

Simulação numérica da morfodinâmica de embocaduras

Autores: A.B. Fortunato (1), A. Oliveira (1), X. Bertin (2), N. Bruneau (1), A. Nahon (1), M. Guerreiro (1), M. Costa (1), L. Pinto (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa. afortunato@lnec.pt.

(2) UMR 6250 LIENSS CNRS-Université de La Rochelle, Institut du Littoral et de l'Environnement (ILE), rue Olympe de Gouges, 17 000 La Rochelle, França.

Resumo: A gestão integrada da zona costeira debate-se com grandes problemas relacionados com a dinâmica sedimentar das embocaduras estuarinas e lagunares, associados à sua migração, ao seu fecho ocasional ou frequente e ao seu assoreamento, os quais requerem intervenções humanas. Apesar da óbvia conveniência da capacidade de prever a evolução destes sistemas, a sua modelação numérica está ainda pouco desenvolvida. Durante a última década, o LNEC tem vindo a desenvolver e a aplicar um sistema de modelação para simulação da morfodinâmica costeira forçada pela maré e pela agitação marítima, particularmente vocacionado para embocaduras. A presente comunicação apresenta este sistema e resume a experiência obtida, focando em particular os seguintes aspectos: 1) principais dificuldades numéricas, computacionais e físicas, e limitações associadas; 2) sucessos obtidos, ilustrados através de aplicações seleccionadas; 3) perspectivas de evolução futura na modelação de embocaduras.

Palavras chave: modelação numérica, embocaduras, malhas não estruturadas, interacção ondas-correntes

1. INTRODUÇÃO

Há cerca de uma década foi publicado o primeiro trabalho no qual um modelo numérico baseado em processos simulava com sucesso a evolução morfológica de uma embocadura real (Cayocca, 2001). Na mesma altura, o LNEC iniciou o desenvolvimento de um sistema de modelos de natureza semelhante, denominado MORSYS2D (Fortunato e Oliveira, 2004). Apresenta-se aqui um balanço destes 10 anos de desenvolvimento e perspectiva-se o futuro.

Os modelos numéricos morfodinâmicos são constituídos por vários módulos que simulam os principais processos envolvidos na dinâmica sedimentar, através da resolução de equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Em zonas costeiras, consideram-se tipicamente módulos de propagação da agitação marítima, de circulação, de transporte de sedimentos e de actualização de fundos (Fig. 1).

Apesar da utilização de cada um destes módulos ser já quase rotineira, o seu acoplamento conduz a um sistema de modelos muito complexo e difícil de utilizar, existindo ainda muito poucas aplicações documentadas na literatura. As dificuldades são particularmente relevantes para a modelação de embocaduras estuarinas, em que os efeitos da agitação marítima e das correntes de maré são ambos importantes.

2. PRINCIPAIS PROBLEMAS

Aspectos físicos

A utilização de modelos morfodinâmicos envolve dois grandes tipos de dificuldades do ponto de vista físico: 1) a forte não linearidade e

sensibilidade do transporte de sedimentos geram grandes incertezas; 2) alguns processos físicos não são representados adequadamente por limitações computacionais ou do próprio conhecimento existente.

A incerteza deriva em grande parte da grande sensibilidade do transporte sólido a pequenas variações em alguns parâmetros, como o diâmetro do sedimento, a velocidade (Pinto *et al.*, 2006) ou a amplitude de alguns constituintes de maré (Fortunato, 2007). Assim, um pequeno erro nestes factores é amplificado no cálculo dos fluxos de sedimento. Este problema é frequentemente exacerbado pela dificuldade em obter dados batimétricos suficientes para uma calibração e validação detalhada do modelo morfodinâmico. Formas de lidar com esta incerteza estão ainda pouco exploradas, mas podem passar pela utilização de *ensemble simulations* (Fortunato *et al.*, 2009), à semelhança do que é feito em meteorologia.

Os modelos morfodinâmicos não representam correctamente alguns processos físicos relevantes. Por exemplo:

- A representação de correntes variáveis na vertical, como o *undertow*, é imprecisa ou mesmo impossível em modelos 2DH. Estas correntes podem criar barras longitudinais que afectam o canal da embocadura (Fig. 2).
- Para minimizar o custo computacional, utilizam-se tipicamente modelos de ondas integrados no período da onda (*phase-averaged*). Estes modelos não representam fenómenos que ocorrem a escalas temporais inferiores ao período das ondas, como o transporte na zona de espraio. Esta limitação impede a reprodução da formação de bancos de areia emersos em preia-mar, ou a

consolidação de cordões litorais. Com efeito, os modelos permitem reproduzir o crescimento destes cordões, mas a cota de coroamento fica limitada pelo nível de máxima preia-mar (Bertin *et al.*, 2009a).

