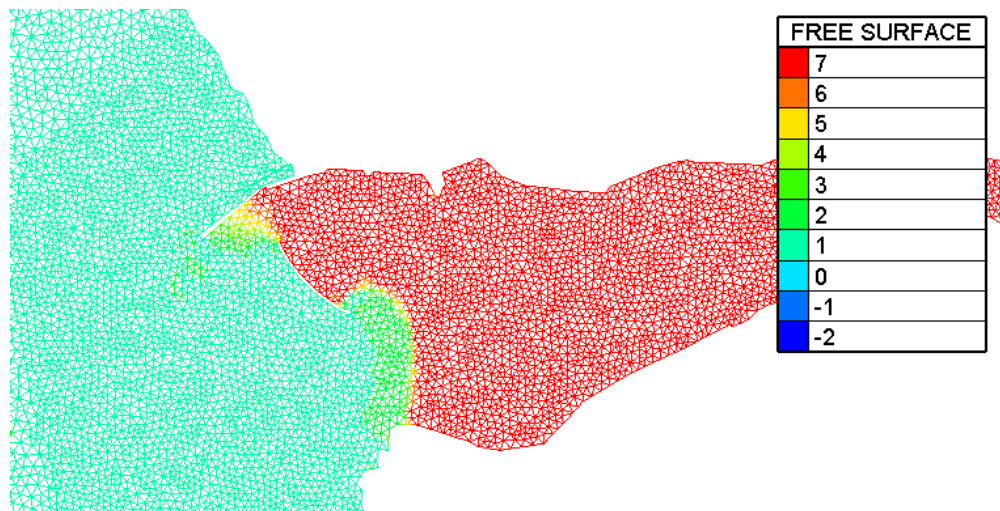


Figura 5.93- Elevação da superfície livre na embocadura para um caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ após a construção dos molhes, em preia-mar.

Mesmo para um caudal elevado como este a restinga não é completamente galgada o que corrobora a afirmação de que o aumento verificado na sua área e volume, pode ser extremamente nefasto em caso de cheia (ver Figura 5.94).

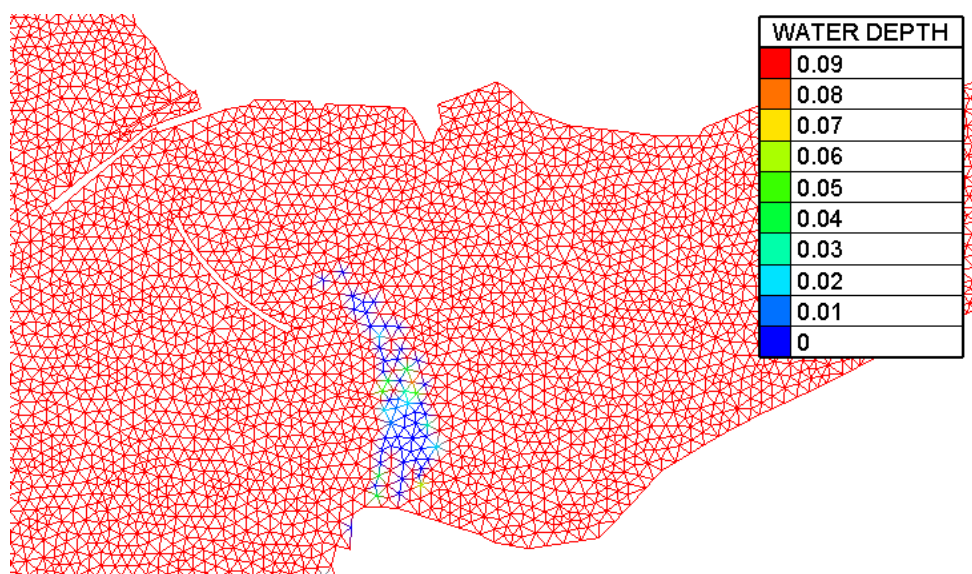


Figura 5.94- Profundidade junto à embocadura para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, em preia-mar e após a construção dos molhes.

Como já foi referido verificam-se algumas diferenças entre a elevação da superfície livre na preia-mar e na baixa-mar. Essas diferenças são maiores nas zonas mais a jusante do estuário (ver Quadro 5.17). Comparando este quadro com o Quadro 5.15 verifica-se que a elevação da superfície livre é superior à da cheia com caudal de $20000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em aproximadamente 2 m, o que é considerável no que toca a estragos. Mais uma vez, todos os locais se encontram inundados.

Quadro 5.17- Cotas atingidas pela água para o caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	9.4	SIM	9.1	SIM
Afurada	2.5	3	9.3	SIM	9.0	SIM
Massarelos	3.5	3	11.0	SIM	10.8	SIM
Alfândega	4.5	8	11.5	SIM	11.4	SIM
Cais de Gaia	5.0	4	12.5	SIM	12.2	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	12.8	SIM	12.7	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	16.0	SIM	15.9	SIM
Gramido	12.0	5	17.1	SIM	17.2	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	19.5	SIM	19.4	SIM
Arnelas	17.6	6	19.6	SIM	19.5	SIM
Zebreiros	18.0	5	19.4	SIM	19.3	SIM
Crestuma	20.4	8	21.0	SIM	21.0	SIM

Na Figura 5.95 encontram-se os perfis longitudinais espaciais da elevação da superfície livre antes e após a construção dos molhes para a preia-mar e a baixa-mar.

Verifica-se que a elevação da superfície livre é sempre superior nos casos após a construção dos molhes, embora essa diferença seja mais notória no estuário inferior e médio.

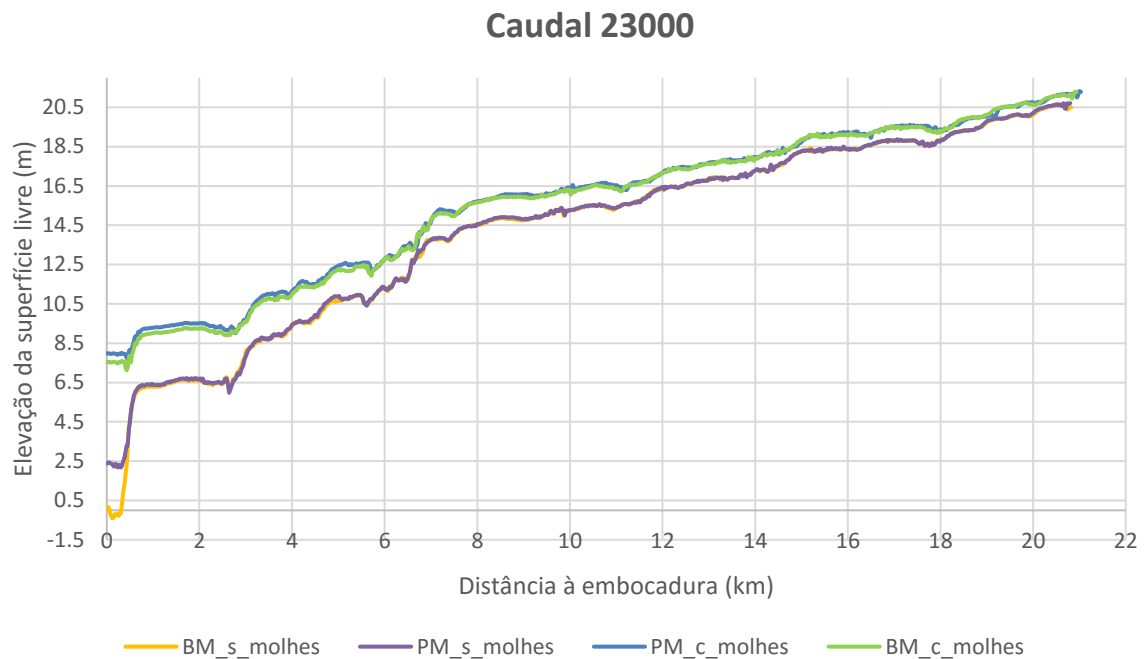


Figura 5.95- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ antes e após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

5.2.3 SIMULAÇÃO PARA O CAUDAL DE $26000 \text{ M}^3\text{s}^{-1}$

Nas Figuras 5.96, 5.97 e 5.98 encontram-se os perfis longitudinais espaciais da baixa-mar e da preia-mar após uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes da construção dos molhes.

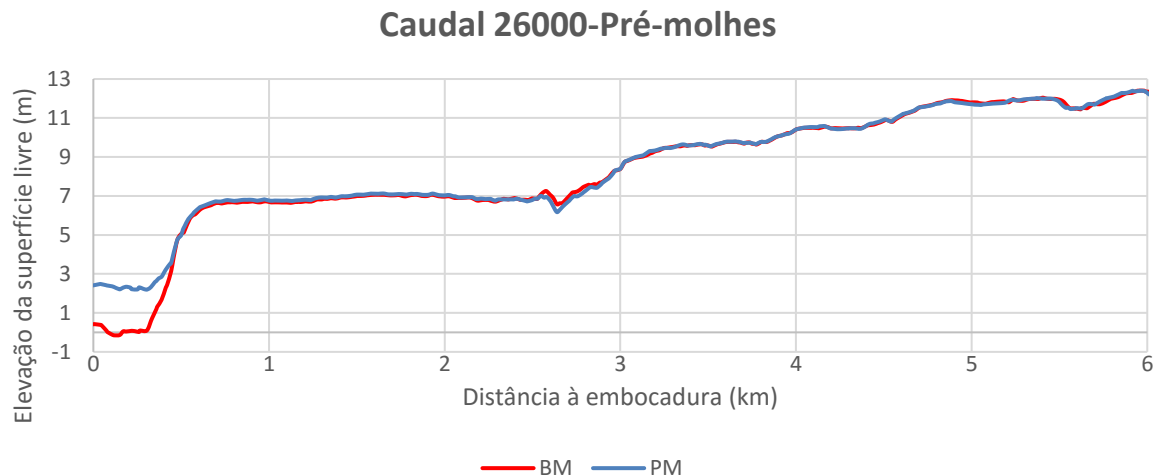


Figura 5.96-Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário inferior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

