



SIMULAÇÃO NUMÉRICA MORFODINÂMICA DO ESTUÁRIO DO RIO LIMA, PARA PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES DE GESTÃO DO ASSOREAMENTO

José Rafael Coelho ¹; Stênio Venâncio ^{1,2}; José Luís Pinho ¹; José Manuel Vieira ¹

RESUMO – A bacia hidrográfica do rio Lima, localizada no norte de Portugal, é relativamente pequena e com pouca intervenção antropogênica. A construção das barragens de Touvedo e Alto Lindoso, apesar de controlarem as cheias em vila de Ponte de Lima e na cidade de Viana do Castelo, provocaram alterações nas condições naturais do escoamento fluvial, atenuando as vazões máximas no estuário. Além disso, a construção das obras portuárias provocou alteração da dinâmica sedimentar para a plataforma costeira. Durante as últimas décadas, verifica-se uma acumulação de sedimentos na zona estuarina, principalmente na zona do canal de navegação, obrigando a administração do Porto de Viana do Castelo a efetuar frequentes dragagens após as épocas de cheia. Nesta zona, é possível observar acumulações de areia, designadas por ínsuas, que mantêm a forma mesmo após os eventos de cheia. Para o estudo do problema do assoreamento na zona do canal de navegação, foi construído um modelo tridimensional morfodinâmico do estuário, utilizando o programa Delft3D. Diferentes cenários foram simulados a partir do processo de calibração e validação do modelo, envolvendo campanhas de monitoramento de nível de água. As análises contemplaram a inclusão de estruturas rígidas para minimizar o problema do assoreamento na embocadura (identificação dos locais de erosão e deposição), decorrendo em função das condicionantes hidrodinâmicas (vazão fluvial e amplitude da maré) e morfodinâmicas (dimensão média dos sedimentos, D50). Observou-se que a vazão fluvial, quando conjugada com um período de maré viva, apresenta uma maior capacidade de erosão e transporte sedimentar. Os resultados mostraram que quanto maior a vazão fluvial e a amplitude da maré maior será a intensidade dos processos de dinâmica sedimentar. As análises morfodinâmicas contendo propostas de estruturas na zona portuária, apontaram para um assoreamento mais intenso e localizado para o tipo de estrutura transversal ao leito do estuário, apontando como uma alternativa viável, com impacto positivo direto para a navegação e gestão das dragagens.

Palavras-Chave – modelo numérico morfodinâmico, estuário do Rio Lima, Delft3D.

1) Centro de Território, Ambiente e Construção (CTAC), Escola de Engenharia da Universidade do Minho, e-mails: a65122@alunos.uminho.pt, jpinho@civil.uminho.pt, stenio.venancio@uftm.edu.br, jvieira@civil.uminho.pt, telefone: +351 253 510 200 (517 206)

2) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, email: stenio.venancio@uftm.edu.br, telefone: +55 034 3700 6000



1 - INTRODUÇÃO

A costa noroeste da Península Ibérica encontra-se principalmente num estado de déficit sedimentar. Esta situação resulta da deriva longitudinal norte-sul, impulsionada pelo clima de onda dominante que atua a partir da direção noroeste do manejo inadequado de sedimentos que chegam à foz dos rios. A bacia do rio Lima é uma bacia relativamente pequena com baixa intervenção antropogênica localizada nessa região. No entanto, a construção de duas barragens, apesar de controlar as inundações nas cidades vulneráveis a jusante, provocou mudanças nas condições naturais do fluxo do rio, atenuando os fluxos máximos ao longo do estuário e, conseqüentemente, a capacidade de transporte de sedimentos. A construção de estruturas de defesa do porto mudou os fluxos sedimentares naturais que contribuem para alimentar a deriva longitudinal nas praias adjacentes (Tonnon et al, 2007).

O problema do assoreamento associado aos estuários tem impacto determinante na zona dos canais de navegação, para o que se efetua operações de dragagem, a custos consideráveis, demandando o conhecimento temporal dos padrões hidrossedimentológicos. Com efeito, a hidroinformática permite a análises atuais e projeção de cenários futuros, tendo sido aplicada, com êxito, em todo o mundo.

