

# Hidrografia, correntometria e modelagem numérica em apoio a obras de engenharia costeira no canal de Piaçaguera (Santos – SP)

Joseph Harari & Luiz Bruner de Miranda & Alessandro Luvizon Bérغامo  
& Marco Antonio Correa

Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo  
[joharari@usp.br](mailto:joharari@usp.br) & [miranda@netuno.io.usp.br](mailto:miranda@netuno.io.usp.br) & [luvizon@netuno.io.usp.br](mailto:luvizon@netuno.io.usp.br) & [mac@asatm.com.br](mailto:mac@asatm.com.br)

**Resumo ?** Foram estudadas as características hidrodinâmicas do canal de Piaçaguera e da plataforma continental ao largo da baía de Santos, como suporte a obras de dragagem no canal e visando a delimitação de áreas de deposição dos materiais dragados. Foram realizadas observações na forma de séries temporais de: 1) correntes e propriedades físicas no canal, 2) nível do mar e meteorologia de superfície na linha da costa e 3) perfis verticais de correntes em duas estações ao largo. Complementando as análises das medições, as características hidrodinâmicas das regiões de plataforma e estuarina foram simuladas através de modelos numéricos hidrodinâmicos tri-dimensionais.

**Palavras-chave ?** Hidrografia, correntometria, séries temporais, diagrama estratificação–circulação, estabilidade, modelagem numérica hidrodinâmica, circulação costeira, canal de Piaçaguera, Baía de Santos (SP).

## I. INTRODUÇÃO

Foram estudadas as características hidrodinâmicas do canal de Piaçaguera e da plataforma continental ao largo da baía de Santos, pela Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas (FUNDESPA), visando dar suporte a obras de dragagem na parte interior do canal, onde se encontra importante terminal marítimo, bem como delimitar possíveis áreas de deposição marítima dos materiais dragados, na plataforma adjacente à baía de Santos.

A seção transversal à jusante do trecho do canal a ser dragado (Lat. 23° 53,99' S; Long. 046° 22,64' W), entre a bacia de evolução do cais da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA) e o largo de Cubatão (Fig. 1), foi escolhida para a caracterização do ambiente físico onde serão executadas as obras de engenharia ("Estação COSIPA"). Essa seção foi amostrada no período de 21/06 a 11/07/2001, para conhecimento de propriedades hidrográficas e da circulação da parte norte do canal estuarino (em época de baixa descarga fluvial). Esta área faz parte de um complexo sistema estuarino de planície costeira, cujas forçantes hidrodinâmicas são a maré, a descarga fluvial, o gradiente longitudinal de densidade e o vento local ou remoto, atuando na plataforma continental

O experimento na estação fixa constou de perfilamentos a intervalos de 1 m com um equipamento de última geração da Falmouth Scientific Instruments (tipo Condutividade – Temperatura – Profundidade - Velocidade, CTPV) operado a bordo de uma embarcação. Os intervalos

de tempo dos perfilamentos foram horários, ocorrendo interrupções que variaram entre 1 e 4 horas devido ao tráfego de navios, abastecimento e reparos da embarcação. Para levar em conta a variação da profundidade devido à influência da maré, a espessura da coluna de água foi determinada em cada estação com um eco-sonda.

Na região costeira, foram instalados um marégrafo, na Ilha das Cabras, 24° 0.52' S 46° 13.09' W, o qual operou no período entre 01 / 08 / 2001 18:00 e 15 / 10 / 2001 14:00, com amostragens a cada 30 minutos, e uma estação meteorológica, na Praia da Enseada, a 23° 59.177' S 46° 13.448' W, com amostragens de pressão atmosférica e vento, medidos no período de 27/07/2001 11:00 a 21/09/2001 15:00, a cada 30 minutos (Fig. 1).