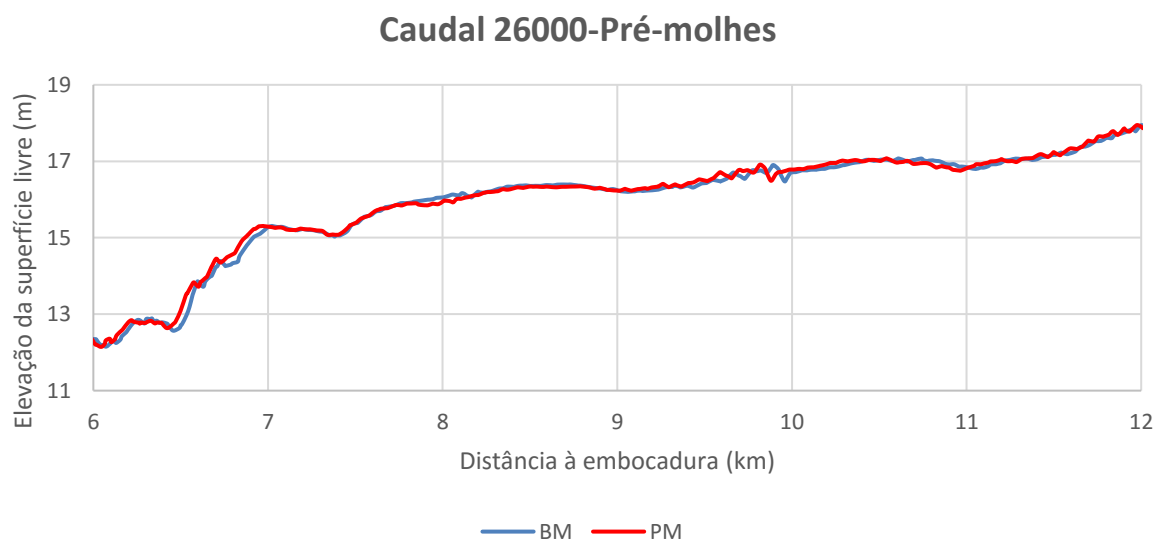


Figura 5.97- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário médio antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

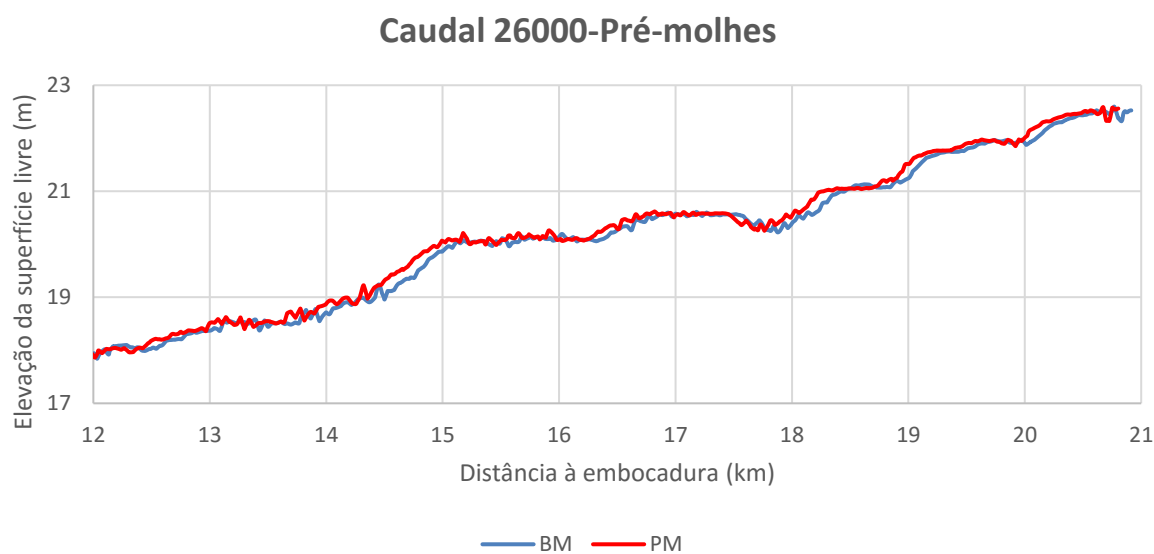


Figura 5.98- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário superior antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

A influência da maré não se faz sentir senão na embocadura pois a diferença entre a preia-mar e a baixa-mar não é relevante.

Verifica-se a diminuição da elevação da superfície livre de cerca de 7 m para 2 m no encontro com o caudal oceânico (ver Figura 5.99).

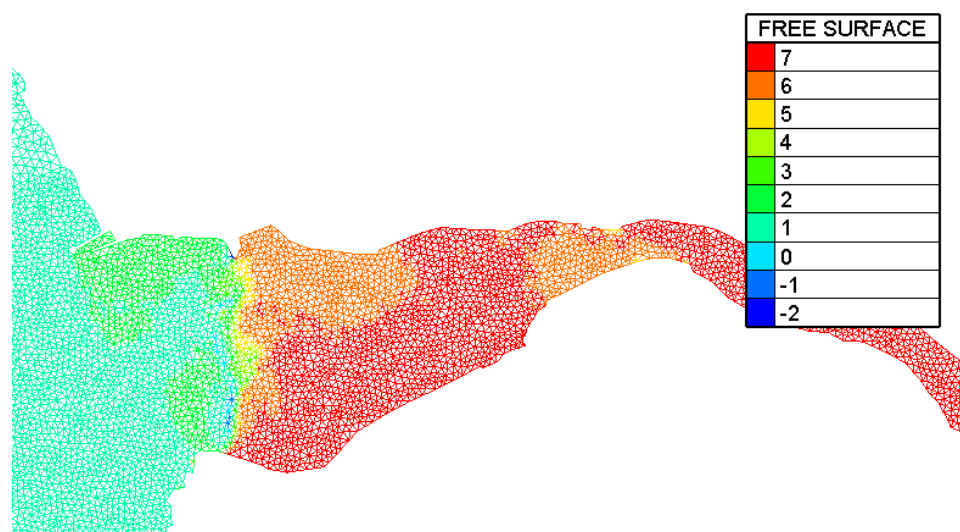


Figura 5.99- Elevação da superfície livre na embocadura para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ antes da construção dos molhes, em preia-mar.

A quase totalidade da restinga é galgada com exceção de alguns pontos (ver Figura 5.100).

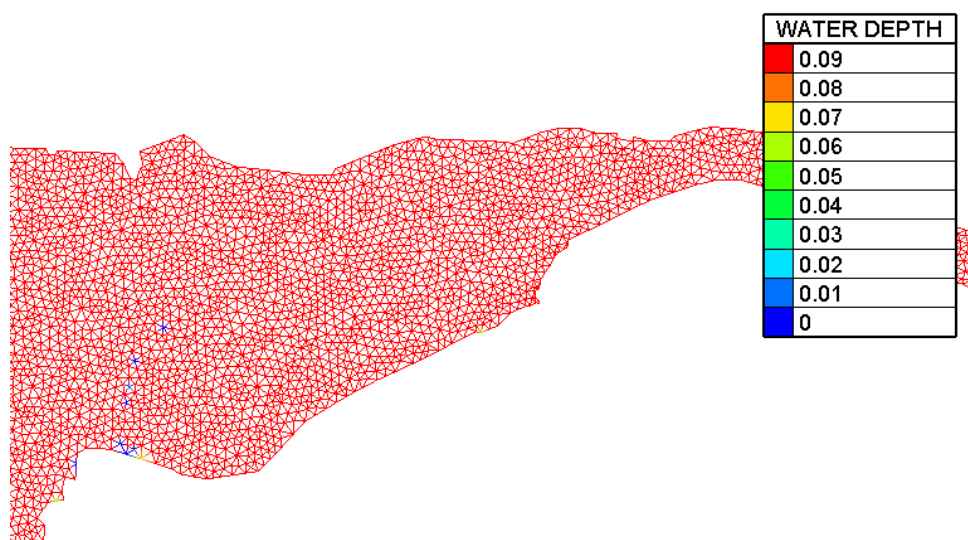


Figura 5.100- Profundidade junto à embocadura para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, em preia-mar e antes da construção dos molhes.

Nesta simulação, de acordo com a magnitude do caudal, a elevação da superfície livre junto à barragem de Crestuma atinge o seu valor máximo quando comparada com todas as simulações feitas com a malha anterior aos molhes. Todos os locais se encontram inundados e mesmo aí, a elevação da superfície livre se revela superior à das restantes simulações antes da construção dos molhes (ver Quadro 5.18).

Quadro 5.18- Cotas atingidas pela superfície livre na preia-mar e na baixa-mar para uma cheia com um caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes da construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	6.9	SIM	6.8	SIM
Afurada	2.5	3	6.8	SIM	6.9	SIM
Massarelos	3.5	3	9.5	SIM	9.5	SIM
Alfândega	4.5	8	10.9	SIM	10.9	SIM
Cais de Gaia	5.0	4	11.7	SIM	11.8	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	12.2	SIM	12.3	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	16.2	SIM	16.2	SIM
Gramido	12.0	5	17.9	SIM	17.9	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	20.5	SIM	20.6	SIM
Arnelas	17.6	6	20.4	SIM	20.5	SIM
Zebreiros	18.0	5	20.5	SIM	20.4	SIM
Crestuma	20.4	8	22.5	SIM	22.4	SIM

Os perfis longitudinais da elevação da superfície livre para uma cheia de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar encontram-se nas Figuras 5.101 a 5.103.