Este trabalho visa explorar as potencialidades da modelagem morfodinâmica (Hu et al, 2009) na tentativa de projetar e avaliar novas soluções para minimizar o assoreamento na foz do rio, favorecer a exportação de sedimentos para as praias costeiras adjacentes ou facilitar os trabalhos de dragagem (Van Maren et al, 2015).

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Área de Estudo

Na Figura 1 é apresentada a localização da área estudada, destacando as fronteiras consideradas (montante: açude da vila de Ponte de Lima; jusante: oceano Atlântico), assim como as estações de monitorização hidrométrica (Lanheses, Deocristes e Viana do Castelo). Para caracterização detalhada da área, ver Pinho et. al. (2014) e Vieira e Pinho (2010).

O rio Lima nasce no monte Talariño, a uma altitude de 975 metros, na Serra de São Mamede, na província de Ourense, na Espanha. A sua foz encontra-se na cidade de Viana do Castelo, Portugal, apresentando uma extensão total de 108 km, dos quais 67 km em território português e destes, aproximadamente, 20 Km abordados neste estudo. São dois os grandes aproveitamentos hidroelétricos em funcionamento ao longo da bacia, que regulam a vazão do rio Lima: Alto Lindoso (maior produtor hidroelétrico de Portugal) e Touvedo. A vazão média anual é de $38 \text{ m}^3/\text{s}$. Porém, em época de verão, este valor pode baixar para cerca de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

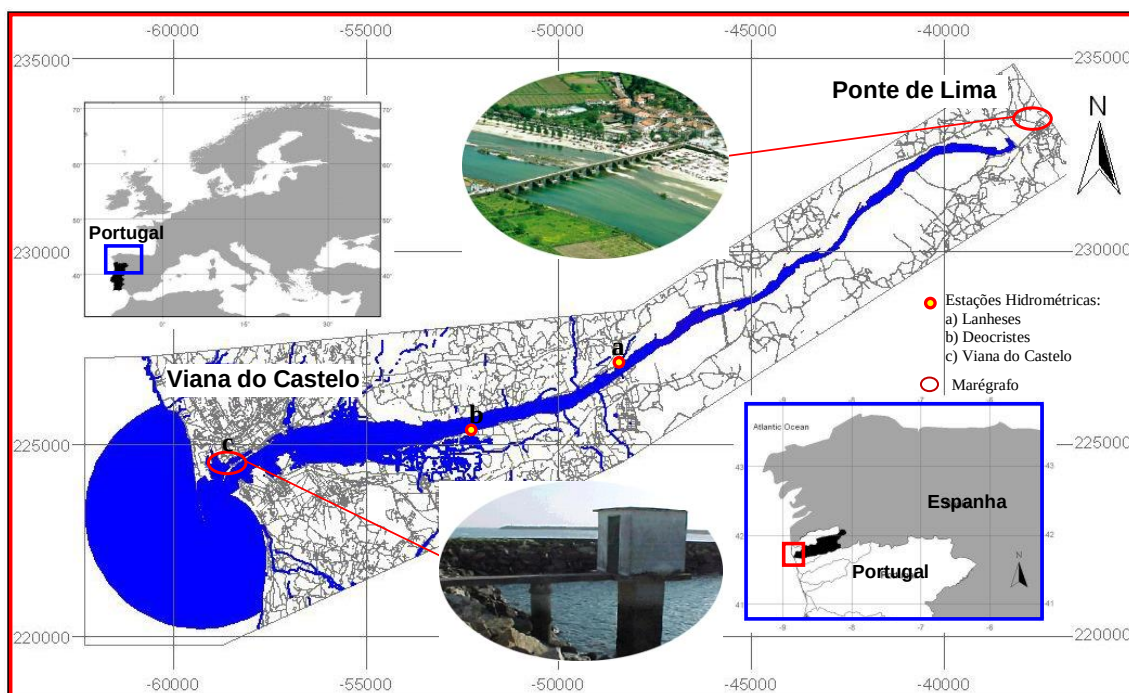


Figura 1. Localização do estuário do rio Lima, fronteiras consideradas e estações hidrométricas.

