

Modelação numérica da abertura e fecho de uma embocadura artificial (Lagoa de Santo André, Portugal) ^{*,**}

Numerical modelling of opening and closure of an artificial inlet (Santo André Lagoon, Portugal)

Alphonse Nahon ^{@,1}, André B. Fortunato ¹, Xavier Bertin ², Ana Rita Pires ³, Anabela Oliveira ¹,
Maria da Conceição Freitas ³, César Andrade ³

RESUMO

As embocaduras de pequenas lagoas são frequentemente instáveis. Por razões ecológicas, estas embocaduras são muitas vezes abertas artificialmente, e deixadas evoluir até fecharem naturalmente. Este artigo apresenta a simulação da evolução natural da embocadura da Lagoa de Santo André após a sua abertura, através da aplicação de um modelo numérico morfodinâmico suportado por extensas campanhas de recolha de dados de campo. O comportamento da embocadura nos primeiros dias após a abertura é correctamente reproduzido, apesar de ter sido necessário introduzir no modelo processos físicos anteriormente negligenciados: as perdas de carga associadas aos ressaltos hidráulicos e o escorregamento de taludes laterais. Pelo contrário, o modelo subestima a colmatação da embocadura, não conseguindo, por isso, reproduzir correctamente o seu fecho. Causas possíveis para esta limitação incluem, entre outras, a não reprodução pelo modelo do transporte na zona de espraio.

Palavras chave: Embocadura, modelo numérico, morfodinâmica, Lagoa de Santo André

ABSTRACT

Tidal inlets associated with small coastal lagoons are often unstable and can close naturally. For ecological reasons, these inlets are often artificially opened, and allowed to evolve naturally until their closure. This paper describes the simulation of the evolution of the Santo André tidal inlet after its opening, through the application of a process-based morphodynamic model (MORSYS2D), supported by extensive field surveys.

The application of a process-based morphodynamic model to the specific case of an inlet artificial breaching and natural closure was particularly challenging, and new processes had to be introduced in the model. In particular, hydraulic jumps associated with extremely strong currents which occur in the first hours after the inlet opening are taken into account by applying a correction to the drag coefficient. This correction is based on

@ - Autor correspondente: anahon@lnec.pt

1 - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. e-mails: anahon@lnec.pt, afortunato@lnec.pt, aoliveira@lnec.pt

2 - UMR 6250 LIENSS, CNRS/Université de La Rochelle, Institut du Littoral et de l'Environnement, 2 rue Olympe de Gouges, 17 000 La Rochelle, France. e-mail: xbertin@univ-lr.fr

3 - Departamento de Geologia da FCUL, Centro de Geologia da UL, Edifício C6, 3º piso, Campo Grande, 1749-016 Lisboa, Portugal. e-mails: arpires@fc.ul.pt, cfreitas@fc.ul.pt, candrade@fc.ul.pt

* Artigo decorrente da comunicação efectuada no MEC 2011 - Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira, 3 a 4 de Fevereiro de 2011, Lisboa, Portugal

** Submissão: 24 Fevereiro 2011; Avaliação: 7 Abril 2011; Recepção da versão revista: 8 Julho 2011; Aceitação: 7 Agosto 2011; Disponibilização on-line: 14 Setembro 2011

previous empirical work, and determines the energy dissipation within the hydraulic jumps based on the local Froude number. Avalanching processes, which are responsible for the rapid enlargement of the tidal inlet, are represented using a numerical filter that prevents a user-specified, spatially-varying bottom, slope to be exceeded.

One month simulations show that the behaviour of the tidal inlet in the first days after its opening is correctly reproduced. This opens the path for the use of such models to test different scenarios of inlet artificial opening, considering for instance different locations and geometries of the initially dredged channel.

In contrast, the model underestimates the reduction of the inlet cross-section, and is unable to fully reproduce inlet closure, which in reality occurs after 28 days. Various possible causes for this limitation are discussed, associated to the lack of data or to the lack of some physical processes in the model.

Keywords: tidal inlet, numerical model, morphodynamics, Santo André Lagoon

1. INTRODUÇÃO

As pequenas lagunas são sistemas costeiros com um grande valor ecológico. A semelhança dos estuários e lagunas de grande dimensão, são geralmente ricas em biodiversidade, têm uma grande produtividade primária, e constituem habitats naturais para muitas espécies de aves, peixes e moluscos. No entanto, a pressão antrópica é frequentemente menor do que em sistemas de maior dimensão, uma vez que não albergam instalações portuárias significativas nem propiciam o desenvolvimento de centros populacionais relevantes à sua volta. Em contrapartida, estas lagunas são muito vulneráveis a eventos poluidores, devido à forte dependência dos efeitos destes relativamente ao estado das suas embocaduras, que controlam as trocas de água, sedimentos, nutrientes e seres vivos com o mar (Oliveira *et al.*, 2007). Em pequenas lagunas as embocaduras são geralmente instáveis, podendo fechar naturalmente em períodos de agitação marítima mais severa. Este fecho é muitas vezes contrariado através de dragagens, de forma a permitir as trocas entre as lagunas e o mar. Em Portugal, várias lagunas são assim abertas artificialmente todos os anos, mantendo-se a ligação com o mar durante semanas a meses.

A abertura artificial destas embocaduras é frequentemente realizada de forma empírica, baseada em experiências anteriores, no mesmo ou noutro sistema. Decisões como o momento ideal para efectuar a abertura ou as características geométricas e a localização do canal artificial podem claramente beneficiar de uma análise sistemática que permita otimizar as escolhas. Através da variação dos vários parâmetros definidores da intervenção, esta análise permitiria, em particular, avaliar as consequências destas decisões no tempo durante o qual a embocadura se manteria aberta. Para tal, é necessária uma ferramenta que permita prever o comportamento da embocadura após a sua abertura para vários cenários de intervenção e condições meteorológicas e oceanográficas. Graças ao desenvolvimento recente de modelos numéricos morfodinâmicos, este tipo de análise é agora possível. Com efeito, a aplicação bem sucedida de modelos morfodinâmicos a embocaduras lagunares revelou o potencial destas ferramentas como suporte à gestão costeira (*e.g.*, Cayocca, 2001, Bertin *et al.*, 2009a, Bruneau *et al.*, no prelo a). No entanto, a capacidade destes modelos em representar o desenvolvimento inicial de uma embocadura após a sua abertura artificial não foi ainda demonstrada, e simulações numéricas do seu encerramento natural também são raras (Ranasinghe & Pattiaratchi, 2003). Neste contexto,

este trabalho visa verificar a capacidade de um modelo morfodinâmico em simular a abertura artificial e a evolução da embocadura de uma pequena laguna até ao seu fecho natural (Lagoa de Santo André, Portugal). A capacidade de reproduzir ambos os acontecimentos na mesma simulação (*i.e.*, sem alterar os parâmetros durante a simulação) é um ponto essencial para estabelecer a credibilidade do modelo como ferramenta de gestão.

Este artigo está organizado em quatro secções. Depois desta introdução, a secção 2 descreve o sistema de estudo e a evolução observada entre a sua abertura artificial e o seu fecho natural; descreve igualmente os dados medidos durante este período, com vista a documentar a evolução da embocadura, e a implementar e validar o modelo morfodinâmico. A secção 3 descreve resumidamente o sistema de modelos MORSYS2D utilizado nas simulações. As alterações introduzidas neste sistema de modelos no âmbito deste trabalho são descritas em maior detalhe. Os resultados são apresentados e discutidos na secção 4, e o artigo termina com um resumo das principais conclusões.

2. CASO DE ESTUDO: LAGOA DE SANTO ANDRÉ

A Lagoa de Santo André constitui um sistema lagunar localizado na costa ocidental portuguesa, no arco litoral Tróia-Sines, cerca de 17 km a norte de Sines e 80 km a sul de Lisboa (Figura 1A). A sua superfície molhada varia entre 1,7 e 2,5 km² em função da cota do plano de água lagunar (Cruces, 2001); apresenta uma morfologia complexa (Figura 1B), sendo constituída por um corpo lagunar principal com dimensões máximas de 2 km na direcção norte-sul e 1,5 km na direcção este-oeste, e por dois corpos de menores dimensões, segmentados e alongados na direcção norte-sul, localmente designados por "Poços", os quais comunicam entre si e com o corpo principal através de canais estreitos e pouco profundos, o que lhes confere um certo confinamento (Cruces, 2001).

A laguna encontra-se separada do Oceano Atlântico por um extenso cordão arenoso, formando uma barreira contínua ao longo de 4 km entre a Praia de Santo André, a Norte, e a Praia de Monte Velho, a Sul, ancorada em ambas as extremidades em arribas talhadas em materiais detríticos brandos do Plio-Quaternário.

