Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería
25-28 junio 2013, Bilbao, España
© SEMNI, 2013

MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO DOURO

Joaquim F. Peixoto* e José L. S. Pinho†

*Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
Campus de Gualtar, 4710-553 Braga, Portugal
e-mail: a50577@alunos.uminho.pt, web page: http://www.civil.uminho.pt

† Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho
Campus de Gualtar, 4710-553 Braga, Portugal
e-mail: jpinho@civil.uminho.pt, web page: http://www.civil.uminho.pt

Palavras-chave: Estuário, Douro, Modelação hidrodinâmica, Delft3D.

Resumo. *O estuário do rio Douro tem cerca de 22 km de comprimento, sendo a propagação da maré limitada a montante pela barragem de Crestuma. É constituído por um vale estreito, com largura mínima de 135 m na ponte D. Luís (a 6 km da embocadura). A jusante da ponte da Arrábida, o estuário alarga atingindo a largura máxima de 1300 m. Na embocadura, o banco de areia do Cabedelo disposto perpendicularmente ao eixo do estuário, confina o escoamento ao canal estreito junto à margem norte. O Cabedelo é um banco arenoso cuja forma é modulada pelo regime de agitação, pelo escoamento fluvial e pela maré. Em situações de cheia, para caudais da ordem dos 10 000 m³/s o banco é galgado e destruído pelo escoamento, sendo reconstruído progressivamente depois de terminada a cheia [1]. Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre a hidrodinâmica do estuário do rio Douro realizou-se este trabalho que contemplou a criação de um modelo hidrodinâmico tridimensional do estuário no programa computacional Delft3D. Este modelo serviu para simular diferentes cenários hidrodinâmicos correspondentes a diferentes condições de descarga da barragem de Crestuma-Lever [2], tipos de maré, salinidade [3] e cenários fictícios de rutura dos molhes da embocadura. Após a obtenção dos resultados da simulação procedeu-se à sua análise. Constatou-se que existem três fatores determinantes na forma como as massas de água doce e marinha, se relacionam que são o caudal escoado pelo rio condicionado pela barragem de Crestuma, o estado da maré e a geometria do fundo e fronteiras. Neste último caso o quebra-mar apresenta-se como o elemento determinante das condições atuais de escoamento na zona da embocadura, sendo o responsável pelo aumento da velocidade de escoamento na saída do estuário. O estado da maré não só determina a distância percorrida pela cunha salina no interior do estuário como delimita a velocidade de escoamento na saída do estuário. Por outro lado quanto mais elevado for o caudal transportado pelo rio menor será a distância percorrida pela cunha salina.*

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos o rio Douro tem sido alvo de inúmeras cheias como é exemplo a cheia de 1703. Devido a estas cheias as zonas ribeirinhas são devastadas com a destruição de bens materiais como embarcações e edifícios, colocando em risco vidas humanas. Exemplo disso é a cheia ocorrida entre 2 e 3 de Janeiro de 1962 em que foram levadas pela cheia 150 barcaças e apenas se recuperaram 25 tendo uma pessoa perdido a vida [4]. Devido ao grande número de naufrágios ocorridos na foz, não só devido às cheias mas sobretudo às suas características hidráulicas e batimétricas, foram surgindo diferentes projetos, estudos e obras ao longo dos anos visando o melhoramento das condições de acesso à barra do Douro.

O rio tem 927 km de comprimento e é o segundo rio mais extenso da Península Ibérica. É um rio de grande utilidade pública, sendo usado fundamentalmente para abastecimento público, pesca, turismo, irrigação, agricultura e produção de energia hidroeléctrica, a qual representa 53% da exploração hidroeléctrica portuguesa. Entre os principais afluentes podem-se distinguir no território nacional os rios Tâmega, Tua, Corgo, Sousa, Sabor, Águeda, Côa, Paiva e Távora.

O estuário tem cerca de 22 km de comprimento, no seu início encontra-se a barragem de Crestuma-Lever, sendo formado por um vale estreito, com largura mínima de 135 m na ponte D. Luís (a 6 km da embocadura). A jusante da ponte da Arrábida, o estuário alarga atingindo a largura máxima de 1300 m. Na embocadura, o banco de areia do Cabedelo disposto perpendicularmente ao eixo do estuário, confina o escoamento ao canal estreito junto à margem norte. A cota da parte central do Cabedelo é da ordem dos 5 m acima do nível médio do mar [2].

A parte final do estuário do rio Douro, nomeadamente o Cabedelo, a zona que resta do sapal e a área de areias que cobrem e descobrem com as marés, apresenta condições favoráveis para o abrigo e nidificação de muitas aves, e outras espécies biológicas, além de constituir um importante elemento natural de defesa do estuário contra o avanço do mar, particularmente em situações de temporal, pelo que importa reforçar e estabilizar o seu cordão dunar.

