

Contribuição para o estudo da propagação da maré no setor oeste da Ria Formosa

J. Jacob (1), S. Carneira (1), M. Rodrigues (2), N. Bruneau (3), A. Azevedo (2), A. Fortunato (2), A. Cravo (1) e M. Rosa (1)

- (1) Universidade do Algarve, CIMA, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal, jjacob@ualg.pt.
 (2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.
 (3) Laboratório Nacional de Engenharia Civil e British Antarctic Survey.

Resumo: O projeto COALA tem como objetivo compreender a dinâmica dos nutrientes, clorofila-*a* e matéria em suspensão no setor oeste da Ria Formosa. Para isso é importante estudar e caracterizar a hidrodinâmica bastante complexa da Ria Formosa.

As primeiras campanhas do projeto COALA foram realizadas no Outono de 2011. Incluíram a colocação de dois sensores de pressão, um na barra de Faro-Olhão e o outro no cais comercial de Faro, durante um período de 2 meses, para estudar a variação do nível do mar em função da maré e outros fenómenos de baixa frequência. A análise dos dados de nível do mar permitiu caracterizar dois ciclos mensais de maré completos, proporcionando informação acerca da propagação e distorção da maré ao longo do canal de Faro. Estes dados permitiram validar o modelo hidrodinâmico ELCIRC, cuja utilização vai ajudar a caracterizar as correntes, o prisma e a distorção da maré na ria Formosa.

Palavras chave: barra de maré, propagação da maré, prisma de maré, modelo hidrodinâmico, Ria Formosa, Projeto COALA.

1. INTRODUÇÃO

A Ria Formosa é um sistema lagunar localizado na costa sul de Portugal, com cerca de 80 km², 55 km de comprimento na direção E-W e 6 km de largura máxima. Tem seis ligações permanentes ao oceano, que proporcionam uma grande renovação de água. É um sistema com um regime meso-mareal - altura média das marés ~ 2 m, numa gama que varia entre 1,5 m e -3,5 m - com predominância de marés semi-diurnas, bem misturado verticalmente, sem evidência de estratificação salina ou térmica devido à reduzida entrada de água doce e à predominância do efeito da maré na circulação da água no seu interior.

Através do projeto *Nutrients and particulate matter dynamics - exchanges between a COAstal Lagoon and the adjacent ocean through a multiple inlet system: the case of Ria Formosa, south of Portugal - COALA* pretende-se caracterizar a distribuição espacial e as escalas temporais de variabilidade da concentração dos nutrientes, clorofila-*a* e matéria em suspensão na Ria Formosa. Os principais objectivos deste projecto são compreender a dinâmica destes compostos, em particular a importância das trocas de massa entre a Ria Formosa e o oceano e entender a influência desta dinâmica na actividade biológica deste ecossistema. Para isso, é necessário caracterizar a circulação dentro da ria Formosa e as trocas de água com o oceano através das barras.

A influência da maré na hidrodinâmica da Ria Formosa e na dinâmica das barras e a quantificação dos prismas de maré e trocas de água com o oceano adjacente tem sido objeto de diversos estudos, dos quais se referem os trabalhos de Salles (2001),

Soares *et al.* (2001), Salles *et al.* (2005), Dias *et al.* (2009) e Pacheco *et al.* (2010).

O conhecimento e a caracterização da hidrodinâmica da Ria Formosa, em particular a circulação da água no seu interior, as trocas com o oceano através das barras e a influência da maré são essenciais para se poder compreender a dinâmica dos nutrientes, clorofila-*a* e matéria em suspensão. Com este objetivo foi feita e é apresentada neste trabalho uma análise harmónica de duas séries temporais com dois meses de valores do nível do mar obtidos em dois pontos do canal de Faro, um na barra de Faro-Olhão e o outro no cais comercial de Faro. Os dados experimentais foram comparados com os resultados da aplicação na Ria Formosa do modelo numérico de circulação ELCIRC (Zhang *et al.*, 2004), obtidos nos mesmos pontos durante os mesmos períodos. Estão a decorrer e estão previstas mais campanhas para medição do nível do mar e outros parâmetros, que permitirão continuar este estudo e aprofundar o conhecimento da hidrodinâmica da Ria Formosa.

2. MÉTODOS

2.1. Campanhas Experimentais

O setor ocidental da Ria Formosa, onde ~ 90 % do volume total de água é trocado com o oceano ao longo de um ciclo de maré semi-diurna, engloba as barras do Ancão, Faro-Olhão e Armona e diversos canais e esteiros. De entre os canais, destaca-se o canal de Faro que liga a barra de Faro-Olhão ao porto e à cidade de Faro (Fig. 1).