Esta barreira pode ocasionalmente romper de forma natural em épocas de temporal e com um plano de água lagunar invulgarmente elevado; contudo, a frequência desses acontecimentos é incompatível com a necessidade de renovação mais frequente da massa de água, pelo que

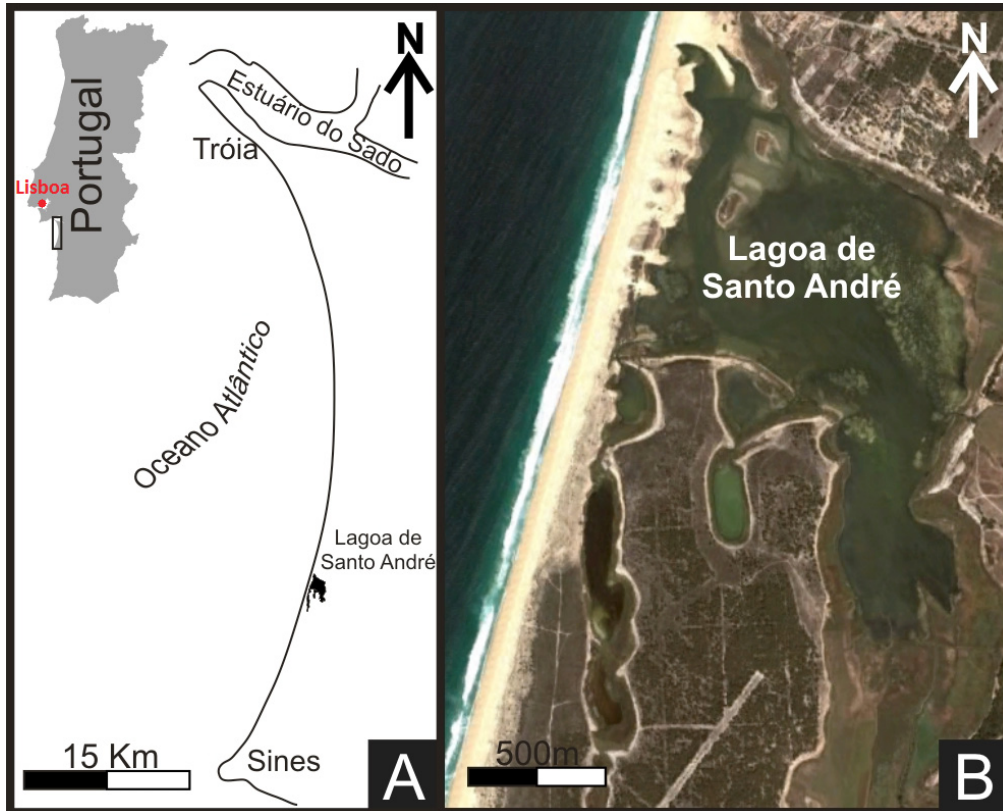


Figura 1. A: Localização no arco litoral Tróia-Sines em Portugal; B: Lagoa de Santo André.

Figure 1. A: Location of the study area on the Tróia-Sines coastal stretch (Portugal); B: Santo André Lagoon.

nela se abre artificial e regularmente desde o séc. XVII uma embocadura (*e.g.*, Freitas *et al.*, 2003), para promover a requalificação do espaço lagunar. Normalmente, a abertura da embocadura é executada com periodicidade anual durante o Equinócio da Primavera, quando o desnível entre as cotas do plano de água no interior da laguna e da baixa-mar no oceano é máximo.

A eficiência e a longevidade da embocadura dependem de vários factores e da sua importância relativa no momento e depois da abertura. Destes factores salientam-se como os mais importantes a amplitude da maré oceânica, a intensidade da agitação marítima e a cota do espelho de água lagunar. Assim, o sucesso da operação de abertura, mensurável através da longevidade da embocadura, dependerá da conjugação favorável destes factores, apesar de o primeiro e último serem os únicos susceptíveis de previsão, uma vez que as características da agitação marítima dependem de condições meteorológicas não susceptíveis de previsão determinista (Freitas & Ferreira, 2004).

Com o intuito de analisar a evolução morfodinâmica da barra de maré da Lagoa de Santo André, foram efectuados seis levantamentos topográficos na barreira/barra de maré e nas zonas adjacentes antes (25 de Fevereiro de 2009) e após a sua abertura artificial, a 11 de Março de 2009, bem como durante a sua evolução (20 e 27 de Março e 3 de Abril de 2009) e imediatamente após o encerramento natural, a 9 de Abril de 2009. A informação topográfica foi obtida com estação total (Zeiss Re50 e Leica TC4 700) e DGPS RTK

(Leica GPS900). Efectuaram-se ainda três levantamentos batimétricos (antes, durante e após a abertura da barra de maré) através da utilização combinada de DGPS RTK e eco-sonda, tendo como interface o programa de navegação HYPACK® 2008 (Coastal Oceanography Inc.) (Bezerra *et al.*, 2011). Cada um dos seis levantamentos topográficos foi associado aos dados batimétricos os mais recentes na altura de cada topografia de maneira a constituir seis Modelos Digitais de Terreno (MDTs), representativos de outros tantos estádios morfodinâmicos (Figura 2). Para a interpolação espacial foi utilizado o método de *krigagem*.

Na Figura 2A, antes da abertura artificial da barra de maré (25 de Fevereiro de 2009), é possível visualizar que a extensão da barreira anualmente afectada por estas operações (cicatriz de aberturas anteriores) tem um comprimento de aproximadamente 250 m. Nesta secção singular da barreira, a cota máxima da berma, cerca de 4.5 m NMM, é substancialmente inferior à dos segmentos adjacentes, sendo delimitada por duas escarpas, com 6 e 6.5 m de altura, a norte e sul, respectivamente.

A operação de abertura da barra de maré iniciou-se com a escavação por meios mecânicos, nesse segmento mais baixo da barreira, de uma vala transversal, desde os fundos e margem lagunares até à região inferior da face de praia com cota de rasto escassamente inferior à do espelho de água lagunar (Pires *et al.*, 2009), deixando um delgado dique arenoso na margem interior, para evitar o escoamento das águas lagunares durante os trabalhos (Figura 3). Os sedimentos removidos foram

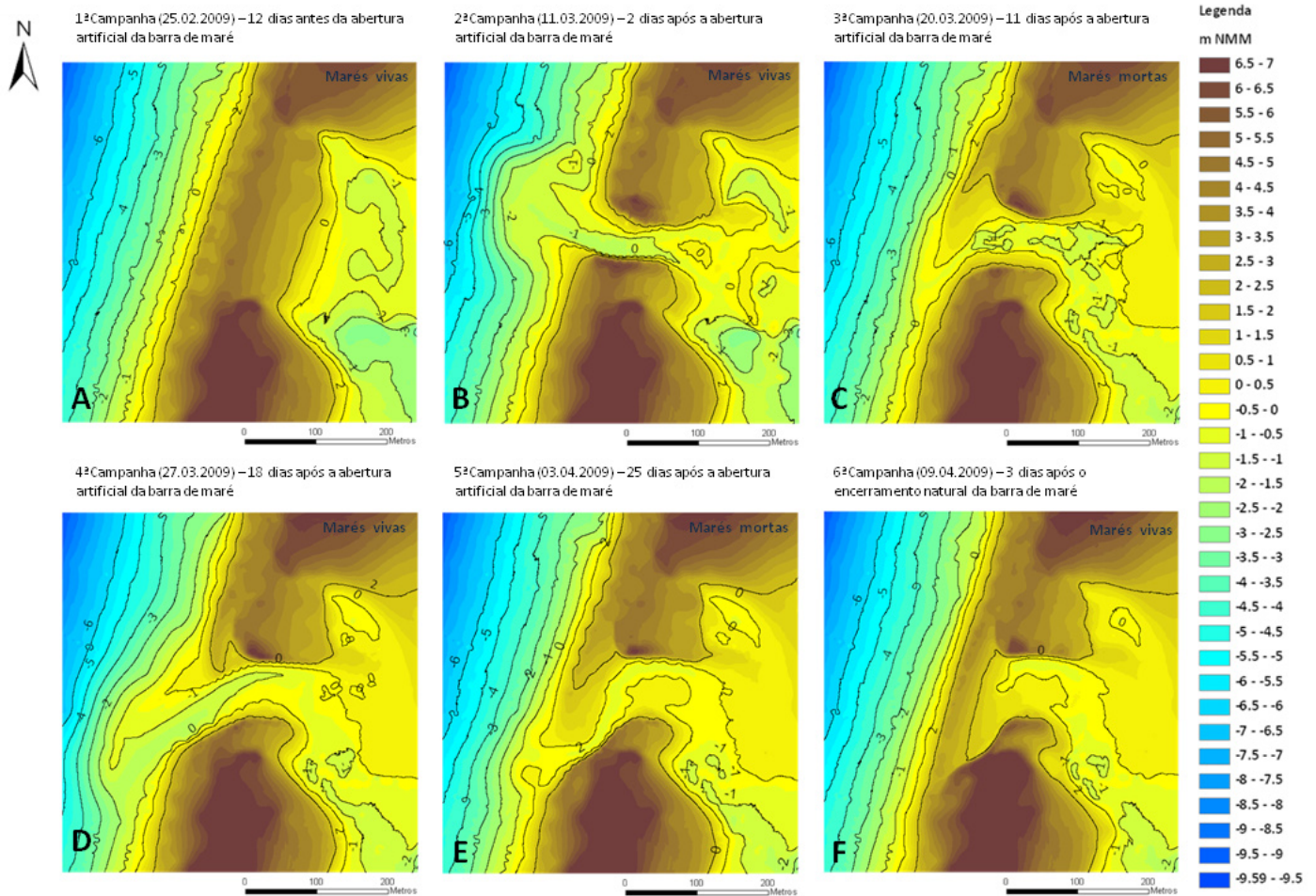


Figura 2. Evolução morfológica medida da embocadura da Lagoa de Santo André.
Figure 2. Observed morphological evolution of the Santo André Lagoon.

