

AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR NO ESTUÁRIO DO RIO DOURO EM DIFERENTES CENÁRIOS HIDRODINÂMICOS

João ALMEIDA¹; José L. S. PINHO²; Stênio S. VENÂNCIO³; José M. P. VIEIRA⁴

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Douro é a mais importante fonte sedimentar fluvial na costa NW Portuguesa. Durante as últimas décadas, verificou-se uma diminuição significativa de sedimentos principalmente devido à alteração das descargas fluviais, provocadas pela construção de barragens. O estuário superior é estreito e tem uma profundidade normalmente superior a 10 m. No estuário inferior a largura aumenta e a profundidade diminui, só ultrapassando os 10 m excepcionalmente no canal principal, o qual permanece confinado à margem norte. Na embocadura, está localizado o banco de areia do Cabedelo disposto perpendicularmente ao eixo do estuário, confinando o escoamento ao canal estreito junto à margem norte. O Cabedelo é um banco arenoso sendo a sua forma modulada pelo regime de agitação e pelo escoamento fluvial e pela maré. Em situações de cheia, para caudais da ordem dos 10000 m³/s o banco era galgado e destruído pelo escoamento, sendo reconstruído progressivamente pelo escoamento depois de terminada a cheia. Tem-se constatado que ao longo do tempo o banco de areia tem migrado para montante no estuário. Foi construído um modelo tridimensional morfodinâmico do estuário com o programa Delft3D, constituído por 12267 células de cálculo por camada, tendo-se utilizado dez camadas na discretização vertical. Apresentam-se os resultados para a dinâmica sedimentar em função das condicionantes hidrodinâmicas como o caudal fluvial e a amplitude da maré. A descarga fluvial apresenta-se como fator chave para a exportação de sedimentos para a plataforma costeira, sendo que nos cenários de cheia a morfologia do estuário é completamente modificada. Os resultados obtidos são naturalmente condicionados pelas características dimensionais dos sedimentos transportados.

Palavras – chave: modelação morfodinâmica, estuário do rio Douro, transporte sedimentar, Delft3D.

¹Mestre e Engenheiro Civil; Departamento de Engenharia Civil - Universidade do Minho; Campus de Gualtar 4704-553 Braga, Portugal; a54214@alunos.uminho.pt, Telefone: +351 253604720.

²Doutor e Professor Auxiliar; Departamento de Engenharia Civil - Universidade do Minho; Campus de Gualtar 4704-553 Braga, Portugal; jpinho@civil.uminho.pt, Telefone: +351 253604720.

³Doutor e Professor Adjunto; Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal do Triângulo Mineiro; Av. Doutor Randolpho Borges Junior n.1250, Univerdecidade, 38064-200 Uberaba, Brazil; stenio@civil.uftm.edu.br, Telefone: +055 34 3318-5600.

⁴Doutor e Professor Catedrático; Departamento de Engenharia Civil - Universidade do Minho; Campus de Gualtar 4704-553 Braga, Portugal; jvieira@civil.uminho.pt, Telefone: +351 253604722.

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos fundos em zonas costeiras é composta por sedimentos, com predominância de areias junto à costa, e de siltes e argilas em estuários e lagunas. Este material é frequentemente transportado pelas correntes e pelas ondas, originando variações morfológicas dos fundos. Em particular, podem ocorrer erosões e acreções significativas em estuários, lagunas, praias, embocaduras e outras zonas costeiras, que necessitam de ser quantificadas e, por vezes, corrigidas por soluções de engenharia por forma a permitir os usos estabelecidos para aqueles sistemas costeiros.

A capacidade de previsão da dinâmica sedimentar e das variações morfológicas é, assim, um elemento fundamental para uma gestão adequada das zonas costeiras. As principais aplicações, que advêm do seu estudo são, a quantificação de taxas de erosão e acumulação em estuários e bacias portuárias, previsão da evolução da linha de costa, alimentação artificial de praias, estudo de obras de defesa costeira, regularização de embocaduras lagunares e a definição de dragagens e de planos de imersão de dragados (Fortunato, 2011).

A modelação matemática da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar de sistemas estuarinos e costeiros, constitui uma ferramenta de enorme valia uma vez que estes processos envolvem uma grande diversidade de variáveis, condicionadas pela atuação da maré, vento, agitação marítima, correntes oceânicas e descargas fluviais, entre muitas outras.

A bacia hidrográfica do rio Douro constitui uma das principais fontes sedimentares afluentes à costa NO Portuguesa. O estuário é o sistema onde se processam as trocas entre o meio fluvial e a zona costeira adjacente, pelo que a correta quantificação do caudal sólido transportado neste sistema apresenta uma importância crucial para a compreensão dos fluxos e balanços sedimentares instalados nesta região necessários à sua correta gestão e planeamento.

O estuário apresenta um desenvolvimento com cerca de 22 km, sendo a propagação da maré limitada a montante pela barragem de Crestuma, conforme mostrado na Figura 1, que também apresenta a grelha computacional e os pontos de monitorização utilizados na calibração do modelo. As cidades do Porto e de Vila Nova de Gaia situam-se, respetivamente, nas margens norte e sul da parte terminal do estuário. Em ambas as cidades, as zonas ribeirinhas apresentam registos de inundações devidas às características do estuário e da bacia de drenagem do rio. O caudal médio anual num ano típico na barragem de Crestuma situa-se em torno dos 450 m³/s, sendo de 700 m³/s e de 200 m³/s para anos húmidos e secos, respetivamente. Este caudal apresenta uma marcada variabilidade entre os meses de Inverno e os de Verão, podendo em situações de cheia exceder os 10 000 m³/s (INAG, 2000).

Em termos de mistura vertical, o estuário pode normalmente ser considerado como verticalmente homogéneo, apresentando no entanto uma cunha salina em situações de caudal elevado. Para condições médias, o estuário é parcialmente misturado com uma modulação na estratificação de marés vivas a mortas (Azevedo et al., 2008).