Na figura 1 apresenta-se a parte final do estuário.



Figura 1: Foz do rio Douro.

Recorrendo-se ao programa computacional de modelação da hidrodinâmica Delft3D foi criado um modelo do estuário do rio Douro. Procedeu-se à calibração deste modelo de modo a simular as condições hidrodinâmicas verificadas no estuário e à sua validação. Foram definidos e simulados trinta cenários diferentes, analisando-se posteriormente os resultados obtidos. Os cenários simulados resultaram da consideração de dois tipos de maré, três caudais fluviais, da salinidade, da temperatura e de cenários fictícios de rutura do molhe norte e do quebra-mar.

2. CONSTRUÇÃO DO MODELO

A construção do modelo no programa Delft3D iniciou-se com a definição geométrica do contorno do estuário no módulo *RGFGRID* [5]. A partir deste contorno procedeu-se à criação da grelha curvilínea. Utilizou-se um método de criação da grelha a partir de um quadrilátero que contém o estuário, procedendo-se a refinamentos sucessivos até se conseguir a resolução espacial adequada, eliminando-se as células criadas no exterior do estuário. Este processo permite obter células com dimensões mais uniformes. O módulo *QUICKIN* [6] foi usado para implementar a batimetria no modelo, tendo sido posteriormente considerado no módulo *Flow Input* [7], uma divisão segundo a direção vertical em dez camadas.
A figura 2 mostra a área de estudo com a grelha criada.

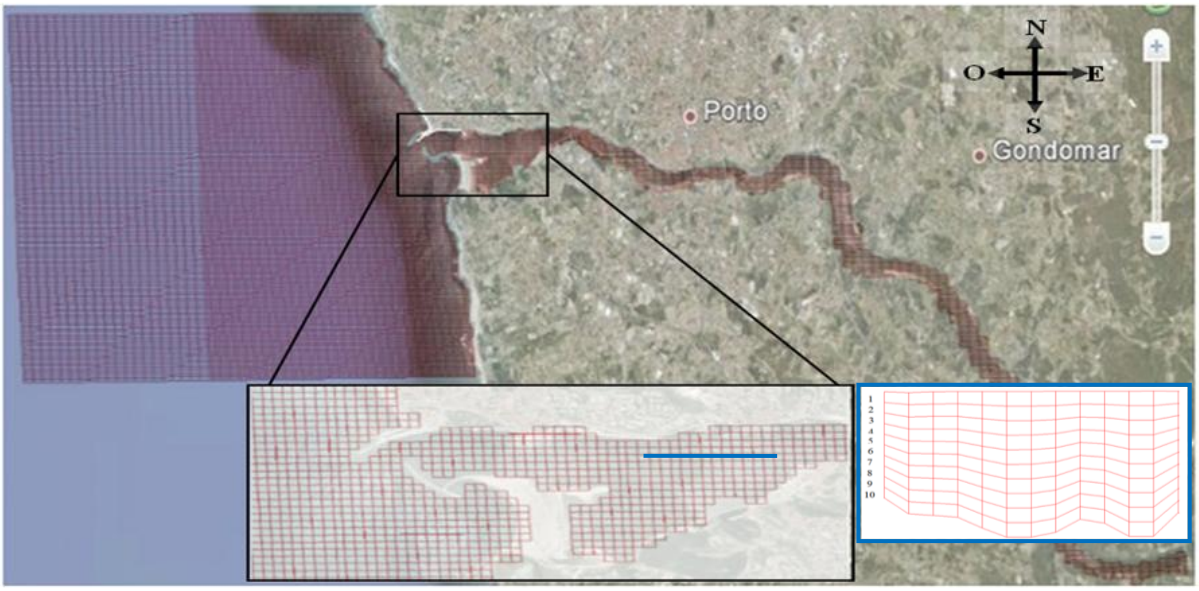


Figura 2: Imagem da área de estudo com o modelo implantado

A divisão da batimetria na direção vertical foi definida considerando-se a espessura para cada camada em percentagem da profundidade local.
Foram consideradas duas fronteiras abertas. Uma na barragem de Crestuma-Lever onde foram impostos diferentes valores para os caudais com base nos dados disponíveis no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos [8]: um caudal característico de Verão (100

m³/s), um caudal de Inverno (800 m³/s), um caudal de cheia de 10 000 m³/s e um caudal médio de um ano seco (200 m³/s). No que diz respeito à fronteira oceânica foram impostos dois tipos de marés, isto é, definiu-se uma maré morta e uma maré viva. Estes dois tipos de maré foram definidos considerando as componentes astronómicas apresentadas no quadro 1 [9]. A fronteira oceânica criada para este modelo fica a uma distância de aproximadamente 8 quilómetros do quebra-mar e tem uma extensão de aproximadamente de 7 quilómetros segundo a direção norte-sul. Também foi considerada uma salinidade de 35 ppt para a água oceânica (salobra) e de 0 ppt para a água fluvial (doce) e uma temperatura de 18º C para toda a massa de água.