Ao largo da Baía de Santos, nas posições (Lat. 24° 20' S; Long. 046° 23' W) e (Lat. 24° 15' S; Long. 046° 01' W), foram instalados dois fundeios com sistemas acústicos (Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP) para perfilamento da corrente em colunas de água com profundidades próximas de 32 e 52 metros – "estações cos32 e cos52" (Fig. 1). Os equipamentos ADCP foram configurados para efetuar medidas a intervalos de tempo de 30 minutos, com a discretização na coluna de água a intervalos de 1 metro; as medidas de corrente abrangeram o período de 01/08 a 14/10/2001, totalizando séries temporais de 64 dias, com 48 perfis por dia.

Os resultados de correntes obtidos com esses equipamentos são representativos das características da circulação na plataforma continental interna, que é gerada predominantemente pelo vento, correntes oscilatórias de maré e, em menor intensidade, pelo gradiente de densidade. Devido à passagem de várias frentes frias durante o período de amostragem, pode-se considerar que os resultados obtidos são representativos para a caracterização tanto da circulação costeira como também das intensidades extremas das correntes.

As características hidrodinâmicas das regiões de plataforma e estuarina foram simuladas através do processamento de modelos numéricos hidrodinâmicos tri-dimensionais. Esses modelos utilizam as equações hidrodinâmicas na forma completa, com coordenadas sigma na vertical, e possibilitam a reprodução dos sistemas de correntes para diversas situações meteorológicas e de maré de interesse.

