

MODELAÇÃO HIDRODINÂMICA DE ESCOAMENTOS COSTEIROS

F. Martins*, R. Neves**, P. Chambel***

*Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve
Campus da Penha 8000 Faro. fmartins@ualg.pt

Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1096 Lisboa
Codex. Email: **ramiro.neves@hidrox.ist.utl.pt, ***pchambel.hidromod@taguspark.pt

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras, os estuários e os sistemas lagunares são regiões de elevada importância do ponto de vista económico devido à intensa actividade nelas desenvolvida. Encontram-se por esse motivo sujeitas a fortes pressões do tipo ambiental. A correcta gestão dos seus recursos deve ser apoiada em ferramentas que possibilitem uma análise precisa dos fenómenos que nelas ocorrem e permitam a previsão da evolução desses sistemas. A recente evolução na capacidade de cálculo dos computadores de pequeno porte tornou viável a utilização de modelos hidrodinâmicos como ferramentas de apoio à decisão. Este tipo de modelos, por caracterizarem o sistema do ponto de vista físico, além de darem pistas para os mecanismos presentes no domínio constituem a base para a aplicação de modelos específicos de transporte de sedimentos, de qualidade da água e biológicos que permitem responder a questões particulares sobre esses sistemas.

DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo apresentado resolve as equações primitivas tridimensionais em coordenadas cartesianas para fluido incompressível com as simplificações de Boussinesq e equilíbrio hidrostático:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -2\varepsilon_{ijk} \Omega_j u_k - g \frac{\rho_\eta}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_s}{\partial x_i} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x_i} dx_3 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x_3} = -\rho g \quad (3)$$

onde u_i são as componentes do vector velocidade nas direcções cartesianas x_i , η é a elevação da superfície livre, Ω a velocidade de rotação da terra, A_i as viscosidades turbulentas e p_s é a pressão atmosférica. ρ é a massa volúmica e ρ' é a sua anomalia. A massa volúmica é calculada como função da temperatura e salinidade pela lei constitutiva [Leendertsee e Liu, 1978]. O campo de velocidades transporta a salinidade, a temperatura e qualquer espécie química usando uma equação de advecção-difusão.

O modelo resolve estas equações usando um algoritmo semi implícito do tipo ADI com dois níveis de tempo por iteração. Foram implementados os esquemas S21 de 4 equações [Abbott et al. 1973] e de 6 equações [Leendertse, 1967].

A discretização usa o método dos volumes finitos que é aplicado no espaço real a células tetraédricas de forma arbitrária. A generalização da forma da célula tem como objectivo a implementação de uma malha genérica na direcção vertical sem a necessidade de recorrer a transformação de coordenadas [Neves et al., 1998].

A figura 1 ilustra as possibilidades desta abordagem.

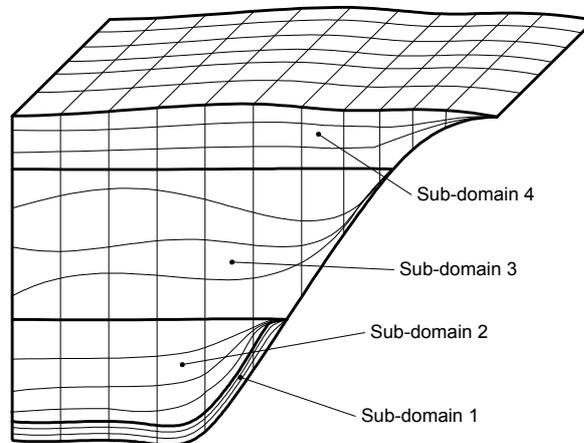


Figura 1: Divisão em subdomínios com malha genérica

A integração da equação da continuidade em toda a coluna de água permite calcular a elevação da superfície livre:

$$\int_{t}^{t+\Delta t/2} \int_{Sup} \vec{u} \cdot \vec{n} \, ds \, dt = DUX_{ij} \cdot DVIY_{ij} (\eta_{ij}^{t+1/2} - \eta_{ij}^t) \quad (4)$$

O integral do lado esquerdo representa os fluxos pelas faces laterais das células. Estes fluxos são determinados explicitamente ou implicitamente de acordo com a

direcção, segundo o método ADI. Este procedimento conduz a esquemas centrados no tempo e origina sistemas tridiagonais de fácil resolução.