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

Quadro 1: Componentes astronómicas da maré.

3. HIDRODINÂMICA DO ESTUÁRIO

A figura 4 mostra-nos a pluma de água fluvial na camada superficial, tal como a direção e sentido da velocidade do escoamento nos cenários de caudal de 100 m³/s considerando quer a presença das estruturas da embocadura quer um cenário anterior à sua construção (ou uma eventual rutura futura) considerando o instante de velocidades máxima durante uma maré viva.

A direção da pluma e consequentemente a forma como esta se dispersa no oceano, é fortemente influenciada pelas estruturas da embocadura. Na situação de rutura de ambas as estruturas (SM) o jato entra no oceano em forma de pluma aproximadamente circular. Por sua vez na presença apenas do molhe norte (SQ) a pluma é desviada por este como se mostra na figura 4, chegando ao oceano com forma de pluma alongada dirigida para sul. No cenário em que só existe o quebra-mar (SMN) o jato não muda de direção mas entra no oceano com uma forma mais estreita alargando à medida que se afasta da embocadura. Na situação atual (SA) o jato de água é direcionado para sul devido à existência do molhe norte e tem uma forma estreita devido à ação do quebra-mar. Nestes resultados foi desprezada a atuação do vento.

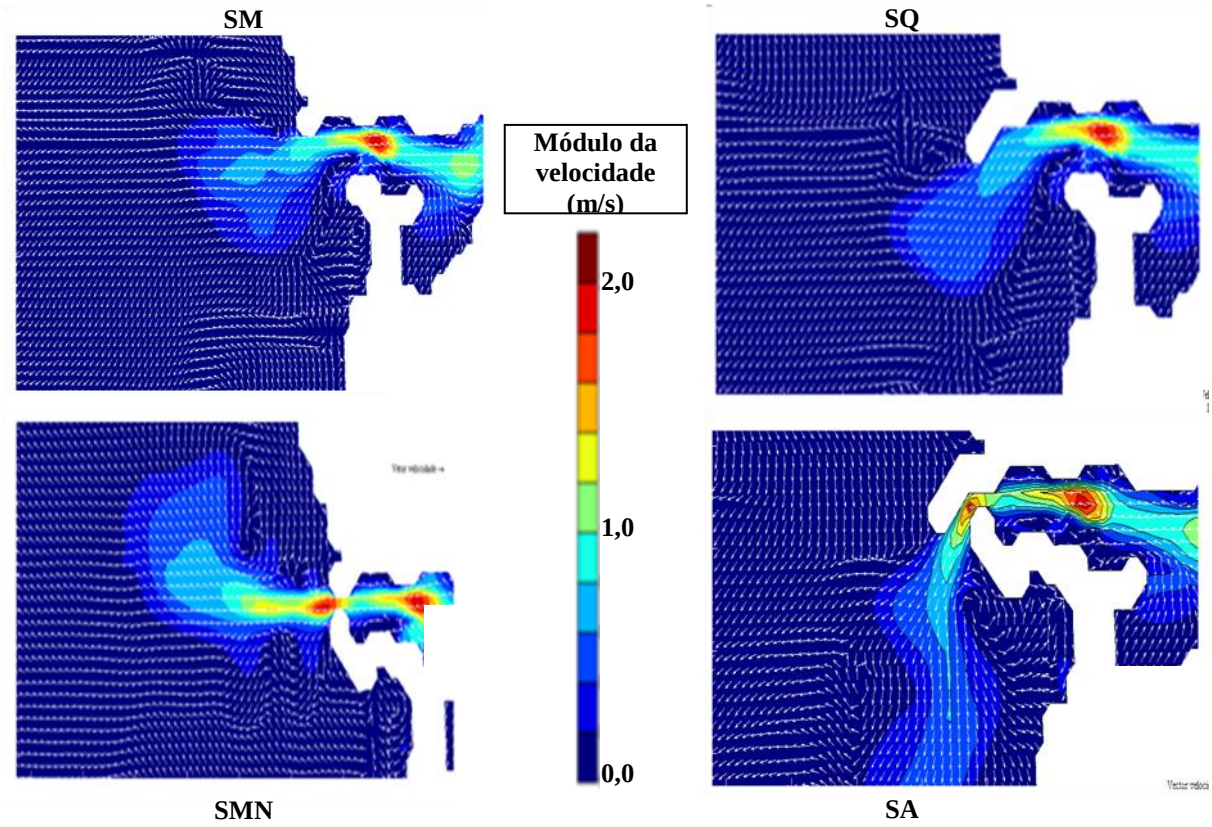


Figura 4: Pluma de água fluvial na situação de rutura de ambos os molhes (superior, esquerda) do quebra-mar (superior, direita) molhe norte (inferior, esquerda) e com ambas as estruturas (inferior, direita).

