

**Flávio A. Martins**

Área Eng. Mecânica  
EST/UAIf

# Modelação do Transporte Vertical no Estuário do Sado em Condições Barotrópicas

## Resumo

Em estuários barotrópicos podem-se desenvolver importantes escoamentos tridimensionais devido à interação da maré com a batimetria. O Estuário do Sado encontra-se nessas condições porque se pode considerar barotrópico durante praticamente todo o ano e possui uma batimetria com forte curvatura e gradientes elevados. Um modelo tridimensional de equações primitivas é utilizado para caracterizar os escoamentos tridimensionais no estuário e a sua correlação com as características da batimetria. A importância destes escoamentos para o transporte vertical de substâncias biogeoquímicas é investigada utilizando um modelo de qualidade da água tridimensional do tipo Euleriano.

## Morfologia do Sado

O Estuário do Sado (Fig. 1) possui uma batimetria caracterizada por um Canal Norte e um Canal Sul que se unem perto da barra numa região de forte curvatura. Este tipo de geometria favorece o desenvolvimento de escoamentos secundários no plano vertical. A plataforma existente fora da barra apresenta uma região com um forte gradiente de batimetria passando a profundidade abruptamente de 10 para 60 m numa distância horizontal de apenas 500 m. Esta batimetria em forma de degrau provoca o aparecimento de uma recirculação no plano vertical durante todo o período de vazante.

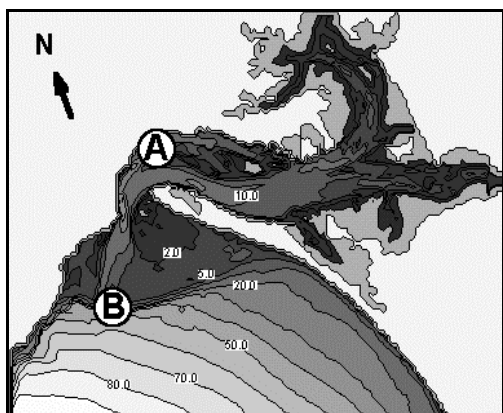


Figura 1 - Batimetria do Estuário do Sado

Estas estruturas verticais podem influenciar o transporte de sedimentos e o transporte vertical de substâncias entre o fundo e a superfície. Quando se usam modelos bidimensio-

nais integrados na profundidade para simular o escoamento este efeito não é no entanto reproduzido, introduzindo importantes erros nos resultados (Langerak, 1987). Neste estudo utilizou-se um modelo tridimensional de equações primitivas integrando também um modelo de transporte e de qualidade da água.

## ESCOAMENTOS NO PLANO VERTICAL

Na presença de forte curvatura da batimetria, as linhas de corrente do escoamento junto ao fundo tendem a possuir uma curvatura superior à do escoamento médio. Este aumento de curvatura compensa a menor velocidade junto ao fundo permitindo equilibrar o gradiente horizontal de pressões na direcção transversal ao canal que, em escoamento barotrópico, é igual para todas as profundidades. Este aumento de curvatura induz, por continuidade, escoamentos secundários no plano vertical caracterizados por upwelling na região interior da curva, downwelling na região exterior e uma menor curvatura das linhas de corrente à superfície. As simulações efectuadas permitiram identificar a presença dessas estruturas associadas a regiões de elevada curvatura da batimetria. A Figura 2 mostra a assinatura deixada pelo escoamento secundário no campo de velocidades residuais para um plano vertical no canal Norte (região A na Figura 1).

As regiões com forte gradiente de batimetria possuem também capacidade para produzir escoamentos de recirculação no plano vertical. Nestas regiões o escoamento passa abruptamente de uma zona de pequena profundidade e velocidade elevada para uma região de elevada profundidade onde o escoamento desacelera. A redução de velocidade traduz-se por uma conversão de energia cinética em pressão, aumentando a elevação da superfície livre.

Em escoamento barotrópico o gradiente horizontal de pressões formado nesse processo possui a mesma intensidade tanto no fundo como na superfície. Como a direcção do gradiente de pressões é oposta ao escoamento este mecanismo induz uma inversão do escoamento junto ao fundo, onde a inércia é menor.