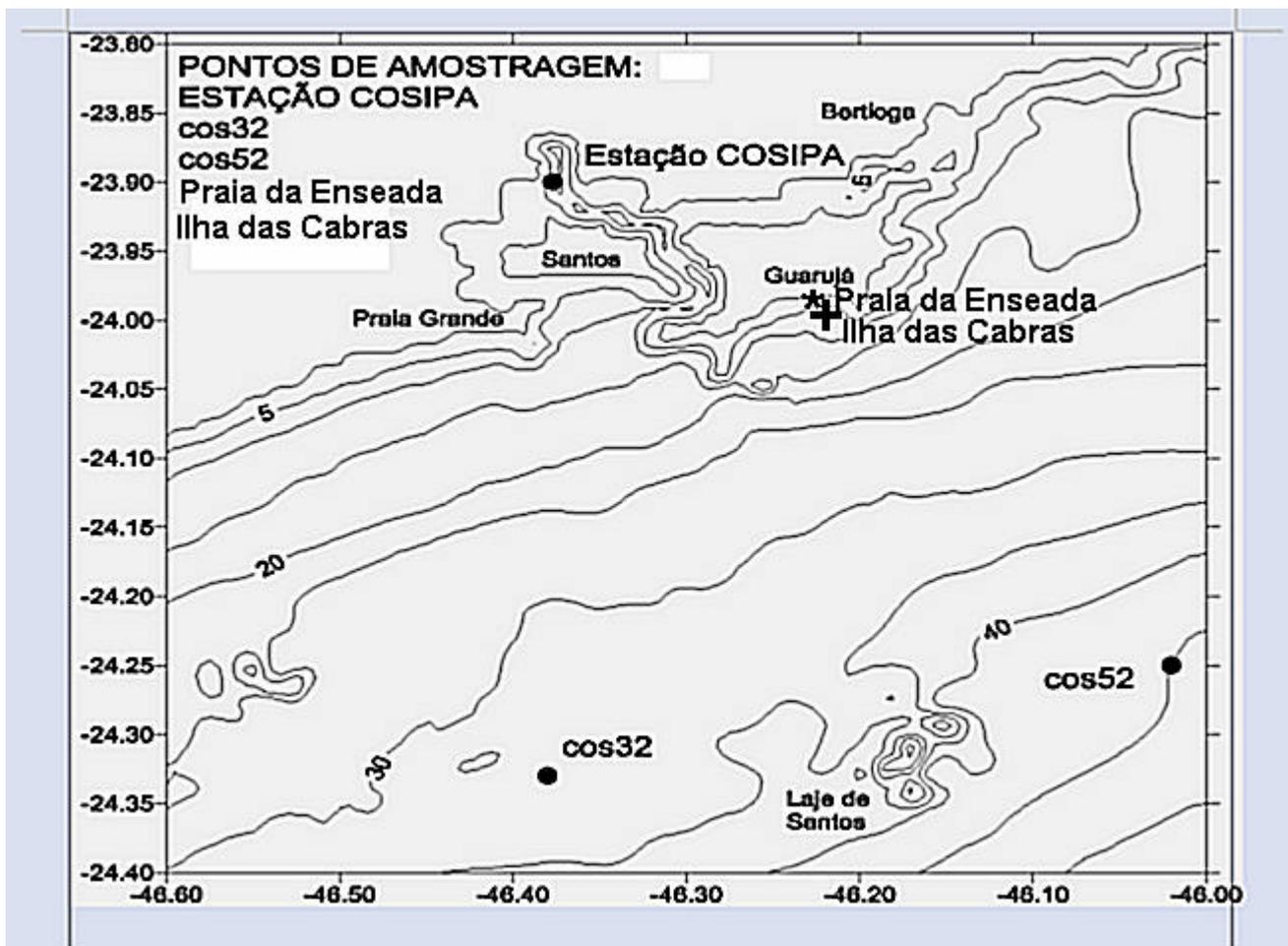


Fig. 1 – Pontos de amostragem: Estação COSIPA, Praia da Enseada, Ilha das Cabras e estações cos32 e cos52.

## II. RESULTADOS OBTIDOS

Na Estação COSIPA, durante o período de amostragem, o menor intervalo de variação da temperatura (20,0 a 22,9°C) contrasta com maior intervalo de variação da salinidade (23,7 a 30,8). Em consequência, a dependência da densidade com a temperatura pode ser considerada desprezível, tendo sido calculados valores entre 1015,4 e 1021,4 kg / m<sup>3</sup>. Os menores valores da salinidade foram observados na superfície, indicando a influência da descarga fluvial, e os maiores valores nas proximidades do fundo, devido à intrusão de águas mais salinas da região costeira adjacente.

As intensidades dos extremos de vazante e enchente do componente longitudinal de velocidade variaram entre -63,0 e 50,0 cm s<sup>-1</sup>, respectivamente. Dentre os ciclos completos de maré analisados, predominaram extremos de vazante maiores do que os de enchente, sendo essa desigualdade determinada pelo componente de velocidade gerado pela descarga fluvial.

Com base nesses dados foram traçadas, pelo método das isopleias, séries temporais da variabilidade do componente longitudinal de velocidade (NS), da salinidade e da densidade (no sistema MKS, subtraindo 1000, ou seja, em unidades de Sigma-t); exemplo das medições obtidas se

encontra na Fig. 2, para quatro ciclos completos de maré na condição de sizígia, no dia 05/07. Nessa figura observa-se a alternância cíclica dos movimentos estuário acima (valores positivos) e abaixo (valores negativos), ocorrendo nas estofas de corrente isotacas praticamente verticais, indicando a reversão quase uniforme na coluna de água. De acordo com a estratificação vertical de salinidade, o estuário, na parte próxima à cabeceira, é do tipo parcialmente misturado e fracamente estratificado, indicando que uma parcela da energia da maré é responsável pela mistura vertical da coluna de água. Além da utilização dos dados hidrográficos e da componente longitudinal de velocidade para controle de simulações numéricas, essas variáveis foram também utilizadas com os seguintes objetivos:

- 1-) classificar, com o Diagrama Estratificação-circulação, a parte norte do canal, estabelecendo-se a proporção relativa de processos de mistura (advecção e difusão turbulenta);
- 2-) calcular o transporte advectivo resultante de propriedades e seus componentes, utilizando a salinidade como indicador;
- 3-) determinar a variabilidade no tempo da estabilidade da coluna de água, com o número de Richardson estuarino.