Na Figura 5 apresentam-se os perfis de velocidade máxima ao longo do eixo longitudinal do estuário para a situação atual da embocadura (gráfico esquerda) e com rutura das estruturas (gráfico direita). Nesta figura assinalam-se três locais (identificados por EE, PA e PI) que correspondem à entrada do estuário (EE), à ponte da Arrábida (PA) e à ponte do Infante (PI).

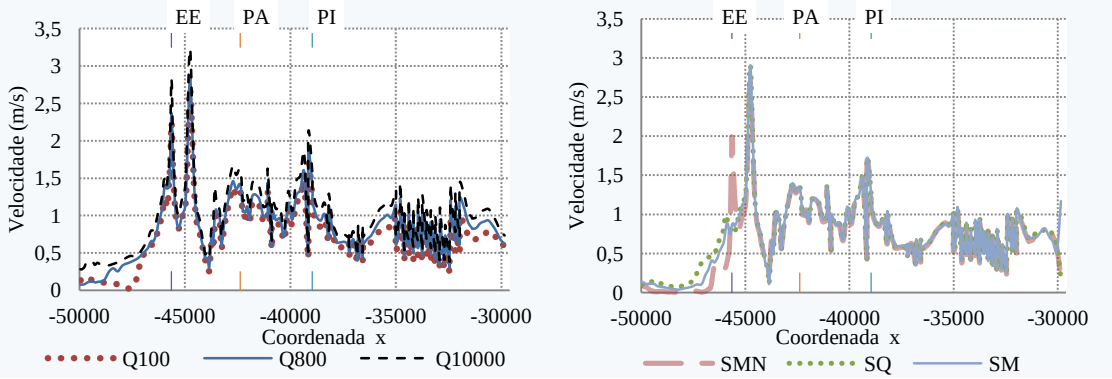


Figura 5: Representação da velocidade ao longo do eixo longitudinal do estuário na camada superficial para o cenário de maré viva e caudais de 100 m³/s (Q100), 10000 m³/s (Q10000) e 800 m³/s (Q800) (esquerda); caudal fluvial de 100 m³/s durante maré viva considerando rutura do molhe norte (SMN), do quebra-mar (SQ) e das duas estruturas (SM) (direita).

Podemos identificar três zonas onde a velocidade atinge valores mais elevados. Essas zonas correspondem à entrada do estuário (primeiro pico a contar da esquerda), o segundo pico de velocidade ocorre na zona mais profunda do estuário que se situa perto da capela de São Miguel-o-Anjo (perto do Cabedelo) e o terceiro pico encontra-se junto à ponte do Infante. No que respeita ao gráfico de rutura das estruturas da embocadura, podemos verificar que apenas a curva SMN (sem molhe norte) apresenta os três picos de velocidade, à semelhança do gráfico sem rutura das estruturas (gráfico da esquerda), ora este fato permite deduzir que o quebra-mar é o responsável pelo pico de velocidade na entrada do estuário.
Na Figura 6 apresenta-se a variação da velocidade com a profundidade no instante de ocorrência de velocidades máximas em cada um dos locais onde ocorrem os picos de velocidade identificado na figura 5.

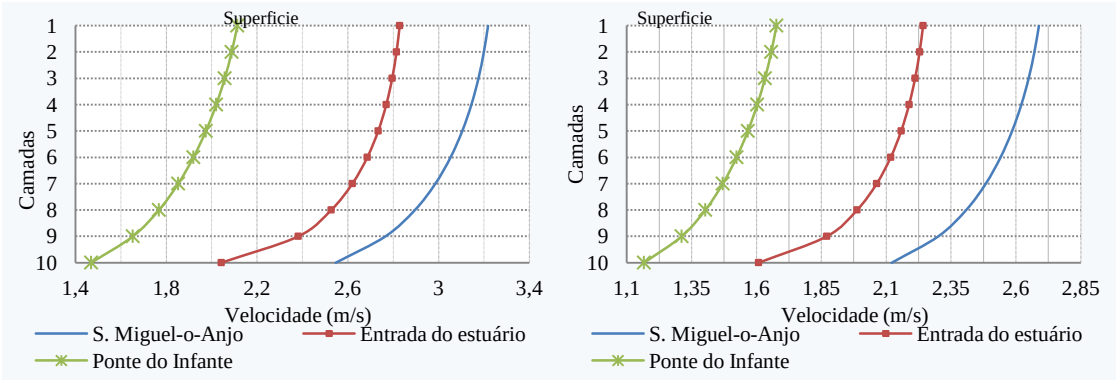


Figura 6: Perfil vertical de velocidade no instante de velocidade máxima durante uma maré viva para o caudal fluvial de 10000 m³/s (esquerda) e para o caudal fluvial de 100 m³/s (direita).

