

Modelação Hidrossedimentológica no Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão

Rogério Fernando do Amaral

Ministério da Integração Nacional

rogeriofamaral@yahoo.com.br

Paolo Alfredini

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

alfredin@usp.br

Recebido: 31/01/07 - revisado: 30/07/08 - aceito: 10/04/10

RESUMO

A Área Portuária do Maranhão, situada na costa ocidental da Ilha de São Luís, na Baía de São Marcos, constitui-se no segundo maior complexo portuário da América Latina em termos de movimentação de carga.

A caracterização da hidrossedimentologia do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão foi conduzida a partir da compilação e análise dos dados de correntes existentes e da aplicação de modelagem computacional.

Este trabalho também contempla uma metodologia para fornecimento de previsão de campos de corrente, a partir dos resultados das simulações hidrodinâmicas, e o fornecimento de previsão da evolução e migração das conformações de fundo. O modelo de transporte de sedimentos indicou pequeno transporte resultante nas Áreas IV, III e II, que explica a reduzida migração dessas ondas quando comparadas com a Área I.

Palavras-chave: Hidráulica Marítima, Modelagem Numérica, Dragagem Marítima e Engenharia Portuária.

INTRODUÇÃO

A Área Portuária do Maranhão constitui-se no segundo maior complexo portuário da América Latina e um dos maiores do mundo em termos de movimentação de carga. Situada na costa ocidental da Ilha de São Luís, na Baía de São Marcos, esta área portuária abrange o Complexo Portuário de Ponta da Madeira, da CVRD - Companhia Vale do Rio Doce S. A., o Porto de Itaqui, da EMAP – Empresa Maranhense de Administração Portuária e o Porto da ALUMAR. Em termos do potencial logístico do transporte aquaviário brasileiro esta região constituir-se-á nos próximos anos no principal pólo portuário brasileiro em movimentação de cargas, em função dos projetos previstos para a área. Localizando-se próximo dos grandes mercados consumidores, como: Estados Unidos, Europa e Ásia através do Canal do Panamá. Constituinte-se em escoadouro natural de ampla região geoeconômica, que é a Amazônia Legal Oriental (ver Figura 1), as principais cargas movimentadas são os minérios de ferro e manganês, provenientes da Província

Mineral de Carajás (PA), ferro gusa, concentrado de cobre, alumina e alumínio, grãos e granéis líquidos.

O Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão é via de acesso para o Complexo Portuário de Ponta da Madeira (CVRD), Porto de Itaqui e o Porto da ALUMAR, constituindo-se no mais longo, largo e profundo Canal de Acesso balizado, das áreas portuárias brasileiras. Desenvolve-se em sua maior extensão na sub-área oceânica da Plataforma Continental do Maranhão (Golfão Maranhense), sendo o restante situado na própria Baía de São Marcos.

Ao largo da costa do Maranhão, em frente à Baía de São Marcos, observa-se a formação de bancos de areia, margeando o Canal de Acesso, tendo sido, por consequência, necessário balizar o Canal em seus cerca de 100 km a partir da Ponta da Madeira. O Canal apresenta quatro áreas especiais denominadas Área I, Área II, Área III e Área IV, no sentido sudoeste-nordeste respectivamente, conforme Figura 2. Essas áreas apresentam a formação de ondas de areia. Segundo CVRD (2001), a largura do Canal, em quase toda a extensão, é de 1.000 m, mas nas áreas especiais a largura mínima é de 500 m.



Figura 1- Localização da área de estudo

As ondas de areia num canal de navegação passam a ser um fenômeno morfológico de grande relevância para a segurança náutica em função do porte dos navios que navegam nesta via. De fato, para navios como os VLOC/VLCC (com porte bruto superior a 200.000 tpb¹), ou ULOC/ULCC (com porte bruto superior a 350.000 tpb), com calados superiores a 19,0 m e comprimento entre perpendiculares superiores a 300 m (PIANC, 1997), as ondas de areia afetam diretamente a folga líquida sob a quilha (pé do piloto) e, em determinadas situações (como o Canal de Acesso à Área Portuária do Maranhão) a embarcação deste porte pode estar sobre até três cristas destas ondas.

Ondas de areia são uma classe de conformação de fundo, composta predominantemente de sedimento não coesivo, em forma de onda dos sedimentos transportados, conforme pode ser visto na Figura 3, com detalhe para a formação de cristas (regiões claras) e cavados (regiões escuras). Trata-se de mega enrugamentos que se formam onde a água tem profundidade suficiente e o aporte de areia é abundante, com velocidades do escoamento relativamente fortes, geralmente desenvolvidas por correntes de maré. Porém outros fatores exercem influência, como, as ondas, as correntes residuais, o transporte de sedimento em suspensão, declividade do fundo e o transporte de sedimento do fundo (Blondeaux et alii, 2001). Estas

formações têm comprimentos superiores a 10 m, podendo chegar a centenas de metros, e alturas acima de 0,75 m.