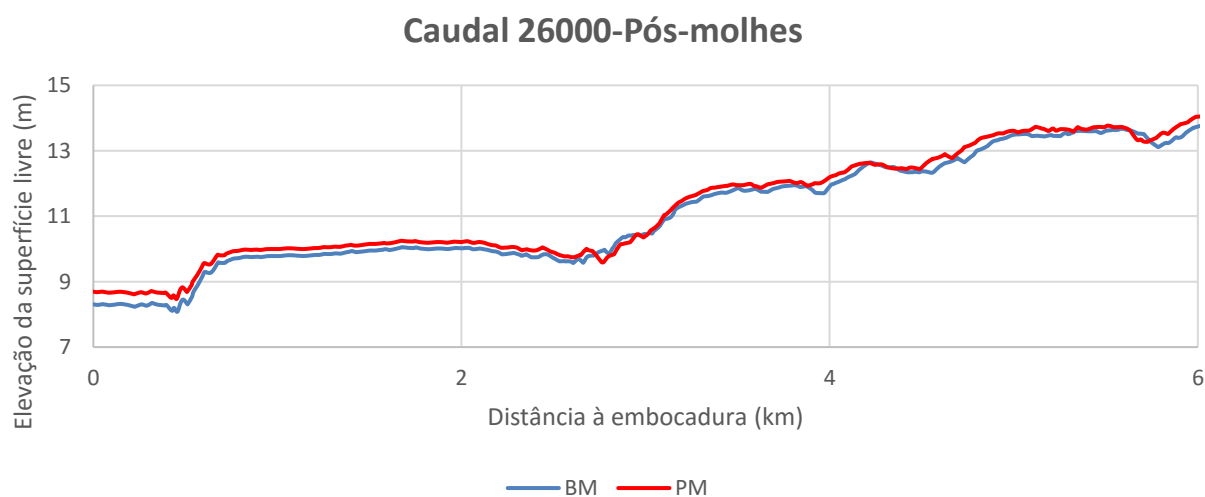


Figura 5.101- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário inferior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

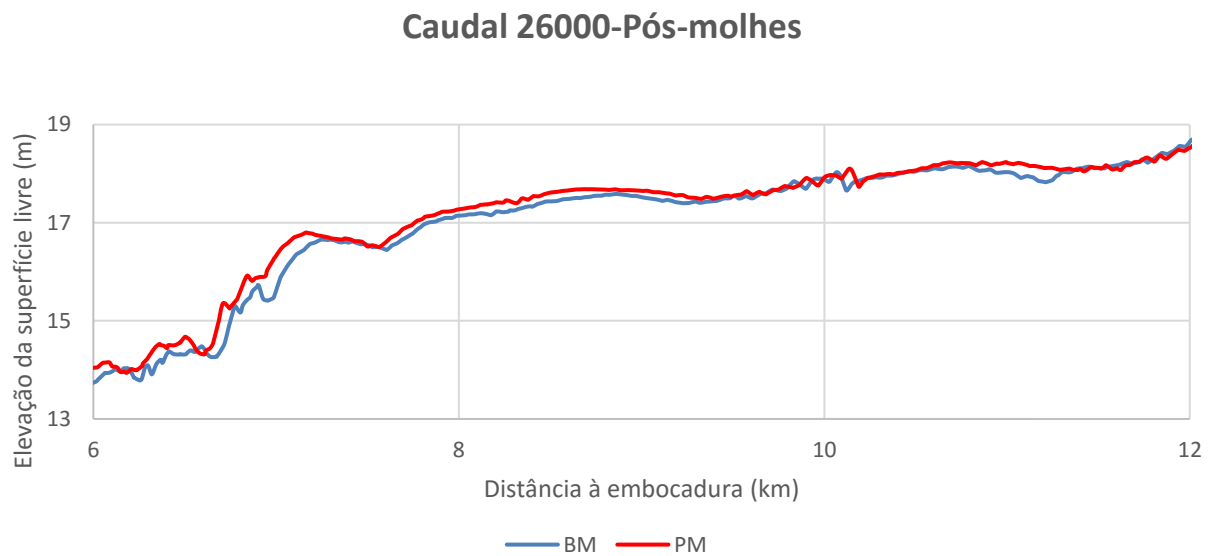


Figura 5.102- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário médio após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

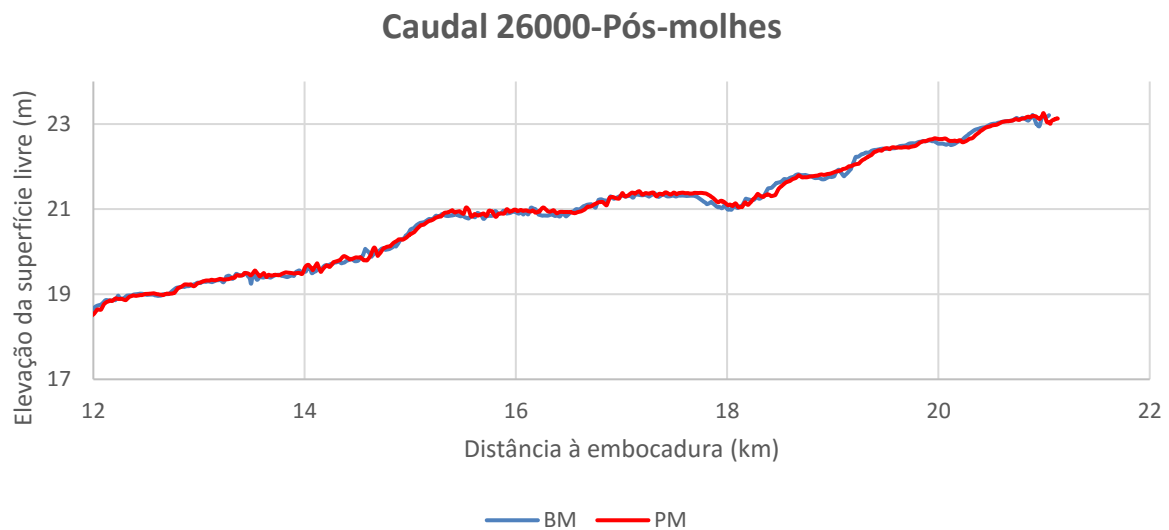


Figura 5.103- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ no estuário superior após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

Para esta cheia verifica-se que a influência da maré se faz sentir até aos 12 km aproximadamente, embora com pouca relevância. No estuário superior não se faz sentir a influência da maré pois as elevações da superfície livre para a preia-mar e para a baixa-mar não apresentam variações muito relevantes entre si. A existência dos molhes permite que o caudal fluvial seja direccionado até mais a jusante (ver Figura 5.104), daí não ocorrer nenhuma descida perto dos 0 km na Figura 5.101.

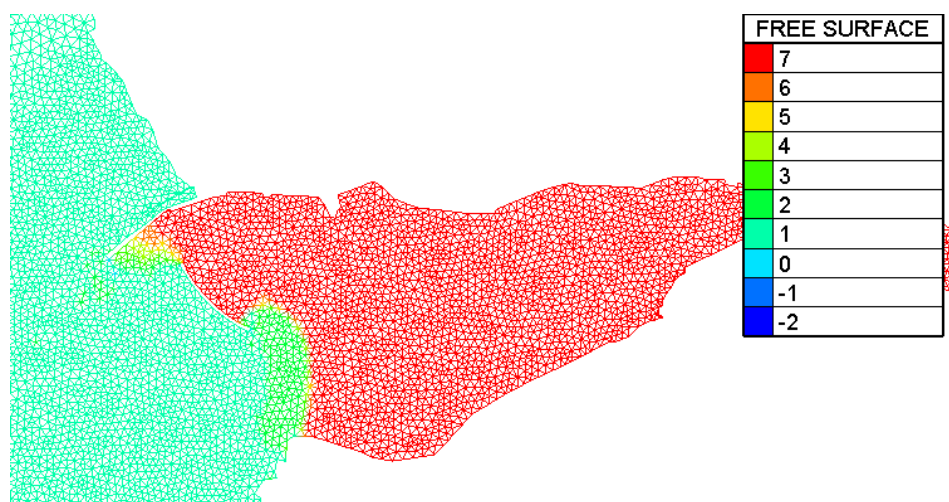


Figura 5.104- Elevação da superfície livre na embocadura para um caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ após a construção dos molhes, em preia-mar.

Foi para este caudal, o caudal máximo de todas as simulações feitas, que se verificou que quase toda a restinga sofre galgamento (ver Figura 5.105).

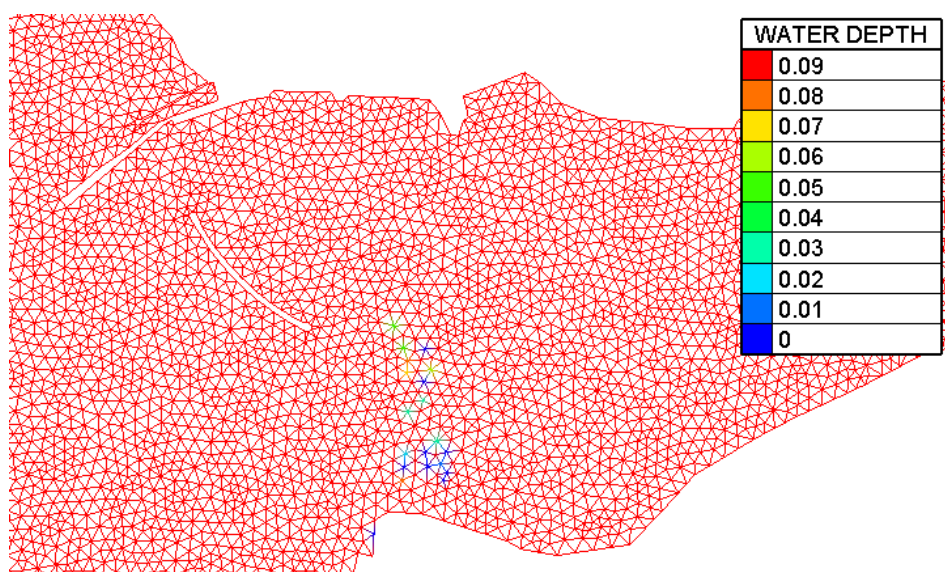


Figura 5.105- Profundidade junto à embocadura para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, em preia-mar e após a construção dos molhes.