Os gráficos seguintes (figura 7) representam a velocidade a partir do segundo dia de simulação para o cenário de caudal de 100 m³/s (Q100), variação de 200 m³/s a 800 m³/s (Q800) e 10000 m³/s (Q10000) numa maré viva na situação atual (esquerda) e considerando

rutura do quebra-mar (SQ), do molhe norte (SMN) e de ambas as estruturas (SM) com o caudal fluvial a variar de 200 m³/s a 800 m³/s durante uma maré viva.

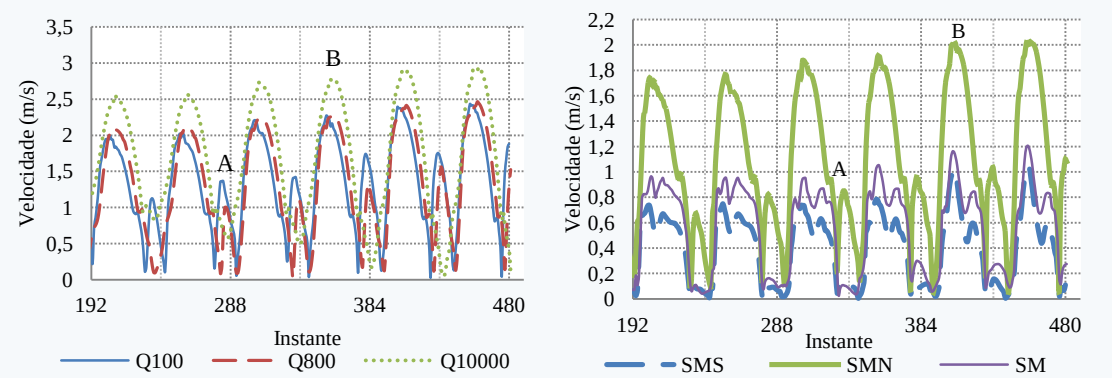


Figura 7: Velocidade para o caudal de 100 m³/s (Q100), 200 a 800 m³/s (Q800) e 10000 m³/s (Q10000) na camada superficial para a maré viva na entrada do estuário (esquerda), e com o caudal de 200 a 800 m³/s e maré viva e rutura do quebra-mar (SMS) norte (SMN) e ambos (SM) (direita).

Da análise dos gráficos da figura 7 verifica-se que a curva Q100 (gráfico da esquerda) apresenta valores próximos de zero seguidos de um pequeno aumento voltando a zero e aumentando para um valor superior. Esta variação resulta da inversão do sentido de escoamento durante o ciclo de maré, ou seja na enchente temos um pico de velocidade como o assinalado pela letra A e na vazante estamos perante um pico de velocidade como o assinalado pela letra B. No gráfico respeitante ao cenário de rutura das estruturas da embocadura (gráfico da direita) apenas a curva SMN (sem molhe norte) apresenta semelhanças com o cenário atual, isto é apenas esta curva tem o pico de velocidade do tipo assinalado pela letra A, sendo que nas outras duas curvas (SM e SMS) a velocidade apresentada é muito inferior quando comparada com a curva SMN. Verifica-se assim, uma alteração importante induzida pelas obras da embocadura na intensidade das correntes durante a enchente de marés vivas para caudais fluviais inferiores a 100 m^3/s.
De resultados obtidos constata-se ainda que durante o ciclo de maré o escoamento não é uniforme em perfil vertical. Nas camadas superiores podemos ter água a sair do estuário e nas camadas inferiores podemos ter água a entrar no estuário num mesmo instante. Também se pode afirmar que quando temos mudança de sentido do escoamento esta acontece de forma quase imediata e homogénea ao longo do perfil vertical, na situação em que a mudança se verifica da enchente para a vazante no estuário. Na situação contrária a mudança acontece de forma progressiva e começa nas camadas inferiores alastrando para as camadas superiores à medida que o nível da maré vai subindo.

4. CONDIÇÕES DE ESTRATIFICAÇÃO

Os gráficos que se seguem (figura 8) correspondem a perfis de concentração da salinidade ao longo do eixo longitudinal do estuário na camada superficial para uma maré viva (direita) e para uma maré morta (esquerda) na atual configuração da embocadura considerando

diferentes caudais fluviais.