As primeiras campanhas do projeto COALA tiveram início no dia 14 de Outubro de 2011 com a colocação dos dois sensores de pressão (PT Level

TROLL) em locais distintos do canal de Faro, um no cais da ilha Deserta/barra de Faro-Olhão (CID) e o outro no cais comercial de Faro (CCF) (Fig. 1) e terminaram com a sua recolha, no dia 14 de Dezembro de 2011. Estas duas localizações estão sujeitas a condições ambientais distintas, uma (CID) exposta às trocas diretas com o oceano, como por exemplo a maré costeira e a ondulação e a outra (CCF) no interior da ria Formosa, 6 km a montante da primeira e resguardada da influência direta do oceano adjacente.



Fig. 1. Setor oeste da Ria Formosa e localização dos sensores de pressão: CCF –cais comercial de Faro; CID – Cais da ilha Deserta.

Durante estas campanhas foram realizadas três amostragens de ciclo de maré semi-diurna em maré-viva e três amostragens de ciclo de maré semi-diurna em maré-morta, nas três barras do setor oeste da ria Formosa: nos dias 22 de Novembro e 7 de Dezembro na barra do Ancão, nos dias 23 de Novembro e 6 de Dezembro na barra da Armonia e canal de Marim e nos dias 24 de Novembro e 5 de Dezembro na barra de Faro-Olhão e nos canais de Faro e de Olhão. Em cada amostragem foi medida a velocidade ao longo da secção recta dos canais com um perfilador acústico por efeito de Doppler (ADP Bottom Track, Sontek), a temperatura, a salinidade, o pH e o oxigénio dissolvido com uma sonda multiparamétrica YSI 6600 XL e foram recolhidas amostras de água com uma garrafa de Niskin de 5 litros para análise dos nutrientes e matéria em suspensão (clorofila-*a* e sedimentos em suspensão) em vários níveis no centro dos canais, com um intervalo de amostragem de uma hora.

Foi efetuada uma análise harmónica clássica dos dados de nível do mar medidos nos dois locais, CCF e CID. Para isso usou-se um conjunto de programas e de subrotinas implementadas em MatLab, o pacote T-TIDE (Pawlowicz *et al.*, 2002). A partir desta análise harmónica foram sintetizadas novas séries temporais de dados usando as componentes MSF, Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, MN4, M4, MS4, M6. Estas novas séries foram posteriormente comparadas com as séries de dados obtidas nos mesmos locais a partir da aplicação do modelo ELCIRC à ria Formosa.

2.2. Modelação Numérica

2.2.a Descrição do modelo

O modelo ELCIRC é 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 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. Uma descrição detalhada do modelo pode ser encontrada em Zhang *et al.* (2004).

2.2.b Aplicação na Ria Formosa

A aplicação do modelo ELCIRC utilizada no presente estudo baseia-se em Portela *et al.* (2011). As simulações foram realizadas em modo bidimensional barotrópico. O domínio horizontal foi discretizado numa malha com 90036 nós e 176937 elementos, cuja resolução espacial varia entre 10 m e 6 km (Fig. 2). A batimetria de base utilizada foi a de 1980, tendo sido actualizada com os dados batimétricos mais recentes (2001, 2003, 2004, 2008 e 2010) e combinada pontualmente com informação retirada de fotografia aérea (Fig. 3). Foi considerada apenas uma fronteira aberta, a oceânica, a qual foi forçada pela maré. No forçamento pela maré utilizaram-se 14 constituintes (Z0, MSF, Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, MN4, M4, MS4, M6) obtidas através do modelo regional de Fortunato *et al.* (2002). O passo de cálculo considerado foi de 60 s.

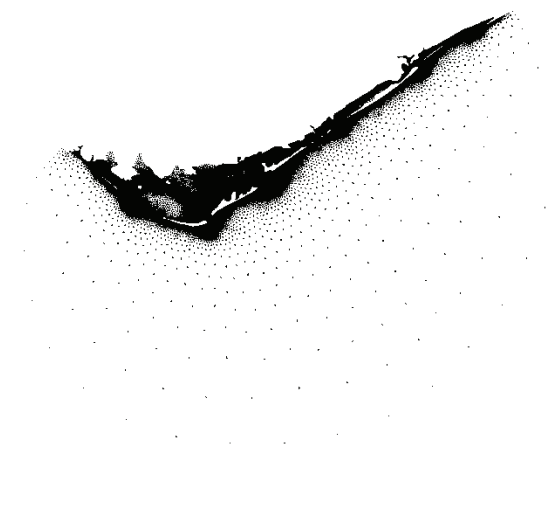


Fig. 2. Malha de cálculo horizontal.