No Quadro 5.19 encontram-se expostas as cotas atingidas pela superfície livre em todos os locais, tanto na maré alta como na maré baixa. São os valores mais elevados de todas as simulações, sendo mesmo atingidos os 23 m junto à barragem de Crestuma. Seria, portanto, com estas condições que se verificariam as piores condições a nível de inundações.

Quadro 5.19- Cotas atingidas pela água para o caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	10.1	SIM	9.9	SIM
Afurada	2.5	3	9.9	SIM	9.7	SIM
Massarelos	3.5	3	11.9	SIM	11.9	SIM
Alfândega	4.5	8	12.5	SIM	12.4	SIM
Cais de Gaia	5.0	4	13.6	SIM	13.5	SIM
Cais da Ribeira	6.0	4	14.0	SIM	13.7	SIM
Marina do Freixo	9.0	6	17.6	SIM	17.5	SIM
Gramido	12.0	5	18.5	SIM	18.7	SIM
Aldeia Nova	17.0	8	21.4	SIM	21.3	SIM
Arnelas	17.6	6	21.4	SIM	21.3	SIM
Zebreiros	18.0	5	21.1	SIM	21.0	SIM
Crestuma	20.4	8	22.8	SIM	22.9	SIM

Após analisar a Figura 5.106 verifica-se que a elevação da superfície livre após a construção dos molhes é sempre superior à elevação da superfície livre antes da sua construção. A maior diferença entre a situação anterior à construção e posterior encontra-se nas zonas mais próximas da embocadura e isto deverá estar relacionado com o facto de ser diferente a influência da maré e de existirem menos pontos submersos após a construção dos molhes.

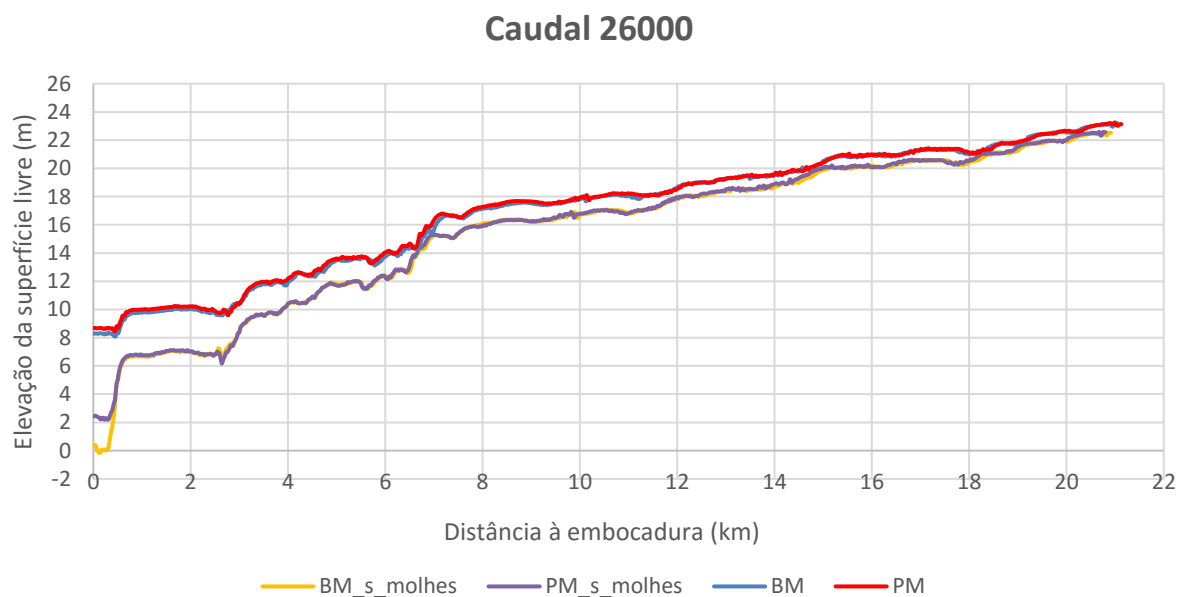


Figura 5.106- Elevação da superfície livre para uma cheia com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ antes e após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

5.2.4 SIMULAÇÃO PARA UM CAUDAL DE $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$

A última simulação feita foi para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ que não representa um caudal de cheia, mas que é um caudal que pode ser facilmente descarregado pela barragem de Crestuma, especialmente nos meses de Inverno. Desta forma será possível comparar a diferença na influência da maré para um caudal deste tipo.

Na Figura 5.107 encontra-se o perfil longitudinal espacial da elevação da superfície livre para uma situação de preia-mar e baixa-mar, antes da construção dos molhes.

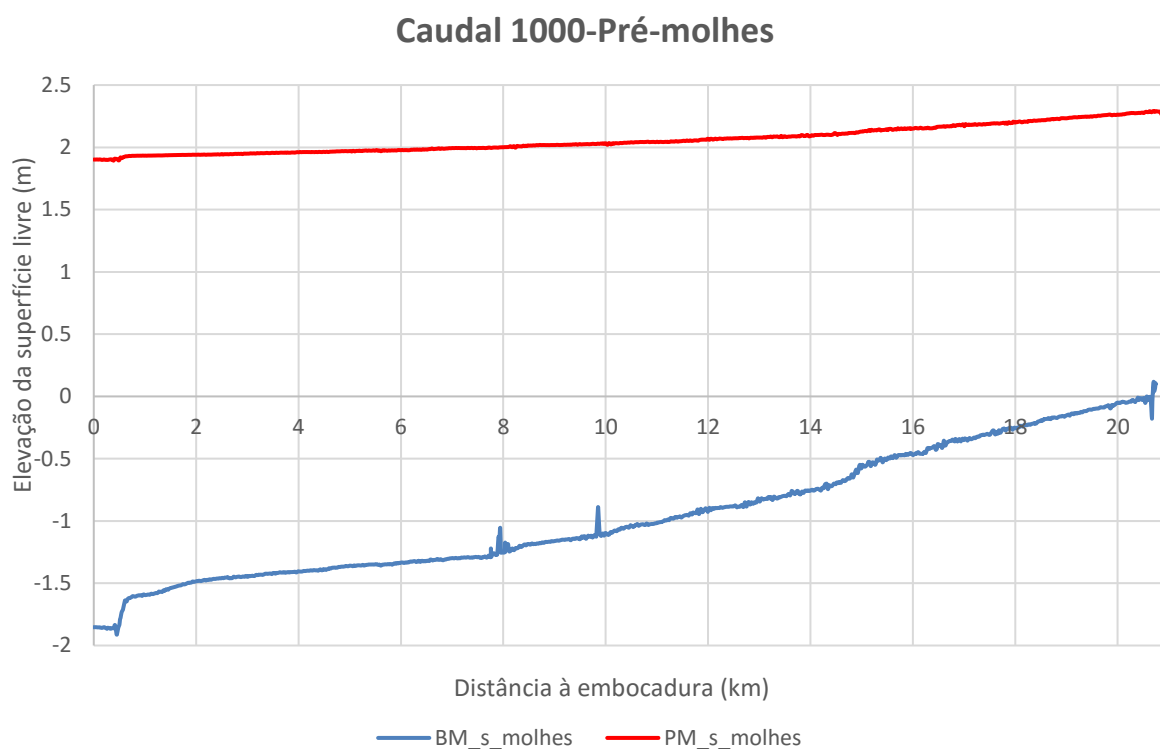


Figura 5.107- Perfil longitudinal espacial da elevação da superfície livre antes da construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

A diferença entre a preia-mar e a baixa-mar é extremamente grande o que dá a entender que a influência da maré se faz sentir ao longo de todo o estuário.

Na Figura 5.108 encontra-se a elevação da superfície para a preia-mar, antes da construção dos molhes.



Figura 5.108- Elevação da superfície livre no estuário na preia-mar para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Verifica-se que a elevação da superfície livre é praticamente constante ao longo de todo o estuário, encontrando-se sempre aproximadamente nos 2 m. A elevação provocada pela descarga do caudal não é muito elevada, visto o caudal ser já pequeno, comparativamente com outros caudais simulados. No caso da baixa-mar verifica-se que o aumento da elevação da superfície livre ocorre no sentido de montante no estuário, parecendo que a influência da maré se faz sentir com maior intensidade junto à embocadura, pois a partir da ponte da Arrábida a elevação da superfície livre começa a diminuir atingindo os 0 m perto da barragem (ver Figura 5.109).

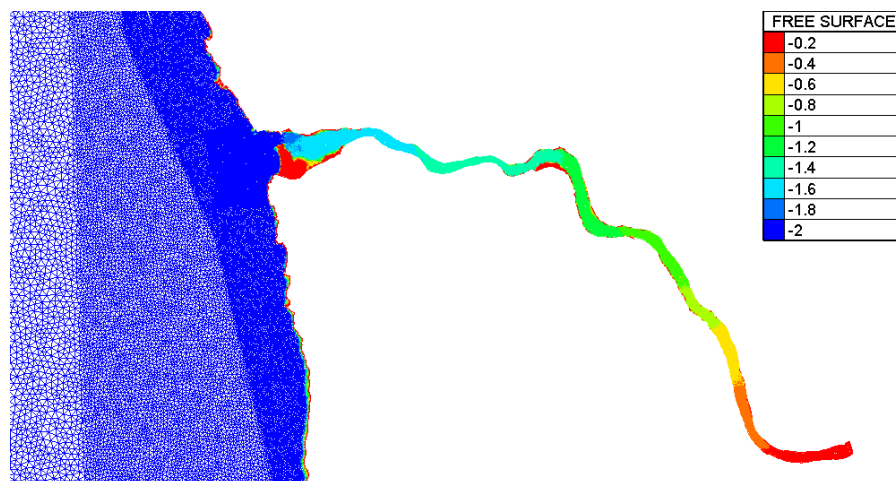


Figura 5.109-Elevação da superfície livre no caso da baixa-mar antes da construção dos molhes.