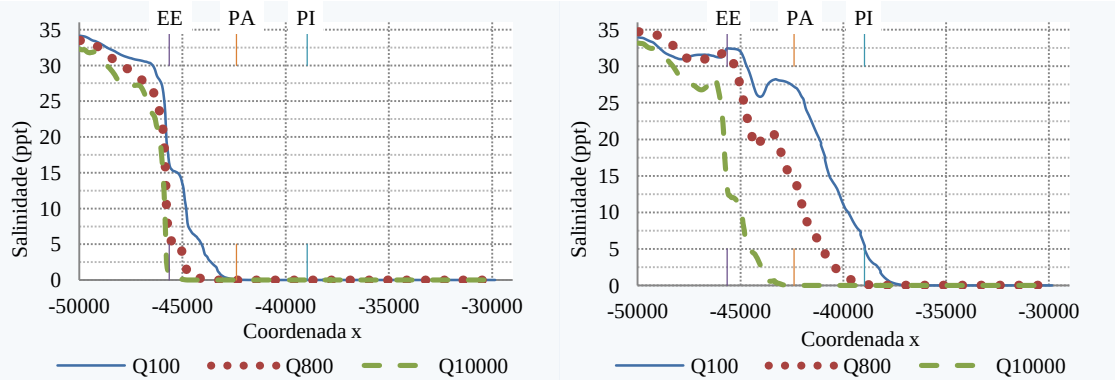


Figura 8: Intrusão salina para os caudais de 100, 200-800 e 10000 m³/s com maré morta à superfície (esquerda) e maré viva (direita). EE-Entrada do estuário; PA – Ponte da Arrábida e PI – Ponte do Infante.

Os valores da salinidade diminuem desde a fronteira oceânica, duma forma mais lenta na zona exterior à embocadura mas assim que se aproxima desta (EE) sofre uma forte redução, chegando à ponte da Arrábida (PA) com valores abaixo de 2 ppt e à ponte do Infante (PI) com o valor nulo, no caso de maré morta e para todos os caudais considerados. Na situação de maré viva observa-se que quanto menor for o caudal maior é a intrusão salina, sendo que a curva Q100 atinge a ponte do Infante com valores superiores a 5 ppt, enquanto a curva Q800 apresenta um valor de cerca de 14 ppt na ponte da Arrábida atingindo o valor de 0 ppt ainda antes da PI.
Na figura 9 apresentam-se resultados em cenários de rutura das estruturas da embocadura considerando um caudal de 100 m³/s.

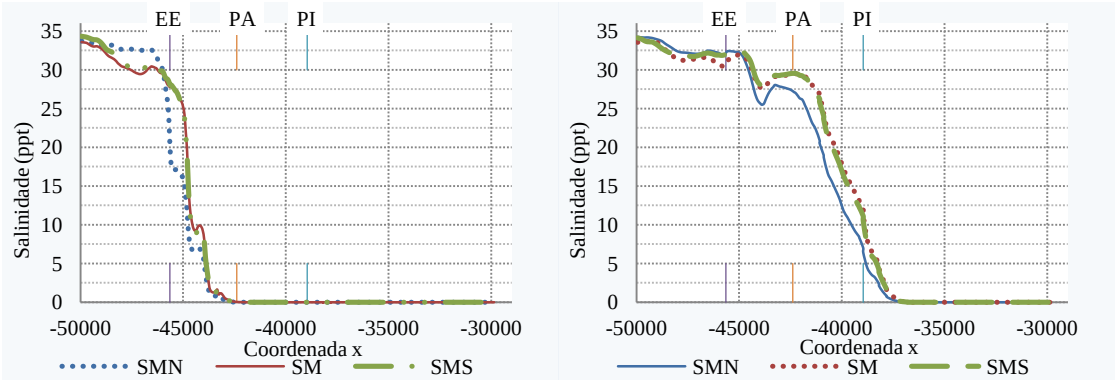


Figura 9: Perfil longitudinal de salinidade na camada superficial, caudal de 100 m³/s, maré morta (esquerda) e maré viva (direita). EE-Entrada do estuário; PA – Ponte da Arrábida e PI – Ponte do Infante. SMN-Sem molhe norte: SM-Sem molhes: SMS-Sem quebra-mar.

