

Avaliação da eficiência de molhes guia-corrente curvos na Baía de Santos, São Paulo: modelagem física

The efficiency of curved jetties in Bay of Santos, São Paulo, Brazil: physical modeling

Tiago Zenker Gireli^{1*} , Patricia Dalsoglio Garcia¹ ,
Antonio Henrique Soares Dutra Gomes Pereira¹ 

RESUMO

Atualmente, o Porto de Santos é o maior da América Latina, e encontra-se em processo de aprofundamento de seu canal de acesso, prevendo alcançar os 17 m DHN como meta final. Especificamente para o trecho da barra marítima que hoje é mantida somente por dragagem, espera-se um incremento significativo no volume de dragagem de manutenção. Nesse sentido, este trabalho empregou a modelagem física para avaliar a eficácia de molhes guia-corrente curvos na manutenção de profundidades ao longo do trecho da barra marítima do canal do Porto de Santos, seu impacto na dispersão da pluma de efluentes do emissário submarino existente na baía e sua influência na praia adjacente ao molhe. Como resultado, verificou-se que a introdução dos molhes tornaria possível manter as profundidades do canal de acesso na transposição da barra com um volume de dragagem de manutenção muito inferior ao atual, que o aumento da extensão original do emissário submarino em 1,2 km não só reduziria a influência da presença dos molhes, como melhoraria a dispersão dos efluentes para o largo em relação à situação original. Além disso, a presença dos molhes induz uma acreção marinha que tende a proteger a região adjacente à embocadura que hoje sofre um severo processo erosivo. Por fim, o estudo realizado indica ser plenamente viável a adoção de obras fixas para a transposição da barra marítima do Porto de Santos, podendo configurar-se como uma opção economicamente mais atraente do que a atual, para manter profundidades de 17 m DHN.

Palavras-chave: obras portuárias; modelagem física; dispersão de efluentes em emissários submarinos.

ABSTRACT

Currently, the Port of Santos is the largest in Latin America, and its access channel is in the process of deepening, intending to reach 17 m DHN as an ultimate goal. Specifically for the maritime bar section, which is now maintained only by dredging, a significant increase in the volume of maintenance dredging is expected. The current study applied the physical modelling to evaluate the effectiveness of two curved jetties in the maintenance of depth along the inlet entrance of Santos channel, its impact on the dispersion of the plume of effluents from the existing outfall and its influence on the beach adjacent to the proposed right jetty. As a result, the jetties' layout could maintain the access channel's depth with a much lower volume of dredging than the current maintenance requires. It was found that the increase of 1.2 km on the outfall's original length would not only reduce the influence of the jetties' presence, but also improve significantly the dispersion of effluents in comparison to the original situation. Moreover, the presence of the jetties induces a marine accretion that tends to protect the region adjacent to the inlet, which is currently suffering a severe erosion process. Finally, the study shows that it is completely feasible to adopt the curved jetties to transpose the Port of Santos' maritime bar, which may be configured as an economic and attractive option to maintain depths of 17 m DHN.

Keywords: port engineering; physical modeling; effluent dispersion in ocean outfalls.

INTRODUÇÃO

No Brasil, existe uma crescente preocupação com a eficiência portuária, sendo a via marítima o principal modal de transporte de mercadorias de seu comércio exterior.

Em 2012, a tonelagem exportada por via marítima representou 96% do total, enquanto que a importada alcançou 89%. Ao se analisar o fluxo comercial por valor (US\$ FOB), percebe-se que essa participação vem se ampliando nos últimos anos, atingido

¹Universidade Estadual de Campinas - Campinas (SP), Brasil.

*Autor correspondente: zenker@fec.unicamp.br

Recebido: 11/01/2016 - Aceito: 05/09/2017 - Reg. ABES: 158416

84% do montante exportado e 76% do importado, ou seja, o melhor patamar desde 2007 (CNT, 2012).

Segundo o relatório *The Global Competitiveness Report 2015-2016*, em relação à qualidade da infraestrutura portuária, o Brasil ocupa a centésima vigésima posição, atrás de todos os países do BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China) e, também, da Argentina, do México e da Colômbia (SCHWAB, 2015). A eficiência dos portos é um dos principais problemas brasileiros, prejudicando a produtividade e a competitividade.