As equações de momento são integradas em cada célula para o cálculo das componentes horizontais da velocidade:

$$\frac{(U_i \cdot V_u)_{ijk}^{t+1} - (U_i \cdot V_u)_{ijk}^t}{\Delta t} + \sum_j U_i \cdot U_{jflux} = \frac{1}{\rho_0} F_i \quad (5)$$

O termo F_i representa a componente na direcção x_i de todas as forças aplicadas ao fluido da célula. Este termo engloba as forças barotrópicas, baroclínicas, Coriolis e os efeitos difusivos horizontais e verticais. Por razões de estabilidade os termos barotrópico e de difusão vertical são implementados implicitamente, sendo os restantes termos resolvidos de forma explícita [Martins et al., 1998].

A implementação de uma coordenada vertical genérica obriga ao cálculo simultâneo da velocidade vertical e da geometria. A velocidade vertical é por isso calculada em duas etapas. Numa primeira fase uma previsão da velocidade vertical wr^* é calculada considerando que o volume se mantém constante:

$$DUX_{ij} \cdot DVY_{ij} \cdot (Wr_{ijk+1}^{*t+1/2} - Wr_{ijk}^{*t+1/2}) = - \oint_{sc} \vec{v}_h \cdot \vec{n} \, ds \quad (6)$$

O valor wr^* é usado de seguida para a redefinição da malha. Depois do cálculo da geometria a velocidade vertical é corrigida usando a variação de volume:

$$DUX_{ij} \cdot DVY_{ij} \cdot (Wr_{ijk+1}^{t+1/2} - Wr_{ijk}^{t+1/2}) = - \oint_{sc} \vec{v}_h \cdot \vec{n} \, ds - \frac{Vol_{ijk}^{t+\Delta t/2} - Vol_{ijk}^t}{\Delta t / 2} \quad (7)$$

O campo de velocidades assim obtido é usado para o transporte da salinidade e temperatura usando uma equação de advecção-difusão.

APLICAÇÃO AO ESTUÁRIO DO SADO

O modelo foi aplicado ao estuário do Sado no âmbito de um estudo de impacte ambiental associado aos trabalhos de dragagem previstos para o novo porto de Setúbal [Silva et al., 1998]. Usou-se uma malha com 120 x 158 pontos na horizontal e um domínio do tipo sigma com 8 camadas na vertical. O modelo foi calibrado tanto em modo barotrópico como baroclínico usando medidas de elevação, velocidade e salinidade. Na figura 2 comparam-se os resultados do modelo com as medidas para um ponto ao largo da Setenave. Pode-se verificar a boa concordância dos níveis tanto em amplitude como em fase e uma boa

modelação do ciclo maré viva maré morta. As velocidades apresentam erros relativos máximos da ordem dos 10 % e uma boa previsão do instante de inversão de maré.