Em Neves *et al.* (2008) foram apresentados modelos bidimensionais do estuário cuja geometria foi definida com base na situação anterior à construção do quebra-mar e do prolongamento do molhe norte na zona da embocadura do estuário, tendo permitido a caracterização dos padrões hidrodinâmicos para as duas situações na embocadura.

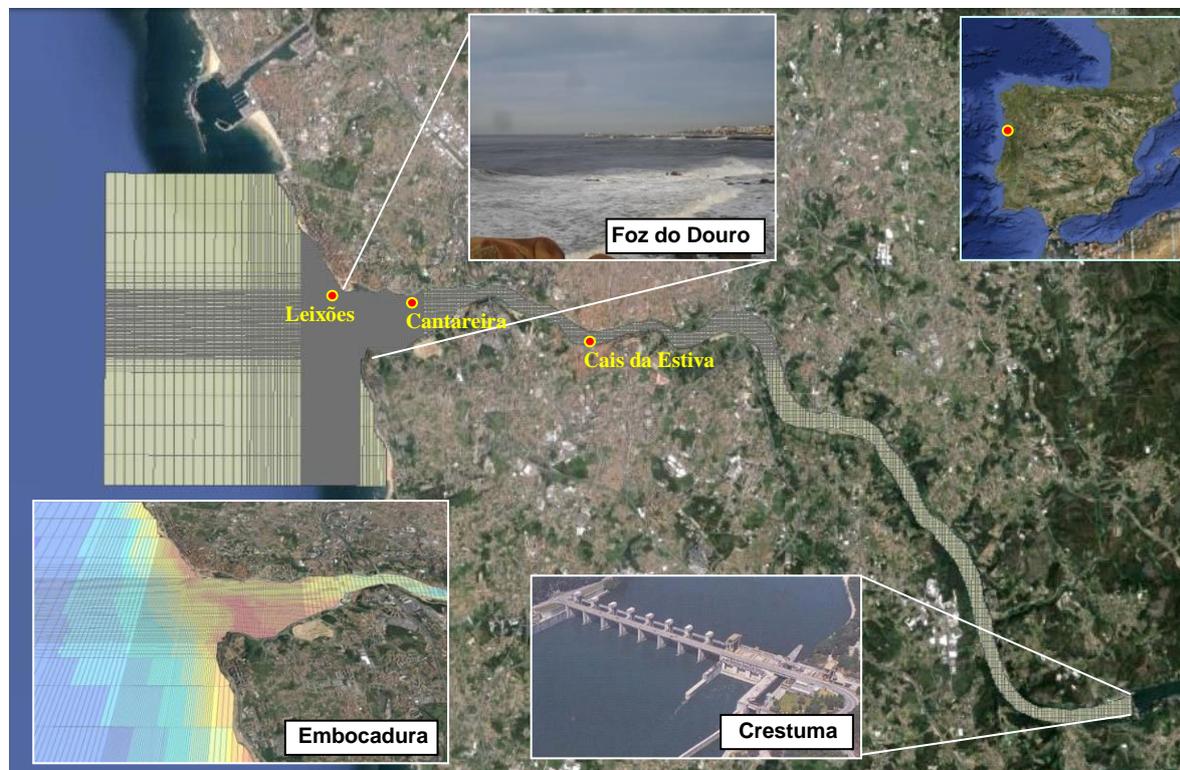


Figura 1. Estuário do rio Douro: localização, grelha utilizada no modelo tridimensional e pontos de monitorização.

Portela (2008) analisa dados de dragagem, levantamentos hidrográficos e utiliza ferramentas de modelação para avaliar alterações morfológicas e de transporte de sedimentos no estuário do rio Douro. Conclui que o transporte sedimentar no período analisado (20 anos) foi muito influenciado pela abertura e manutenção do canal de navegação, indicando ainda que a capacidade de transporte pelas correntes de maré é muito limitada, sendo as cheias fluviais os eventos responsáveis pela capacidade de transporte mais significativa e alimentação da costa.

Pinho *et al.* (2010) apresenta modelos bidimensionais que permitiram analisar as alterações dos padrões hidrodinâmicos resultantes das alterações geométricas introduzidas pelas obras da embocadura e resultados sobre condições de propagação da frente salina e padrões de acumulação e erosão no estuário. As obras da embocadura alteraram a forma das áreas de acumulação e erosão na sua zona de implantação e áreas adjacentes. Dada a importância atribuída aos caudais sólidos do rio Douro, é expectável a ocorrência de modificações na morfodinâmica deste segmento, com eventuais repercussões na forma de propagação da agitação marinha decorrentes das alterações do fundo.

A evolução morfodinâmica da restinga tem sido objeto de monitorização (Bastos *et al.*, 2012) e os resultados indicam que a instabilidade na parte sudeste do banco de areia pode representar uma ameaça para a reserva natural local existente por ela defendida. O tamanho e a forma variável do banco de areia causaram incómodo frequente no passado para a navegação, afetando a largura e profundidade do canal de navegação, pelo que para melhorar a segurança da navegação, entre 2004 e 2008 foi construído um quebra-mar para estabilizar o banco de areia.

Este trabalho teve como objetivo principal a construção de um modelo hidrodinâmico tridimensional implementado com o auxílio do programa Delft3D que permite simular e caracterizar padrões de circulação em situações normais ou de cheia, e padrões de erosão e acumulação para o estuário do rio Douro. Pretendeu-se avaliar a resposta de curto e médio prazo do processo de erosão/acumulação, na embocadura do estuário, em cenários que contemplam o efeito da maré, do caudal fluvial e as características afluência de sedimentos.

2. METODOLOGIA

2.1 Programa Delft3D

O programa Delft3D é composto por um conjunto de módulos, com capacidade de simulação de um conjunto diversificado de problemas associados a massas de águas superficiais. Apresenta uma estrutura flexível que simula escoamentos em duas ou três dimensões, assim como propagação da agitação, qualidade da água, transporte de sedimentos e morfodinâmica.