Na balança comercial, o Complexo Portuário Santista está isolado no *ranking* dos portos nacionais, com 25,3% de participação na movimentação das trocas comerciais brasileiras. Especificamente quanto à movimentação de carga contenerizada, o Porto de Santos movimentou 3,7 milhões TEUs em 2014, 6,8% superior à movimentação do ano anterior, que lhe garantiu a 38ª posição no *ranking* de 2013 da *Container Management Magazine*, ocupando a melhor posição entre os portos da América Latina, superando o Porto de Balboa, no Panamá (CODESP, 2016). Dessa forma, Santos seria o candidato natural a “Hub Port”, porto concentrador de cargas, do Atlântico Sul, desde que conseguisse superar alguns entraves relacionados, principalmente, à eficiência nas operações e aos acessos marítimos, reduzindo os custos logísticos e aumentando a competitividade dos produtos latino-americanos no mercado internacional (GIRELI & VENDRAME, 2012).

O Porto de Santos (Figura 1) é administrado pela Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP). Com uma área de 7,7 milhões de m² e 13 km de extensão de cais, o porto está localizado no centro do litoral do estado de São Paulo, em um estuário limitado pelas ilhas de São Vicente e Santo Amaro, a 2 km do Oceano Atlântico. Por causa da

localização, sua área de influência, que concentra mais de 50% do produto interno bruto (PIB), abrange os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Paraná, além da sua importância na América do Sul. A cidade de Santos também possui uma localização num ponto estratégico do estado de São Paulo — cerca de 90% da base industrial desse estado está a menos de 200 km do Porto de Santos, segundo a Confederação Nacional do Transporte (BRASIL, 2015).

Segundo a CODESP (2015), desde janeiro de 2015 o canal de Santos já possui um canal dragado com profundidades de 15,0 m e calado homologado de 13,2 m até a Alemoa. Essa ampliação de profundidades — anteriormente era 13,3 m — faz parte da primeira fase das obras de aprofundamento do porto previstas no Programa Nacional de Dragagem (PND), com uso de verbas do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), do governo federal. A meta é atingir até 2020 a profundidade de 17 m. Esse aprofundamento tem por objetivo permitir ao porto a atracação de navios da classe Post-Panamax, cujo calado pode atingir 14,4 m. Da mesma forma, foi finalizado recentemente o alargamento do canal do porto, passando de 150 m de largura mínima para 220 m, possibilitando maior movimentação de cargas. Porém, as obras de dragagem não têm efeito permanente, ou seja, sedimentos naturalmente se depositarão mais uma vez no canal do porto.

De toda a extensão do canal de acesso do Porto de Santos, o trecho da barra marítima é o que mais sofre com o processo de assoreamento, sendo responsável por cerca de 60% do volume dragado, anualmente, para manutenção das profundidades no porto (GIRELI & VENDRAME, 2012).

De acordo com Gireli e Vendrame (2012), o volume de dragagem para manter a profundidade em 15 m neste trecho é estimado em 3,2 milhões de m³ por ano, com uma taxa média de evolução do