Na situação de maré viva (gráfico da direita) atingem-se valores de salinidade acima de 5 ppt na ponte do Infante, em qualquer um dos cenários considerados. Este resultado indica que a

construção das estruturas da embocadura não alterou substancialmente o alcance da intrusão salina nestas condições de caudal e maré. No gráfico da esquerda da figura 9 temos um comportamento para as três curvas em todo semelhante. Em todos os cenários a pluma salina não ultrapassa a ponte da Arrábida (PA).
Na figura 10 apresentam-se resultados de concentração de salinidade na camada superficial para o cenário de caudal fluvial de 100 m³/s (Q100) e para o cenário em que o caudal fluvial varia de 200 a 800 m³/s (Q800). A pluma assinalada na imagem da direita justifica valores superiores de salinidade que aparecem neste cenário e que são apresentados também na figura 8. Trata-se de água salobra que entra no estuário durante a enchente e que posteriormente é transportada para o largo na vazante devido à maior capacidade de transporte induzida pelo caudal fluvial no cenário Q800 relativamente ao cenário Q100.

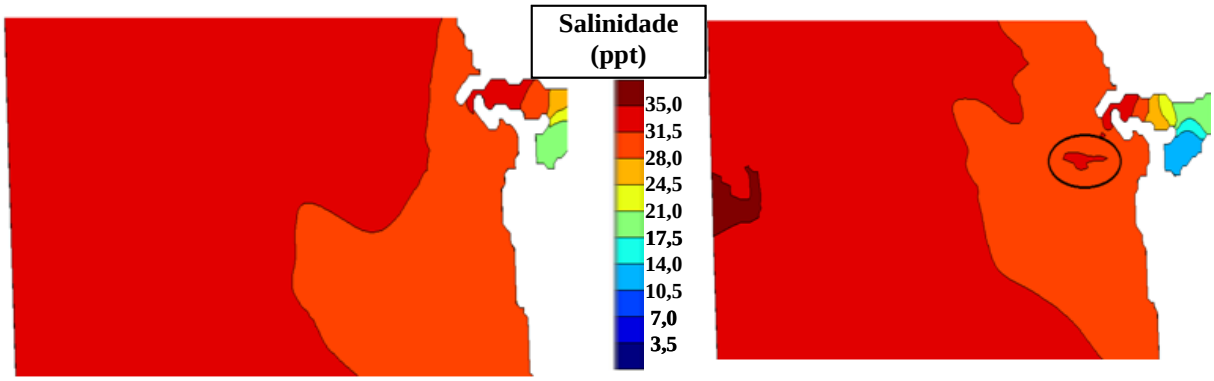


Figura 10: Salinidade na saída do estuário para o caudal de 100 m³/s (esquerda) e caudal de 200-800 m³/s (direita).

Na figura 11 apresenta-se a distribuição salina numa secção vertical segundo o eixo longitudinal do estuário evidenciado uma estratificação clara. Este tipo de distribuição resulta de condições de mistura complexas influenciadas pela forma do fundo do estuário associado à complexidade das correntes neste local.

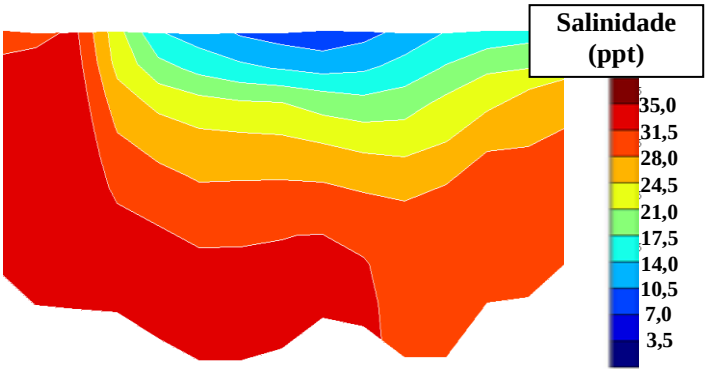


Figura 11: Salinidade entre a entrada do estuário (esquerda da imagem) e São Miguel-o-Anjo (direita da imagem) numa secção vertical (num instante da simulação do cenário de caudal fluvial variável entre 200 e 800 m³/s e maré viva).

Do conjunto de resultados obtidos infere-se que o caudal fluvial e o tipo de maré do oceano são fatores condicionantes da distância percorrida pela água salobra no interior do estuário. Caudais baixos associados ao mesmo tipo de maré (viva ou morta) facilitam a progressão da pluma salina para o interior do estuário, e durante a ocorrência de caudais elevados associados ao mesmo tipo de maré impedem essa mesma progressão. A maré viva permite uma maior intrusão salina. De acordo com os cenários simulados a pluma salina pode alcançar a ponte do Infante (PI) com valores da ordem dos 5 ppt na camada superficial (a PI fica a cerca de 7 Km da embocadura). Por outro lado se compararmos a progressão da pluma salina para o interior do estuário entre os cenários com rutura das estruturas da embocadura e aqueles em que se consideram as estruturas atuais verifica-se que não existem grandes diferenças.
A figura 12 representa as curvas de salinidade na entrada do estuário na penúltima camada (próxima do fundo) para todo o tempo de simulação para cenários de maré viva (esquerda) e maré morta (direita).