depositados a curta distância, elevando localmente a cota da superfície da berma a norte em cerca de 1,5 m e a sul em cerca de 2 m. A ligação entre a laguna e o mar ocorreu com o rompimento intencional do dique, permitindo, assim, a libertação das águas lagunares. Uma vez estabelecida a ligação com o mar, em plena vazante, a água acumulada na laguna foi violentamente ejetada através do sulco estreito, curto e rectilíneo previamente rasgado. O escoamento da primeira vazante, que durou 19h30m, foi responsável pelo alargamento e aprofundamento desse sulco, modelando um canal com perfil em “U”, simétrico e com um único talvegue (Figura 2B). Uma grande quantidade de sedimentos provenientes da erosão dos fundos lagunares próximos e da barreira foi transportada pelo jacto desta vazante extraordinária para os fundos submarinos adjacentes, onde se depositou e formou um delta de vazante localizado a curta distância e no enframento da embocadura (Figura 2B). No interior da laguna formou-se um delta de enchente, mais pequeno, resultando da actividade das correntes de enchente. Ambas as margens do canal recém-formado são escarpadas, como consequência da rápida erosão regressiva e incisão do talvegue operada pelas correntes de maré. Dois dias após a abertura da barra (11 de Março de 2009), a largura do canal era de 50 m e a cota do talvegue atingiu -1,5 m (NMM) - Figura 2B.



Figura 3. Dique (na margem interna da barreira) e vala escavada durante a operação de abertura artificial da embocadura.
Figure 3. Sandy dike on the internal margin of the barrier, and excavated trench during the opening works of the artificial inlet.

Na figura 2C, onze dias após a abertura da barra (20 de Março de 2009), observa-se o aumento da largura do canal para cerca de 80 m, tendo a secção permanecido aproximadamente simétrica, embora o fundo do canal tenha perdido a configuração em “U” e assoreado ligeiramente, elevando a cota do talvegue para valores de -1 m (NMM). Concomitantemente, o transporte de areias induzido pela acção das ondas aproximou o delta de vazante da face de praia e, na margem norte da embocadura, aquela estrutura formou um banco entre marés com a configuração e a dinâmica de uma barra de espalho (“swash bar”) progradante (Pires *et al.*, 2010). Em consequência, o troço exterior do canal de maré deflectiu para sul. Dezoito dias após a abertura da barra (27 de Março de 2009), em regime de marés vivas, a interacção das correntes induzidas pelas ondas e marés conduziu à remodelação do canal para uma secção assimétrica, com o talvegue encostado à margem norte (-1 m NMM) e cotas de 0 m NMM a sul como é possível observar na Figura 2D. A contínua actividade das ondas, e da deriva litoral resultante, foi responsável pelo crescimento persistente para sul da barra de espalho e erosão da margem sul, o que resultou na extensão e meandrização do canal, que se foram acentuando ao longo do tempo. Na Figura 2E, vinte e cinco dias após a abertura da embocadura (3 de Abril de 2009), observava-se um importante desenvolvimento da barra de espalho projectada a partir da margem norte. Esta cresceu para sul, fechando parcialmente a embocadura e desviando ainda mais para sul o segmento externo do canal, que tinha então cerca de 110 m de largura entre margens.

O contínuo processo de remodelação do banco da margem norte induzido pelas ondas, promoveu a sua agradação, acompanhada de acreção ao longo da margem lagunar, e conduziu a que este banco se soldasse definitivamente à praia. Assim, na Figura 2F observa-se a formação de uma berma baixa e curta, articulada numa face de praia, que isola o corpo de água lagunar do oceano. O encerramento da embocadura processou-se de forma natural em marés mortas, através do bloqueio e da colmatação completa do canal ao fim de 28 dias (6 de Abril de 2009).

Após o encerramento natural da embocadura, a nova barreira evoluiu essencialmente em altura, através da acreção de sucessivas lâminas arenosas depositadas por galgamentos oceânicos. Apesar das importantes modificações morfológicas, não houve migração significativa da embocadura.

3. O MODELO MORSYS2D

3.1 Abordagem geral

O sistema de modelos morfodinâmico MORSYS2D (Figura 4) permite simular a evolução batimétrica de zonas costeiras, sob a acção das ondas e das correntes de maré (Fortunato & Oliveira, 2004, Bertin *et al.*, 2009b, Bruneau *et al.*, 2010). Consiste no acoplamento de um modelo de circulação (ELCIRC, Zhang *et al.*, 2004), um modelo de propagação da agitação marítima (SWAN, Booij *et al.*, 1999) e um modelo de transporte de sedimentos e actualização dos fundos (SAND2D, Fortunato e Oliveira, 2004). Este conjunto de modelos é acoplado através de *scripts* em linguagem *perl* que gerem a transferência de informação, fazem o controlo de qualidade dos *inputs* e lançam os vários modelos. Na costa Portuguesa, o MORSYS2D é forçado por resultados de modelos regionais de ondas (Dodet *et al.*, 2010) e marés (Fortunato *et al.*, 2002). Este sistema foi validado com dados de várias embocaduras lagunares – Óbidos (Bertin *et al.*, 2009a; Bruneau *et al.*, no prelo a), Ancão (Bertin *et al.*, 2009c), Aveiro (Plecha *et al.*, 2010) e Aljezur (Guerreiro, 2010) – assim como por comparação com modelos empíricos (Nahon *et al.*, 2009).

3.2 Modelo hidrodinâmico ELCIRC

O modelo de código aberto ELCIRC (Zhang *et al.*, 2004) foi desenvolvido no *Center for Coastal Margin Observation and Prediction* (E.U.A.). Trata-se de um modelo tridimensional baroclínico que combina o método dos volumes finitos, o método das diferenças finitas e conceitos Eulerianos-Lagrangeanos. A combinação destes métodos oferece simultaneamente estabilidade, precisão e conservação

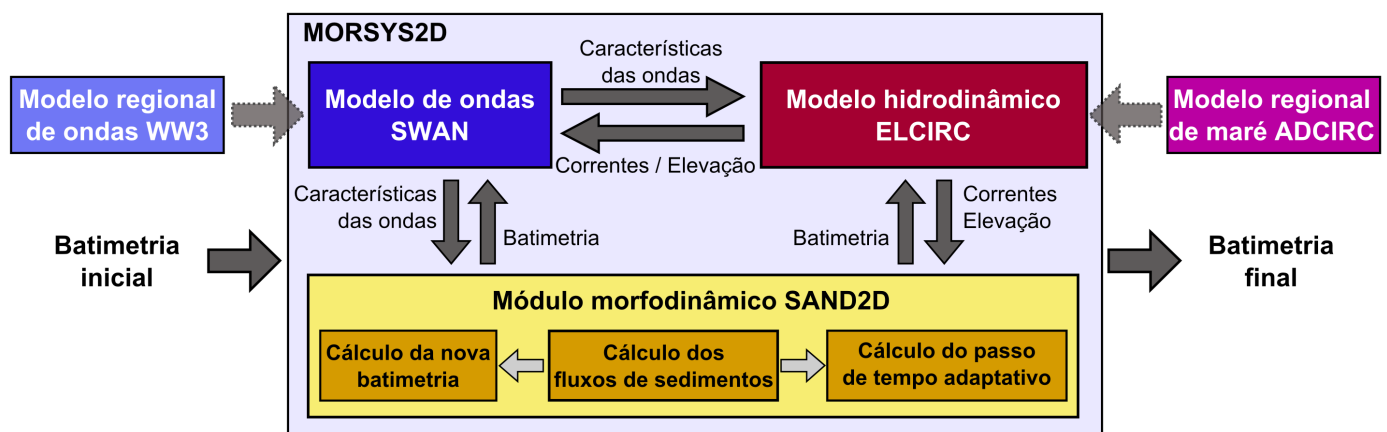


Figura 4. Sistema de modelos MORSYS2D.