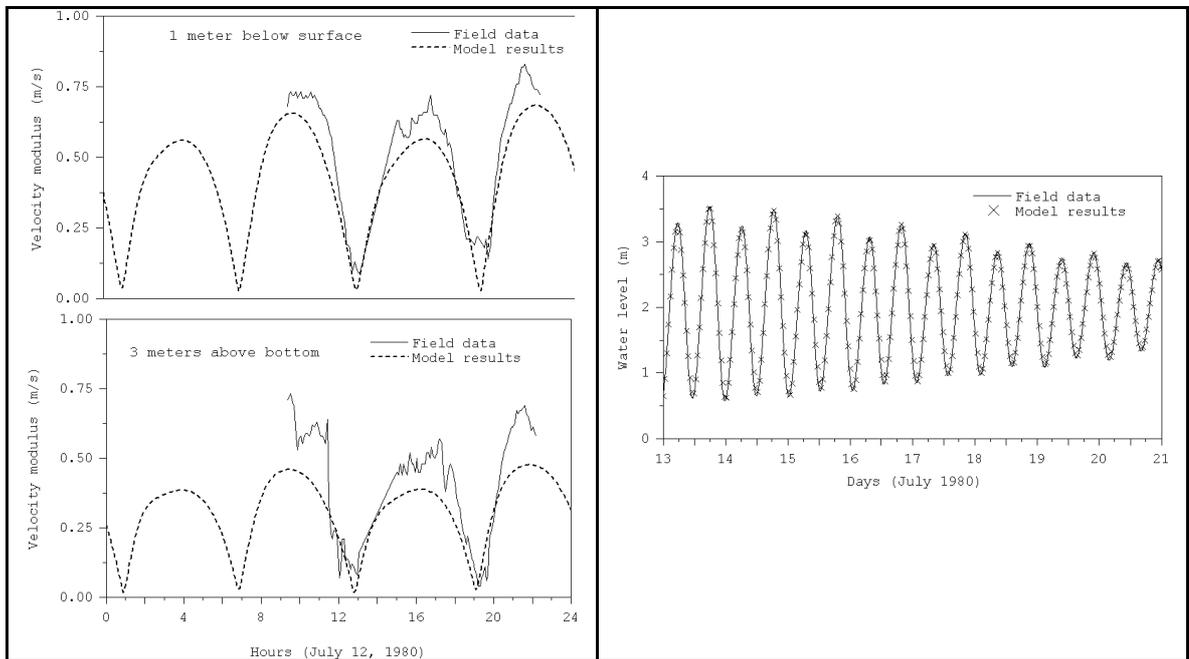


Figura 2: Calibração para uma estação ao largo da Setenave

O campo de velocidades residuais constitui um bom indicador do trânsito sedimentar na região. Os resultados do modelo foram integrados num ciclo maré viva maré morta obtendo-se o campo de velocidades residuais eulerianas da figura 3.

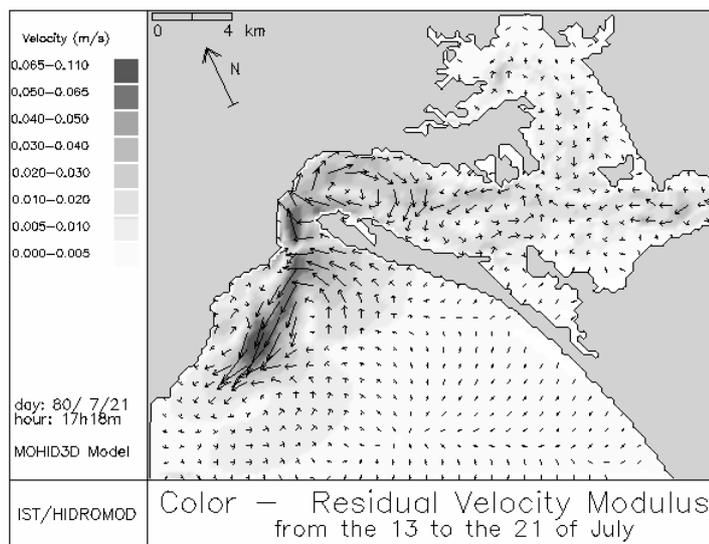


Figura 3: Campo de velocidades residuais eulerianas

Pode-se identificar uma circulação anti-ciclónica no interior do estuário responsável pela distribuição de sedimentos entre os canais Norte e Sul. Verifica-

se que o fornecimento de sedimentos de origem fluvial ao canal Norte processa-se pelo canal Sul e não de forma directa. No exterior do estuário observa-se a presença de um jacto intenso alinhado com a barra e coincidente com o canal de navegação dragado na plataforma. Identifica-se também uma circulação ciclónica que alimenta esse jacto. O uso de um modelo 3D permite explorar as características tridimensionais do escoamento. Numa simulação barotrópica os efeitos tridimensionais estão presentes sob a forma de escoamentos secundários associados à curvatura do escoamento e sob a forma de recirculações em zonas com elevado gradiente da batimetria. No quadro superior da figura 4 representa-se o campo de velocidades instantâneas para uma situação de vazante e no quadro inferior apresenta-se um corte numa região de elevado gradiente de batimetria no exterior do estuário. O padrão de cinzentos representa a intensidade da velocidade vertical.