- Ao contrário do que ocorre em estuários, onde os escoamentos são geralmente lentos (número de Froude inferior a 1), nas embocaduras lagunares ocorrem por vezes velocidades muito elevadas, que podem gerar ressaltos hidráulicos (Fig. 3). Uma vez que os modelos de circulação utilizados não representam as perdas de carga introduzidas por estes ressaltos, prevêem velocidades – e caudais sólidos – excessivas.

Aspectos numéricos

O conjunto de equações resolvido pelos modelos morfodinâmicos é fortemente não linear (e.g., devido à dependência das velocidades na batimetria). A sua resolução exige por isso métodos numéricos robustos, capazes de evitar oscilações de pequeno comprimento de onda sem uma difusão excessiva. Os métodos mais bem sucedidos combinam esquemas de progressão temporal de alta ordem, para minimizar o desenvolvimento de oscilações espúrias, com filtros numéricos que as eliminam (Fortunato e Oliveira, 2007). O MORSYS2D utiliza ainda um passo de cálculo adaptativo na resolução da equação de continuidade de fundo, que se revelou fundamental para garantir a estabilidade sem comprometer o custo computacional (Bertin *et al.*, 2009b).

Aspectos computacionais

O custo computacional constitui uma forte limitação na utilização destes modelos, em particular para simulações da ordem de anos a décadas (Bruneau *et al.*, 2010). Tipicamente, pretende-se conhecer o comportamento das embocaduras a escalas anuais ou superiores, enquanto o passo de cálculo dos modelos de circulação é da ordem de 1 segundo a 1 minuto. Os campos de ondas devem ser actualizados com uma frequência horária ou superior, dada a sua dependência no nível de maré. As resoluções espaciais devem ser elevadas, de forma a resolver a zona de rebentação com pelo menos 4 a 5 nós de cálculo. Uma vez que esta zona se desloca ao longo do ciclo de maré, a zona a resolver em detalhe pode ter uma extensão transversal à praia da ordem da centena de metros. A utilização dos modelos em modo paralelo em clusters permite mitigar estas dificuldades (Bruneau *et al.*, 2010).

O tempo computacional é também condicionado pela necessidade de transferir informação entre os vários módulos do modelo. Esta transferência

implica frequentes escritas e leituras em ficheiro, fazendo com que o *input/output* constitua uma fracção significativa do tempo de cálculo. Formas de mitigar este problema incluem a utilização de ficheiros binários e a utilização de memória RAM para a troca de informação temporária entre módulos (Costa *et al.*, 2010).

3. APLICAÇÕES

O sistema MORSYS2D foi recentemente aplicado às embocaduras das lagunas de Óbidos (Bertin *et al.*, 2009c), Aveiro (Plecha *et al.*, 2010) e St. André, à barra do Ancão (Bertin *et al.*, 2009a), a uma trincheira na costa algarvia (Lopes *et al.*, 2009), à Ribeira de Aljezur (Guerreiro *et al.*, 2010) e a casos sintéticos (Nahon *et al.*, 2009). A aplicação do modelo é ilustrada a duas escalas temporais.

A simulação da Ribeira de Aljezur mostra a evolução batimétrica da embocadura ao longo de um ciclo de maré (Fig. 4). Durante a enchente de maré viva, as velocidades são pequenas e a secção transversal mantém-se aproximadamente estável. Devido à forte assimetria da maré, na vazante ocorre um pequeno assoreamento, seguido de uma maior erosão da secção.

A simulação a longo prazo (3 anos) de uma embocadura sintética mostra o efeito da agitação incidente e da amplitude da maré sobre a forma dos bancos de enchente e de vazante (Fig. 5).