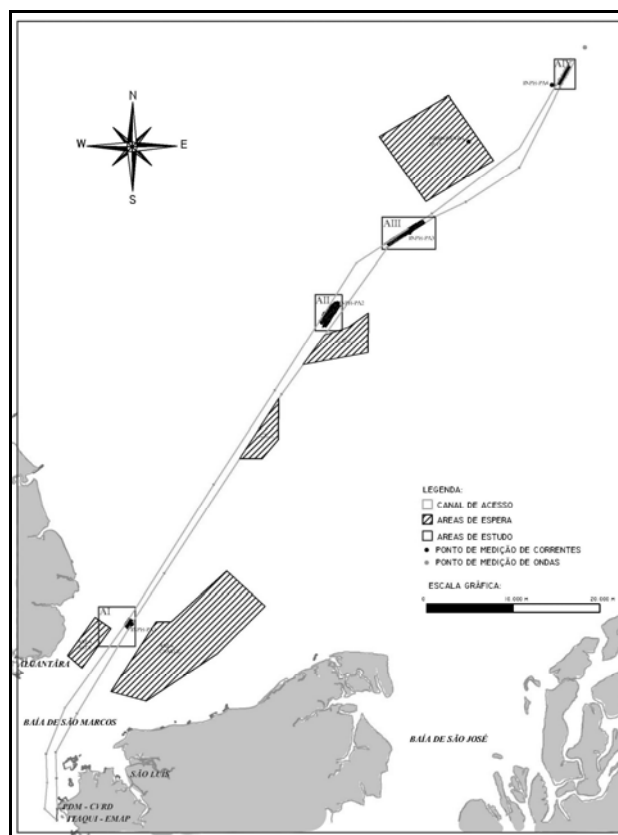


Figura 2- Detalhe do Canal de Acesso.

O perfil das ondas de areia é simétrico, a não ser que haja uma grande corrente residual, isto é, uma corrente de maré com sentido preferencial de vazante ou enchente. A assimetria do perfil das ondas de areia está intimamente ligada à migração dessas. Essas ondas podem migrar no rumo da propagação da corrente, podendo chegar a uma taxa típica de algumas dezenas de metros por ano (Fenster et alii, 1990).

Poucas áreas do mundo apresentam os requisitos necessários para a formação de grandes campos de ondas de areia. Cite-se o caso do canal de Bisanseto (Japão), região próxima a Kobe, onde o desenvolvimento dessas ondas limita a profundidade em 13 m (Kato et alii, 1998; Knaapen et alii, 2002). Durante o período de 1981 até 1983 foram dragados cerca de 2,2 milhões de m³, mas em apenas 10 anos desenvolveram-se ao mesmo patamar de 1981.

¹ Tpb - tonelada porte bruto é a unidade comumente utilizada para peso de um navio. Considera não apenas a carga comercial e a tripulação, mas tudo o que é necessário à sua locomoção e à sua tripulação.

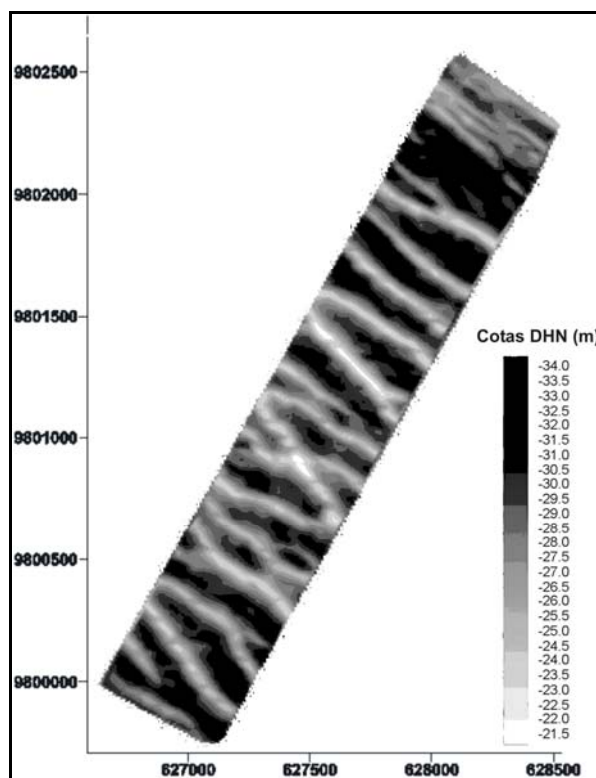


Figura 3 - Batimetria da Área IV do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão, no período de junho de 2006

No Estreito de Messina (Itália), localizado entre a Sicília e a Calábria, estão assentadas no fundo do mar diversas tubulações e cabos, que não foram dimensionados considerando a sobrecarga de uma onda de areia, o que tem sido estudado pela Universidade de Catania (Santoro et alii, 2002).

HISTÓRICO DE ESTUDOS

Embora a área tenha grande interesse nacional, trata-se de uma área pouco estudada. Abaixo são apontados alguns dos estudos desenvolvidos para o Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão.