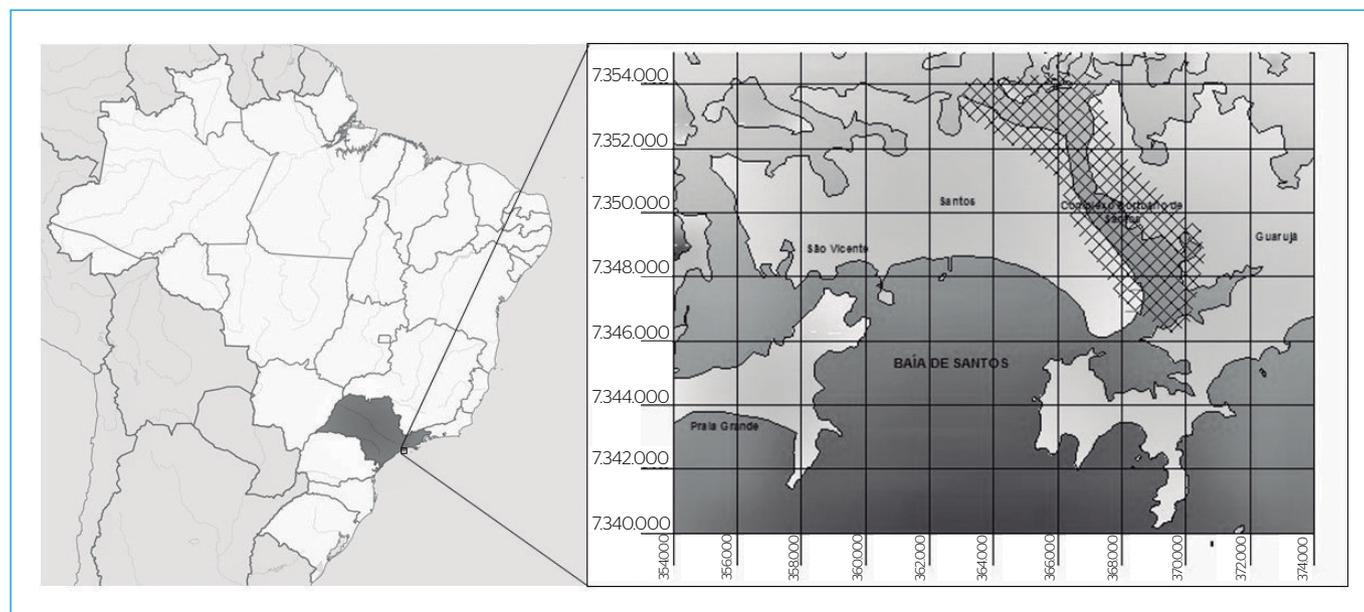


Figura 1 - Localização do Porto de Santos.

fundo de 1,34 m/ano. Essa taxa é quase 140% superior àquela verificada antes do aprofundamento. O valor aproximado do custo da dragagem, segundo o estudo, para manter a profundidade de 15 m no canal era, na época, de R\$ 30 milhões anuais. Além disso, após grandes ressacas, as dragas podem levar desde dias a semanas para devolver o canal para sua cota de projeto, impossibilitando, temporariamente, a entrada de navios de maior calado e causando sérios prejuízos ao porto.

No passado, para a transposição da barra marítima de Santos, obras fixas foram estudadas e descartadas, uma vez que para os calados dos navios que adentravam no porto naquela época, a opção de manutenção apenas por dragagem se mostrava economicamente mais atrativa. Entretanto, com a adoção do Post-Panamax como novo navio-tipo para o Porto de Santos e a necessidade de atingir 17 m de profundidade, a adoção de molhes guia-corrente pode passar a se configurar como uma opção viável.

Em Reis (1978), foram estudadas, em modelo reduzido de fundo móvel, seis diferentes alternativas de molhes guia-corrente. O objetivo deste estudo era reduzir o grande volume de sedimentos dragados anualmente para manter a cota de 14 m na barra. As primeiras duas alternativas estudadas foram omitidas, porque apresentaram resultados menos eficientes que as demais. Já as alternativas de 3 a 6 podem ser observadas na Figura 2.

As conclusões deste trabalho apontam:

- alternativa 3: o talvegue tende a se movimentar para sudeste, mudando o raio de curvatura e perdendo a capacidade de expulsar os sedimentos durante a maré de vazante;
- alternativa 4: a presença do segundo molhe melhorou a capacidade de expulsão dos sedimentos durante a vazante, porém o desvio do canal persistia nesta alternativa;
- alternativa 5: o molhe curvo enraizado na Ponta da Praia não foi capaz de evitar o desvio do eixo do canal, tal como as demais alternativas;
- alternativa 6: a extensão do molhe curvo próximo da cota de 11,0 m e a introdução do segundo molhe, reto e disposto no outro lado da boca do estuário, resultaram na melhor alternativa, segundo o autor. Não obstante, observou-se uma sedimentação próxima ao molhe curvo, além de um desvio do talvegue do canal em direção à ponta do molhe reto.

Mais recentemente, Pezzoli *et al.* (2013) enfatizam que as obras fixas são de grande importância para a manutenção dos fundos no Porto de Santos e propõem um traçado fortemente convergente para os molhes (Figura 2). Entretanto, o relatório de Reis (1978) traz, em suas conclusões, que para configurações como esta, o eixo do talvegue do canal tenderia a se deslocar, o que poderia gerar inconvenientes para a navegação. Por outro lado, o enraizamento do molhe direito proposto por Pezzoli *et al.* (2013) teria forte impacto em um trecho de mais de 2 km