As condições hidrodinâmicas (velocidade, níveis, densidade, temperatura e salinidade.) calculadas pelo módulo Delft3D-Flow são utilizadas como dados de entrada nos restantes módulos. Utiliza para resolução numérica das equações em que se baseia o método das diferenças finitas e grelhas curvilíneas. A discretização vertical utilizada neste trabalho foi a coordenada sigma, evitando assim que os elementos da malha intercetem a topografia do fundo. É contudo possível adotar outras opções em termos de coordenadas verticais. O modelo tem por hipótese as seguintes aproximações usuais aplicadas para regiões de águas pouco profundas: a variação longitudinal do campo de densidade é considerada no cálculo da componente baroclínica da força de gradiente de pressão, através da aproximação de Boussinesq; condição de não escorregamento é assumida no fundo do estuário (Andutta, 2011).

O módulo Delft3D-MOR utiliza resultados da hidrodinâmica associada a ondas e correntes para simular o transporte de sedimentos e evolução morfológica da batimetria. Foi concebido para simular o comportamento morfodinâmico de rios, estuários e zonas costeiras em escalas de tempo de dias a anos, devido às complexas interações entre as ondas, correntes, transporte de sedimentos, e batimetria. Para o cálculo do transporte em suspensão, e transporte de fundo são utilizadas as equações de Van Rijn, Engelund-Hansen, Meyer-Peter-Muller, Bijker, e Bailard (Tomlinson, 2006).

2.2 Formulação matemática

As equações básicas que regem o modelo são descritas a seguir na sua forma tridimensional (Delft3d-FLOW, 2011). O escoamento hidrodinâmico é resolvido pela equação da continuidade (1) combinada com as equações de conservação da quantidade de movimento (2 e 3), permitindo simular a evolução temporal de velocidades e níveis de água sobre o domínio espacial. As flutuações de velocidade são tratadas pela incorporação de modelos de turbulência.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = H(q_{in} - q_{out}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv \\ = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + fu \\ = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3)$$

onde u, v, ω são as componentes de velocidade (m/s); $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ e $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ são coeficientes para transformar a grelha curvilínea em retangular (m); ξ, η são as coordenadas curvilíneas na direção horizontal; σ é a coordenada segundo a direção vertical ($\sigma = 0$ para superfície e $\sigma = -1$ para o fundo); f é o parâmetro de Coriolis (s^{-1}); $H = d + \zeta$ é a profundidade da água total (m), d é a profundidade da água abaixo do plano de referência (m), ζ é a profundidade da água acima do plano de referência (m); q_{in} e q_{out} representam, respetivamente, as fontes e sumidouros por unidade de volume ($1/s$); ρ_0 é a massa volúmica da água (Kg/m^3); P_ξ e P_η são os gradientes de pressão hidrostática ($Kg/m^2 \cdot s^2$); F_ξ e F_η representam o desequilíbrio horizontal das tensões de Reynold's (m/s^2); M_ξ e M_η são as fontes ou sumidouros de impulso (m/s^2); ν_V é a viscosidade turbulenta vertical (m^2/s).

Para a solução da morfodinâmica, o transporte de sedimentos no modelo baseia-se na equação de advecção-difusão (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(l)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(l)}}{\partial y} + \frac{\partial (\omega - w_s^{(l)})c^{(l)}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial y} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z}^{(l)} \frac{\partial c^{(l)}}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

onde $c^{(l)}$ é a concentração da fracção de sedimentos (l) (Kg/m^3); $\varepsilon_{s,x}$, $\varepsilon_{s,y}$ e $\varepsilon_{s,z}$ são os coeficientes de difusividade da fracção de sedimentos (l) (m^2/s); $w_s^{(l)}$ é a velocidade de sedimentação da fracção de sedimentos (l) (m/s). A velocidade de sedimentação, assim como os fluxos de erosão e acumulação, podem ser calculados segundo a formulação de

Ariathurai-Partheniades (Partheniades, 1965 ; Ariathurai, 1974), para sedimentos coesivos, e pela aplicação do método de Rijn (1993), para sedimentos não coesivos.

As equações hidrodinâmicas e morfodinâmicas podem ser formuladas em coordenadas esféricas, ortogonais curvilíneas ou retangulares.

2.3 Cenários simulados

Para a avaliação da resposta dos padrões morfodinâmicos simulados na embocadura, foram contemplados três parâmetros intervenientes neste processo: caudal fluvial a partir da albufeira de Crestuma (problema 1), efeito da maré (problema 2) e influência da dimensão dos sedimentos (problema 3). Assim, para o problema 1, avalia-se a erosão/deposição verificadas no estuário sob influência de diferentes caudais típicos de Crestuma, que são agrupados em seis cenários distintos (cenários de 1 a 6) com as respetivas concentrações de sedimentos, mantendo-se invariável o tipo de maré (média) e dimensão de sedimentos. O mesmo procedimento é repetido para os problemas 2 (cenários 7 e 8) e 3 (cenários 9 e 10), que avaliam a influência da maré e dimensão do sedimento, respetivamente, mantendo constante, para este efeito, os outros parâmetros não avaliados no problema específico. Os problemas e cenários considerados nas simulações são apresentados na Tabela 1, para simulações de curto e médio prazo.