Hidrologia (1980) forneceu o primeiro estudo da propagação da maré no Canal de Acesso. Com o monitoramento do ponto JP-15 (nas proximidades da Área IV) durante o período de 26/05/1980 a 28/06/1980. O estudo balizou as mudanças propostas pela Carta Náutica – Proximidades da Baía de São Marcos com a adoção

de zoneamento de amplitude e fase da maré ao longo do Canal.

Pereira (1993) propôs o primeiro modelo de circulação de correntes. Com a batimetria discretizada em elementos de 9800 m. Simulando três condições diferentes: a primeira considerando apenas a componente M_2 de maré separada das demais componentes, a segunda com as componentes M_2 , K_1 , N_2 , S_2 e K_2 e a terceira com as componentes da segunda mais a ação de efeitos meteorológicos. Chegou à conclusão de que os efeitos meteorológicos influenciam muito pouco na hidrodinâmica da região e que ocorrem efeitos de ressonância na Baía de São Marcos.

FCTH (1995) apresentou uma análise da implantação e manutenção do Canal de Acesso, descrevendo a evolução das isóbatas nas respectivas regiões de interesse, mapeando as cristas e cavados, além de um modelo de circulação com maior resolução, tendo a batimetria discretizada em elementos de 2800 metros. Esse modelo obteve, em comparação a maré observada em Itaqui, um erro médio de 21 cm na amplitude.

FCTH (2005) acompanhou a dragagem de março de 2005 do Canal de Acesso e analisou alternativas de linhas de atuação quanto às operações de dragagem a partir do conhecimento adquirido. Estas informações subsidiaram tecnicamente a CVRD na tomada de decisão sobre o comportamento morfológico esperado dos fundos.

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA PARA MODELAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA

O programa utilizado para a modelação hidrosedimentológica é o MIKE 21, de posse do Laboratório de Hidráulica sob licença educacional. Este programa foi desenvolvido pelo DHI (DANISH HYDRAULIC INSTITUTE WATER & ENVIRONMENT).

As equações utilizadas para descrever as variações do fluxo e do nível d'água são a equação da conservação de massa e as equações do momento integradas na vertical.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p \\ & - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] + \Omega p \\ & - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Onde:

- $h(x,y,t)$ - profundidade d'água.
 ζ - nível d'água.
 p, q - densidade de fluxo na direção x e y .
 $C(x,y)$ - coeficiente de Chezy.
 g - aceleração da gravidade.
 $f(V)$ - fator de atrito do vento.
 V, V_x, V_y - velocidade do vento e das componentes na direção x e na direção y .
 Ω - parâmetro de Coriolis.
 $P_a(x,y,t)$ - pressão atmosférica.
 ρ_w - densidade da água
 x, y - coordenadas espaciais
 t - tempo.
 $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ - componentes da tensão de cisalhamento.

Para este estudo foi aplicada a Teoria de transporte de arrastamento de fundo de Meyer-Peter e Müller, tendo em vista o objetivo de análise do comportamento das conformações de fundo. A Fórmula de Meyer-Peter e Müller da taxa de transporte de material de fundo q_b é dada por:

$$\phi_b = \frac{q_b}{((s-1)gd^3)^{0.5}} = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5},$$

somente se $\theta' > \theta_c$; caso contrário $\Phi_b = 0$.

Onde:

Φ_b número de Einstein.

- θ_c valor crítico do parâmetro de Shields.
 θ' parâmetro de Shields relativo ao atrito superficial.
 g aceleração da gravidade
 d diâmetro mediano dos grãos do material do leito.
 q_b taxa de transporte de material de fundo.
 s densidade relativa do sedimento.

METODOLOGIA E RESULTADOS

Dados

A base de dados batimétricos utilizada foi elaborada a partir de Cartas Náuticas e campanhas de sondagens batimétricas realizadas pela CVRD (Companhia Vale do Rio Doce). Para as regiões não hidrografadas acabou sendo utilizado o estudo desenvolvido por FCTH (2004) para a parte interna do estuário e o estudo desenvolvido por Coutinho e Moraes (1976) para Baía de São José.

Os dados de corrente disponíveis nas proximidades do Canal de Acesso apresentam medições efetuadas pela Hidrologia (1980) e pelo INPH (1991) e foram utilizados na calibração do modelo, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo da localização e data das medições de correntes.

Data	Pontos	Coordenadas	Empresa
Junho de 1980	JP-15	LAT.: 2° 34,06' S LONG.: 44° 22,30' W	Hidrologia
Abril de 1991	A1	LAT.: 2° 22' 32" S LONG.: 44° 18' 07" W	INPH
	A2	LAT.: 2° 02' 17" S LONG.: 44° 05' 19" W	
	A3	LAT.: 1° 57' 53" S LONG.: 44° 00' 49" W	
	A4	LAT.: 1° 48' 33" S LONG.: 43° 51' 57" W	

Na Figura 4 é apresentada a rosa resumo do levantamento realizado em abril de 1991 no ponto A4.