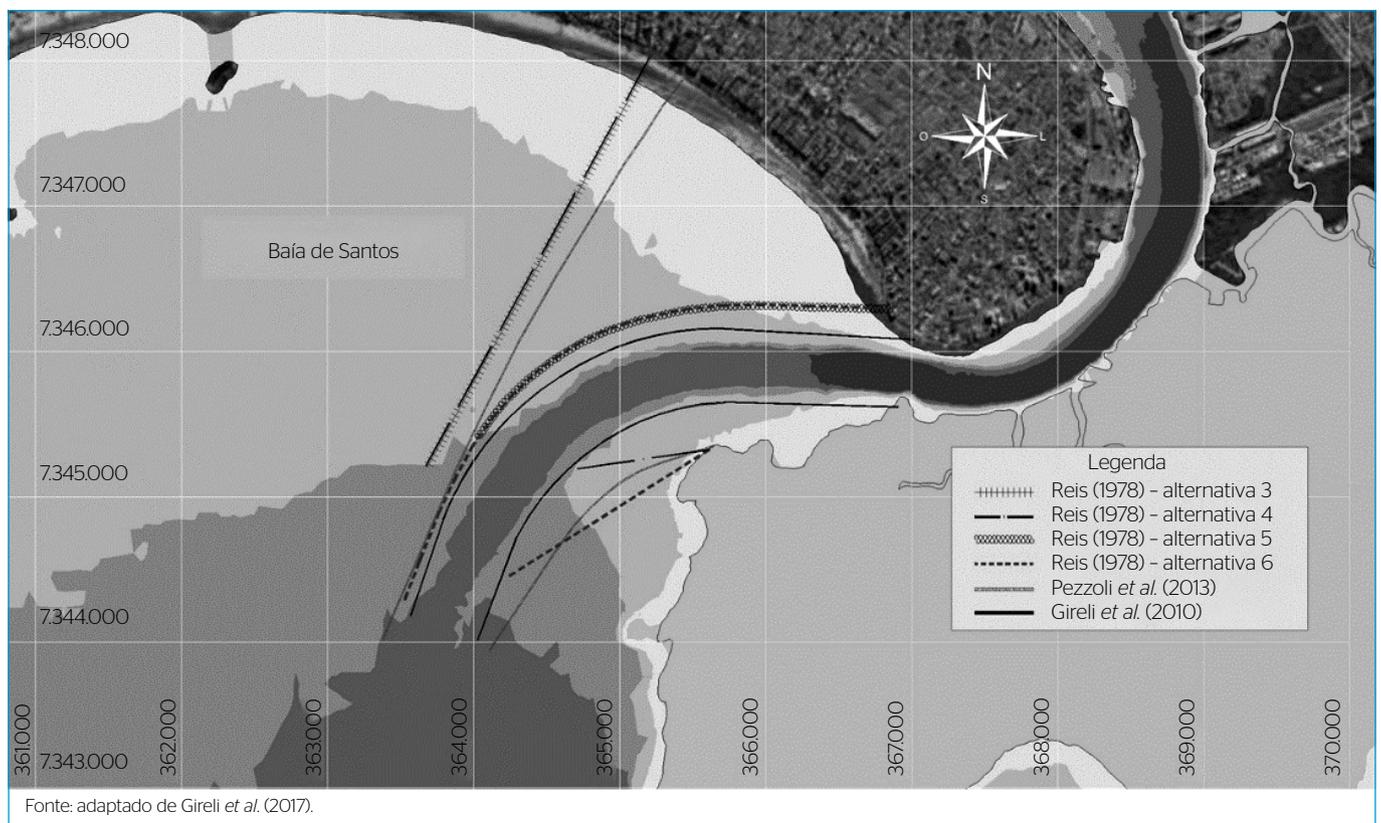


Figura 2 - Propostas de molhes guia-corrente estudadas para o Porto de Santos.

da orla santista, o que poderia se tornar um impeditivo para a adoção dessa alternativa em um futuro processo de licenciamento ambiental.

Gireli *et al.* (2010) apresentaram uma proposta de molhes curvos levemente convergentes. Já Gireli *et al.* (2017), com base na modelação matemática hidrodinâmica, mostram, qualitativamente, que houve incremento de velocidade das correntes com a introdução dos molhes, tendo essa alternativa se mostrado viável sob o aspecto estudado.