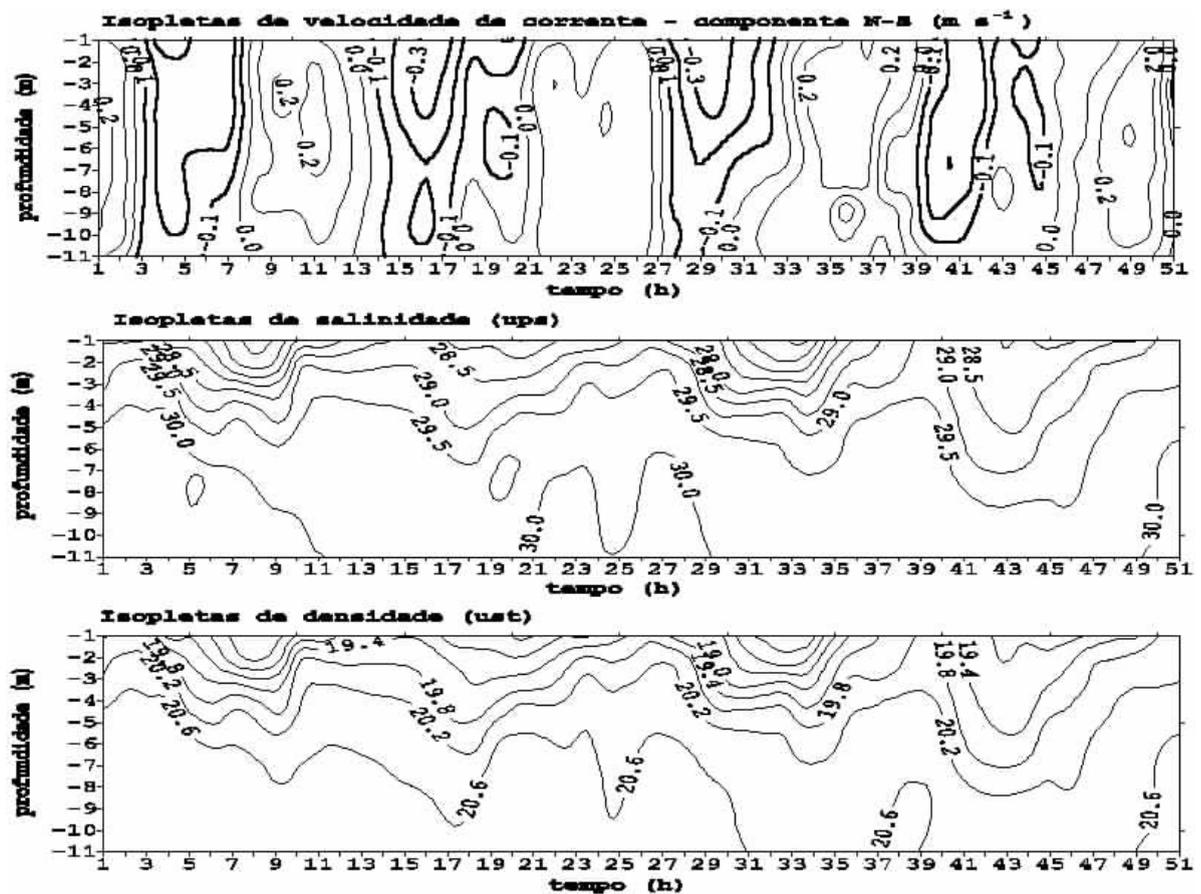


Figura 2 – Variabilidade local da componente norte-sul (NS) da corrente, da salinidade e da densidade ( $\sigma_t$ ), durante quatro ciclos completos de maré de sizígia. Traços fino e cheio indicam isotacas de enchente ( $>0$ ) e de vazante ( $<0$ ), respectivamente.