Com base no estudo desenvolvido pela Hidrologia (1980), a Marinha do Brasil determinou 3 regiões de diferente amplitude e fase ao longo do Canal, conforme Carta Náutica n° 410. Por exemplo, segundo a Carta Náutica n° 410, na

entrada do Canal, a maré ocorre 75 minutos antes que a do Porto de Itaqui e sua amplitude é 60% daquela. Já o estudo da Hidrologia considera 70 minutos antes e 68% da amplitude. Nas Figuras 5 a 6 são apresentadas comparações do estudo da Hidrologia (1980) com o valor adotado pela Marinha do Brasil.

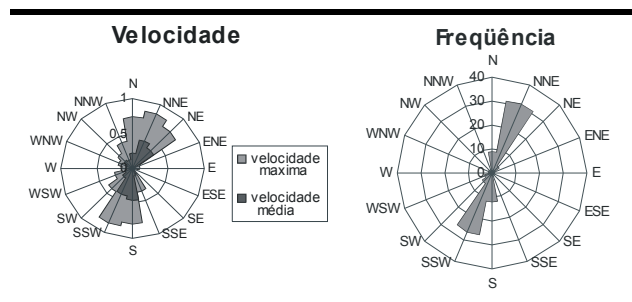


Figura 4 - Levantamento das velocidades (m/s) no Ponto A4, próximo à Área IV (20 metros do fundo) dos dias 05 a 26 de abril de 1991.

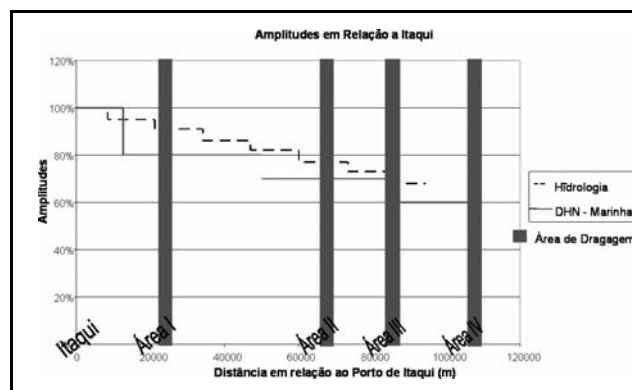


Figura 5 - Comparação da amplitude de maré com referência a Itaqui adotada pela Marinha do Brasil em relação ao Estudo da Hidrologia (1980).

Para a modelação hidrodinâmica foi necessária a escolha de estações maregráficas conhecidas para o fornecimento das constantes harmônicas, já que se faz necessário fornecer o nível de maré no contorno aberto do modelo, sendo dessa maneira um passo fundamental a escolha de estações maregráficas, conforme esquematizado na Figura 7.

O sedimento encontrado na região é predominantemente classificado entre a areia fina e média, trata-se de um sedimento não coesivo com diâmetro do grão na faixa de 0,125 ~ 0,5 mm.

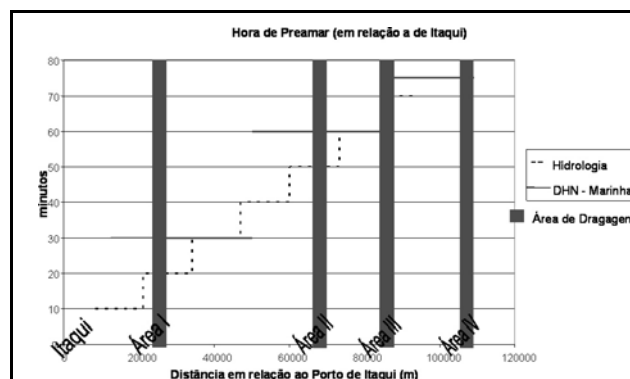


Figura 6 - Comparação da diferença de fase de maré com referência a Itaqui adotada pela Marinha do Brasil em relação ao Estudo da Hidrologia (1980).

Calibração do Modelo

Os períodos de julho de 1980 (conjunto de dados da Hidrologia) e março de 1994 (conjunto de dados do INPH) foram utilizados para a calibração do modelo.

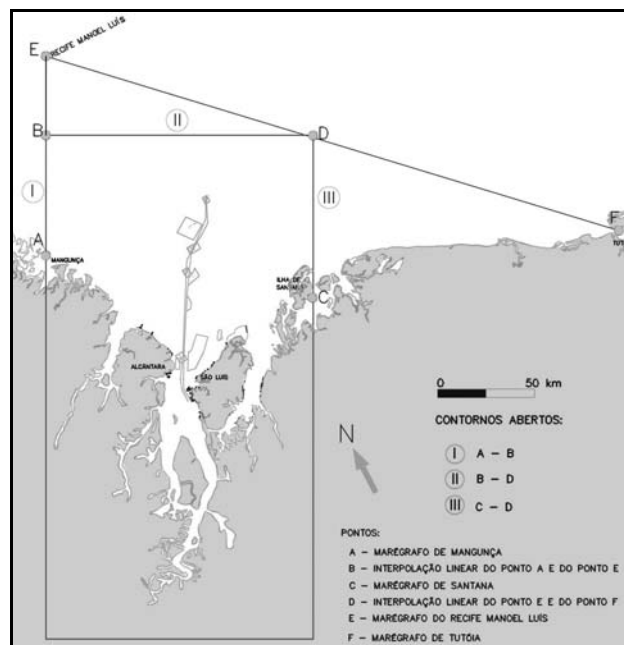


Figura 7 – Definição do contorno aberto do modelo.