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar de alguns inegáveis sucessos, os modelos morfodinâmicos de embocaduras estão ainda numa fase de desenvolvimento (Bertin *et al.*, 2010). É necessário por isso continuar o seu desenvolvimento, com vista a melhorar o seu desempenho e fiabilidade. As direcções em que o LNEC está a evoluir, em colaboração com investigadores da Universidade de Aveiro, da FCUL e da Universidade de La Rochelle, incluem: a melhoria da representação de vários processos físicos; o desenvolvimento de um modelo morfodinâmico 3D (Pinto *et al.*, 2007; Pinto, 2010 – Fig. 6); e a paralelização de vários módulos e melhoria da eficiência da transferência de informação entre módulos.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, projectos: MADyCOS (PTDC/ECM/66484/2006), DETI (PTDC/MAR/65585/2006), G-Cast (GRID/GRI/81733/2006) e SANDEX (PTDC/ECM/70428/2006), e pelo projecto europeu IMMATIE.

REFERÊNCIAS

Bertin, X., A.B. Fortunato e A. Oliveira (2009a). Morphodynamic modeling of the Ancão Inlet, South Portugal, *J. Coastal Research*, SI56: 10-14.

Bertin, X., A. Oliveira e A.B. Fortunato (2009b). Simulating morphodynamics with unstructured grids: description and validation of a modeling system for coastal applications, *Ocean Modelling*, 28/1-3: 75-87.

Bertin, X., A.B. Fortunato e A. Oliveira (2009c). A modeling-based analysis of processes driving wave-dominated inlets, *Continental Shelf Research*, 29/5-6: 819-834.

Bertin, X., A.B. Fortunato e D. Roelvink (2010). Morphodynamic Modelling of Tidal Inlets and Embayments. *Geomatic Solutions For Coastal Environments*. Eds: M.Maanan and M. Robin, Nova Science Publishers Inc., pp.197-213, ISBN 978-1-61668-140-1.

Bruneau, N., A.B. Fortunato, A. Oliveira, X. Bertin, M. Costa e G. Dodet (2010). Towards long-term simulations of tidal inlets: performance analysis and application of a partially parallelized morphodynamic modeling system, *Computational Methods in Water Resources XVIII*, Ed.: J. Carrera, 8 pp.

Cayocca, F. (2001). Long-term morphological modeling of a tidal inlet: the Arcachon Basin, France, *Coastal Engineering*, 42: 115-142.

Costa, M., N. Bruneau, A. Oliveira e A.B. Fortunato (2010). Optimizing I/O in a morphodynamic model, *Ibergrid 2010*, 485-488.

Fortunato, A.B. (2007). Accuracy of sediment flux computations in tidally-driven simulations, *J. Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, 133/5: 377-380.

Fortunato, A.B. e A. Oliveira (2004). A modeling system for tidally driven long-term morphodynamics, *J. Hydraulic Research*, 42/4: 426-434.

Fortunato, A.B. e A. Oliveira (2007). Improving the stability of a morphodynamic modeling system, *J. Coastal Research*, SI50: 486-490.

Fortunato, A.B. e A. Oliveira (2007). Case study: promoting the stability of the Óbidos lagoon inlet, *J. Hydraulic Engineering*, 133/7: 816-824.

Fortunato A.B., A. Bertin e A. Oliveira (2009). Space and time variability of uncertainty in morphodynamic simulations, *Coastal Engineering*, 56/8:886-894.

Guerreiro, M., A.B. Fortunato, A. Oliveira, X. Bertin, N. Bruneau e M. Rodrigues (2010). Simulation of morphodynamic processes in small coastal systems: application to the Aljezur coastal stream (Portugal). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12.

Lopes, V., P. Silva, X. Bertin, A. Fortunato, A. Oliveira (2009). Dinâmica Sedimentaria Alrededor de una excavación, *X Jornadas Españolas de Puertos e Costas*, 222-223.

Nahon, A., X. Bertin, A.B. Fortunato e A. Oliveira (2009). A modeling-based assessment of tidal inlet classification. *Colloque SHF: "Morphodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas"*, CD-ROM, 13pp.

Oliveira, A., A.B. Fortunato e J. Rego (2006). Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the Óbidos lagoon, *Cont. Shelf Res.*, 26, 917-942.

Pinto, L. (2010). *Modelação da morfodinâmica de estuários*. Tese de Doutoramento, Univ. de Coimbra, 188 pp.

Pinto, L., A.B. Fortunato e P. Freire (2006). Sensitivity analysis of non-cohesive sediment transport formulae, *Continental Shelf Research*: 26/15, 1826-1839.