Fonte: modificado de Vieira e Pinho (2010)

2.2 - Dados de Campo

Para este trabalho obtiveram-se registros de níveis de água através de três sondas: TGR-2050, TWR-2050 e DEI/DEC-V0. As campanhas foram realizadas nos períodos de 10-12/06/2016 e 14-16/06/2016, para as estações de Lanheses e Deocristes, respectivamente, além do período de 20-21/05/2016 para a estrutura do Instituto Hidrográfico, que compõe o marégrafo de Viana do Castelo.

Os dados de maré oceânica são relativos ao marégrafo de Viana do Castelo, e as vazões diárias típicas, fornecidas pela companhia Energias de Portugal – EDP. A batimetria do estuário corresponde ao final do ano de 2003 e início de 2004, gerada pela APA (Agência Portuguesa do Ambiente), sendo na área da foz, realizada pela Administração do Porto de Viana do Castelo, para o mesmo período. Os sedimentos utilizados na análise são típicos do estuário, com diâmetros médios de 200 e 400 μm , densidade específica de 2650 Kg/m^3 , densidade do fundo seco de 1600 kg/m^3 e concentração de 0,5 Kg/m^3 , correspondendo a caracterizações anteriormente realizadas.

2.3 - Modelo Numérico

O modelo numérico morfodinâmico tridimensional, construído com o módulo FLOW do Delft3D (Delft3D-FLOW, 2011), utilizou como base o trabalho de Costa et al. (2017). Consiste de uma grelha, com um total de 7515 células de cálculo. Testes de calibração conduziram para Manning de 0,010 $\text{s.m}^{-1/3}$, coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal de 5 m^2/s e difusividade turbulenta horizontal de 1 m^2/s . O processo de calibração contemplou quatro

métricas para aferição: modelo de eficiência de Nash-Sutcliffe (*NSE*), soma das diferenças entre valores simulados e valores observados (*BIAS*), raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*) e média do erro absoluto (*MAE*).

A partir do modelo calibrado, análises morfodinâmicas sobre a influência da vazão fluvial ($400 \text{ m}^3/\text{s}$ e $1000 \text{ m}^3/\text{s}$), tipo da maré oceânica (viva e morta) e da dimensão dos sedimentos ($200 \mu\text{m}$ e $400 \mu\text{m}$), foram realizadas. Duas estruturas, para minimizar o assoreamento na foz, foram testadas, considerando vazão milenar de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$.

3 - RESULTADOS

Para o cenário de calibração, os dados de saída do modelo apresentaram uma boa concordância com os dados de campo. Na Figura 2, a seguir, é apresentado o resultado da calibração, para as estações de monitoramento.