Foram simulados mais de 100 ensaios para a calibração do modelo. Como parâmetros de calibração optou-se pela correção do nível de redução e rugosidade de fundo. Para a batimetria foram 22 variações, adicionando durante a calibração a sondagem batimétrica da Baía de São José e tendo como objetivo principal o ajuste da fase da maré de Itaqui. A rugosidade de fundo teve valores iniciais constantes em toda a grade, definindo a melhor calibração para cada ponto de medição. A partir desses valores iniciais e estimando uma área de influência foram desenvolvidas as primeiras matrizes de rugosidade de fundo que foram sendo alteradas procurando sempre o melhor ajuste da velocidade dos pontos. Chegou-se a modificar o contorno aberto do modelo, adotando-se um valor de variação de amplitude 10% superior do valor inicial para melhor calibração da maré de Itaqui, porém essa modificação não surtiu o efeito desejado, sendo rejeitada. A viscosidade também não se mostrou como sendo um parâmetro de maior influência. Ao final da calibração foram extraídas saídas com maior duração de simulação.

Um dos parâmetros mais sensíveis para a calibração é a correção do nível de redução. Uma importante fonte de dados da área modelada foi a Carta Náutica nº 410 - Proximidades da Baía de São Marcos, com escala de 1:135.000, sendo parte dos levantamentos realizados anteriormente a 1980, portanto sem o conhecimento do comportamento da propagação da maré, acreditando-se que esses dados possam ter sido reduzidos em relação ao antigo Porto de São Luís, região que apresenta uma amplitude superior à do início do Canal. Para minimizar a defasagem da maré na comparação dos dados observados em relação à saída do modelo foi necessária a utilização de correção no nível de redução.

Para a rugosidade do fundo, inicialmente adotou-se valores constantes para toda a grade. Posteriormente, como as calibrações dos pontos apontavam necessidade de rugosidade crescente na direção sul para norte, foi necessário adotar valores diferentes de rugosidade de fundo para a grade. A primeira matriz considerou uma interpolação linear das seções de cada ponto (INPH A1, INPH A2, INPH A3, INPH A4 e JP-15). Após a primeira simulação constatou-se um resultado insatisfatório, sendo necessárias outras alterações nessas matrizes, procurando uma melhor solução. As bordas do modelo foram alteradas para uma rugosidade maior para melhor estabilidade do programa. Na Figura 8 é apresentada comparação da rosa de correntes para o ponto A4, obtida ao final da calibração.

Validação

Para a validação de maré com dados independentes, comparou-se a maré observada no período de março de 1985 no Porto de Itaqui com a simulação do modelo. A Figura 9 mostra o gráfico de comparação do nível da maré modelada em relação à observada. Nesse registro observam-se amplitudes superiores a 6 metros e erros médios inferiores a 5% em relação à cota observada.

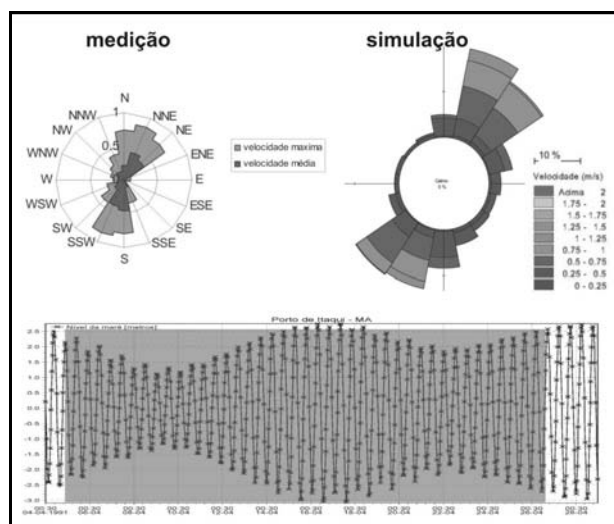


Figura 8 – Comparação da rosa de correntes para o ponto A4 do conjunto de dados do INPH, nas proximidades da Área IV.

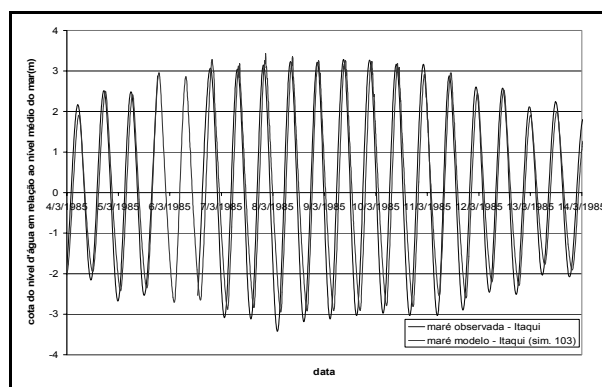


Figura 9 - Comparação da onda de maré em março de 1985 para o Porto de Itaqui (MA), referidos ao nível médio do mar.