Tabela 1. Cenários da modelação

Problema em análise	Cenário	Tipo de maré	Caudal (m ³ /s)	Diâmetro médio de sedimento D50 (µm)	Concentração sedimentos Crestuma (kg/m ³)	Período simulado
1 – Análise da morfodinâmica (caudal)	1	Intermédia	200	200	0,1	2 dias
	2	Intermédia	450	200	0,5	2 dias
	3	Intermédia	700	200	1	2 dias
	4	Intermédia	10000	200	5	2 dias
	5	Intermédia	450	200	0,5	1 ano
	6	Intermédia	450	200	0,5	10 anos
2 – Análise da morfodinâmica (maré)	7	Maré viva	450	200	0,5	2 dias
	8	Maré morta	450	200	0,5	2 dias
3 – Análise da morfodinâmica (dimensão de sedimento)	9	Intermédia	450	750	0,5	2 dias
	10	Intermédia	450	375	0,5	2 dias

Os caudais considerados representam o valor médio anual descarregado pela barragem de Crestuma (INAG, 2000), assim como as suas variações típicas. Na construção do modelo hidráulico, estes valores foram considerados na fronteira de montante, tendo sido adotadas para a fronteira de jusante diferentes situações de maré (vivas, mortas e intermédias) de acordo com o registo no marégrafo do porto de Leixões (INAG, 2000). Foi considerada a maré viva ocorrida entre 29 e 31 de março de 2002, a maré morta e intermédia de 8 a 10 de

janeiro de 2010 e de 2 a 4 de janeiro de 2000, respetivamente. Um valor constante de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ foi adotado para a viscosidade turbulenta e para a difusividade turbulenta horizontal. Já as componentes verticais foram obtidas pelo modelo de turbulência $k - \varepsilon$. As características dos sedimentos foram definidas com base na referência SNIRH (2013), para rios portugueses e o trabalho de Hickin (1995), além de inspeções “*in loco*”. O parâmetro de resistência adotado foi o coeficiente de Manning, que assumiu o valor de $0,033 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$. Este valor corresponde a canais com leito arenoso e lodoso e paredes laterais em pedra, o que se aproxima às características gerais do estuário do rio Douro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Calibração

A calibração de um modelo morfodinâmico como aquele que foi implementado no âmbito deste trabalho exige um conjunto de dados sedimentológicos cuja obtenção requiere levantamentos frequentes que atualmente não estão disponíveis. Na calibração do módulo hidrodinâmico foram utilizados dados de nível de maré (Mimoso, 1995) para três locais distintos: Leixões, Cantareira e Cais da Estiva, cujas localizações foram destacadas anteriormente na Figura 1. A calibração obtida para níveis de maré medidos e simulados, nas três estações distintas, apontou para uma correlação próxima da unidade, o que demonstra uma boa convergência e robustez do modelo na simulação dos níveis de maré. Além disso, a parametrização utilizou diferentes coeficientes de aferição, confirmando a baixa discrepância entre os valores medidos de maré e aqueles registrados pela simulação. Os resultados da calibração hidrodinâmica são apresentados na Figura 2.

Contudo os resultados de campanhas de medição de velocidades e elevação de maré, utilizados no âmbito da calibração hidrodinâmica, são anteriores à construção do quebra-mar destacado na embocadura. Face à indisponibilidade dos dados hidro-sedimentológicos pós construção do quebra-mar, os resultados aqui apresentados procuram identificar as variáveis determinantes na definição dos padrões de erosão e acumulação no estuário, dando-se especial atenção aos resultados obtidos na embocadura e discutindo-os do ponto de vista qualitativo. Procura-se no entanto quantificar as características de transporte sedimentar sempre que possível.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados obtidos para o módulo da velocidade média segundo a profundidade no cenário de cheia simulado (cenário 4) e cujos valores são da ordem de grandeza de valores obtidos noutros trabalhos (ex. Neves et al., 2008).

As características hidrodinâmicas observadas evidenciam o predomínio do escoamento de montante, resultante das descargas a partir de Crestuma, com valores de velocidade expressivos, inclusive na região da embocadura, que é o objeto de análise deste estudo particular. Este cenário pode conduzir para a elevação da taxa de concentração de sedimentos suspensos ao longo do estuário que, por sua vez, poderá interferir na intensificação ou diminuição do processo de erosão/sedimentação.

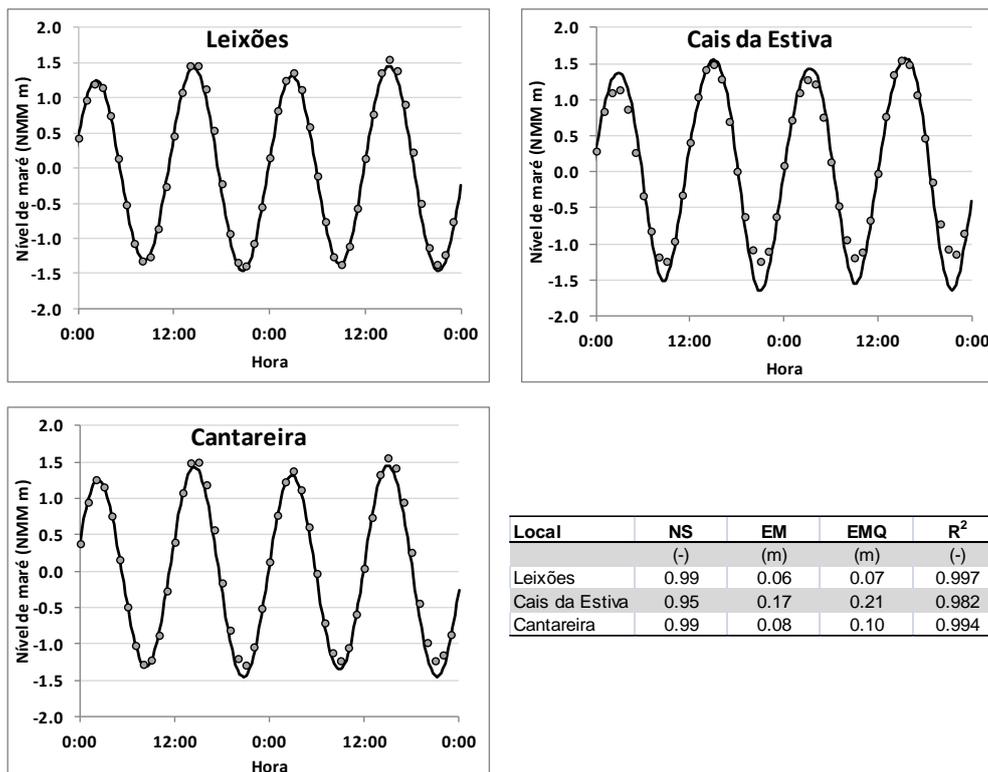


Figura 2. Comparação de resultados entre valores observados no período de 21 a 22 de Setembro de 1994 e valores simulados no programa Delft3D. Valores de diferentes coeficientes de aferição do ajuste conseguido: Nash-Sutcliffe (NS), erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ) e coeficiente de correlação (R²).