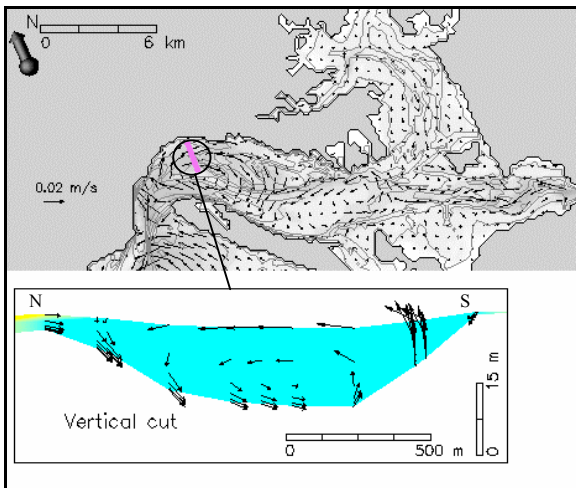


Figura 2 – Escoamento secundário no canal norte (velocidades residuais)

Na Figura 3 Identifica-se uma zona de recirculação produzida por esse mecanismo numa região de elevado gradiente de batimetria (região B na Figura 1). A figura representa o campo de velocidades instantâneas num instante 3 horas após a preia-mar. A recirculação pode-se identificar durante aproximadamente 4 horas durante a vazante.

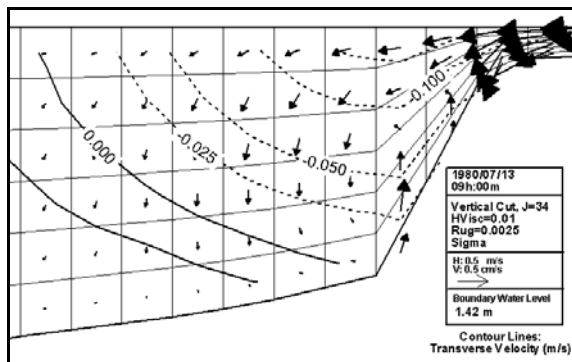


Figura 3 – Recirculação vertical numa região de elevado gradiente de batimetria (Viscosidade da calibração).

## SENSIBILIDADE AO FECHO TURBULENTO E À MALHA VERTICAL

O mecanismo de formação da recirculação atrás referido é fortemente dependente da transferência vertical de momento das camadas da superfície para o fundo. Se esta transferência for suficientemente eficiente a injeção de momento nas camadas do fundo pode compensar a tendência de inversão devida ao gradiente adverso de pressões. É por isso de esperar que a forma e intensidade da recirculação seja condicionada pelo tipo de fecho turbulento vertical e pelo tipo de malha vertical utilizados.

Efectuou-se uma análise de sensibilidade utilizando diversos valores para a viscosidade vertical (considerada constante para cada simulação) e também um fecho turbulento baseado no comprimento de mistura e sensível à estratificação. Neste último caso considerou-se um padrão de estratificação térmica característico do Estuário do Sado no Verão. Verificou-se uma elevada dependência do valor da viscosidade vertical. A estratificação térmica típica deste

sistema não foi suficiente para alterar o padrão da recirculação. Na figura 4 apresenta-se o campo de velocidades obtido com um valor de viscosidade vertical igual a metade do valor obtido na calibração, sendo facilmente identificável a maior intensidade e dimensão da zona de recirculação.

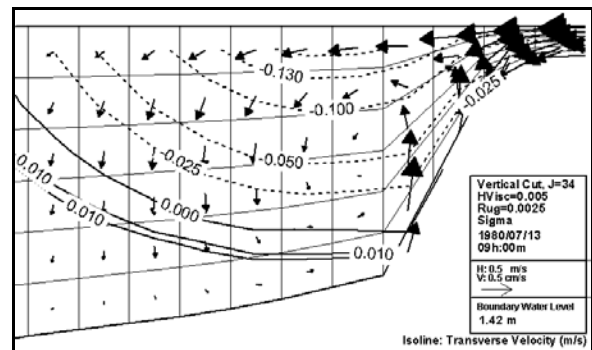


Figura 4– Recirculação vertical para uma viscosidade vertical igual a metade do valor de calibração.