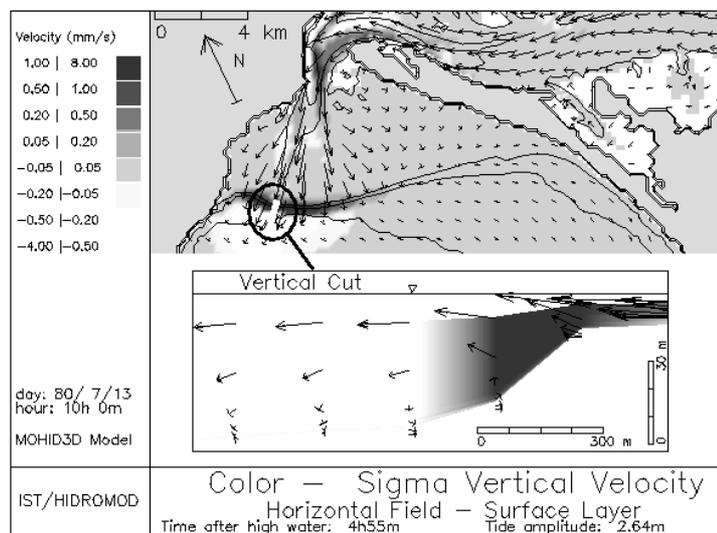


Figura 4: Características tridimensionais do campo de velocidades

Na região da barra pode-se verificar a presença de um forte escoamento secundário associado à elevada curvatura do escoamento. O padrão de "upwelling" no interior da curva e "downwelling" no exterior é identificado pelo valor da velocidade vertical. No corte vertical representa-se uma região com um elevado gradiente de batimetria que é coincidente com o jacto residual da figura 3. Estes factos parecem estar em contradição pois o transporte residual tenderia a desfazer o gradiente. A intensa recirculação do escoamento no plano vertical permite explicar este facto: A recirculação perdura durante todo o período de vazante sendo destruído no início da enchente. Desta forma a velocidade na

camada do fundo possui sentido de montante durante quase todo o ciclo de maré, re-alimentando o talude com sedimentos.

CONCLUSÕES

O modelo apresentado provou ser capaz de simular com precisão o escoamento barotrópico no estuário do Sado. As principais características do escoamento foram identificadas. Mostrou-se que os padrões tridimensionais do escoamento jogam um papel importante na dinâmica de sedimentos do estuário. A presença de fortes escoamentos secundários e de zonas de recirculação vertical associadas a elevados gradientes de batimetria levantam a necessidade de um estudo mais aprofundado destes fenómenos. O uso de modelos de transporte de sedimentos acoplados ao modelo hidrodinâmico deve por isso ser a metodologia a seguir.

BIBLIOGRAFIA

Leendertsee, J. J., e S. K. Liu. 1978. A three-dimensional turbulent energy model for non-homogeneous estuaries and coastal sea systems, em *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*. Ed. J. C. J. Nihoul, pp. 387-405, Elsevier, Amsterdam.

Leendertse, J. J.. 1967. Aspects of a computational model for long water wave propagation, *Memorandum RH-5299-RR*, Rand Corporation, Santa Monica.

Abbot, M. B., A. Damsgaardand, and G. S. Rodenhuis. 1973. *J. Hyd. Res.*, 1, 1-28.

Neves, R., Martins, F., Santos, A. 1998. Improvement of vertical discretization using finite volumes. Conferência JONSMOD98 Delft, The Netherlands.

Martins, F., R. Neves e P. Leitão, 1998. A three-dimensional hydrodynamic model with generic vertical coordinate. Proceedings de Hydroinformatics'98, Vol. 2, pp. 1403-1410, Ed. V. Babovic & L. C. Larsen, Balkema, Rotterdam.

Silva, A., J. Chambel e P. Chambel, 1998. Estudo hidrodinâmico e dos processos de transporte na área de projecto do novo terminal do porto de setúbal usando um modelo 3D. Relatório Técnico, Hidromod Lda. Lisboa.