Para a validação das correntes foram utilizadas as Cartas de Correntes de Maré – Proximidades de São Luís da Marinha do Brasil (1972). Como a Carta de Correntes representa uma maré de 4,5 metros de amplitude para a região do antigo Porto de São Luís, foi necessária a avaliação nessa mesma condição. A Carta tem pobre resolução espacial e representa uma velocidade da coluna d'água superficial, que é mais sujeita aos efeitos meteorológicos. A Figura 10 mostra para a condição 4 horas antes da preamar de São Luís o resultado obtido.

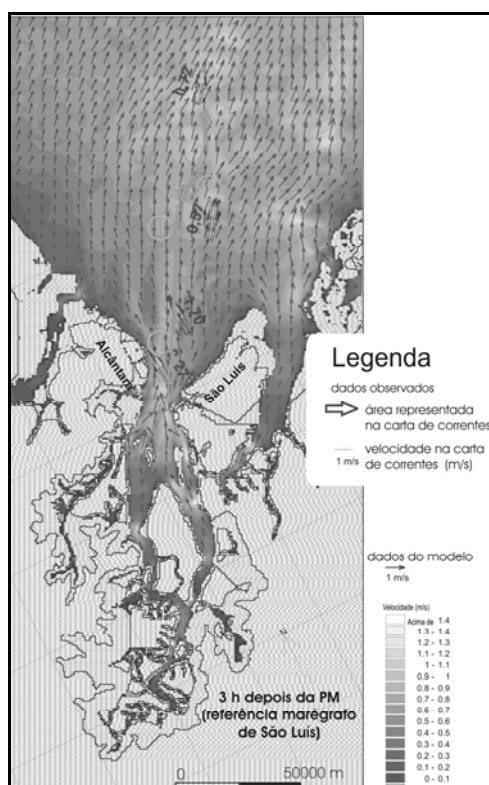


Figura 10 - Comparação do modelo em relação à carta de correntes. Na condição de 3 horas depois da preamar de São Luís.

Aplicações

Como resultados das aplicações do modelo calibrado e validado apresentam-se os resultados da caracterização hidrossedimentológica.

A propagação da maré é apresentada nas Figuras 11 e 12, sendo realizada a comparação com

o estudo da Hidrologia e o adotado pela Marinha do Brasil para a região.

O estudo das trajetórias de derivadores considerou a simulação para 19 posições de lançamentos. Os lançamentos foram realizados no centro das respectivas áreas (Área I, Área II, Área III e Área IV) do Canal de Acesso (ponto C) e a 5 km e 10 km das margens leste e oeste das respectivas áreas do Canal de Acesso (pontos D, E, B e A, respectivamente). A simulação do lançamento foi realizada para a preamar de São Luís, num período de 4 dias (05/03/1985 6:20 – 09/03/1985 6:20). Nas Figuras 13 e 14 estão apresentados os resultados das simulações.

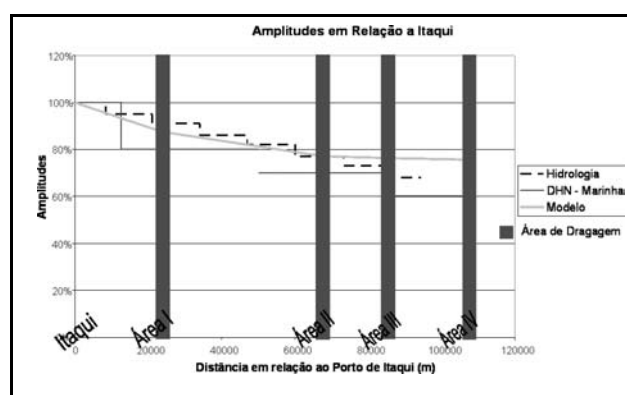


Figura 11 - Comparação da amplitude da onda da maré com referência a Itaqui: modelo em relação ao estudo Hidrologia (1980) e o adotado pela Marinha do Brasil.

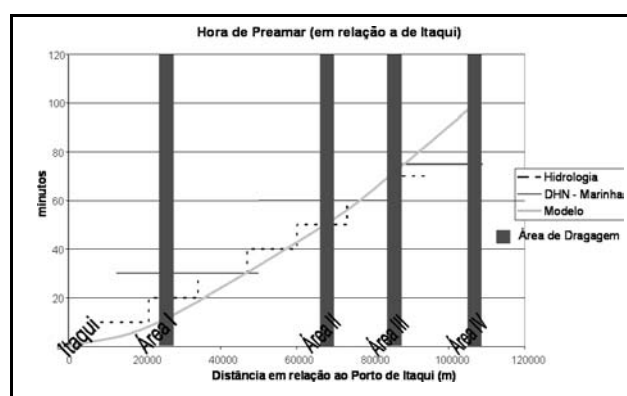


Figura 12 - Comparação da diferença de fase da onda da maré com referência a Itaqui: modelo em relação ao estudo Hidrologia (1980) e o adotado pela Marinha do Brasil.