O Diagrama Estratificação-circulação classifica o estuário como parcialmente misturado (tipo 2a), tanto nas condições de quadratura como de sizígia. Os cálculos demonstram que a coluna de água é sempre estável, mas apresenta instantes de baixa estabilidade vertical; por sua vez, os instantes de alta estabilidade vertical são mais intensos na condição de quadratura do que na sizígia.

Na região costeira, as medidas de nível do mar demonstram o caráter semi-diurno das marés, com marcantes desigualdades diurnas; entretanto, um aspecto de grande importância na hidrodinâmica da área estudada se encontra no efeito de eventos meteorológicos extremos, como intensas frentes frias, que produzem significativas variações do nível médio do mar; no caso em questão, o nível do mar atingiu 2 m acima da média em 18/09/2001, às 02:30 min (Fig. 3).

O registro de ventos demonstra a alternância dos efeitos da alta subtropical do Atlântico (ventos do quadrante N) e de frentes frias (ventos do quadrante S), com máxima intensidade igual a  $6,9 \text{ m s}^{-1}$ , em 11 / 09 / 2001, às 07:30 (próximo a 25 Km/h); a Figura 4 mostra os intensos ventos de S – SW que antecederam a máxima elevação do nível do mar registrada.

Nas medições de correntes na plataforma, a estação a 32 m possui comportamento mais homogêneo segundo a vertical, com médias por nível em torno de  $16 \text{ cm s}^{-1}$ ; quanto

aos valores máximos, eles decrescem de  $72 \text{ cm s}^{-1}$  na superfície (7 m de profundidade) a  $50 \text{ cm s}^{-1}$  próximo ao fundo (7 m acima do fundo). Já na estação a 52 m a variação vertical das correntes é muito mais intensa: valores médios são de  $45 \text{ cm s}^{-1}$  na superfície (a 7 m) e  $15 \text{ cm s}^{-1}$  próximo ao fundo (a 45 m); em termos de valores extremos, foram amostrados  $164 \text{ cm s}^{-1}$  e  $55 \text{ cm s}^{-1}$ , respectivamente. A Figura 5 mostra os perfis verticais de correntes na estação cos52, quando da ocorrência dos máximos observados, na superfície e no fundo (que não foram coincidentes).

As características hidrodinâmicas das regiões amostradas foram simuladas através de modelos numéricos, para a plataforma (de resolução espacial 1 Km) e para a região estuarina (com espaçamento de 75 m). No modelo do estuário, são considerados valores de salinidade e temperatura típicos; a Figura 6 mostra as correntes de superfície no estuário, considerando a circulação de maré e efeitos de densidade; se observa uma grande variabilidade espacial das correntes, com valores ultrapassando  $25 \text{ cm/s}$  no Canal do Porto. Note-se que efeitos do campo de densidade no Canal da COSIPA, devidos à descarga fluvial, chegam a impedir correntes de superfície enchentes para o Norte.