Pinto, L., A. Oliveira e A.B. Fortunato (2007). Development of a Three-Dimensional morphodynamic modeling system, *Estuarine and Coastal Modeling 7 Book of Abstracts*.

Plecha, S., Silva, P.A., Vaz, N., Bertin, X., Oliveira, A., Fortunato, A.B. e Dias, J.M. (2010). Sensitivity analysis of a morphodynamic modelling system applied to a coastal lagoon inlet, *Ocean Dynamics*, 60/2: 275-284.

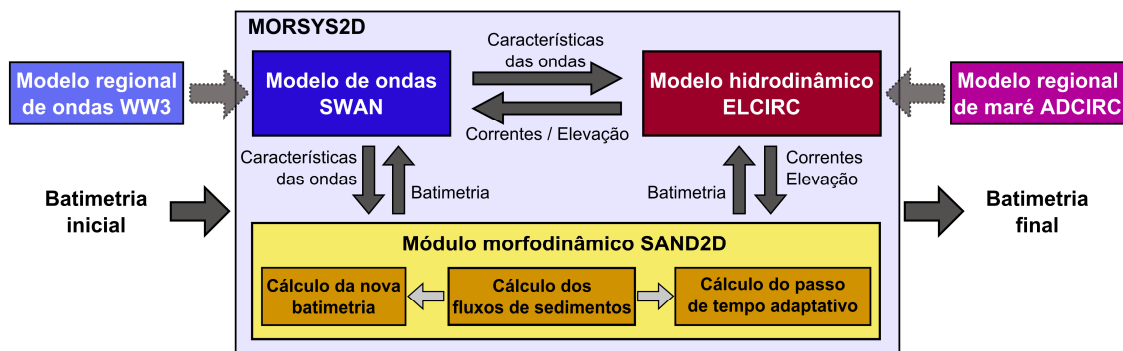


Fig. 1. Esquema de funcionamento do sistema MORSYS2D, incluindo os modelos SWAN (www.wildelft.nl/soft/swan/) e ELCIRC (www.stccmop.org/CORIE/modeling/elcirk/index.html).

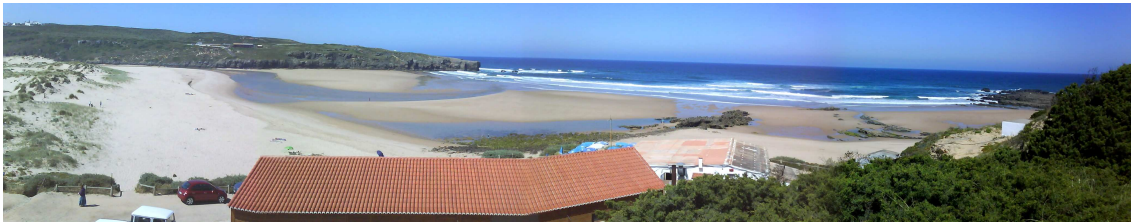


Fig. 2. Exemplo do deslocamento da embocadura do estuário da ribeira de Aljezur, provavelmente devido em parte à formação de um perfil barra-fossa pelo undertow na praia da Amoreira.

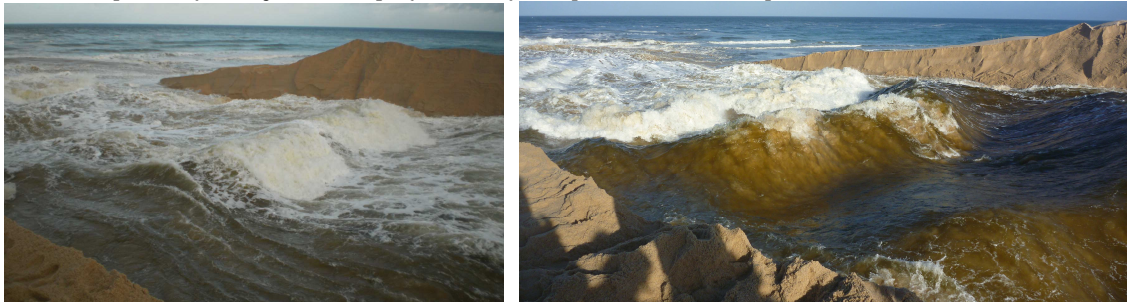


Fig. 3. Exemplos de formação de ressaltos hidráulicos na embocadura da lagoa de Albufeira após a sua abertura artificial. Note-se que o mar está calmo, pelo que a rebentação observada no canal não corresponde a agitação marítima.