Figure 4. MORSYS2D modelling system.

de massa no cálculo da elevação da superfície livre e dos campos da velocidade, salinidade e temperatura.

Este modelo calcula a elevação da superfície livre, as três componentes da velocidade, a salinidade e a temperatura, através de um conjunto de seis equações hidrodinâmicas assumindo as aproximações de Boussinesq e hidrostática. A equação de estado é utilizada para calcular a densidade através da salinidade, temperatura e pressão hidrostática. No âmbito do sistema MORSYS2D, o modelo ELCIRC é utilizado em modo bidimensional horizontal (2DH), pelo que resolve apenas as equações de continuidade e de conservação da quantidade de movimento horizontal. O atrito de fundo é representado por uma fórmula de Manning.

As equações diferenciais são discretizadas no tempo através de um esquema semi-implícito de forma a obter um algoritmo numérico eficiente, cuja estabilidade é independente da celeridade da onda, da tensão do vento, da viscosidade vertical e do atrito de fundo. O gradiente de pressão barotrópico na equação da quantidade de movimento e o termo de fluxo na equação de continuidade são tratados de forma semi-implícita; as condições de fronteira de fundo para as equações da quantidade de movimento são tratadas implicitamente; e todos os outros termos são tratados explicitamente.

Uma das maiores dificuldades no tratamento numérico das equações de águas pouco profundas é a discretização do termo convectivo nas equações de movimento (Casulli & Cheng, 1992). O recurso a métodos Eulerianos conduz a oscilações e frequentemente a problemas de estabilidade, que são frequentemente contornados por recurso a difusão numérica excessiva. Para evitar estes problemas, este modelo utiliza um método Euleriano-Lagrangeano para a discretização dos termos convectivos, o que melhora a estabilidade numérica. Este método permite utilizar passos de cálculo superiores aos dos modelos Eulerianos, sendo mais eficaz em termos computacionais. A discretização do domínio horizontal é efectuada com uma malha não estruturada formada por elementos triangulares ou quadrangulares.

3.3 Representação dos ressaltos hidráulicos

O escoamento em estuários e zonas costeiras ocorre geralmente em regime lento, i.e., com números de Froude (F) inferiores à unidade. No entanto, durante a abertura da embocadura da Lagoa de Sto. André, observou-se a ocorrência de ressaltos hidráulicos no canal de maré, que indicam a passagem de regime rápido a lento (Figura 2). Ao contrário dos ressaltos associados a estruturas, como descarregadores, os ressaltos que ocorrem numa embocadura são móveis e transitórios, estando associados ao aparecimento, migração e desaparecimento de formas de fundo (antidunas). No caso particular da Lagoa de Sto. André, observou-se um fenómeno periódico consistindo na seguinte sequência de eventos: 1) aumento da velocidade no canal de maré; 2) crescimento das formas de fundo com a consequente alteração da superfície livre; 3) formação de ressaltos hidráulicos; 4) redução progressiva da velocidade; e 5) desaparecimento dos ressaltos hidráulicos. Cada ciclo durava 1 a 2 minutos.



Figura 5. Exemplo de ressalto hidráulico na embocadura da Lagoa de Sto. André. Notar a rebentação da onda estacionária, para montante do campo de correntes de vazante, e a lomba (antiduna) associada, realçada pela cor amarelada do fundo, que a diminuição da espessura da coluna de água sobre a forma de fundo torna mais visível.

Figure 5. Example of a hydraulic jump in Santo André Lagoon inlet. Note the breaking of stationary waves, upstream to the ebb current field, and associated antidune, reinforced by the yellowish colour of the bottom, which becomes more visible as the water column becomes smaller.

Estes ressaltos têm assim uma importância significativa no escoamento, uma vez que constituem um mecanismo estabilizador, por introduzirem perdas de carga localizadas e impedirem o aumento da velocidade para valores irrealistas. Este aumento teria um impacto significativo na morfologia do canal, através do aumento dos fluxos de sedimentos no canal e na sua erosão.

A necessidade de considerar estas perdas de carga levou à implementação de uma formulação empírica para representar os ressaltos no modelo ELCIRC, desenvolvida com base nos resultados laboratoriais de Ead & Rajaratnam (2002). Estes autores mostraram que existem as seguintes relações entre o número de Froude a montante do ressalto (F_1), as profundidades a montante (H_1) e a jusante (H_2) deste, e o seu comprimento (L_r):

$$\frac{H_2}{H_1} = F_1 \quad (1)$$

$$L_r = 3.7H_1 \quad (2)$$

Assume-se que o gradiente da superfície livre é aproximadamente constante ao longo do ressalto, o que é consistente com a dificuldade prática de usar uma discretização da malha que permita resolver o ressalto.

Usando esta hipótese, o gradiente da superfície livre η numa zona de ressaltos pode ser escrito como:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{H_2 - H_1}{L_r} \quad (3)$$

onde x representa a direcção principal do escoamento. Admite-se ainda que, quando ocorre um ressalto hidráulico, a equação de conservação da quantidade de movimento ao longo dessa direcção exprime essencialmente um balanço entre o gradiente de pressão barotrópica e a dissipação de energia:

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x} = C_d \frac{U^2}{H} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial \eta}{\partial x} = C_d F^2, \quad \text{com} \quad F = \frac{U}{\sqrt{gH}} \quad (4)$$

onde C_d representa o coeficiente de atrito adimensional, U a velocidade média na vertical, g a aceleração gravítica e H a profundidade local.

Assim, combinando as equações (1)-(4), obtém-se uma expressão para o coeficiente de atrito que representa as perdas de carga associadas ao ressalto hidráulico:

$$\frac{F_1 - 1}{3.7} = C_d F^2 \quad (5)$$

Na prática, a implementação dos efeitos dos ressaltos hidráulicos no modelo hidrodinâmico resume-se à verificação da existência de um número de Froude superior a 1 em cada nó do domínio e cada passo de cálculo. Quando este valor é excedido, calcula-se um coeficiente de atrito adicional, através da equação (5), que é adicionado ao coeficiente de atrito habitual, baseado na lei de Manning. Por simplicidade, admite-se na equação (5) que F e F_1 são idênticos, i.e.:

$$C_d \approx \frac{F - 1}{3.7F^2} \quad (6)$$

A Figura 6 mostra o coeficiente de atrito calculado pela equação (6). Considerando que os coeficientes de atrito

associados ao atrito de fundo são tipicamente da ordem de 0.002 a 0.003, os ressaltos hidráulicos podem introduzir perdas de carga muito significativas, cerca de uma ordem de grandeza superiores àquelas introduzidas pelo atrito de fundo.

3.4 Modelo SWAN

O modelo SWAN, desenvolvido pela *Delft University of Technology*, simula a geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da acção de onda (Booij *et al.*, 1999). Considera os processos físicos de refração, difracção e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por acção dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*) e dissipação de energia devido ao atrito de fundo. O campo de ondas na zona é caracterizado pelo espectro bidimensional (direcção – frequência) de densidade da acção da agitação marítima. Pode ser usado em modo estacionário ou não estacionário. No contexto do MORSYS2D, utiliza-se sempre o modo estacionário. A discretização espacial é feita com malhas estruturadas, rectangulares ou curvilíneas.

3.5 Modelo SAND2D

O modelo SAND2D (Fortunato & Oliveira, 2004, 2007) simula o transporte de areias por acção das correntes, e as alterações batimétricas associadas. O modelo SAND2D resolve uma equação de continuidade para os sedimentos na forma bidimensional (integrada na vertical):

$$\Delta h^i = \frac{1}{1 - \lambda} \nabla Q_s^i \quad (7)$$

onde Δh representa a variação de profundidade num passo de cálculo, Q_s o fluxo de sedimentos integrado num passo de cálculo, λ a porosidade, e i o passo de cálculo. Os fluxos de areia são calculados através de fórmulas de equilíbrio, que representam o transporte sólido forçado por correntes ou por ondas e correntes. A equação é resolvida através de uma técnica de volumes finitos em malhas triangulares não-estruturadas. O passo de tempo morfológico é o tempo sobre

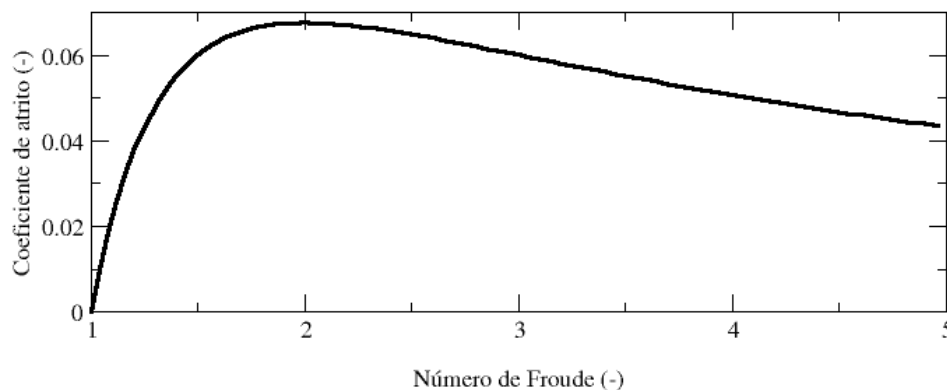


Figura 6. Coeficiente de atrito associado aos ressaltos hidráulicos.