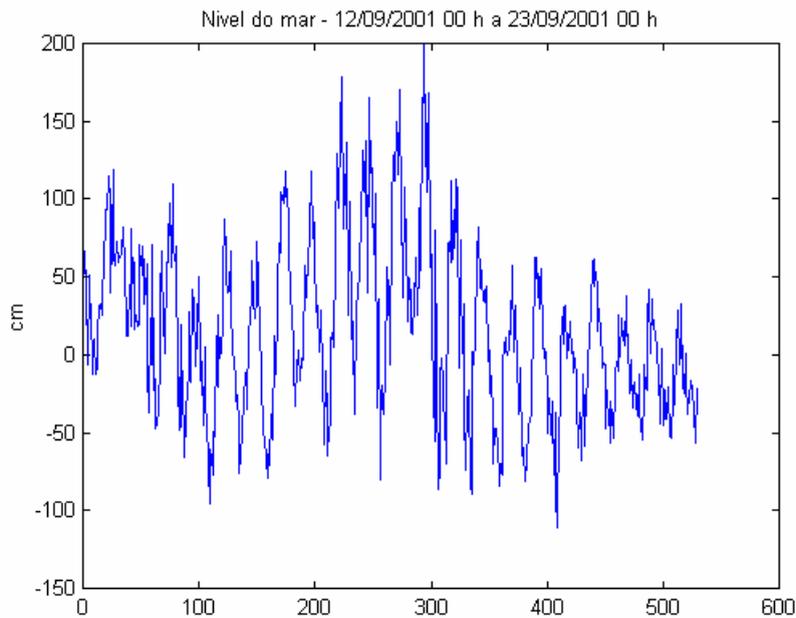


Fig. 3 – Medições do nível do mar, com ênfase na ocorrência de valor máximo.

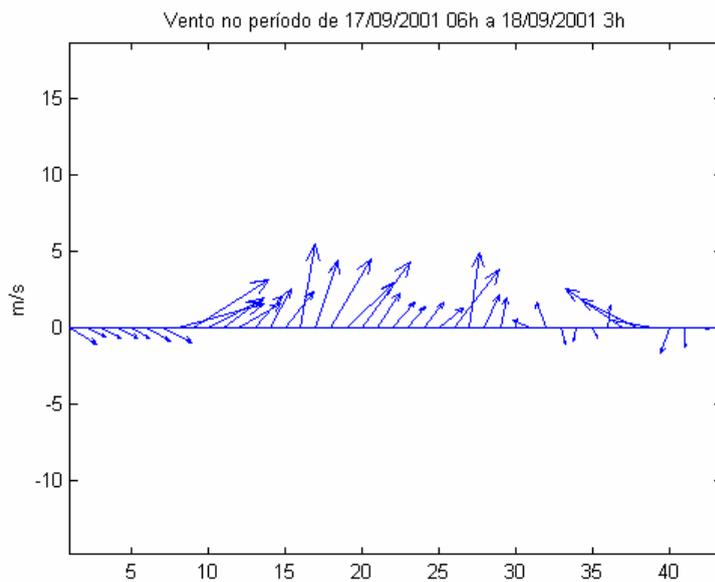


Fig. 4 – Medições de vento, com ênfase nos dias 17 e 18 / 09 / 2001.

#### REFERÊNCIAS

FOFONOFF, N. & MILLARD Jr. R.C. 1983. *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*. Unesco tech. Papers in Mar. Sci, Paris., N° 44, 53 p.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M. & KJERFVE, B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física em Estuários*. Coleção Acadêmica da Editora da Universidade de São Paulo, S. P., 417 p.

MORGAN, P.P. 1994. *SEAWATER: A Library of MATLAB Computational Routines for the Properties of Sea Water – Version 1.2*. CSIRO Marine Laboratories, Australia, Report 222, 29 p.

BLUMBERG, A. F. & G. L. MELLOR (1987) A description of a three dimensional coastal ocean circulation model. In: N. S. Heaps (Ed.), *Coastal and Estuarine Sciences 4: Three-dimensional Coastal Ocean Models* - American Geophysical Union, pp. 1-16.

HARARI, J. & CAMARGO, R. (1998) Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré - Revista Brasileira de Oceanografia, vol 46 (2), pp 135-156.

HARARI, J. & CAMARGO, R. & CACCIARI, P. L. (1999) Implantação de um sistema de previsão de marés e de correntes de maré na Baixada Santista através de modelo numérico tridimensional - Relatório Técnico do Instituto Oceanográfico da USP, n° 45, 21 p.

HARARI, J. & CAMARGO, R. & CACCIARI, P. L. (2000) Resultados da modelagem numérica hidrodinâmica em simulações tridimensionais das correntes de maré na Baixada Santista - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 5, n° 2, p. 71 - 87.