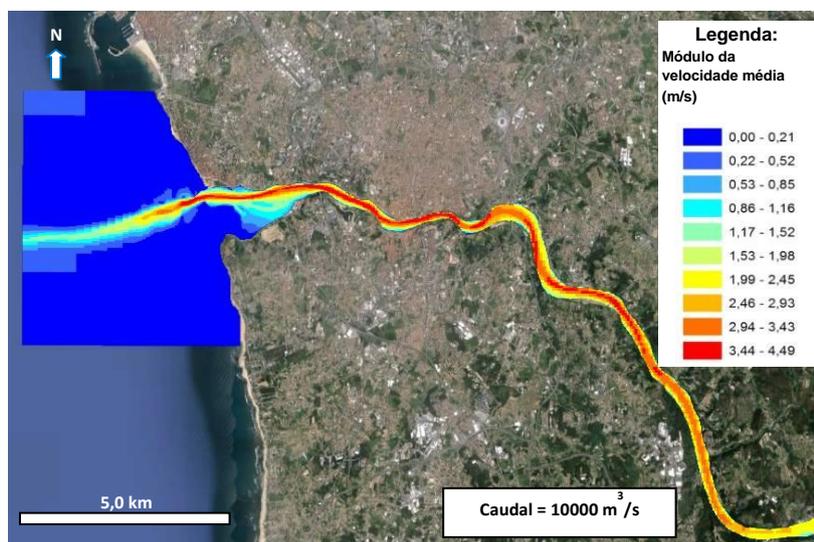


Figura 3. Resultados do módulo da velocidade média segundo a direção vertical para um caudal de cheia (cenário 4).

3.2 Influência do caudal fluvial e concentração de sedimentos

Os resultados apresentados na Figura 4 mostram a influência do caudal fluvial e respetiva concentração de sedimentos na dimensão e forma do delta de vazante formado a jusante da embocadura do rio Douro. Este delta apresenta naturalmente uma área crescente com o caudal fluvial atingindo uma extensão segundo a direção este-oeste de cerca de 2 km, para os sedimentos de dimensão 0,2 mm considerados nas simulações e para o caudal médio diário anual máximo de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ (característico de anos húmidos). Outro aspeto importante evidenciado pelos resultados apresentados no ponto P4 é que para o sedimento não coesivo simulado não existe transporte na direção do interior do estuário durante a enchente conforme se constata pela evolução representada no gráfico relativo ao referido ponto. É importante destacar também que apesar da elevação da concentração de sólidos suspensos ser diretamente proporcional a elevação do caudal em Crestuma, não se pode afirmar que a sedimentação obedece a mesma ordem de grandeza. Isto porque a magnitude, turbulência e oscilação da direção do escoamento, além das cargas de campo geradas pelo contato dos sedimentos, poderão mantê-los em suspensão.

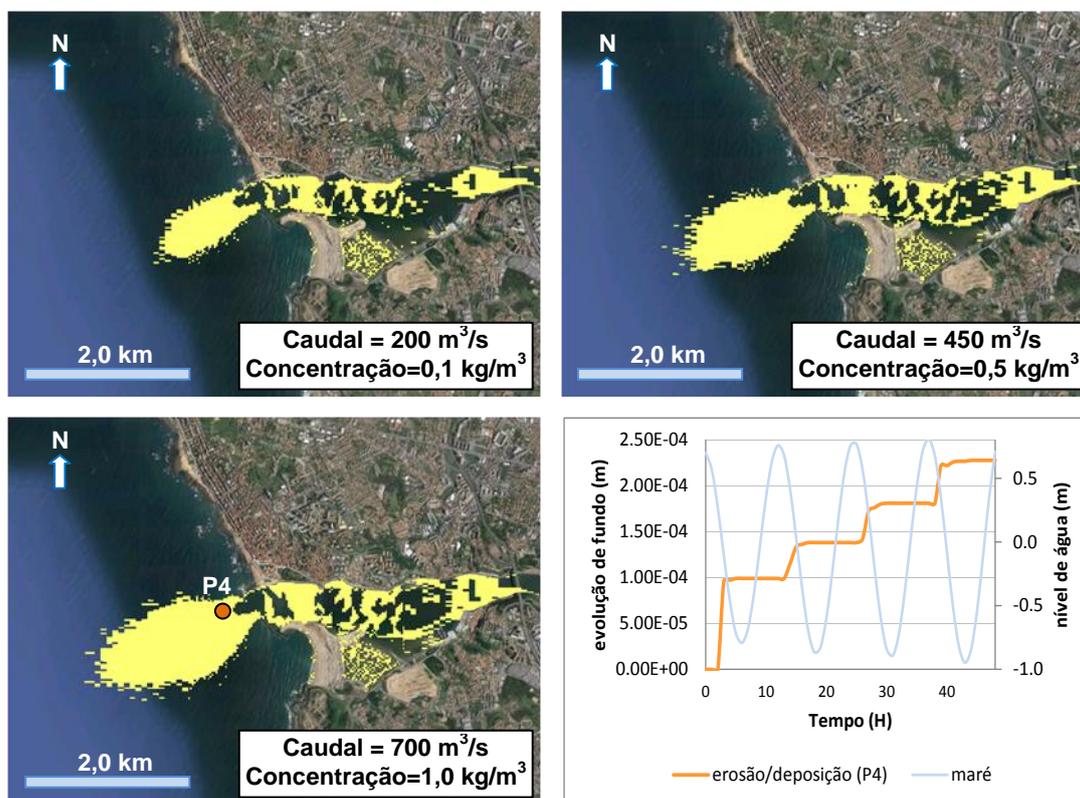


Figura 4. Áreas de acumulação para diferentes caudais fluviais (cenários 1 a 3) e evolução da acumulação na localização P4 para o cenário 3.