Figure 6. Bottom friction coefficient associated with the hydraulic jumps.

o qual são integrados os fluxos sedimentares. Este determina a frequência com a qual os diversos modelos que compõem o sistema de modelação morfodinâmica são corridos, e contribui para o desempenho do modelo em termos de tempo de cálculo. Para optimizá-lo, foi implementado no SAND2D um método que estima a intensidade dos fluxos no início do ciclo morfodinâmico seguinte, através da extrapolação do valor dos fluxos no fim do ciclo morfodinâmico presente. Esta extrapolação serve para, dentro de limites fixados pelo utilizador, aumentar (quando os fluxos são pequenos) ou reduzir (quando os fluxos são importantes) o passo de cálculo morfológico de maneira a utilizar um passo de tempo o maior possível sem prejudicar os resultados morfológicos (Bertin *et al.* 2009a).

3.6 Erosão das margens do canal

Um aspecto essencial a reproduzir na simulação é o alargamento do canal após a sua abertura. Este alargamento ocorre de forma rápida nos primeiros dias após a abertura, essencialmente através do escorregamento dos taludes laterais do canal e envolvendo a totalidade das vertentes. Estes taludes podem ter inclinações muito importantes (como sugere a Figura 5), dado que o sedimento está parcialmente consolidado e húmido. A simulação deste processo é complexa e não é convenientemente descrita pelas fórmulas de transporte de areia convencionais. Optou-se aqui pela utilização de um filtro numérico, que limita o ângulo entre o fundo e o plano horizontal a um valor fixado pelo utilizador (Fortunato & Oliveira, 2007). Quando esse ângulo é excedido, as profundidades nos nós do elemento em causa são ajustadas de forma a preservar o volume de sedimento, e a garantir o ângulo pré-definido. Na presente aplicação, impôs-se um ângulo máximo de 35° no canal. No resto do domínio, o valor limite foi definido como 10°.

4. MODELAÇÃO MORFODINAMICA

4.1 Aplicação do sistema MORSYS2D

O modelo ELCIRC foi aplicado a um domínio cobrindo toda a laguna e a zona costeira adjacente. A malha de cálculo (Figura 7D) tem 23155 nós e uma resolução entre 1 m (no canal e na zona de rebentação) e 150 m (na fronteira oceânica). O passo de cálculo foi definido como 5 s. O modelo foi forçado pela maré astronómica na fronteira oceânica, proveniente do modelo regional de Fortunato *et al.* (2002), e pelos gradientes de tensões de radiação provenientes do modelo SWAN. O coeficiente de Manning foi especificado como 0.030 m^{1/3}/s na zona do canal e 0.018 m^{1/3}/s no resto do domínio, com uma zona de transição linear.

O modelo SWAN foi aplicado através de três malhas encaixadas que permitem a propagação do clima de agitação do largo até à costa, representando os processos físicos relevantes para cada escala e optimizando os tempos computacionais. A Figura 7A B e C apresenta a sequência de malhas utilizada. A malha mais grosseira (Figura 7A) tem uma resolução de 500 m x 1000 m (perpendicular à costa x paralelo à costa) e estende-se até profundidades de 150 m. Esta malha é forçada por resultados do modelo regional de ondas de Dodet *et al.* (2010), baseado no modelo spectral Wave Watch 3. A malha mais fina, apresentada na

Figura 7C, tem uma resolução de 1 m x 3 m de forma a representar correctamente a zona de rebentação nas praias adjacentes caracterizadas por declives fortes, e a penetração das ondas no canal. Os principais processos físicos considerados são a rebentação e as interacções não lineares onda-onda. Devido à ausência de dados de agitação na zona de rebentação, foi utilizada a parametrização por defeito do SWAN para a rebentação, nomeadamente o quociente entre a altura de onda significativa máxima e a profundidade local (γ) igual a 0.73.

Finalmente, o modelo SAND2D foi aplicado na mesma malha que o modelo ELCIRC para evitar interpolações. Utilizou-se um passo de cálculo morfodinâmico adaptativo, entre 10 e 60 segundos. Os caudais sólidos foram calculados com a fórmula de Soulsby – van Rijn (Soulsby, 1997). O diâmetro mediano dos sedimentos (d₅₀) foi definido no domínio inteiro como 1.15 mm (d₉₀ = 1.18 mm), com base na análise granulométrica a várias amostras recolhidas no campo.

Foram realizadas simulações de 27.25 dias, desde o momento de abertura da embocadura (9 de Março de 2009), até ao seu fecho natural (ausência de sinal de maré nos dados de elevação do plano de água lagunar). As simulações correm, em série (1 processador), em 50% do tempo real.

4.2 Resultados e discussão

A comparação entre os resultados do modelo e os dados de agitação marítima ao nível da bóia de Sines, a uma profundidade de 85 m (Nível Médio do Mar, NMM) e de níveis medidos no Porto de Sines permitiram validar as condições de fronteira e a capacidade dos modelos (SWAN e ELCIRC) propagarem os forçamentos até à costa (Figura 8). Ambos os modelos apresentam erros reduzidos, semelhantes aos expectáveis em simulações deste tipo. Os erros aparentemente mais significativos ocorrem para o período das ondas. No entanto, o período médio calculado a partir dos dados da bóia no domínio do tempo (T_z, período do zero ascendente, fornecido pelo Instituto Hidrográfico) não corresponde exactamente ao período médio TM01 calculado a partir dos espectros obtidos pelo modelo, o que explica parcialmente as discrepâncias observadas.

A comparação dos dados de níveis no interior da Lagoa de Santo André permite avaliar o comportamento global do sistema. Com efeito, os níveis no interior da laguna são afectados simultaneamente por vários processos físicos interdependentes. Por um lado, a propagação da maré através da embocadura é fortemente condicionada pelo atrito e, como as observações sugerem, pelas perdas de carga associadas aos ressaltos hidráulicos. Por outro lado, a configuração da embocadura, que varia fortemente ao longo do tempo, determina em larga medida o prisma de maré e assim, indirectamente, a amplitude da maré na laguna. Finalmente, a própria agitação marítima é responsável por uma sobre-elevação que aumenta a altura de água na embocadura, favorecendo assim a penetração da maré na laguna (*e.g.*, Bertin *et al.*, 2009a). Durante a fase de abertura (dois primeiros dias), a cota do plano de água lagunar foi medida com uma periodicidade de 10 minutos na extremidade interna do canal com um DGPS em modo