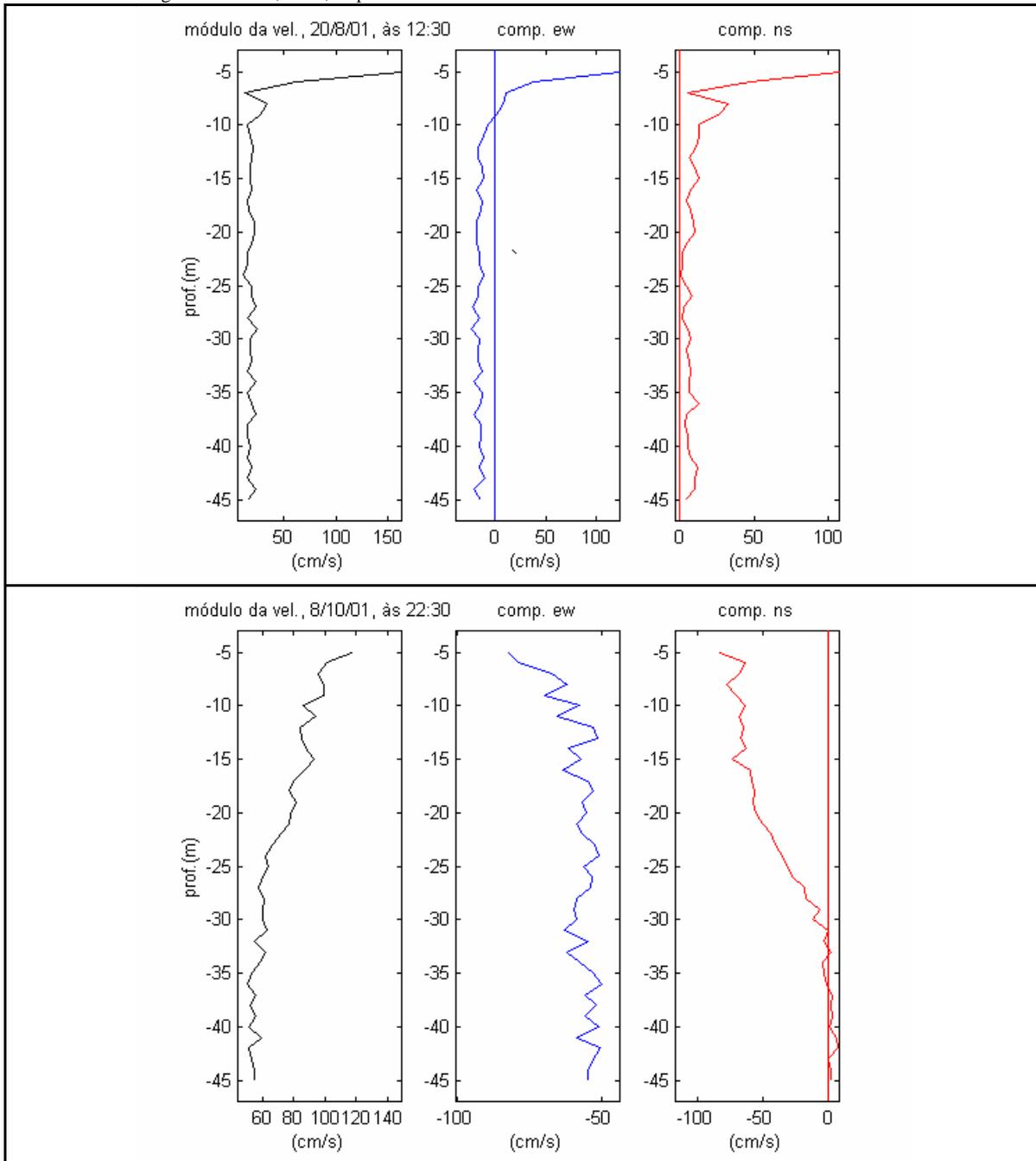


Fig. 5 – Perfis com valores máximos de corrente na superfície (a 7 m) e no fundo (a 45 m), na estação cos52.