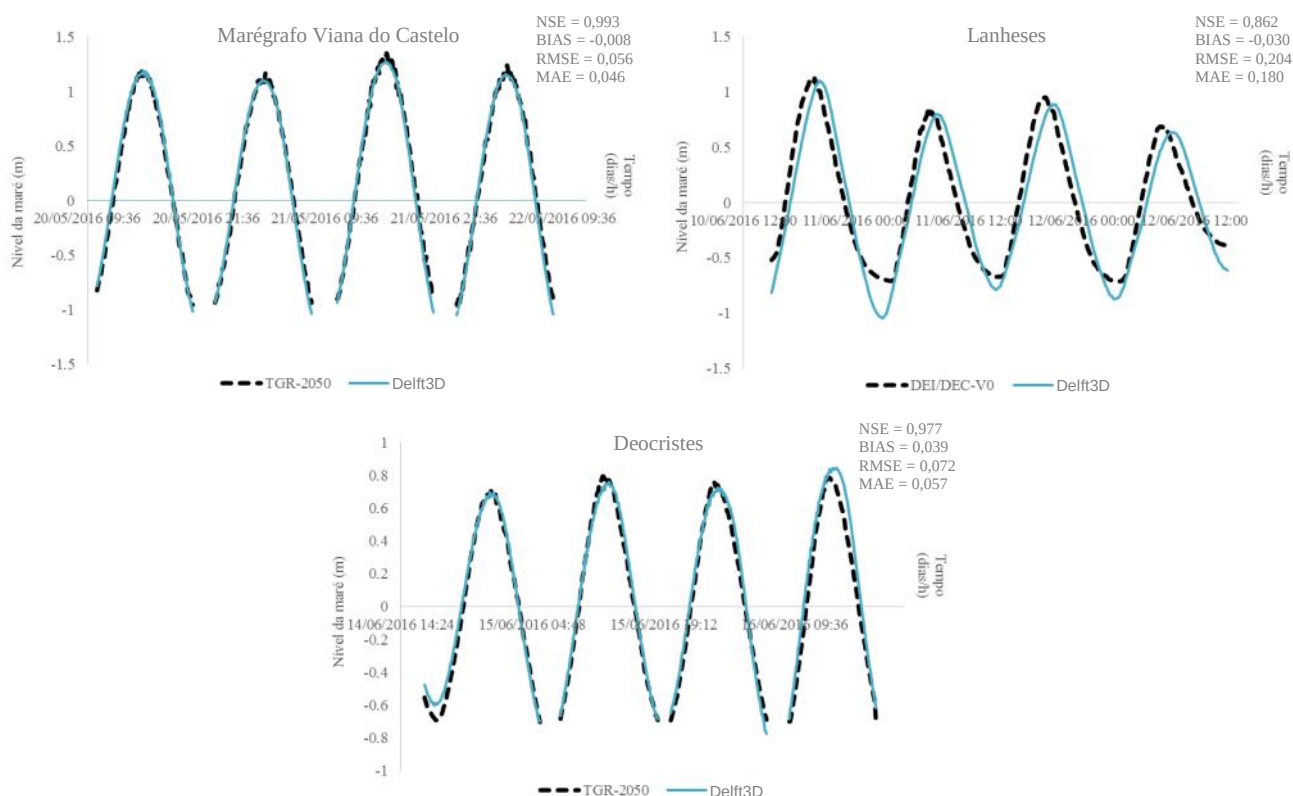


Figura 2. Calibração dos níveis de água para as estações de monitoramento
Fonte: dados das campanhas e de saída Delft3D

Nota-se que para as campanhas nas estações Deocristes e Marégrafo de Viana do Castelo, a baixa mar foi abstraída da representação. Este fato está relacionado a questões de ordem operacional, não permitindo que as sondas fossem instaladas em profundidade maior para contemplar esta fase. Observa-se também que para a estação Marégrafo, a correlação entre

valores medidos e simulados são idênticas. Uma ligeira destoaância entre valores, entretanto, com defasagem de ciclo de preia e baixa mar é notado para as estações de Lanheses e Deocristes. Esta ocorrência é devida ao predomínio da vazão nas áreas de montante, onde estão localizadas estas duas estações. Um monitoramento da vazão de montante, para substituir as médias diárias utilizadas no modelo, torna-se necessário. Já para a estação Marégrafo, o predomínio da maré oceânica, sobre o escoamento de montante, torna o efeito da vazão inexpressivo. Apesar das diferenças destacadas, verifica-se um NSE de 86% para Lanheses e de 97% para Deocristes.

Na Figura 3, mostrada a seguir, são apresentados os resultados sobre a influência dos tipos de maré oceânica, na evolução morfodinâmica do estuário.