Em nenhum dos casos a restinga fica submersa, embora na preia-mar fiquem mais locais imersos, como é o caso da Baía de São Paio, o que seria de esperar (ver Figuras 5.110 e 5.111).

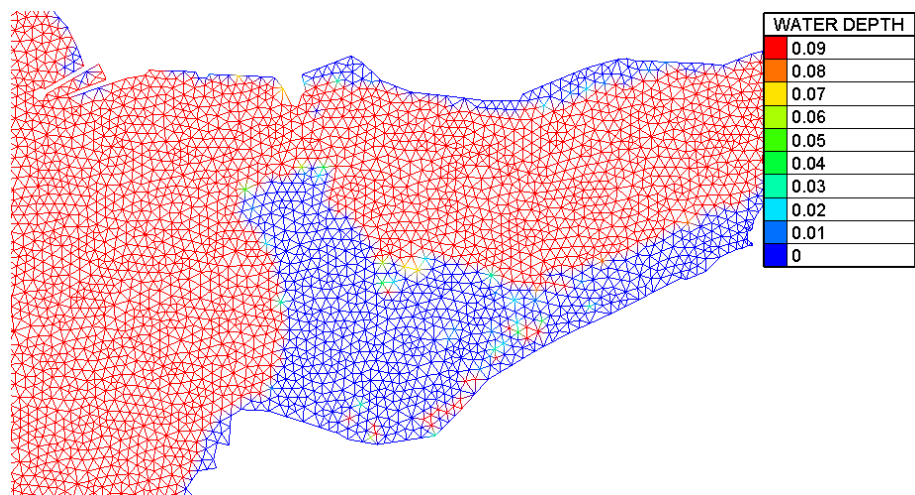


Figura 5.110- Profundidade na zona da restinga em baixa-mar, antes da construção dos molhes.

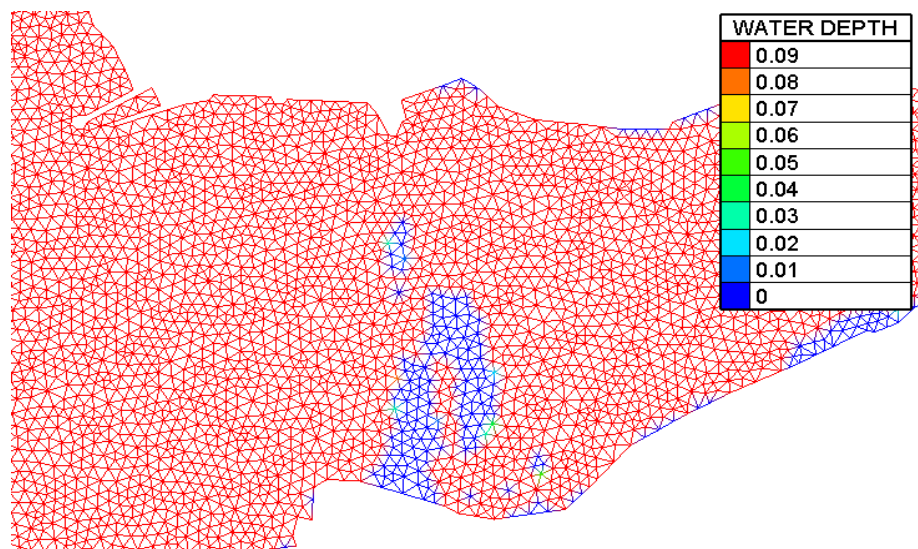


Figura 5.111- Profundidade na zona da restinga em preia-mar, antes da construção dos molhes.

Quadro 5.20- Cotas atingidas pela superfície livre na preia-mar e na baixa-mar para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes da construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	1.93	NÃO	-1.57	NÃO
Afurada	2.5	3	1.95	NÃO	-1.46	NÃO
Massarelos	3.5	3	1.96	NÃO	-1.42	NÃO
Alfândega	4.5	8	1.96	NÃO	-1.39	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	1.97	NÃO	-1.36	NÃO
Cais da Ribeira	6.0	4	1.98	NÃO	-1.33	NÃO
Marina do Freixo	9.0	6	2.02	NÃO	-1.16	NÃO
Gramido	12.0	5	2.07	NÃO	-0.92	NÃO
Aldeia Nova	17.0	8	2.17	NÃO	-0.35	NÃO
Arnelas	17.6	6	2.19	NÃO	-0.3	NÃO
Zebreiros	18.0	5	2.20	NÃO	-0.05	NÃO
Crestuma	20.4	8	2.28	NÃO	-0.01	NÃO

Uma análise mais atenta ao Quadro 5.20 demonstra que para um caudal deste tipo não ocorre nenhuma inundação, não havendo qualquer estrago. O quadro serve também para comparar a preia-mar com a baixa-mar e verifica-se que as cotas atingidas pela superfície livre não se encontram relacionadas em ambos os casos.

Por fim, na Figura 5.112 encontra-se o perfil longitudinal espacial da elevação da superfície livre para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ após a construção dos molhes, na preia-mar e na baixa-mar.

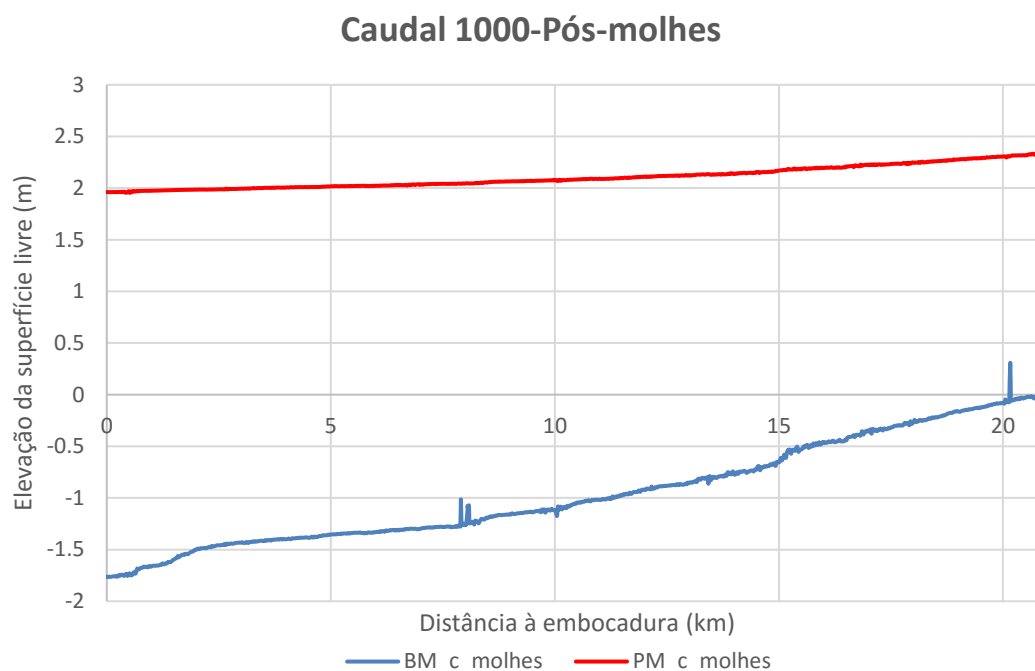


Figura 5.112- Perfil longitudinal espacial da elevação da superfície livre após a construção dos molhes, em preia-mar e baixa-mar.

As diferenças entre a preia-mar e a baixa-mar são muito grandes, o que indica que a influência da maré se fará sentir com alguma intensidade. O aumento da elevação da superfície livre na baixa-mar revelou-se bastante superior ao aumento da elevação na preia-mar, passando de cerca de -1,8 m na embocadura para cerca de 0 m junto à barragem de Crestuma (situação muito semelhante à observada na situação pré-molhes).

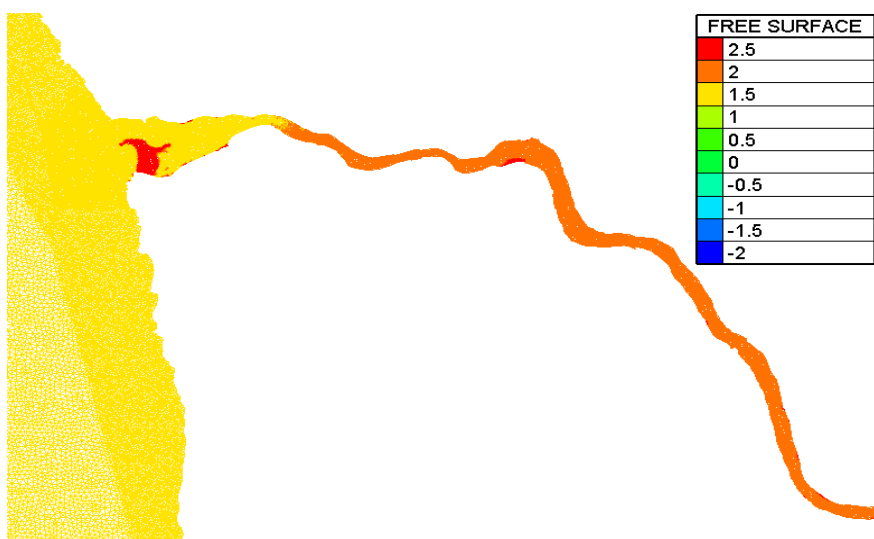


Figura 5.113- Elevação da superfície livre no estuário após a construção dos molhes, na preia-mar para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Em todo o estuário a elevação da superfície livre para a preia-mar ronda os 2 m, aumentando apenas junto à barragem de Crestuma (ver Figura 5.113).