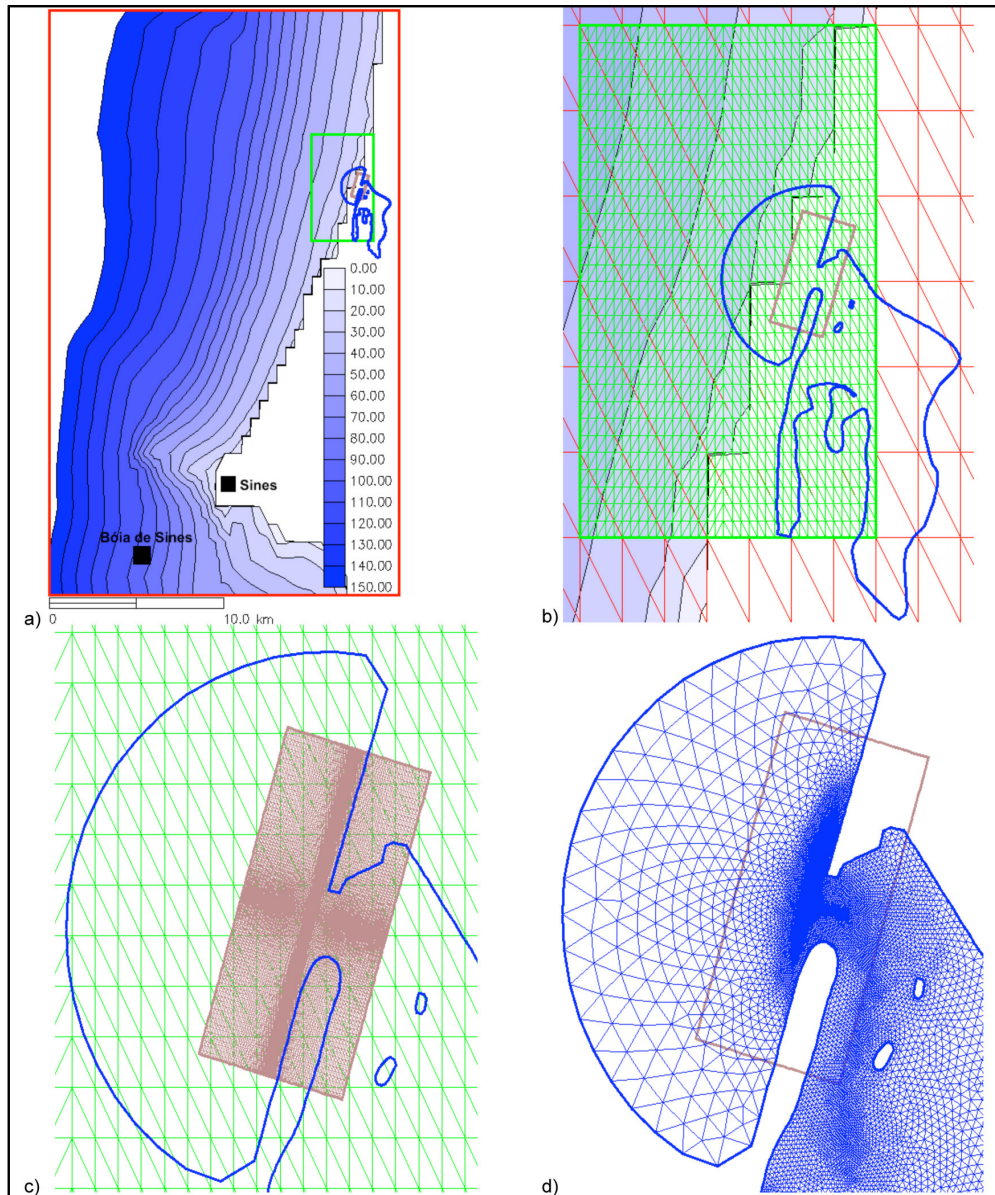


Figura 7. Malhas de cálculo para os modelos SWAN, ELCIRC e SAND2D: a) limites das 4 malhas (3 malhas SWAN, 1 malha ELCIRC/SAND2D); b) detalhe do primeiro aninhamento, a 1ª malha SWAN (vermelho) serve para forçar a 2ª malha SWAN (verde); c) a 3ª malha SWAN (rectilínea, a castanho), forçada pela 2ª malha SWAN, serve para forçar a hidrodinâmica na zona litoral; d) malha triangular dos modelos ELCIRC e SAND2D.

Figure 7. Computational grids used for SWAN, ELCIRC and SAND2D models: a) 4 grid boundaries (3 grids for SWAN, 1 grid for ELCIRC and SAND2D); b) first mesh nesting, the first SWAN grid (red) is used to force the second SWAN grid (green); c) the third SWAN grid (rectilinear, brown), forced by the second SWAN grid, is used to force the hydrodynamics in the nearshore region; d) triangular mesh used for ELCIRC and SAND2D simulations.

RTK. No resto do tempo, esta informação foi recolhida com um transdutor de pressão instalado na lagoa (antes de as medições com o DGPS acabarem) e adquirindo informação igualmente de 10 em 10 minutos. As comparações com o modelo (em relação ao plano de água lagunar) são realizadas ao nível do transdutor.

Os resultados (Figura 9) indicam que a evolução da embocadura nos dias subsequentes à sua abertura é muito bem representada pelo modelo. Em particular, o modelo

representa o período inicial de vazante, que dura mais do que um ciclo de maré, enquanto a água inicialmente presente na laguna se escoava para o mar. Ao longo da simulação, as amplitudes simuladas são ligeiramente inferiores às medidas. O erro quadrático médio (12 cm) é comparável com o obtido em simulações hidrodinâmicas de estuários maiores, em que a morfologia é aproximadamente constante. Neste contexto, pode-se considerar que os resultados são excelentes. Por fim, o modelo prevê uma ligeira redução das amplitudes

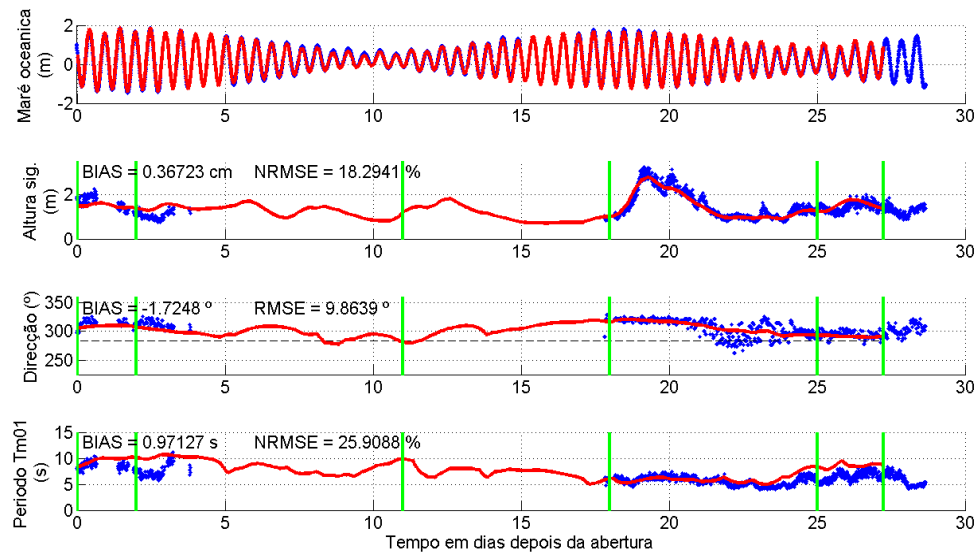


Figura 8. Validação dos modelos SWAN e ELCIRC: comparação dos resultados (vermelho) com dados (azul) de agitação marítima e níveis na bóia de Sines. O período médio espectral Tm01 do modelo é comparado com o período médio calculado no domínio do tempo (zero-crossing) a partir dos dados da bóia. As linhas a verde situam os outputs batimétricos da Figura 10. No caso da direcção, a linha a tracejado indica a direcção normal à praia. A direcção é dada segundo a convenção náutica: 0° para ondas provenientes de norte e 270° para ondas provenientes de oeste.

Figure 8. Validation of the models SWAN and ELCIRC: comparison between the model results (red) and the wave and water level data (blue) at Sines buoy. The model spectral mean period, Tm01 is compared with the mean period calculated within the time domain (zero-crossing) from the buoy data. The green lines indicate bathymetric outputs in Figure 10. Concerning the direction, the dashed line indicates the direction normal to the beach. The direction is given nautical convention: 0° corresponding to waves coming from the north and 270° to waves coming from the west..

por volta do 25º dia de simulação, mas não o fecho total da embocadura.

Uma comparação entre os levantamentos topohidrográficos (Figura 2) e as batimetrias simuladas (Figura 10) permite avaliar em maior detalhe o comportamento do modelo. Nos dois primeiros dias de simulação, a extensão do delta de vazante e a profundidade e a largura do canal são bem reproduzidos. No entanto, enquanto a orientação do canal se mantém aproximadamente inalterada no modelo, os dados indicam a sua reorientação a sul, através da erosão

da margem sul na extremidade de jusante do canal, e o desenvolvimento de um esporão arenoso na extremidade de montante da margem norte. Entre o dia dois e o dia onze, o modelo tem um desempenho mais fraco, não reproduzindo, na extremidade de jusante do canal, o desenvolvimento da restinga da margem norte que desvia o canal para sul. Os resultados numéricos apresentam uma morfologia quase simétrica, típica de uma embocadura dominada pela maré. Depois do dia onze, tanto os resultados do modelo como os levantamentos revelam acumulação de areia proveniente

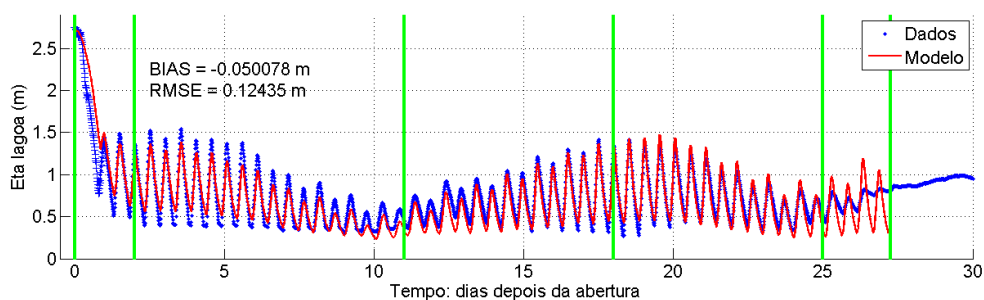


Figura 9. Validação do sistema MORSYS2D: comparação entre os níveis simulados e medidos no interior da lagoa. As linhas verdes situam os outputs batimétricos da Figura 10.