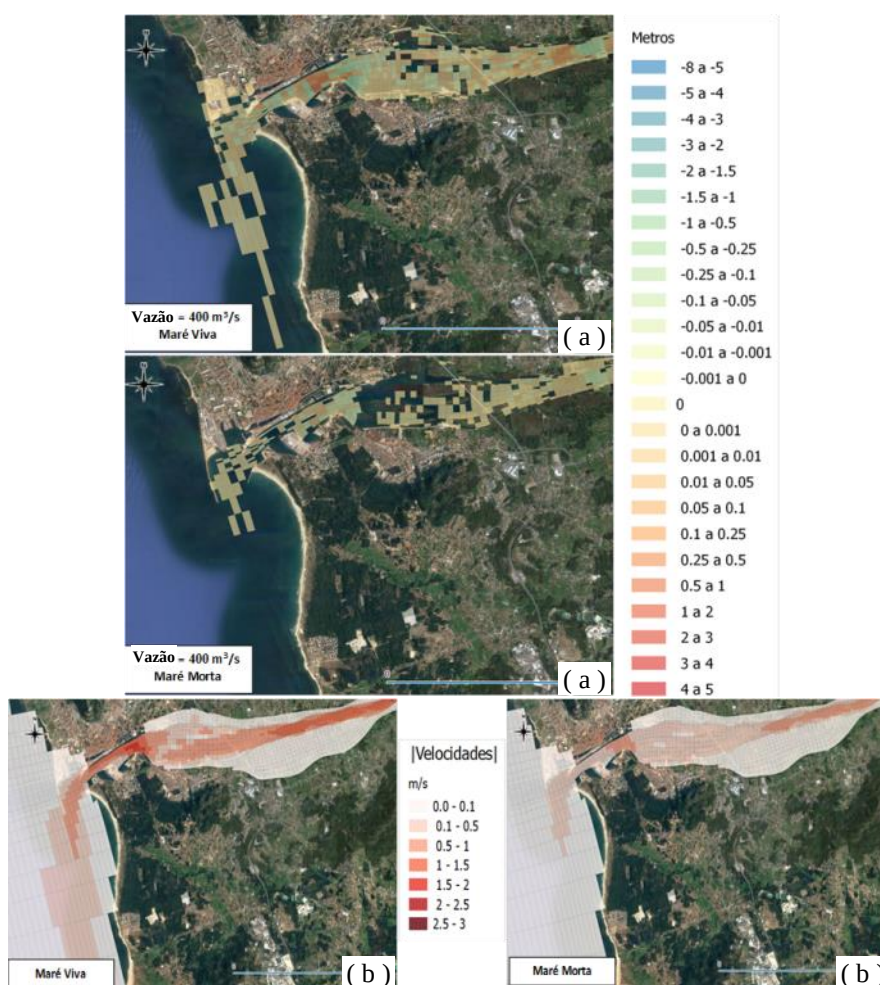


Figura 3. Comparação dos fenômenos de erosão/sedimentação (a) e do módulo das velocidades na vazante (b) para marés viva e morta, com vazão constante de $400 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fonte: dados de saída Delft3D

Nota-se na Figura 3 (a) que os fenômenos de erosão e sedimentação, na zona da embocadura do estuário, ocorrem muito mais intensamente no período de maré viva, decorrente da maior amplitude da mesma. Também é possível observar que, para o cenário de maré viva, o processo de assoreamento é mais intenso, havendo também uma maior capacidade de transporte sedimentar no período de vazante, uma vez que o módulo da velocidade é maior do que no

cenário de maré morta, conforme Figura 3 (b). Estes resultados evidenciam a importância da amplitude de maré nos padrões de erosão/sedimentação na proximidade da embocadura.

Na Figura 4, os resultados mostrados denotam a influência da vazão fluvial e do diâmetro dos sedimentos no processo de transporte sedimentar na embocadura.