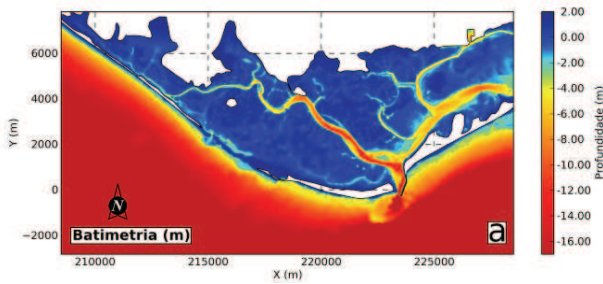


Fig. 3. Batimetria no domínio de estudo referida ao nível médio do mar.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como já foi referido anteriormente, foi feita uma análise harmónica com o programa T_TIDE, das duas séries temporais de dois meses de valores do nível do mar obtidas na barra de Faro-Olhão e no cais comercial de Faro, com um intervalo de amostragem de 10 minutos. De acordo com Pugh (2004), para se fazer uma análise harmónica satisfatória, a série temporal deve ter uma extensão de pelo menos um mês lunar com um intervalo de amostragem de uma hora (709 horas), embora o ideal seja um ano (8766 horas).

A Figura 4 contém a representação temporal da síntese das componentes MSF, Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, MN4, M4, MS4, M6 após análise harmónica das séries dados medidos de nível do mar para as duas localizações, em sobreposição com as soluções do modelo ELCIRC nos mesmos locais, para os mesmos períodos e usando as mesmas harmónicas. Os erros quadráticos médios (EQM) dos resultados do modelo relativamente aos dados de campo estão registados na Tabela I. Este erro permite avaliar a qualidade da previsão do modelo (Dias *et al.*, 2009).

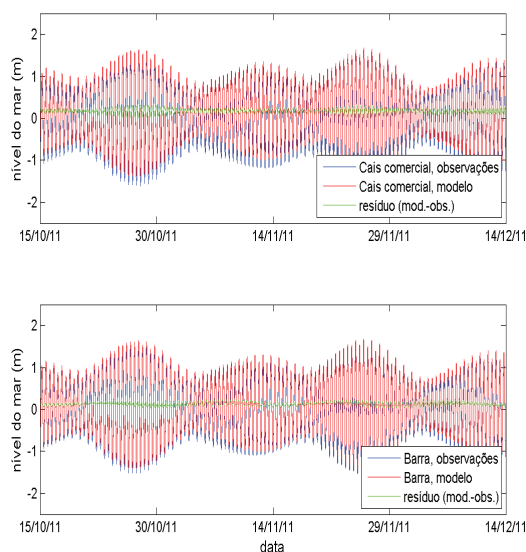


Fig. 4. Séries temporais de dados de nível do mar sintetizados para os valores medidos (a azul) e para os resultados do modelo (a vermelho): em cima - cais comercial de Faro; em baixo - barra de Faro-Olhão.

Tabela I. EQM . Erro quadrático médio para o desempenho do modelo relativamente aos valores medidos.

	Dados (total)	Dados (síntese)
EQM – Cais Ilha Deserta	8.2 cm	5.3 cm
EQM – Cais Comercial Faro	12.3 cm	6.2 cm

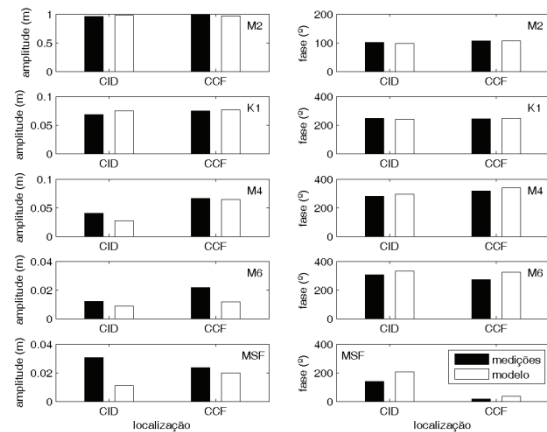


Fig. 5. Distribuições da amplitude e fase de maré para as constituintes harmónicas M2, K1, M4, M6 e MSF: barras a negro - medições; barras brancas - resultados do modelo).

Em ambas as estações, os EQM revelam uma boa concordância entre os dados e o modelo. Os EQM obtidos no presente estudo são da mesma ordem de grandeza ou inferiores aos obtidos por Dias *et al.* (2009).

A comparação entre as constituintes M2, K1, M4, M6 e MSF dos dados e do modelo é apresentada na Figura 5. Os resultados sugerem uma dominância das constituintes semi-diurnas e diurnas, a qual já tinha sido observada em estudos anteriores (e.g. Dias *et al.*, 2009). De um modo geral, observa-se uma boa concordância entre os resultados do modelo e os dados. Para a constituinte M2, observam-se diferenças de amplitude de cerca de 1 cm e de fase de 4° no cais da Ilha Deserta. No cais Comercial de Faro estas diferenças são de 3 cm e de 1°, respectivamente. Para a constituinte K1 as diferenças de amplitude entre os dados e o modelo são inferiores a 1 cm no cais da Ilha Deserta e a 0.2 cm no cais comercial de Faro.