O transporte vertical de momento está intimamente ligado ao tipo de malha utilizado para a direcção vertical pois esta condiciona por um lado o espaçamento vertical entre camadas (e por isso as escalas filtradas) e por outro a inclinação entre as linhas da malha e as linhas de corrente (e por isso a difusão numérica). A utilização de um modelo com uma concepção de malha vertical genérica permitiu analisar a influência do tipo de malha vertical utilizando um mesmo código. Efectuaram-se simulações com malha vertical do tipo sigma, do tipo cartesiano e do tipo lagrangeano, tendo neste último caso sido limitado o movimento vertical das camadas. Na Figura 5 representa-se o escoamento para o caso de malha cartesiana. Verifica-se que a difusão é excessiva não sendo possível identificar correctamente a recirculação. A malha lagrangeana produziu neste caso resultados semelhantes à malha sigma.

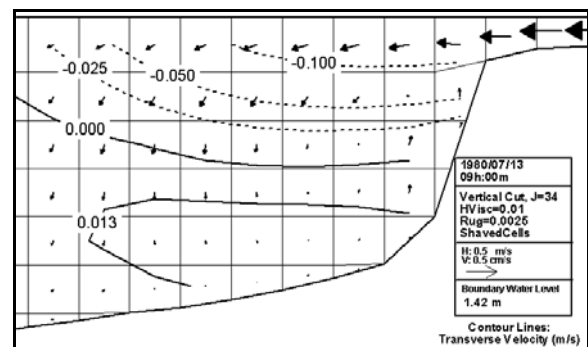


Figura 5 – Recirculação vertical para malha do tipo cartesiano. (Vertical recirculation for a cartesian mesh.)

## TRANSPORTE VERTICAL DE UM TRAÇADOR PASSIVO

Os escoamentos verticais induzidos pela batimetria podem desempenhar um papel importante no transporte de substâncias entre o fundo e a superfície. Para analisar as características desse transporte utilizou-se o modelo de transporte euleriano integrado no modelo Mohid2000. Considerou-se um traçador passivo com uma concentração inicial igual a 1 para profundidades superiores a 10 m e

zero para profundidades inferiores, tendo-se analisado a evolução da propriedade à superfície durante uma semana. Verificou-se uma forte assinatura na região adjacente ao talude (região B na Figura 1). Na Figura 6 apresenta-se a distribuição da propriedade na camada da superfície após uma semana de simulação. Pode-se identificar um máximo perto do talude com um valor superior a 80 %.

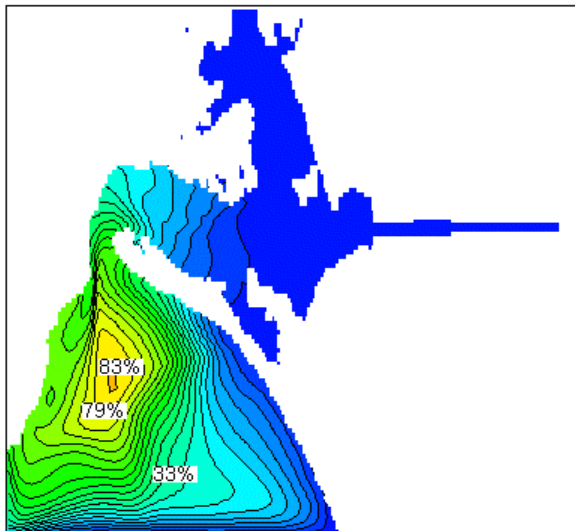


Figura 6– Concentração do traçador na camada da superfície após 7 dias de simulação.

## CONCLUSÕES

Mostrou-se a importância dos escoamentos verticais induzidos pela batimetria no transporte vertical de substâncias. O traçador utilizado pode ser associado a nutrientes armazenados na camada sub-fótica sendo por isso um mecanismo importante para a produção primária. Estes resultados serão complementados no futuro com dados de campo e implementação de um modelo de produção primária.

## REFERÊNCIAS

Langerak, A. (1987): "Secondary currents and their influence on depth-averaged (tidal) models". IAHR Congress, Lausanne, 65-70.

Martins, F. (2000): "Modelação matemática tridimensional de escoamentos costeiros e estuarinos usando uma abordagem de coordenada vertical genérica". Tese de Doutorado, I.S.T..

Abbott, M., A. Damsgaard e G. Rodenhuis (1973): "System 21 Jupiter, A design system for two-dimensional nearly-horizontal flows". J. Hyd. Res. 1:1-28.

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