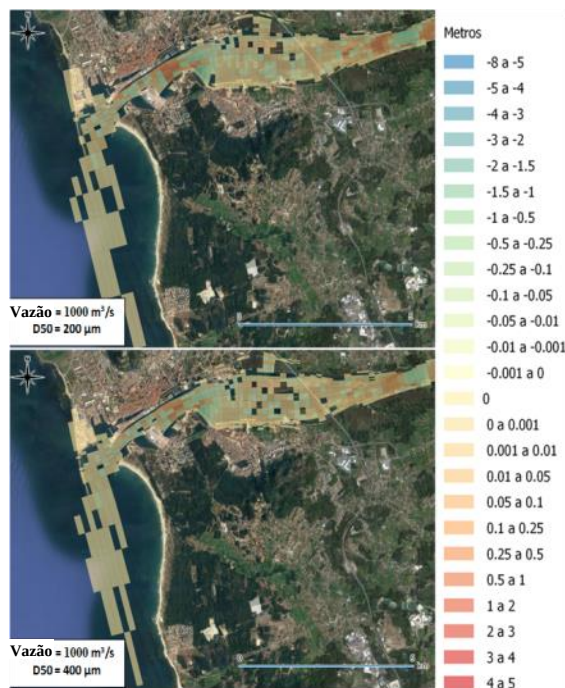


Figura 4. Comparação dos fenômenos de erosão/sedimentação para os tipos de maré, com uma vazão fluvial de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ e duração do evento de 2 dias.

Fonte: dados de saída Delft3D

O fenômeno erosão/deposição torna-se mais intenso quando a dimensão média dos sedimentos é mais fina, representada nesta análise pela fração de $200 \mu\text{m}$. Simulação envolvendo a mesma combinação acima, mas com alteração da vazão fluvial para $400 \text{ m}^3/\text{s}$ e da duração do evento para 7 dias, mostrou que os valores de erosão/deposição apresentam o mesmo padrão do cenário acima apresentado. Este fato mostra que a duração do evento é igualmente relevante a intensidade do mesmo.

Os resultados gerados pelo modelo, para as duas estruturas rígidas propostas na embocadura do estuário, longitudinal e transversal, com vazão milenar de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$ são apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Na estrutura longitudinal, o propósito é o de se estabelecer um aumento de velocidade nas áreas de maior assoreamento, que seja capaz de provocar o transporte sedimentar para a plataforma oceânica. Já para a estrutura transversal, a análise recai sobre a eficiência da barragem em diminuir a velocidade do escoamento para a montante da mesma, fazendo com que o processo de assoreamento ocorra fora da área portuária.

Nota-se, na Figura 5 (a), que a presença da estrutura longitudinal, promove um deslocamento modesto do assoreamento, identificado na embocadura, para a jusante, em relação à situação sem estrutura.