A aplicação do ST-Mike21 foi realizado para o período de 10 ciclos de maré durante os dias de 04/03/1985 02:50 à 09/03/1985 06:50 e sedimento com diâmetro de 0,4 mm. Aplicou-se a teoria de transporte de fundo de Meyer-Peter e Müller, conforme a Figura 15.

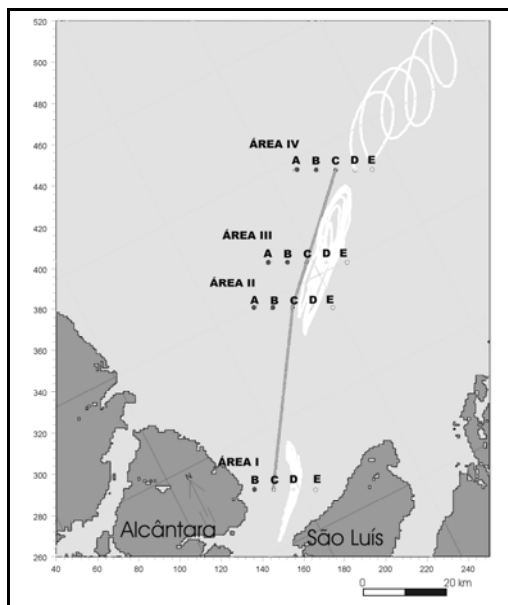


Figura 13 – Simulação de trajetória de derivadores 5 km a leste do centro (ponto D) das Áreas I, II, III e IV do Canal de Acesso.

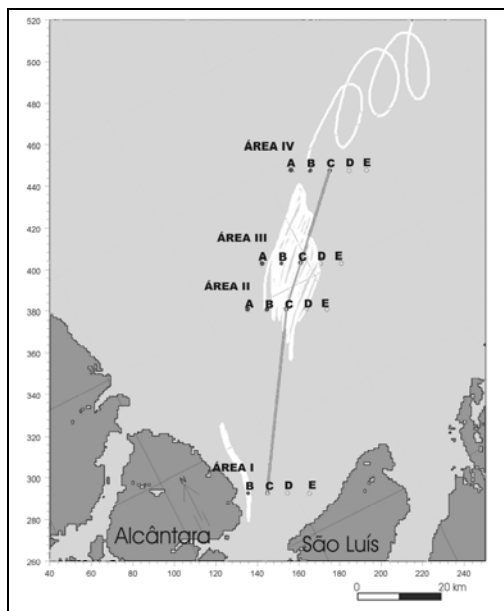


Figura 14 – Simulação de trajetória de derivadores 5 km a oeste do centro (ponto B) das Áreas I, II, III e IV do Canal de Acesso.

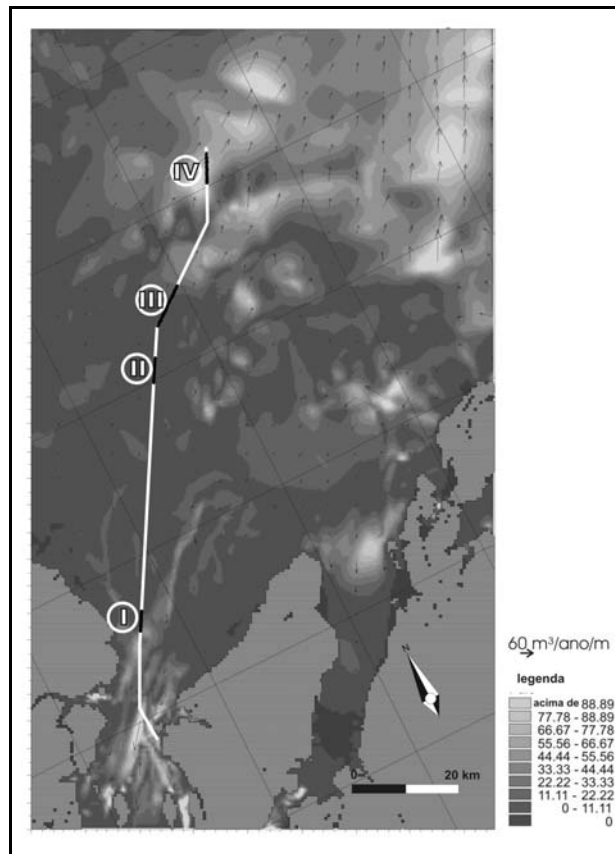


Figura 15 - Teoria de Meyer-Peter e Müller (transporte de fundo).

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Poucas localidades do mundo apresentam as condições necessárias para a formação de grandes campos de ondas de areia como a região do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão, com fortes correntes de maré, sedimento não coesivo e profundidade suficiente. Atualmente existe pouca literatura que aborda a formação de ondas de areia.

O modelo hidrossedimentológico e o estudo das ondas de areia são de interesse para a redução de custos da dragagem e de sondagens batimétricas em canais aquaviários sujeitos a este fenômeno.