No caso da baixa-mar (ver Figura 5.114) verifica-se que a influência da maré não se faz sentir até tão a montante pois as diferenças entre a elevação da superfície livre são maiores ao longo do estuário, do que no caso da preia-mar.

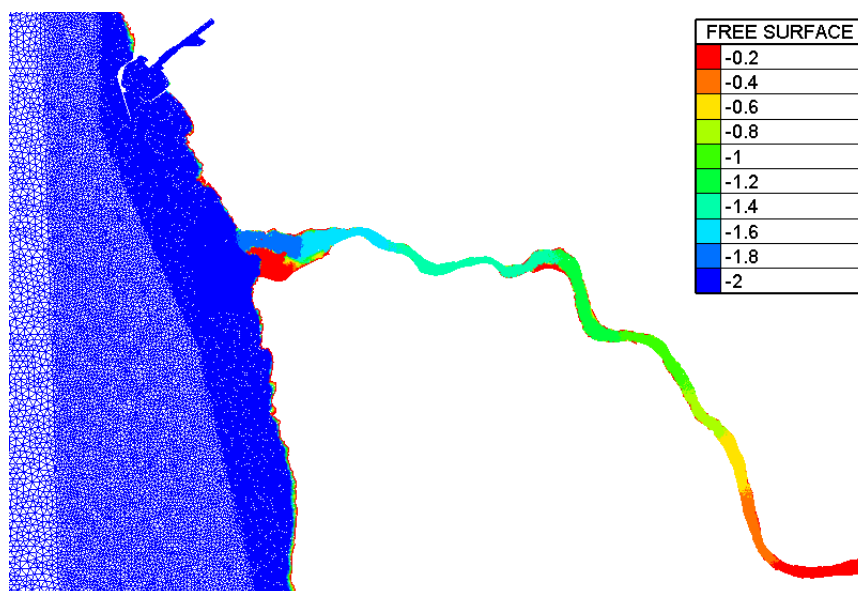


Figura 5.114- Elevação da superfície livre no estuário após a construção dos molhes, na baixa-mar para um caudal de 1000 m³s⁻¹.

Mais uma vez se verifica que a restinga não é galgada para este caudal, tanto na preia-mar como na baixa-mar, além de na baixa-mar ainda ficarem mais alguns pontos emersos (ver Figuras 5.115 e 5.116).

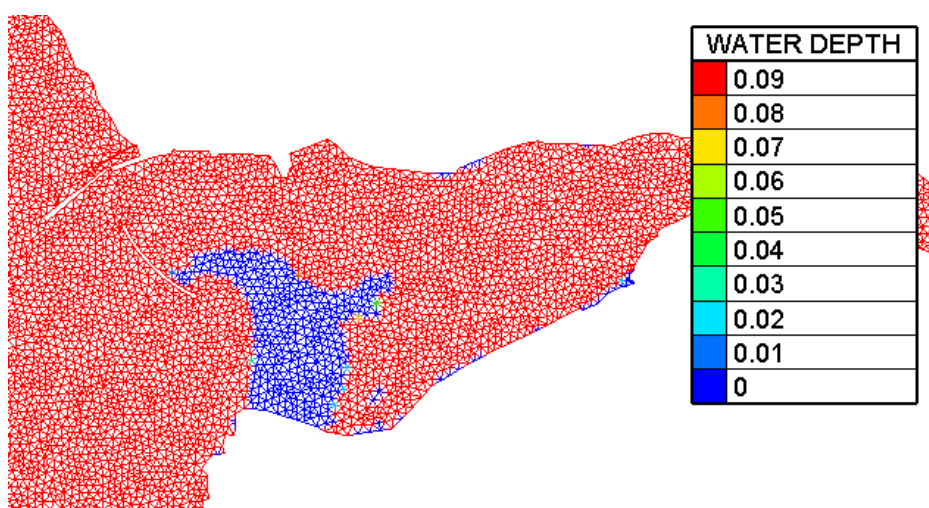


Figura 5.115- Profundidade na zona da restinga em preia-mar, após a construção dos molhes.

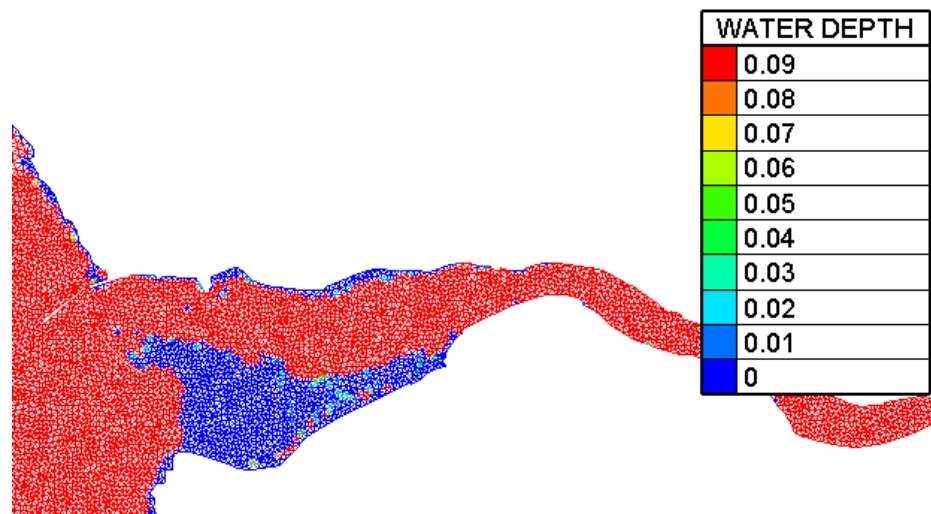


Figura 5.116- Profundidade na zona da restinga em baixa-mar, após a construção dos molhes.

No Quadro 5.21 verifica-se que nenhum dos pontos de referência fica inundado para uma descarga de um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, antes pelo contrário, no caso da preia-mar ainda existem zonas entremarés que ficam emersas.

Quadro 5.21- Cotas atingidas pela água para o caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas simulações da preia-mar e baixa-mar após a construção dos molhes.

Local	Distância à embocadura (km)	Cota (NMA)	Cota Telemac PM	Inundação PM	Cota Telemac BM	Inundação BM
Cantareira	1.3	3	1.98	NÃO	-1.63	NÃO
Afurada	2.5	3	1.99	NÃO	-1.46	NÃO
Massarelos	3.5	3	2.01	NÃO	-1.42	NÃO
Alfândega	4.5	8	2.01	NÃO	-1.38	NÃO
Cais de Gaia	5.0	4	2.02	NÃO	-1.35	NÃO
Cais da Ribeira	6.0	4	2.02	NÃO	-1.33	NÃO
Marina do Freixo	9.0	6	2.06	NÃO	-1.16	NÃO
Gramido	12.0	5	2.11	NÃO	-0.92	NÃO
Aldeia Nova	17.0	8	2.22	NÃO	-0.36	NÃO
Arnelas	17.6	6	2.24	NÃO	-0.30	NÃO
Zebreiros	18.0	5	2.25	NÃO	-0.27	NÃO
Crestuma	20.4	8	2.32	NÃO	-0.04	NÃO

Na Figura 5.117 encontra-se o gráfico que permite estabelecer a comparação entre os perfis longitudinais antes da construção dos molhes e após, para um caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

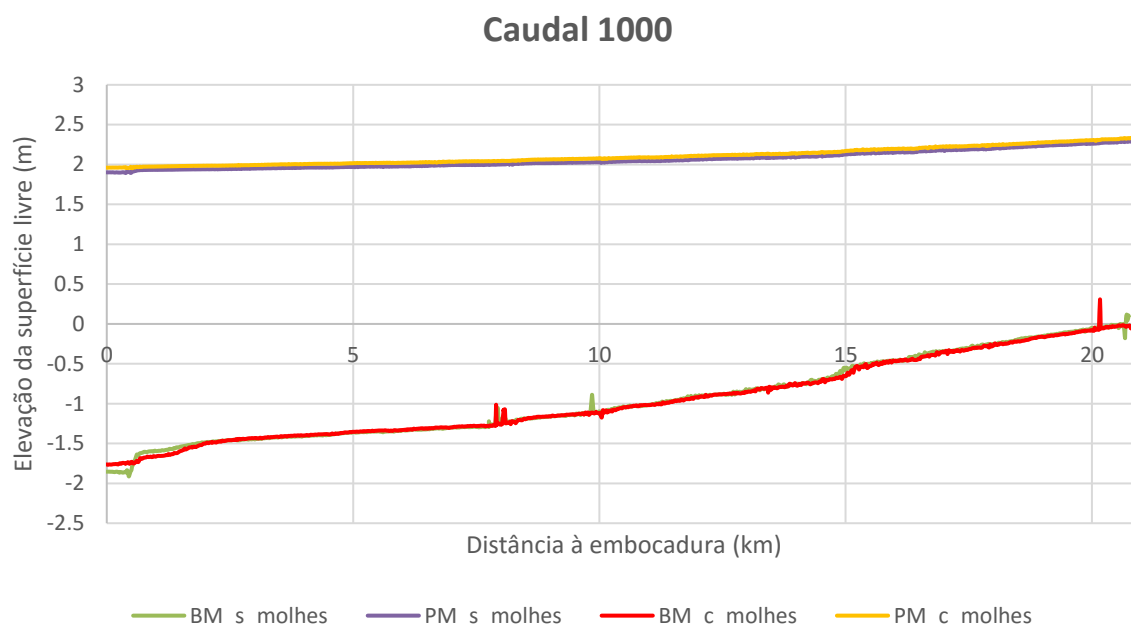


Figura 5.117- Perfis longitudinais espaciais da baixa-mar e preia-mar, antes e após a construção dos molhes.