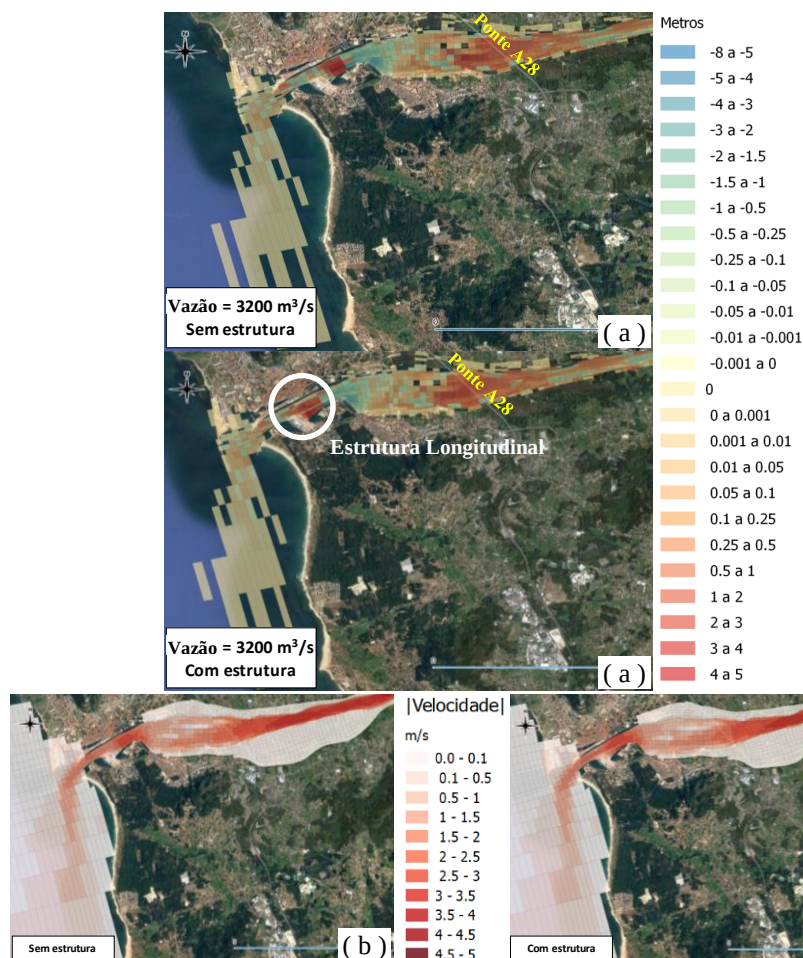


Figura 5. Comparação dos resultados de erosão/sedimentação, com e sem estrutura longitudinal (a) e do módulo de velocidades na vazante (b), para ambos os cenários, com vazão milenar de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fonte: dados de saída Delft3D

Na Figura 5 (b), pode ser verificado que a presença das duas estruturas longitudinais projetadas não promove alteração significativa no padrão de velocidade do escoamento na embocadura, sendo identificado um ligeiro aumento no canal compreendido entre as mesmas. Este fato comprova a baixa capacidade de transporte de sedimentos para a plataforma oceânica, mesmo considerando um cenário extremo de vazão milenar.

Para a estrutura transversal projetada, A Figura 6 (a) mostra um padrão de deposição de sedimentos preferencialmente nas margens e não no centro do canal, conforme mostrado para a situação sem estrutura transversal. Este fato representa um ganho em relação à estrutura longitudinal, anteriormente analisada, pela minimização do assoreamento na zona portuária. Também pode ser visto, na Figura 6 (a), uma diminuição do assoreamento entre a estrutura transversal e a ponte da rodovia A28. Isto pode ser justificado pela diminuição da velocidade do fluxo, conforme apresentado na Figura 6 (b), fazendo com que a capacidade de transporte diminua e o assoreamento ocorra em regiões mais a montante. Considerando esta análise sob o efeito da vazão milenar, esta estrutura pode ter eficiência melhorada para vazões típicas.