Os padrões morfodinâmicos associados a condições de caudais fluviais médios são completamente alterados em situações de cheia. Na Figura 5 apresenta-se a evolução do fundo para uma cheia de valor da ordem de grandeza associada a um período de retorno de 10 anos (Portela, 2008).

Ao fim de 2 horas a acumulação no delta de vazante apresenta valores no intervalo de 10 a 60 cm, muito superiores aos valores obtidos em condições médias para o mesmo período para o máximo caudal médio considerado (Figura 3).

Considerando as condições adotadas nas simulações verifica-se que para cheias com duração de 5 horas podem ocorrer acumulações da ordem de 1 m e para cheias com duração de 11 horas atingem-se valores de 2 m.

A erosão verificada nas regiões mais estreitas da embocadura atinge também valores elevados. Salienta-se no entanto, que face à ausência de informação sobre a composição e profundidade dos sedimentos acumulados nestas zonas foi considerado um estrato de composição uniforme e profundidade superior ao valor máximo erodido, ignorando-se a real posição do estrato rochoso.

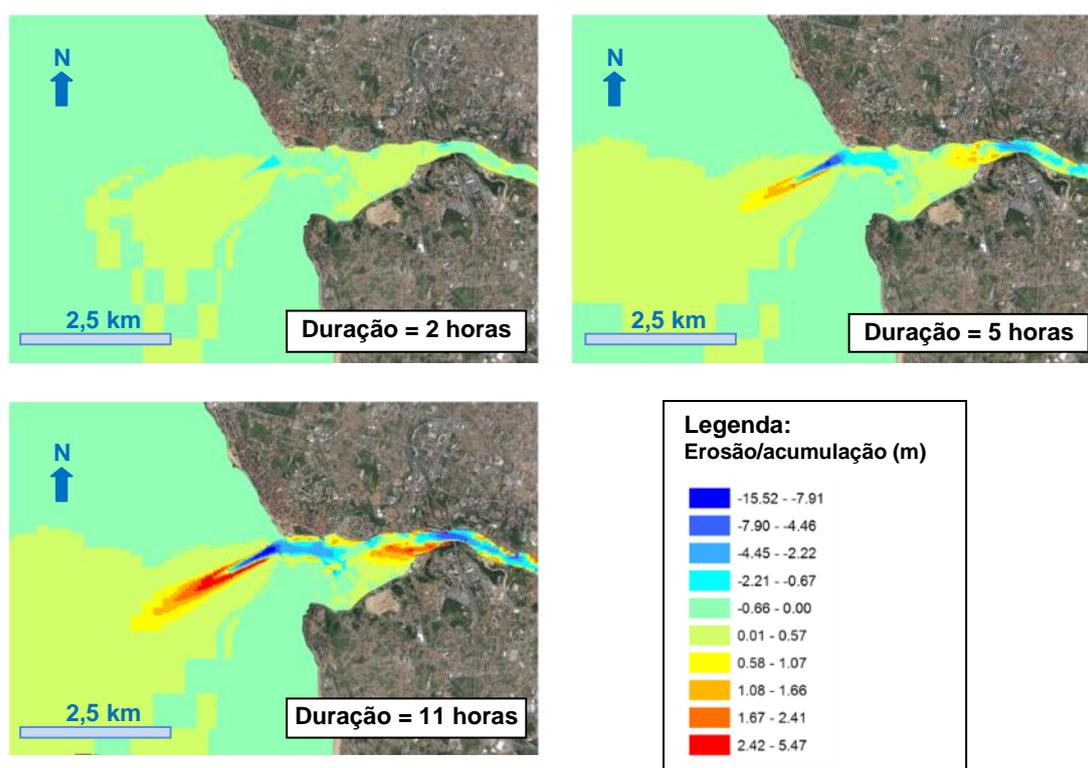


Figura 5. Áreas de erosão/acumulação para caudal de cheia (cenário 4) com diferentes durações.

3.3 Influência da maré

Para se avaliar o impacto das diferentes amplitudes de maré no transporte sedimentar são apresentados na Figura 6 os valores da acumulação na embocadura para sedimentos não coesivos, no final de uma simulação com duração de dois dias, para o caso de uma maré viva e de uma maré morta, com um caudal fluvial constante de 450 m³/s.

É notória a influência da amplitude de maré na extensão e intensidade da acumulação no delta de vazante. Quanto maior for o valor da amplitude de maré maior será o valor da

acumulação. As diferenças encontradas resultam das maiores intensidades da corrente durante a vazante de marés vivas.

O valor máximo de acumulação que ocorre a jusante do estrangulamento do quebra-mar (ponto P4) destacado durante uma maré viva é cerca de 10 vezes superior ao obtido em maré morta nas condições simuladas. Estes resultados evidenciam a importância da amplitude de maré nos padrões de erosão/acumulação na proximidade da embocadura.