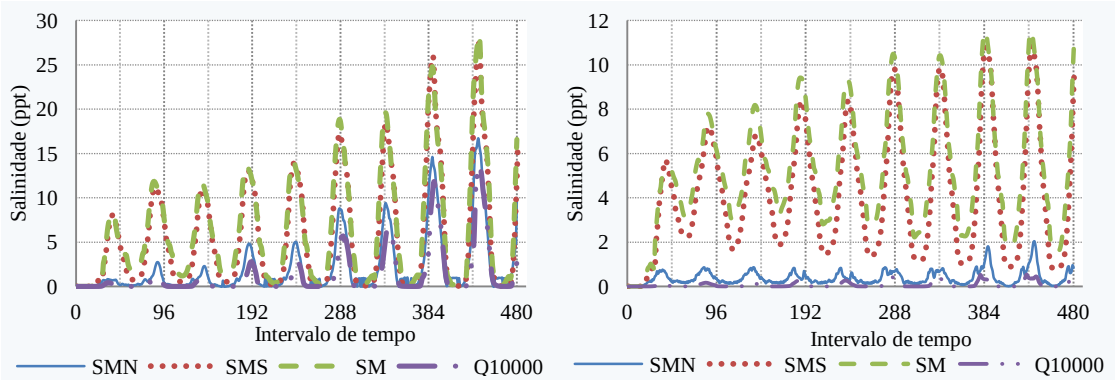


Figura 12: Variação da salinidade ao longo do tempo na penúltima camada na entrada do estuário para o caudal de 10000 m³/s e maré viva (esquerda) e maré morta (direita). SMN-Sem molhe norte: SMS-Sem quebra-mar: SM-Sem estruturas na embocadura: Q10000-Sem rutura dos molhes.

Este conjunto de gráficos evidencia que a curva sem molhe norte (SMN) comporta-se de forma muito semelhante à curva Q10000, enquanto a curva sem quebra-mar (SMS) se aproxima da curva sem molhes (SM). Este comportamento é mais notório no gráfico da direita, no entanto como se pode verificar no gráfico da esquerda à medida que a simulação avança no tempo as curvas SMN e Q10000 vão-se aproximando das curvas SMS e SM, isto acontece em todos os cenários simulados.

5. CONCLUSÕES

Da análise hidrodinâmica podemos depreender que a velocidade do escoamento depende de três fatores essenciais que são o caudal transportado pelo rio, o tipo de maré e das características geométricas do fundo e fronteiras. O caudal do rio e o tipo de maré por razões óbvias, isto é quanto maior for o caudal maior será a velocidade para uma mesma secção.
As condições de estratificação estão inteiramente dependentes das condições acima referidas, isto é, no estuário o processo de mistura das massas de água depende das condições

hidrodinâmicas. No interior do estuário podemos não ter salinidade se o caudal for suficientemente elevado, ou podemos ter salinidade caso o caudal não seja elevado e/ou as condições de maré tenham energia suficiente para transportar a água salgada para o interior do estuário o que acontece nas camadas mais profundas mesmo para caudais elevados. A distância à qual podemos encontrar valores de salinidade superiores a zero está inteiramente relacionada com o tipo de maré, caudal e geometria do estuário. Para os cenários considerados neste trabalho não se obteve valores de salinidade significativos muito distanciados da ponte do Infante, logo pode afirma-se que este será o limite para a progressão da pluma. Falta assinalar que a progressão da água salobra no interior do estuário tem a forma de cunha salina, isto é a intrusão salina nas camadas mais profundas é maior do que na superfície.

Da análise de rutura dos molhes podemos afirmar que do ponto de vista hidrodinâmico o molhe com menor influência em caso de colapso é o molhe norte, apresentando o quebra-mar influência mais significativa dentro dos cenários simulados e omitindo os efeitos da propagação da agitação de curto período temporal.

REFERÊNCIAS

[1] Balsinha, M.J., Santos, A.I., Alves, A.M.C., Oliveira. *Textual Composition of Sediments from Minho and Douro Estuaries (Portugal) and Its Relation with Hydrodynamics*. Journal of Coastal Research, 56, p. 1330-1334 (2009).

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

[3] Pinho, J.L.S. *Aplicação de modelação matemática ao estudo da hidrodinâmica e da qualidade da água em zonas costeiras*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho (2001).

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

[5] Deltares. *Delft3D-RGFGRID User Manual*, version 4.00. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands (2011).

[6] Deltares. *Delft3D-QUICKIN User Manual*, version 4.00. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands (2011).

[7] Deltares. *Delft3D-Flow User Manual*, version 3.15. Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands (2011).

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

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