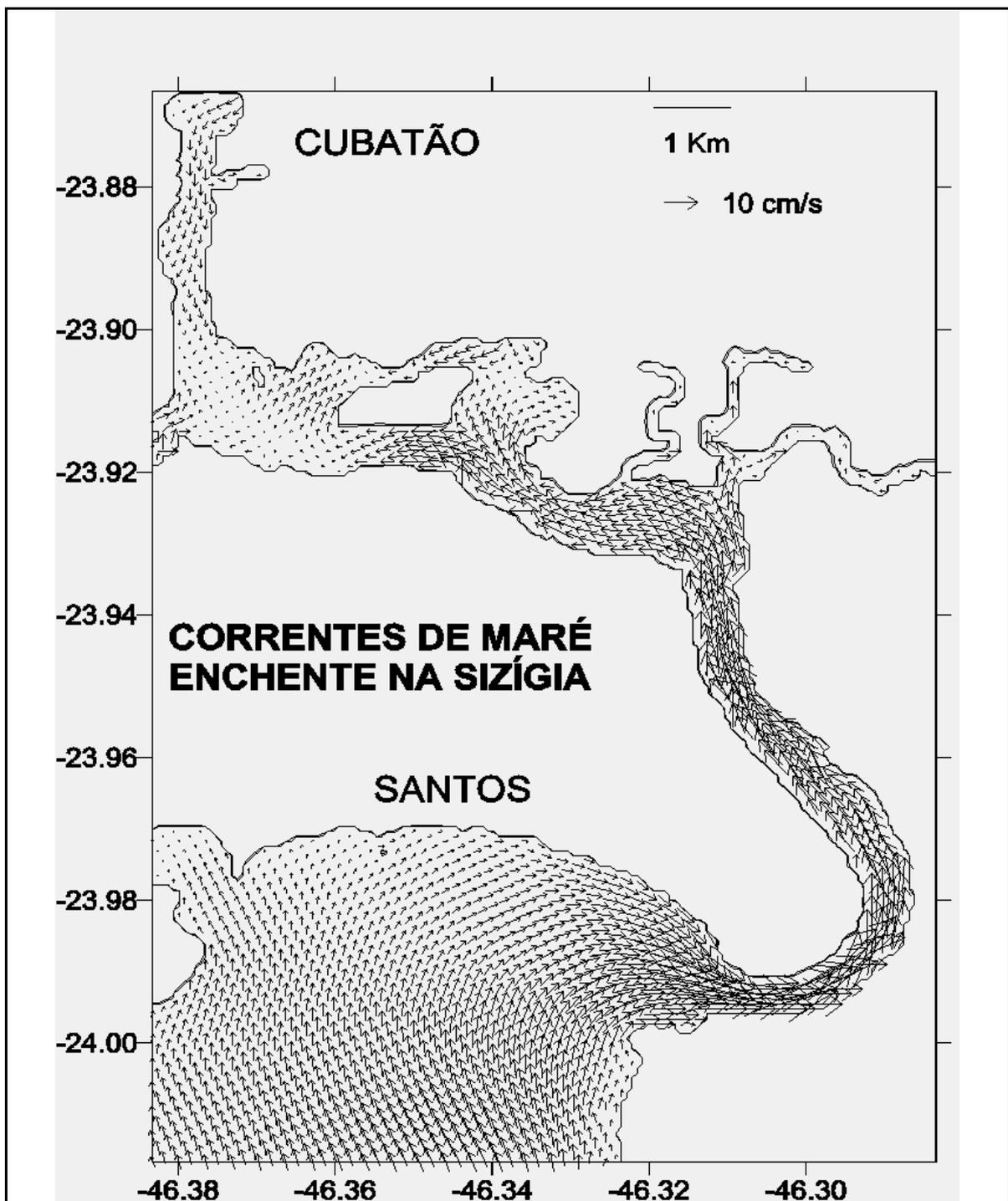


Fig. 6 – Resultados do modelo estuarino para a circulação de maré e termo-halina, na superfície, em condições de enchente na sizígia, referentes a 03:00 GMT de 04 de Janeiro de 2000.