O modelo hidrodinâmico mostrou a amplificação de amplitude da maré que ocorre na entrada do Canal até a Área do Complexo Portuário do Maranhão. O modelo apresentou erro médio da amplitude de 6,51% em comparação aos dados observados. O modelo reproduziu as correntes em

situações bem definidas, mas mostrou divergências em horários próximos às estofas.

A trajetória de derivadores é uma ferramenta importante para definir a conveniência de áreas de despejo.

O modelo de transporte de fundo apresentou taxas elevadas na Área I em relação às demais Áreas. De fato, a reduzida migração dessas ondas de areia, principalmente nas Áreas III e IV, provavelmente é resultado da simetria alternativa nas correntes de maré nas respectivas regiões.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R. F. **Caracterização hidrossedimentológica do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão** – Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- BRASIL/MARINHA DO BRASIL/ CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA/ DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO **Carta de Correntes: Proximidades da Baía de São Marcos**. 1ª Edição, Rio de Janeiro, 1972.
- BRASIL/MARINHA DO BRASIL/ CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA/ DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO **Carta náutica nº 410 – Proximidades da Baía de São Marcos (MA), escala 1:135.000**, Rio de Janeiro, 1985.
- BLONDEAUX, P., BROCCINI M. e VITTORI G. **A model for sand waves generation**. University of Genova, Genova, Itália, 2001.
- CVRD – Companhia Vale do Rio Doce – Complexo Portuário de Ponta da Madeira - **Informações Portuárias**, 2001.
- COUTINHO, P. N., MORAIS, J. O. **Distribuição de sedimentos na Baía de São José, Estado do Maranhão, Brasil** – Arquivo Ciências do Mar, 16(2): pág 123-127, Fortaleza, Brasil, 1976.
- DANISH HYDRAULIC INSTITUTE SOFTWARES – **Módulos do software MIKE 21**.
- FEMAR – Fundação de Estudos do Mar - Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras - **Dados maregráficos de Mangunça, Recife Manoel Luís, Porto de Tutóia e Farol de Santana**.
- FENSTER, M.S., FITZGERALD, D.M., BOHLEN, W.F., Lewis, R.S. and BALDWIN, T. - **Stability of giant sand waves in eastern Long Island Sound**. páginas 207-225, vol 91, Marine Geology, U.S.A., 1990.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA **Análise Preliminar dos Dados Existentes, sobre a implantação e manutenção do canal de acesso do TPM**, Volume 1 e Volume 2, São Paulo, Brasil, 1995.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA **Estudo da circulação de correntes de maré na Área Portuária do Maranhão abrangendo o Porto de Itaqui**, São Paulo, Brasil, 2004.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA **Estudo da circulação de correntes de maré e do transporte de sedimentos na área de influência do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão**, São Paulo, Brasil, 2005.
- HIDROLOGIA S.A. **Marés e correntes –JP -15 e Porto de Itaqui**. Relatório Final RL 3200-17-04. Rio de Janeiro, 1980.
- INPH – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS **Medições hidráulicas realizadas na Baía de São Marcos**. Relatório INPH 54/91. Rio de Janeiro, 1991.
- IPPEN, A. T. **Estuary and coastline hydrodynamics**. McGraw Hill Book Company Inc., New York, 1966.
- KATOH, K., KUME, H., KUROI, K. AND HASEGAWA, J. **The development of sand waves and the maintenance of navigation channels in the Bisaneto Sea**. Coastal Engineering, pp 3491-3502, 1998.
- KNAAPEN, M. A. F. AND HULSCHER, S. J. M. H. **Regeneration of sand waves after dredging**. Journal Coastal Engineering (Elsevier), pp. 277 – 289, 2002.
- PEREIRA, J. E. R. **Modelagem numérica tri-dimensional da circulação na plataforma do Estado do Maranhão** – Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
- PIANC **Approach channels – a guide for design**. Final report of the Working Group II – 30 PIANC – IAPH in cooperation with IMPA and IALA. Brussels (Belgium) and Tokyo (Japan), 1997.
- SANTORO, V. C., AMORE, E., CAVALLARO, L., COZZO, G. AND FOTI, E. **Sand Waves in the Messina Strait**. Journal of Coastal Research, No. 36, pp 640-653, 2002.
- Universidade de São Paulo – Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica **Relatórios e levantamentos hidrográficos referentes aos estudos da Área Portuária do Maranhão**. São Paulo, 1972-2002.

Hydrosedimentological Modeling in the Access Channel of the Maranhão Harbor Area

ABSTRACT

The Maranhão Harbor Area is the second largest harbor Complex of Latin America for cargo handling and it is located on the western side of São Luís Island in São Marcos Bay.

The hydrosedimentological characterization of the Access Channel of Maranhão Harbor Area was performed using current data review and analysis for numerical modeling application.

This paper also provides a method to obtain current pattern predictions from the results of hydrodynamical simulation, and to predict the evolution and migration of sand waves.

The sediment transport model pointed to a low sediment transport rate in Area IV, III and II, explaining the smaller migration pattern of these waves when compared with Area I.

Key-words: *Maritime Hydraulics, Mathematic Modeling, Maritime Dredging, Harbor Engineering.*