Figure 9. Validation of MORSYS2D system: comparison between simulated and measured water levels inside the lagoon. The green lines indicate bathymetric outputs in Figure 10.

da deriva litoral a norte da embocadura. Com efeito, durante o período simulado, a direcção das ondas ao largo permanece rodada a norte da normal à praia (Figura 8), sugerindo transporte sólido para sul. O modelo reproduz esta acumulação de areia principalmente na zona entre marés, acima da cota -2 m (NMM), ainda que sobrestime a distância entre o banco e a embocadura, possivelmente por não ter em consideração os processos associados à assimetria das ondas. Com efeito, a assimetria as ondas favorece a migração de corpos sedimentares em direcção à costa. Durante o período mais energético que ocorre por volta do dia 20, o modelo reproduz a contínua acumulação de areia e o seu transporte em direcção à costa. No entanto o modelo não reproduz durante este período a redução de amplitude da maré dentro da lagoa observada nos dados no dia 19, e a evolução simulada ocorre exclusivamente nas zonas submareal e entre marés (Figura 10) dado que o modelo não reproduz o transporte sedimentar na zona de espraio. Neste período, as observações indicam que a face exterior da recém-formada restinga (descrita no terreno como barra de espalho) toma progressivamente o aspecto da praia adjacente. Nesta praia com declive forte na face (da ordem dos 10°), os processos de espraio contribuem para a deriva litoral numa faixa restrita e em parte subaérea, e geram o desenvolvimento de uma berma. É este processo que leva ao fecho completo da embocadura. A partir do dia 18, até ao fecho observado, existem semelhanças entre o comportamento morfológico simulado e as observações no terreno. No entanto, as evoluções simuladas ocorrem nas

zonas submareal e entre marés, enquanto uma grande parte das evoluções observadas ocorrem na zona entre marés mas também nas zonas subaéreas. Em particular, esta evolução acontece no desenvolvimento do banco/restinga que acaba por colmatar o canal.

CONCLUSÕES

Na última década, os modelos numéricos morfodinâmicos baseados em processos têm tido um grande desenvolvimento. Ainda assim, a sua aplicação ao caso específico da abertura artificial e fecho de embocaduras está ainda muito mal documentada. Apesar de preliminar, a aplicação do sistema de modelos MORSYS2D à abertura e fecho da embocadura da Lagoa de Santo André, aqui apresentada, constitui assim uma das primeiras aplicações deste tipo, com resultados muito encorajadores.

Esta aplicação mostrou que é fundamental incluir alguns processos frequentemente negligenciados em aplicações deste tipo. Em particular, foi desenvolvida e implementada uma formulação empírica para representar os ressaltos hidráulicos devidos ao desenvolvimento de anti-dunas, e foi adaptado um filtro numérico com vista a reproduzir o alargamento inicial do canal através do escorregamento dos seus taludes laterais. Com estas modificações, o modelo revelou-se capaz de simular o comportamento da embocadura durante os dias seguintes à sua abertura. O bom desempenho do modelo na fase de abertura sugere que este pode ser usado para realizar análises sistemáticas do impacto das características

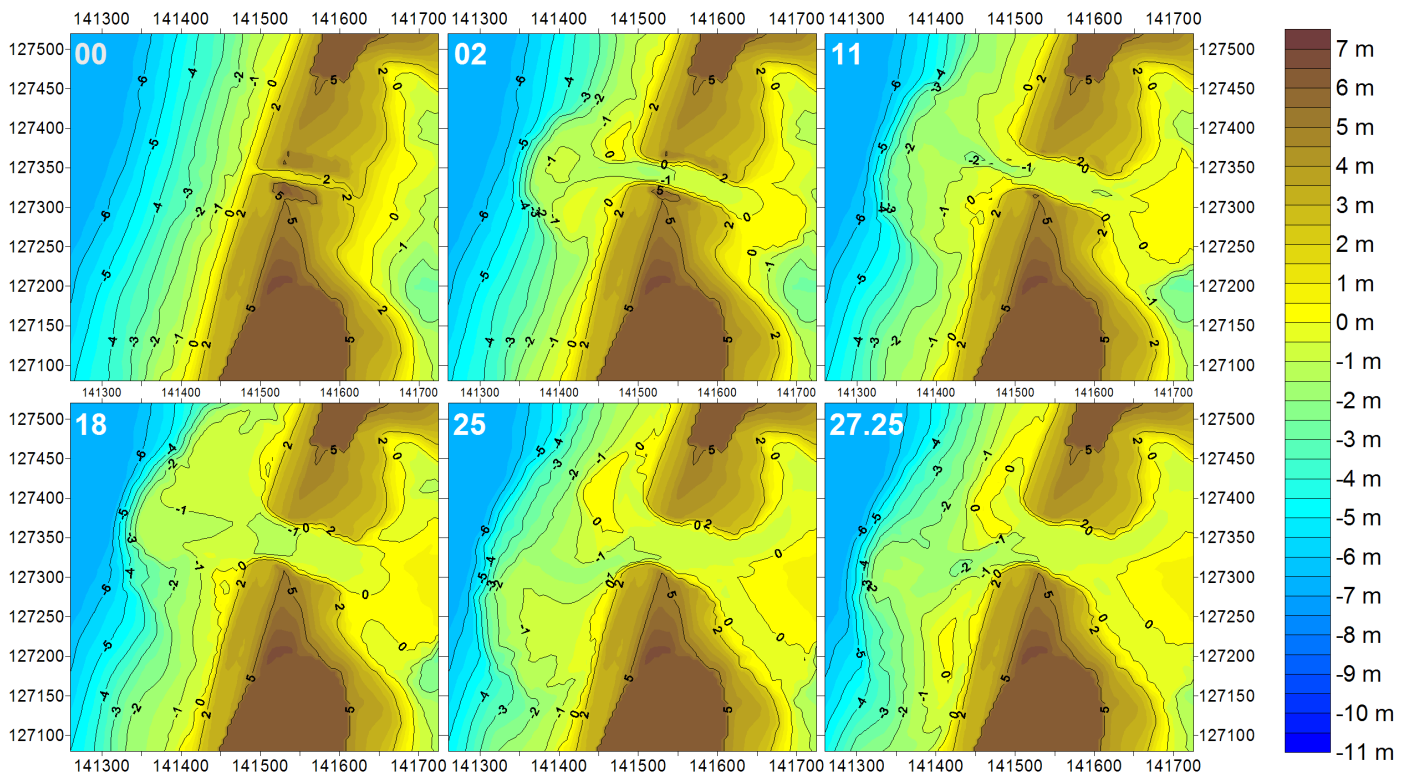


Figura 10. Evolução simulada da embocadura da Lagoa de Sto. André. O tempo simulado, em dias, está indicado em branco no canto superior esquerdo de cada quadro.

Figure 10. Simulated morphological evolution of the Santo André Lagoon Inlet. The simulated time, in days, is indicated in white in the left upper corner of each view.

geométricas da vala inicial escavada ou da posição onde se efectua a aberta. Esta análise permite otimizar o esforço necessário (volume de areia escavado) e a estratégia a adotar para obter uma morfologia que favoreça a longevidade da embocadura.

Pelo contrário, o modelo revelou algumas limitações na reprodução do fecho da embocadura. Com efeito, a colmatagem do canal foi subestimada e não permitiu reproduzir a anulação da amplitude de maré no interior da laguna. De momento, apenas se pode especular sobre as razões que causaram esta dificuldade. Por um lado, é possível que a simulação da propagação das ondas na zona de rebentação tenha produzido desvios significativos dos valores de campo. Em particular, o valor de γ controla a rebentação no modelo e tem um impacto nas correntes geradas. Este parâmetro deve ser calibrado, uma vez que varia em função do tipo de praia. No entanto, a falta de dados de agitação junto à costa para calibração do modelo de ondas levou à utilização da parametrização usada por defeito neste modelo, ainda que vários estudos mostrem que esta é simplista e nem sempre a mais apropriada para representar a rebentação (e.g., Ruessink et al., 2003, Bertin et al., 2009b, Bruneau et al., no prelo). Por outro lado, a fórmula utilizada para o cálculo do transporte sedimentar revelou-se apropriada para representar a erosão inicial do canal, não sendo, porém, necessariamente a que melhor reproduz a deriva litoral. Em ambos os casos, uma melhor calibração do modelo é necessária para melhorar o seu desempenho. É ainda provável que o fecho da embocadura esteja parcialmente associado ao transporte perpendicular à costa, que desloca o banco de vazante em direcção a terra, colmatando a embocadura. A confirmar-se esta hipótese, é natural que algumas simplificações do modelo no que respeita ao transporte perpendicular à costa limitem a reprodução correcta deste processo. Em particular, não se considerou aqui o bloqueamento das ondas pelas correntes de vazante (Chawla & Kirby, 2002), o transporte associado à assimetria da onda (Hoefel & Elgar, 2003), e ainda o efeito das ondas infra-gravíticas (Roelvink et al., 2009). Finalmente, a comparação entre as batimetrias medidas e simuladas sugere também que o transporte na zona de espraio, que não é representado no modelo, tem um papel importante no crescimento em extensão e envergadura do banco arenoso que fecha a embocadura. A confirmar-se esta hipótese, o transporte na zona de espraio deverá ainda ser incluído no modelo para permitir uma representação adequada ao encerramento da barra. Novos desenvolvimentos estão actualmente em curso para esclarecer estas questões.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, projecto FCT-PTDC/MAR/65585/2006, “DETI – Dinâmica de barras de maré efémeras”. Agradece-se ainda a disponibilização dos modelos ELCIRC e SWAN aos seus autores. Os autores agradecem ainda ao Prof. Trigo Teixeira, e aos dois revisores anónimos que contribuíram para melhorar a qualidade deste artigo.