As diferenças observadas poderão decorrer de diferenças batimétricas, dado que a batimetria utilizada não é contemporânea dos dados, e da definição das condições de fronteira. Desenvolvimentos futuros do modelo incluirão a actualização da batimetria com base nos dados mais recentes, assim como a actualização das condições fronteiras. Esta aplicação servirá de base à implementação do modelo SELFE (Zhang e

Baptista, 2008) em modo baroclínico na Ria Formosa. O modelo SELFE será utilizado conjuntamente com um modelo de partículas para estudar os fluxos de clorofila-*a* e nutrientes entre a Ria e o mar.

Refira-se ainda que no âmbito do projeto COALA foram realizadas na primavera de 2012 mais três amostragens de ciclo de maré semi-diurna em maré-viva e três amostragens de ciclo de maré semi-diurna em maré-morta, nas três barras do setor oeste da ria Formosa. Foram colocados novamente os dois sensores de pressão nos mesmo locais, igualmente por um período de 2 meses. Os dados adquiridos permitirão prosseguir este estudo, proporcionando um conhecimento ainda mais completo da propagação e distorção da maré na Ria Formosa, em condições distintas. Está também em curso o cálculo dos prismas de maré nas mesmas barras e nos canais adjacentes, a partir das secções de velocidade medidas ao longo de ciclos de maré semi-diurna completos em situações distintas num mesmo ciclo quinzenal, em maré viva e maré morta e em diferentes alturas do ano.

O conhecimento da hidrodinâmica da Ria Formosa será ainda aprofundado através do estudo da influência relativa do vento na circulação no seu interior, com o acoplamento dos resultados de um modelo atmosférico de mesoscala ao modelo hidrodinâmico. Além disso, o conhecimento conjunto da hidrodinâmica da Ria Formosa, da distribuição espacial e das escalas temporais de variabilidade da concentração dos nutrientes, clorofila-*a* e matéria em suspensão irá permitir compreender a dinâmica destes compostos, em particular a importância das trocas de massa entre a Ria Formosa e o oceano e entender a influência desta dinâmica na actividade biológica deste ecossistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do António Brás e do Sr. Alves, pescador residente na ilha Deserta, na colocação do PT na ilha Deserta e do IPTM-Sul na escolha e autorização de utilização dos locais para colocar os 2 PT's e na sua recuperação. Este trabalho foi suportado pela Fundação Para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do Projeto de Investigação PTDC/MAR/114217/2009 - COALA.

REFERÊNCIAS

- Dias J.M., Sousa M.C., Bertin X., Fortunato A.B. e Oliveira A. (2009). Numerical modeling of the impact of the Ancão Inlet relocation (Ria Formosa, Portugal). *Environmental Modelling & Software*, 24 (6), 711-725.
- Fortunato A.B., Pinto L.L., Oliveira A. e Ferreira J.S. (2002). Tidally-generated shelf waves off the western Iberian coast. *Continental Shelf Research*, 22 (14), 1935-1950.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. e Lentz, S. (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T_TIDE. *Computers and Geosciences*, 28, 929-937.
- Pacheco, A., Ferreira, Ó., Williams, J.J., Garel, E., Vila-Concejo, A. and Dias, J.A. (2010). Hydrodynamics and equilibrium of a multiple-inlet system. *Marine Geology*, 274, 32-42.
- Portela L., Azevedo A e Fortunato, A.B. (2011). *Valorização hidrodinâmica da Ria Formosa e mitigação do risco nas ilhas barreira*, Relatório 3: Valorização hidrodinâmica da laguna, 3ª fase. Relatório 395/2011-NEC, Lisboa.
- Pugh, D. (2004). *Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather and Climate*. Cambridge University Press, 265 pp.
- Salles, P. (2001). *Hydrodynamic controls on multiple tidal inlet persistence*. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 272 pp.
- Salles, P., Voulgaris, G. e Aubrey, D. (2005). Contribution of Nonlinear Mechanisms in the Persistence of Multiple Tidal Inlet Systems. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 65, 475-491.
- Soares, C., Onofre, J. e Grade, N. (2001). Caracterização Hidrodinâmica do Sistema de Barras da Ria Formosa. *Actas das 2^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Sines, Associação Internacional de Navegação, CD-ROM, 14 p.
- Zhang, Y. e Baptista, A.M. (2008). SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modeling*, 21 (3-4), 71-96.
- Zhang, Y., Baptista, A.M. e 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.