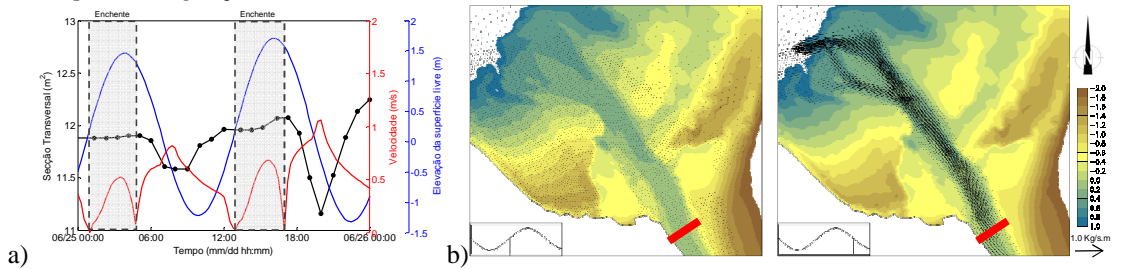


Fig. 4. Morfodinâmica de curto prazo da embocadura da ribeira de Aljezur em marés vivas: a) secção transversal (preto), nível (azul) e velocidade na embocadura (vermelho); b) batimetrias e caudais sólidos em enchente e vazante. O traço vermelho mostra a secção analisada em a).

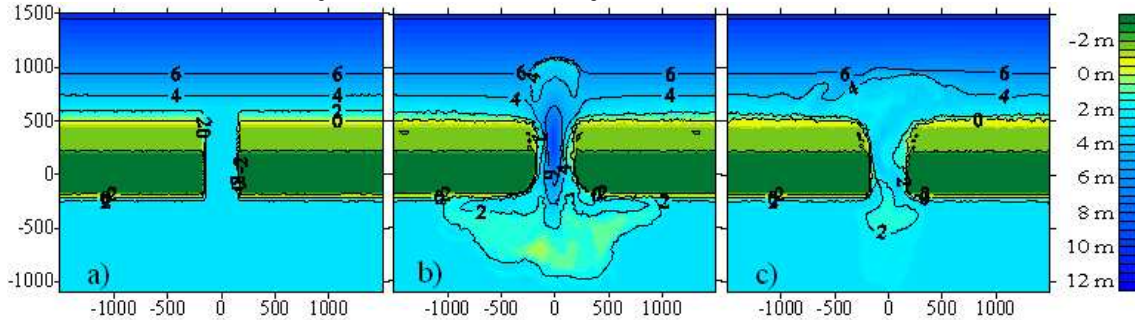


Fig. 5. Formação de bancos de enchente e de vazante numa embocadura sintética: a) condições iniciais; b) após 3 anos para uma amplitude de maré de 2 m e uma altura de onda de 0.5 m; c) após 3 anos para uma amplitude de maré de 1 m e uma altura de onda de 1 m.

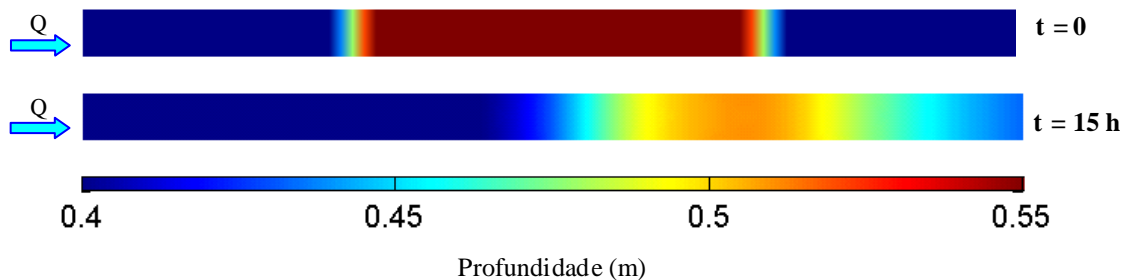


Fig. 6. Migração e assoreamento de uma fossa num canal, forçada por um caudal permanente, com o modelo morfodinâmico 3D MORSELFÉ: condições iniciais e após 15 horas de simulação.