Verifica-se que não existem grandes variações entre as duas preias-mar e as duas baixas-mar. Isto poderá estar relacionado com o facto de em nenhum dos casos a restinga ser galgada, sendo semelhante a capacidade de vazão dessa zona. Como o caudal e o nível da maré imposto é igual em ambos os casos é normal que a elevação da superfície livre seja semelhante. Existem apenas algumas exceções junto à embocadura porque as batimetrias são diferentes e existem algumas variações nos contornos da restinga.

5.3 DISCUSSÃO

Os dados topográficos utilizados da restinga para a malha após a construção dos molhes correspondem à topografia que ela apresentava em 2015. Em todas as simulações, com exceção da simulação com caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, se verificou que a restinga não é galgada, o que sugere que a construção dos molhes permitiu o seu fortalecimento. Isto é muito vantajoso ao nível da proteção das margens face à agitação marítima, mas, em situação de cheia pode apresentar desvantagens pois ao surgir um obstáculo tão forte ao escoamento observa-se que a altura de água a montante aumenta provocando mais danos do que os que seriam provocados caso ela fosse parcialmente ou completamente destruída.

Outro facto importante e que merece referência é que o BlueKenue quando se faz a representação da superfície livre coloca alguns valores para a restinga, o que não faz muito sentido nos casos em que ela se encontra emersa. A submersão da restinga deve portanto ser avaliada com base na informação da profundidade obtida através do BlueKenue.

Para a simulação com caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, nenhum dos locais sofreu inundação, sendo esse um caudal descarregado frequente em alturas de Inverno. Para as simulações de cheias com caudais mais elevados (20000 até $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) verificou-se que todos os locais ficaram inundados, incluindo a Alfândega. Nas restantes simulações, todos os locais ficaram inundados, exceto a Alfândega. A Alfândega é um ponto alto e encontra-se a quase 5 km da restinga. Tendo em conta que o estuário tem 21,6 km e que as alturas de água junto à barragem são enormes mas vão diminuindo ao longo do percurso do rio, é de esperar que num ponto já tão próximo da embocadura não ocorram grandes problemas. Nos restantes locais verifica-se que algumas das cheias provocam graves estragos. Foi também notório que, para os diferentes locais, as alturas de água, para a mesma cheia, aumentavam após a construção dos molhes

relativamente à fase anterior à sua construção. Isto indicia que a restinga está a ficar cada vez mais forte e que quando ocorrem cheias com grandes caudais, que a barragem não tem capacidade de laminar, podem esperar-se consequências piores em todos os pontos de referência utilizados.

A única situação em que o não galgamento da restinga não apresentou repercussões foi no caso do caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, que se revela um caudal já muito baixo, que provoca uma elevação da superfície livre muito pequena e que não afeta as zonas escolhidas.

Verifica-se que a construção dos molhes permitiu à restinga fixar a sua posição, pois o maior problema estava a ser a sua migração para o interior do estuário deixando as margens completamente desprotegidas. O facto da sua posição se encontrar fixa não quer dizer que ela não apresente um dinamismo elevado, variando a sua área e volume de acordo com a agitação marítima, regime de caudais e energia do vento. O aumento na sua espessura após a construção dos molhes fez atingir um valor tão elevado que pode dificultar a sua destruição durante episódios de cheias fortes, aumentando a elevação da superfície livre na zona estuarina e produzindo efeitos mais prejudiciais nas margens.

Para finalizar, verifica-se que nas simulações com a malha anterior à construção dos molhes existem zonas do estuário em que a diferença entre a elevação da superfície livre na preia-mar e na baixa-mar é desprezável, indicando que a influência da maré não se faz sentir nessas zonas. Nas simulações com a malha anterior à construção dos molhes verifica-se que no estuário inferior a influência da maré apenas se faz sentir na cheia de 1966. Como na cheia de 1962 a diferença entre as duas marés não era grande, existirá um caudal intermédio entre o caudal destas duas cheias abaixo do qual a influência da maré se faz sentir na zona mais a jusante do estuário. Quanto ao estuário superior, nessa mesma malha, verifica-se que a influência da maré só apresenta influência na cheia de 1979. Como na cheia de 1966 não se verificaram diferenças na elevação da superfície livre entre a preia-mar e a baixa-mar supõe-se que existirá um caudal entre o caudal de 1966 e o de 1979 abaixo do qual se fará sentir a influência da maré.

No caso da malha após a construção dos molhes verifica-se sempre uma diferença entre a elevação da superfície livre entre a preia-mar e a baixa-mar, pelo menos no estuário inferior, para todos os caudais simulados. Isto estará relacionado com o facto de a restinga não ser galgada e o escoamento apenas ocorrer no canal de navegação, permitindo que a influência da maré seja mais sentida.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

O objetivo da presente dissertação era analisar a hidrodinâmica do estuário do rio Douro e proceder à simulação de diferentes cenários de cheia antes e após a construção do molhe norte e do quebramar destacado de forma a avaliar o efeito destes nas condições de segurança no estuário, em caso de cheia. Para a caracterização do estuário do Douro e a representação do seu comportamento em eventos extremos de cheias foi utilizado o modelo numérico OpenTelemac, mais concretamente o seu módulo de circulação a duas dimensões horizontais: Telemac 2D. Foi analisado o possível galgamento da restinga de forma a averiguar se o aumento da robustez deste corpo arenoso após a construção do quebramar destacado apresenta consequências negativas nas inundações das zonas adjacentes.

A fase mais morosa de todo o trabalho foi a calibração do modelo. Foi necessário fazer numerosas simulações alterando as definições das condições-fronteira de alguns pontos, experimentando diferentes valores de viscosidade turbulenta até descobrir qual o que melhor se ajustava aos dados recolhidos *in-situ*, ou alterando as cotas da malha porque foram detetados erros em alguns pontos junto à barragem de Crestuma.

Foram feitas simulações de cheias históricas onde ficou perceptível que para a malha posterior aos molhes a influência da maré se faz sentir sempre no estuário inferior. Na zona mais a montante do estuário essa influência depende dos caudais de ponta. Foi também possível observar que para esses caudais a restinga não é galgável após a construção dos molhes, provocando assim o aumento da elevação da superfície livre nas zonas a montante. Isso ficou visível quando se estabeleciam comparações entre as elevações da superfície livre antes e após a construção dos molhes, em que nos casos após a construção dos molhes as elevações da superfície livre eram sempre superiores.

Foram também feitas simulações com caudais mais elevados, próximos do caudal máximo descarregável por Crestuma. Verificou-se que, para o cenário pós-molhes apenas para o caudal de $26000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a maior parte da restinga foi galgada. Por fim, foi feita uma simulação com caudal de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, um caudal frequente no Inverno, e verificou-se que com ambas as malhas a restinga não foi galgada, não se verificando grandes diferenças entre as preias-mar e as baixas-mar. Esta foi a única simulação para a qual todos os locais não sofreram inundação. Além disso, nesta simulação ainda se registaram algumas planícies de entremarés (*tidal flats*).

Nos perfis longitudinais da elevação da superfície livre das simulações feitas com a malha sem molhes observou-se, junto à restinga, a descida brusca da elevação da superfície livre. Isto deve-se ao encontro do escoamento lento do rio com o escoamento lento do mar, que possui uma altura inferior por se encontrar numa zona mais alargada. Nas simulações feitas com a malha pós-molhes verificou-se que

esta descida não acontecia junto à restinga, mas um pouco mais a jusante, o que indica que os molhes permitem o redireccionamento do caudal fluvial mais para jusante.

Em suma, a construção dos molhes terá surtido o efeito desejado, no sentido em que a embocadura se encontra mais protegida do efeito da agitação marítima, o que torna o canal de navegação mais seguro e a restinga também parece encontrar-se mais fortalecida, possuindo uma espessura maior e cumprindo a sua função de proteger as margens das tempestades marítimas. No entanto, o facto de a restinga se encontrar mais robusta não traz só vantagens. Como foi possível observar nas simulações feitas com a malha pós-molhes, a elevação da superfície livre a montante da restinga é superior à elevação que existiria caso ela fosse destruída o que faz com que ocorram inundações mais gravosas e, consequentemente, os estragos sejam mais nefastos. Na situação de ocorrência de cheia, quanto mais forte a restinga se encontra, mais graves são os efeitos sentidos nas margens. Desse ponto de vista, a construção dos molhes foi desvantajosa.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

As batimetrias utilizadas na implementação do modelo não eram coincidentes com as batimetrias dos anos para os quais foram realizadas as simulações. Seria interessante utilizar as batimetrias corretas de forma a conseguir fazer-se uma mais correta validação do modelo.

Além disso, seria interessante também utilizar um modelo digital do terreno de forma a ser facilitada a avaliação do efeito das cheias nos terrenos adjacentes.

Apesar de se terem colocado traçadores de salinidade e temperatura no Telemac 2D a representação destas grandezas não é correta pois, tal como é feito com as velocidades, o valor final de cada traçador em cada ponto consiste na média do valor desse mesmo traçador na vertical, não permitindo uma perceção correta do que realmente acontece. Seria portanto interessante implementar um modelo 3D de forma a estudar de forma mais aprofundada a forma como ocorre a estratificação no estuário, como ocorre o processo de intrusão salina e quais as correntes de circulação que as variações de densidade induzem.