BIBLIOGRAFIA

- Bertin, X.; Fortunato, A.B.; Oliveira, A. (2009a) - A modeling-based analysis of processes driving wave-dominated inlets. *Continental Shelf Research*, 29(5-6):819-834. DOI: 10.1016/j.csr.2008.12.019.
- Bertin, X.; Fortunato, A.B.; Oliveira, A. (2009c) - Morphodynamic modeling of the Ancão Inlet, South Portugal. *J. Coastal Research*, SI56:10-14. Disponível em http://www.cerf-jcr.org/images/stories/10.14_X.Bertin_ICCS2009.pdf.
- Bertin, X.; Oliveira, A.; Fortunato, A.B. (2009b) - Simulating morphodynamics with unstructured grids: Description and validation of a modeling system for coastal applications. *Ocean Modelling*, 28(1-3): 75-87. DOI: 10.1016/j.ocemod.2008.11.001.
- Bezerra, M.; Ferreira, Ó.; Pacheco, A.; Freitas, M.C.; Pires, A.R.; Andrade, C.; Tabora, R. (2011) - Stages in the evolution of an ephemeral tidal inlet immediately after artificial opening. *Journal of Coastal Research*, SI64:1453-1456. Disponível em http://www.form.ics2011.pl/artic/SP64_1453-1456_M.Bezerra.pdf.
- Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. (1999) - A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4):7649-7666. DOI: 10.1029/1998JC900123.
- Bruneau, N.; Bonneton, P.; Castelle, B.; Pedreros, R. (no prelo b) - Modeling rip current circulations and vorticity in a high-energy meso-macrotidal environment. *Journal of Geophysical Research – Oceans* (em impressão).
- Bruneau, N.; Fortunato, A.B.; Dodet, G.; Freire, P.; Oliveira, A.; Bertin, X. (no prelo a) - Future evolution of a tidal inlet due to changes in wave climate, sea level and lagoon morphology (Óbidos Lagoon, Portugal). *Continental Shelf Research* (em impressão). DOI:10.1016/j.csr.2011.09.001
- Bruneau, N.; Fortunato, A.B.; Oliveira, A.; Bertin, X.; Costa, M.; Dodet, G. (2010) - Towards long-term simulations of tidal inlets: performance analysis and application of a partially parallelized morphodynamic modeling system. *XVIII International Conference on Computational Methods in Water Resources*, CD-ROM, Barcelona, Espanha.
- Casulli, V.; Cheng, R.T. (1992) - Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15: 629-648. DOI: 10.1002/flid.1650150602.
- Cayocca, F. (2001) - Long-term morphological modeling of a tidal inlet: the Arcachon Basin, France. *Coastal Engineering* 42(2):115-142. DOI: 10.1016/S0378-3839(00)00053-3.
- Chawla, A.; Kirby, J.T. (2002) - Monochromatic and random wave breaking at blocking points. *Journal of Geophysical Research*, 107(C7), 3067. DOI: 10.1029/2001JC001042.
- Cruces, A. (2001) - *Estudo micro e meso-escala temporal dos sistemas lagunares do SW alentejano (Portugal) – lagoas de Melides e Santo André*. Dissertação de Mestrado, 228p., Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Dodet, G.; Bertin, X.; Tabora, R. (2010) - Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, 31(3-4):120-131. DOI: 10.1016/j.ocemod.2009.10.010.

- Ead, S.A.; Rajaratnam, N. (2002) - Hydraulic Jumps on Corrugated Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7):656-663. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656).
- Fortunato, A.B.; Oliveira, A. (2004) - A Modeling System for Tidally Driven Long-term Morphodynamics. *Journal of Hydraulic Research*, 42(4): 426-434. Disponível em http://www.unc.edu/ims/adcirc/publications/2004/request/2004_Fortunato.pdf.
- Fortunato, A.B.; Oliveira, A. (2007) - Improving the stability of a morphodynamic modeling system. *Journal of Coastal Research*, SI50:486-490. Disponível em <http://www.griffith.edu.au/conference/ics2007/pdf/ICS093.pdf>.
- Fortunato, A.B.; Pinto, L.; Oliveira, A.; Ferreira, J.S. (2002) - Tidally generated shelf waves off the western Iberian coast. *Continental Shelf Research*, 22(14):1935-1950. DOI: 10.1016/S0278-4343(02)00069-9.
- Freitas, M.C.; Andrade, C.; Rocha, F.; Tassinari, C.; Munhá, J.M.; Cruces, A.; Vidinha, J.; Silva, C. M. (2003) - Lateglacial and Holocene environmental changes in Portuguese coastal lagoons: 1. The sedimentological and geochemical records of the Santo André coastal area (SW Portugal). *The Holocene*, 13(3):433-446. DOI: 10.1191/0959683603hl636rp
- Freitas, M.C.; Ferreira, T. (2004) - Lagoa de Albufeira. Geologia. In: *Lagoa de Albufeira. Geologia. Comunidade de Aves. Avaliação ecológica e socioeconómica e factores que influenciam a gestão*, pp.11-52, Instituto da Conservação da Natureza, Centro de Zonas Húmidas, Lisboa, Portugal. Disponível em http://www.acaprena.org.br/planodemanejo/artigos/lagoa_de_albufeira.pdf
- Guerreiro, M. (2010) - *Morphodynamic modeling of the Aljezur stream*. Dissertação de Mestrado, 58p., Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Hoefel, F.; Elgar, S. (2003) - Wave-induced sediment transport and sandbar migration. *Science*, 299(5614):1885-1887. DOI: 10.1126/science.1081448.
- Nahon, A.; Bertin, X.; Fortunato, A.B.; Oliveira, A. (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, 13p., Paris, França.
- Oliveira, A.; Fortunato, A.B.; Rodrigues, M.; Azevedo, A. (2007) - Integration of physical and water quality models. *Houille Blanche*, 4:40-46. DOI: 10.1051/lhb:2007076.
- Pires, A.R.; Ramos, R.; Freitas, M.C.; Taborde, R.; Andrade, C.; Cruces, A.; Ferreira, Ó.; Pacheco, A. (2010) - Morfodinâmica da barra de maré efêmera da Lagoa de Santo André (SW Portugal). *Coastal Hope, Livro de Resumos*. Lisboa, Portugal.
- Pires, R.; Freitas, M.C.; Andrade, C.; Ramos, R.; Ferreira, Ó.; Pacheco, A.; Nahon, A.; Antunes, C.; Fortunato, A.B.; Bertin, X.; Oliveira, A.; Taborde, R.; Cruces, A.; Silva, A. (2009) - Morfodinâmica de uma barra de maré efêmera (Lagoa de Santo André, SW Portugal)., 6º *Simpósio sobre a Margem Ibérica Atlântica*, pp. 217-220, Oviedo, Espanha.
- Plecha, S.; Silva, P.A.; Vaz, N.; Bertin, X.; Oliveira, A.; Fortunato, A.B.; Dias, J.M. (2010) - Sensitivity analysis of a morphodynamic modelling system applied to a coastal lagoon inlet. *Ocean Dynamics*, 60(2): 275-284. DOI: 10.1007/s10236-010-0267-5.
- Ranasinghe, R.; Pattiaratchi, C. (2003) - The seasonal closure of tidal inlets: causes and effects. *Coastal Engineering Journal*, 45(4):601-627. DOI: 10.1142/S0578563403000919.
- Roelvink, D.; Reniers, A.; van de Dongeren, A.; de Vries, J.; McCall, R.; Lescinski, J. (2009) - Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11-12):1133-1152. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.08.006.
- Ruessink, B.G.; Walstra, D.J.R.; Southgate, H.N. (2003) - Calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches. *Coastal Engineering*, 48: 139-149. DOI: 10.1016/S0378-3839(03)00023-1.
- Soulsby, R. (1997) - *Dynamics of marine sands, a manual for practical applications*. Thomas Telford, Wallingford, England, U.K. ISBN: 072772584X.
- Zhang, Y.; Baptista, A.M; Myers, E.P. (2004) - A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment. *Continental Shelf Research*, 24(18):2187-221. DOI: 10.1016/j.csr.2004.07.021.