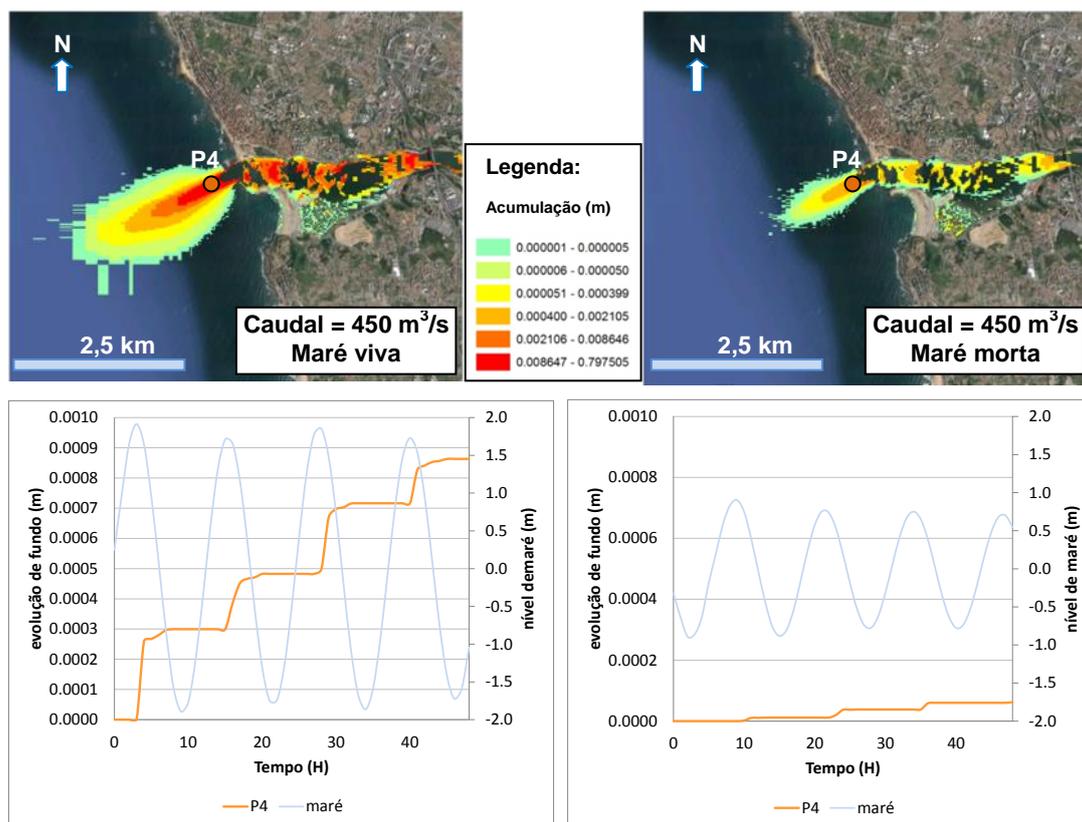


Figura 6. Áreas de acumulação para diferentes amplitudes de maré (cenários 7 e 8) e evolução da acumulação na localização P4.

3.4 Influência da dimensão dos sedimentos

Nas simulações realizadas efetuou-se análise de sensibilidade dos resultados à variação da dimensão dos sedimentos, tendo sido consideradas areias finas, médias e grosseira. Na Figura 7 apresentam-se os resultados dos padrões de acumulação verificados na embocadura. O delta de vazante apresenta-se com uma configuração alongada segundo a direção do canal principal delimitado pelas estruturas da embocadura no caso dos sedimentos mais grosseiros. A área de acumulação aumenta à medida que os sedimentos se tornam mais finos, como é expectável que aconteça quando se mantém as condições hidrodinâmicas responsáveis pelo transporte sedimentar.

Das simulações realizadas verifica-se ainda que à medida que o diâmetro médio dos sedimentos aumenta os valores da componente de transporte de sedimentos no fundo vão aumentando e em contrapartida os valores da componente de transporte em suspensão vão diminuindo (resultados não discriminados neste trabalho).

Também nestas simulações se verifica que apenas ocorre acumulação durante o período de vazante do estuário. Os valores máximos de erosão e de acumulação também ocorrem na proximidade do quebra-mar, local onde se obtêm os máximos valores de velocidade de escoamento. Verificou-se um valor máximo de erosão de 0,0096 m para $D_{50} = 200 \mu\text{m}$, 0,0086 m para $D_{50} = 375 \mu\text{m}$, e 0,0067 m para $D_{50} = 750 \mu\text{m}$, ao fim de dois dias nas condições simuladas. A acumulação máxima atingiu um valor de 0,0060 m para um $D_{50} = 200 \mu\text{m}$, 0,0053 m para $D_{50} = 375 \mu\text{m}$, e 0,0045 m para $D_{50} = 750 \mu\text{m}$.