BIBLIOGRAFIA

- Águas de Portugal. <http://www.adp.pt/pt/?id=61&img=9&bl=2>. Consultado em 13 de Maio de 2016.
- Almeida, A., Pinto, F.T., Gomes, F.V., Paredes, G.M. (2009). *Análise das marés meteorológicas em Leixões*. 6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. 8 e 9 de Outubro de 2009, Funchal.
- Álvarez, I., Gómez-Gesteira, M., deCastro, M., Dias, J.M. (2008) *Spatiotemporal evolution of upwelling regime along the western coast of the Iberian Peninsula*. Journal of Geophysical Research: Oceans 113:C07020.
- APA. (2015). *Plano de Gestão de Região Hidrográfica 2016/2021. Parte I- Enquadramento e Aspetos Gerais. Região Hidrográfica do Douro (RH3)*. Agência Portuguesa do Ambiente
- APA. (2012). *Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro RH3. Relatório de Base. Parte 2- Caracterização e diagnóstico da região hidrográfica*. Agência Portuguesa do Ambiente.
- Araújo, M.A.V.C., Mazzolari, A., Trigo-Teixeira, A. (2013). *An object oriented mesh generator: application to flooding in the Douro estuary*. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), *Proceeding 12th International Coastal Symposium* (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 642-647, ISSN 0749-0208.
- Araújo, M.F., Jouanneau, J.-M., Valério, P., Barbosa, T., Gouveia, A., Weber, O., Oliveira, A., Rodrigues, A., Dias, J.M.A. (2002). *Geochemical tracers of northern Portuguese estuarine sediments on the shelf*. Progress in Oceanography 52: 277-297.
- ATA, R., Goeury, C., Hervouet, J.M. (2014). *Telemac Modelling System User Manual: 2D Hydrodynamics Telemac-2D Software Version 7.0*.
- Azevedo, I.C., Bordalo, A.A., Duarte, P.M. (2010). *Influence of river discharges patterns on the hydrodynamics and potential contaminant dispersion in the Douro estuary (Portugal)*. Water Research, 44:3133-3146.
- Azevedo, I.C., Duarte, P.M., Bordalo, A.A. (2006). *Pelagic metabolism of the Douro estuary (Portugal) – Factor controlling primary production*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 69: 133-146.
- Azevedo, I.C., Duarte, P.M., Bordalo, A.A. (2008). *Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a mesotidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 76:620-633.
- Bastos, L., Bio, A., Pinho, J.L.S., Granja, H., da Silva, A.J. (2012). *Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 109:53-69.
- Becker, J.J., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., Braud, J., Binder, B., Depner, J., Fabre, D., Factor, J., Ingalls, S., Kim, S.-H., Ladner, R., Marks, K., Nelson, S., Pharaoh, A., Trimmer, R., Von Rosenberg, J., Wallace, G., and Weatherall, P. (2009). *Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS*. Marine Geodesy, 32, 355–371.
- Bordalo, A.A., Teixeira, R., Wiebe, W.J. (2006). *A water quality index applied to an international shared river basin: The case of the Douro River*. Environ Manage 38:910-920.
- Bordalo, A.A., Vieira, M.E.C. (2005). *Spatial variability of phytoplankton, bacteria and viruses in the mesotidal salt wedge Douro Estuary (Portugal)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 63:143-154.

- Corti, S., and V. Pennati (2000). *A 3-D hydrodynamic model of river flow in a delta region*. Hydrological Processes 14: 2301-2309.
- da Silva, M.C. (2000). *Estuários – Critérios para uma Classificação Ambiental*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 5: 25-35.
- deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., Lorenzo, M.N., Álvarez, I., Crespo, A.J.C. (2008) *Influence of atmospheric modes on coastal upwelling along the western coast of the Iberian Peninsula, 1985 to 2005*. Climate Research 36:169-179.
- Dias, A.A.P (Sem data), *O Estuário do Rio Douro - O risco de cheias*. Trabalho de Licenciatura, FLUP.
- Dias, J.M.A., Gonzalez, R., Garcia, C., Diaz-del-Rio, V. (2002). *Sediment distribution patterns on the Galicia-Minho continental shelf*. Progress in Oceanography 52:215-231.
- dos Santos, C.F. (2014). *Evolução Morfodinâmica da Restinga do Douro a Várias Escalas Temporais*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- EDP. http://www.a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/producao.php?cp_type=he&map_type=he. Consultado em 9 de Maio de 2016.
- Egbert G.D., Bennett A.F., and Foreman, M.G.G. (1994). *Topex/Poseidon tides estimated using a global inverse model*. Journal Geophysical Research, 99, 24821–52.
- Gómez-Gesteira, M., Gimeno, L., deCastro, M., Lorenzo, M.N., Alvarez, I., Nieto, R., Taboada, J.J., Crespo, A.J.C., Ramos, A.M., Iglesias, I., Gómez-Gesteira, J.L., Santo, F.E., Barriopedro, D., Trigo, I.F. (2011). *The state of climate in NW Iberia*. Climate Research 48:109-144.
- Granja, H. M., Bastos, L., Pinho, J. L. S., Gonçalves, J., Henriques, R. F., Bio, A., Mendes, J., Magalhães, A. (2011) – *Integração de metodologias no estabelecimento de um programa de monitorização costeira para avaliação de risco*. VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, 5 e 6 de Maio de 2011, Porto-FCUP, pp. 11.
- Hervouet, J.M. (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method*. John Wiley & Sons, Ltd.
- IH. (2016). *Tabelas de Maré 2016 – Volume I – Capítulo III - Informação Suplementar Sobre Marés*. Instituto Hidrográfico.
- IPTM. (2003). *Estudo de Impacte Ambiental das Obras de Melhoria de Acessibilidade e Segurança da Barra do Douro*. Instituto Portuário e dos Transportes Marítios
- Irmãos Cavaco SA. http://www.icsa.pt/client/skins/a_negocio.asp?page=28. Consultado em 10 de Maio de 2016.
- Krige, D.G. (1951). *A Statistical Approach to Some Mine Valuations and Allied Problems at the Witwatersrand*, Master's thesis, University of Witwatersrand.
- Lynch, D.R. and Gray, W.R. (1979) *A wave equation model for finite element tidal computation*. Computers and Fluids, 7:207-228.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., Piroton, M. (2009). *Bottom friction formulations for free surface flow modeling*. In 8th NCTAM Congress.
- Matheron, G. (1963). *Principles of geostatistics*. Economic Geology, 58, 1246–1266.

- Monteiro, I.O., Marques, W.C., Fernandes, E.H., Gonçalves, R.C., Möller, O.O (2011). *On the effect of earth rotation, river discharge, tidal oscillations, and wind in the dynamics of the Patos Lagoon coastal plume*. Journal of Coastal Research 27: 120-130.
- Mucha, A.P., Bordalo, A.A., Vasconcelos, M.T.S.D. (2004a). *Sediment quality in the Douro river estuary based on trace metal contents, macrobenthic community and elutriate sediment toxicity test (ESTT)*. J. Environ. Monit., 6:585-592.
- Mucha, A.P., Vasconcelos, M.T.S.D., Bordalo, A.A. (2003). *Macrobenthic community in the Douro Estuary: relations with trace*. Environmental Pollution 121:169-180.
- Mucha, A.P., Vasconcelos, M.T.S.D., Bordalo, A.A. (2004b). *Vertical distribution of the macrobenthic community and its relationship to trace metals and natural sediment characteristics in the lower Douro estuary, Portugal*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 59:663-673.
- Pardé, M. (1966). *Les crues du Douro d'après une étude portugaise remarquable*. Boletim Trimestral de Informação, Direção Geral dos Serviços Hidráulicos, Lisboa, n.23, p.93-169.
- Perillo, G.M.E. (1995). Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, edited by Perillo, G. M. E., pp. 17–47, Elsevier Sci., New York.
- Pierre Lang, P. (2010). *Telemac Modelling System Reference Manual: 2D Hydrodynamics Telemac-2D Software Version 6.0*, pp. 1-92.
- Pinto, J.A.G.T. (2007). *Influência do Regime de Escoamento Fluvial na Hidrologia e Dinâmica do Estuário do Douro*. Relatório Final de Estágio. Universidade de Évora.
- Portela, L.I., (2008). *Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary*. Geo-Marine Letters 28, 77-86.
- Potter, I.C., Chuwen, B.M., Hoeksema, S.D., Elliott, M. (2010). *The concept of an estuary: a definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline*. Estuarine Coastal and Shelf Science 87, 497-500.
- Ramos, C. (2014). *Perigos Naturais Devidos a Causas Meteorológicas: O Caso das Cheias e Inundações*. Edições Universitárias Lusófonas.
- Rodrigues, R., Brandão, C., da Costa, J.P. (2003). *As cheias no Douro ontem, hoje e amanhã*. Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente, Instituto da Água.
- Santos, I., Teorodo, A.C., Pinto, F.T. (2010). *Análise da evolução morfológica da restinga do rio Douro*. 5^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 25 de Outubro de 2010, Porto-FEUP, pp. 14.
- Shewchuk J. R. (1996). Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator, *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering* (Ming C. Lin and Dinesh Manocha, editors), volume 1148 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 203–222.
- Teodoro, A.C., Pais-Barbosa, J., Gonçalves, H., Veloso-Gomes, F. and Taveira-Pinto, F. (2011). *Extraction of Cabedelo sand spit area (Douro estuary) from satellite images through image processing techniques*. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium). 1740 – 1744.
- Teodoro. A.C., Pinto. F.T., Santos. I. (2014). *Morphological and statistical analysis of the impact of breakwaters under construction on a sand spit area (Douro River estuary)*. Journal of Coastal Conservation 18:177-191.

Veloso-Gomes, F., Pinto, F.T., das Neves, L., Barbosa, J.P., Coelho, Carlos. (2004). *Erosion risk levels at the NW Portuguese coast: the Douro mouth – Cape Mondego stretch*. Journal of Coastal Conservation 10: 43-52.

Veloso-Gomes, F., Pinto, F.T., Paredes, G.M. (2009). *Estudo da evolução da fisiografia da restinga do Rio Douro desde 2002*. 4^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 26 de Outubro de 2009, Porto-FEUP, pp. 10.

Vieira, M.E.C., Bordalo, A.A., (2000). *The Douro estuary (Portugal): a mesotidal salt wedge*. Oceanologica Acta 23, 585–594.