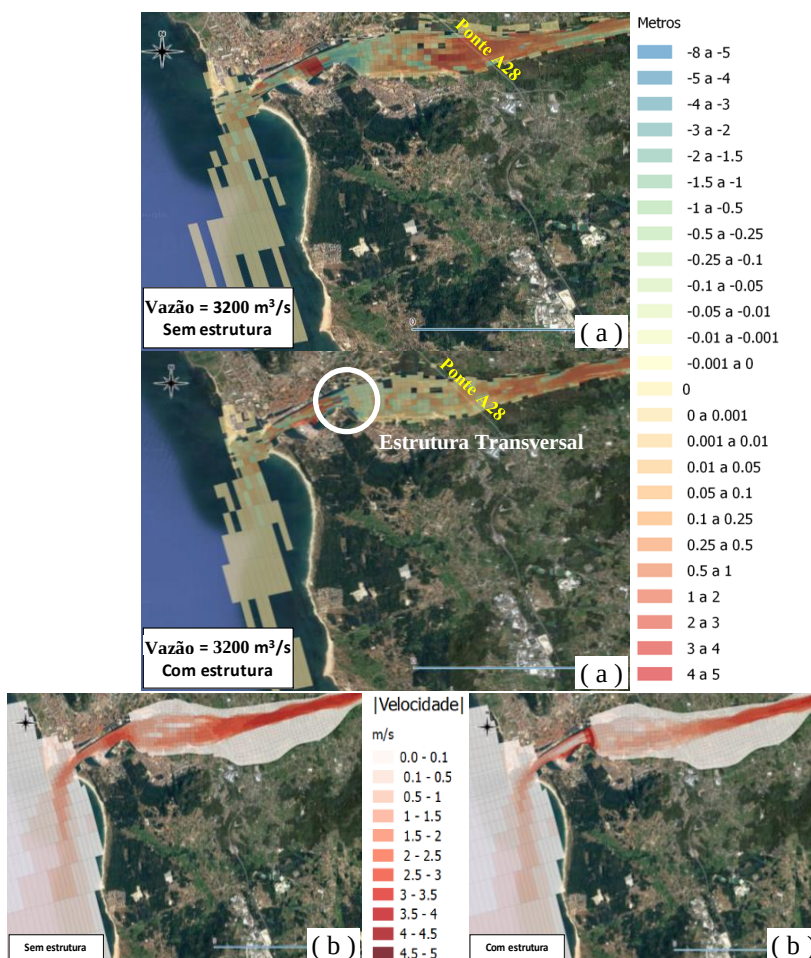


Figura 6. Comparação dos resultados de erosão/sedimentação, com e sem estrutura transversal (a) e do módulo de velocidades na vazante (b), para ambos os cenários, com vazão milenar de $3200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fonte: dados de saída Delft3D

4 - CONCLUSÕES

As inundações são o principal impulsionador das entradas de sedimentos no rio para a costa. No entanto, os locais de depósito obtidos podem prejudicar as atividades de navegação, o que implica recorrer aos trabalhos de dragagem. O material de dragagem é normalmente depositado em locais que não permitem a alimentação da deriva longitudinal (impulsionada pela ação das ondas). Os resultados de modelagem considerando novas estruturas modificam a hidrodinâmica e a morfodinâmica dessa área, levando a uma ligeira diminuição nos locais de deposição. Dentre as estruturas avaliadas, uma barragem transversal submersa localizada na seção a montante do estreito canal intermediário revela o melhor desempenho.

Os sedimentos de dragagem devem ser corretamente depositados na costa para alimentar adequadamente a deriva longitudinal, caso contrário, eles estarão fora do sistema, o que agrava a tendência de erosão instalada.



Vitória/ ES – Brasil

HIDROSSEDIMENTOLOGIA NO CONTEXTO NEXO PARA UMA SOCIEDADE SUSTENTÁVEL

XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos
I Partículas das Américas

24 a 28 de setembro de 2018



AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de pós-doutoramento concedida ao segundo autor (200016/2014-8).

BIBLIOGRAFIA

COSTA, N.C.D.B., VENÂNCIO, S.S., PINHO, J.L.S., VIEIRA, J.M.P. (2017). *“Hydrodynamic analysis of the estuary of the Lima river, Portugal, using numerical simulation”*. Environment & Water - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, v. 12, n. 3, pp. 476-488.

DELFT3D-FLOW (2011). *“User Manual - Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments”*. Deltares, Netherlands. 674p.

HU, K., DING, P., WANG, Z., YANG, S. (2009). *“A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China”*. Journal of Marine Systems, v. 77, n. 1-2, pp. 114-136.

PINHO, J.L.S., FERREIRA, R., VIEIRA, L., SCHWANENBERG, D. (2014) *“Comparison between two hydrodynamic models for flooding simulations at river Lima basin”*. Water Resource Management, Springer, v. 29, n. 2, pp. 431-444.

TONNON, P.K., VAN RIJN, L.C., WALSTRA, D.J.R. (2007). *“The morphodynamic modelling of tidal sandwaves on the shoreface”*. Coastal Engineering, v. 54, pp. 279–296.

VAN MAREN, D.S., VAN KESSEL, T., CRONIN, K., SITTONI, L. (2015). *“The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration”*. Continental Shelf Research, v. 95, pp. 1-14.

VIEIRA, J.M.P., PINHO, J.L.S. (2010). *“Distribuição salina na embocadura e estuário do rio Lima em diferentes regimes hidrodinâmicos”*. Revista Recursos Hídricos, APRH, v. 31, nº 2, pp. 5-14.