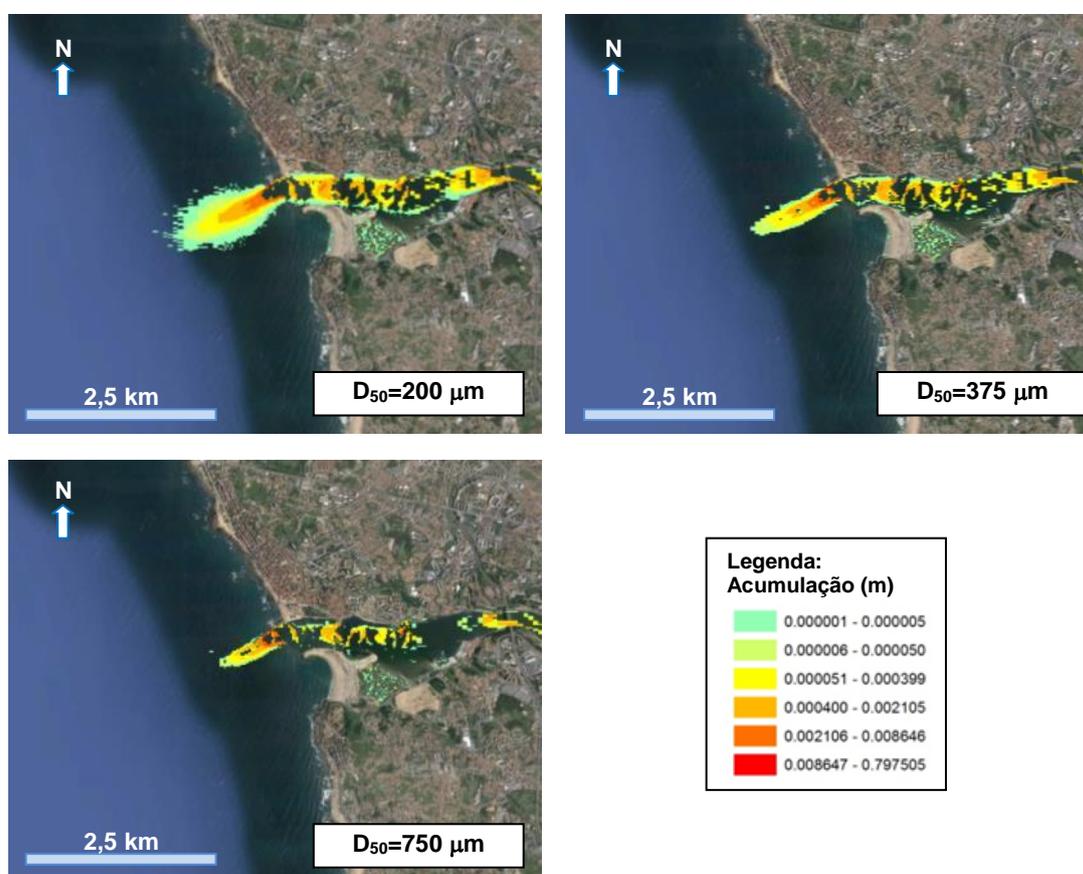


Figura 7. Áreas de acumulação considerando diferentes dimensões do sedimento (cenários 2, 9 e 10).

4. CONCLUSÕES

Do trabalho de modelação realizado pode-se afirmar que as condições de escoamento no estuário do rio Douro dependem com maior relevância de dois fatores: (i) o caudal descarregado pela barragem de Crestuma, e (ii) o tipo de maré que atua no estuário.

Os valores mais elevados da velocidade ocorrem no canal da embocadura do estuário formado pelo molhe norte e pelo quebra-mar destacado, enquanto na área protegida pela restinga as velocidades são muito próximas do valor nulo. Constatou-se ainda que não ocorre a inversão do sentido de escoamento durante a ocorrência de marés vivas, para caudais fluviais superiores a 1200 m³/s, e durante a ocorrência de marés mortas para caudais fluviais superiores a 700 m³/s. Salienta-se ainda que o nível da água atinge valores próximo da cota da crista da restinga para o caudal de cheia simulada de 10000 m³/s.

O caudal fluvial apresenta-se como fator mais relevante para o transporte sedimentar ao longo do estuário e determinante para as condições de exportação de sedimentos para a plataforma costeira. Durante a ocorrência de eventos de cheia a morfologia de fundo do estuário é completamente alterada, devido às elevadas velocidades do escoamento que lhe estão associadas. Os resultados da erosão e acumulação de sedimentos são também condicionados pelas características dos sedimentos não coesivos afluentes ao estuário. Os valores mais elevados de erosão ocorrem na mesma zona em que ocorrem os valores mais elevados de velocidades da corrente, junto ao quebra-mar destacado.

O transporte sedimentar é feito predominantemente em direção ao mar para todos os cenários considerados, e é visível a existência de erosão localizada a montante do quebra-mar destacado, seguido de uma acumulação de sedimentos formando um banco de areia a jusante deste, que se vai extinguindo à medida que se avança em direção ao oceano.

Este delta de vazante apresenta uma extensão de cerca de 2 km nas condições simuladas neste trabalho para caudais fluviais médios, sendo expectável a acumulação dos sedimentos mais grosseiros a jusante da extremidade do molhe norte numa extensão de largura idêntica à do canal de entrada. Durante a ocorrência de cheias a acumulação de sedimentos transportados para o oceano apresenta extensões muito superiores dependendo da duração da cheia.

Os resultados apresentados neste artigo correspondem a uma fase inicial de um estudo mais extenso em que para além do modelo morfodinâmico do estuário se irá integrar um modelo hidrológico/hidrodinâmico que permitirá simular os caudais afluentes ao estuário e na embocadura será considerado o efeito da agitação no transporte sedimentar. Contudo, pelos resultados obtidos na simulação, pode-se concluir sobre a importância das regras de operação em Crestuma para as consequências morfodinâmicas no estuário, inclusive na embocadura, além de permitir atuar como indicador para a definição de pontos monitorização.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Administração do Porto do Douro e Leixões (APDL) pela cedência de dados batimétricos do estuário do rio Douro e ao CNPq pela bolsa (Processo 200016/2014-8) de pós-doutoramento concedida ao 3º autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andutta, F. P. (2011). O Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe (Bahia): Observações, simulações, tempo de residência e processos difusivos e advectivo. *Tese de doutoramento*. São Paulo: Tese de doutoramento, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- Ariathurai C. R. (1974). A finite element model for sediment transport in estuaries. Ph.D. Thesis, University of California, Davis.
- 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., Granja, H., & Silva, A. J. (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, 53-69.
- Delft3D-FLOW (2011). User Manual - Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Deltares, Netherlands. 674p.
- Fortunato, A. LNEC (2011). <http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec>. (acedido a 20 Dezembro 2012).
- Hickin, E. J. (1995). River geomorphology. 1st Ed. Universidade da Califórnia. Wiley.
- Mimoso, P. (1995). Campanha hidromorfológica para o estudo da barra do Douro. Instituto Hidrográfico. Lisboa.
- Neves, D.R.C.B.; Pinho, J.L.S.; Vieira, J. M. P. (2008). Modelação Matemática da Hidrodinâmica e Intrusão Salina no Estuário do Rio Douro. 9º Congresso da Água. Cascais, Portugal.
- Partheniades E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division Proceedings of the ASCE*, Vol. 91, No. HY1, pp. 105–139.
- Pinho, J.L.S.; Vieira, J. M. P.; Neves, D.R.C.B. (2010). Efeito das obras da embocadura na hidrodinâmica, intrusão salina e dinâmica sedimentar do estuário do Rio Douro. 10º Congresso da Água. Alvor, Portugal.
- Portela, L. I. (2008). Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. *Geo-Marine Letters* 28, pp. 77-86.
- Rijn V. L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, Estuaries and Coastal Seas. Amsterdam. Aqua Publications.
- SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (2013). <http://www.snirh.pt>. (acedido a 20 Fevereiro 2013).
- Tomlinson, R. (2006). Investigation of Ebb Tidal Deltas using a Numerical Model at the Moveable Bed Physical Model Scale. Griffith University.