Há ainda uma grande e polêmica discussão sobre as reais causas da erosão da Ponta da Praia, que por estar localizada próximo à entrada do canal de Santos, pode provavelmente estar sendo influenciada pelas alterações feitas nas dragagens nos últimos anos. Essa erosão se intensificou muito a partir de 2010, quando as obras de aprofundamento e alargamento do canal do Porto se iniciaram. Esse assunto tem sido discutido na mídia e, segundo as notícias, o Ministério Público moveu uma ação civil contra a CODESP em 2015 por causa da erosão da Ponta da Praia (GI SANTOS, 2015).

Isso posto, neste trabalho pretendeu-se complementar os estudos realizados por Gireli *et al.* (2017), utilizando-se dessa alternativa de traçado de molhes guia-corrente e da modelagem física para avaliar, quantitativamente, a eficiência dessas obras na manutenção dos fundos e sua influência na dispersão dos efluentes do emissário submarino existente na Baía de Santos. Além disso, é feita uma avaliação qualitativa em modelo físico sobre a influência dessas obras na Ponta da Praia, que atualmente passa por um processo intenso de erosão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a eficiência de molhes guia-corrente na manutenção das profundidades ao longo do canal e seu impacto na dispersão da pluma de efluentes do emissário submarino existente na baía, foi utilizado um modelo físico baseado na semelhança de Froude com fundo fixo, nas escalas de 1:1.200 na horizontal e 1:200 na vertical, escala de descarga de 1:3.394.113 e tempo de escala de correntes de maré de 1:84,85, dinâmico e que permite reprodução de ondas e marés (LAMPARELLI *et al.*, 2008).

Segundo Hudson (1979 *apud* GOIS, 2004), o grau de distorção geométrica das escalas do modelo está dentro dos limites recomendáveis (máximo de 6), sendo capaz de reproduzir, portanto, o desejado. Caso a distorção fosse maior, o modelo tornar-se-ia muito liso e as conformações de fundo não seriam satisfatoriamente representadas, em virtude de taludes muito íngremes. Ainda segundo Gois (2004), esse limite refere-se a modelos de fundo fixo para ensaios reproduzindo ondas e marés e utilizando-se de traçadores para verificação do comportamento sedimentar em zonas estuarinas. Para outros estudos, há outros limites, podendo chegar a distorções de até 10. Ressalta-se que, apesar de modelos geometricamente distorcidos não reproduzirem os fenômenos naturais integralmente, são capazes de reproduzir com fidelidade a movimentação dos sedimentos em função da ação hidrodinâmica (GOIS, 2004).

O modelo utilizado compreendia toda a Baía e Estuário de Santos e São Vicente e ocupava uma área de cerca de 750 m² do Grande Hall de modelos do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LHEPUSP). O modelo possuía um gerador de ondas, um gerador de marés e a possibilidade de reproduzir vazões fluviais. Para estudos de transporte de sedimentos, usou-se a técnica de traçadores em modelo de fundo fixo. O traçador utilizado foi uma areia fina com diâmetro mediano de 0,125 mm. Na Figura 3 é apresentada uma foto do modelo físico com a inserção dos molhes guia-corrente.

Esse modelo foi calibrado a partir de dados de medição de correntes na baía e tempos de propagação da maré no estuário, tendo como foco os estudos sobre elevação do nível médio do mar e seus efeitos na costa (LAMPARELLI *et al.*, 2008).

Para estabelecer a altura de onda de projeto para estudo dos molhes e sua influência na costa foram utilizados os dados medidos na Baía de Santos entre 1972 e 1973 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias do Rio de Janeiro (INPH/RJ) e apresentados em Brasil (1974). Garcia *et al.* (2002) realizaram uma análise estatística na qual a maior frequência das ondas significativas observadas situou-se na classe entre 0,6 e 1,2 m. A altura significativa máxima registrada foi de 2,9 m.

A Norma Brasileira (NBR) nº 9.782/1987 (ABNT, 1987) estabelece que devem ser utilizados os valores de alturas significativas para estudos de estruturas flexíveis e estudos de processos litorâneos. Como base na norma e utilizando os dados anteriormente referidos, foi feita uma correlação estatística de longo termo, obtendo-se, para o período de retorno de 50 anos, uma altura de onda significativa para o projeto de 5,0 m.

A altura de maré astronômica considerada para os ensaios foi de 1,5 m, representando a média das preamares de sizígia equinocial obtidas nas tábuas de marés para o Porto de Santos publicadas pela Marinha do Brasil. Foi considerada, ainda, uma variação de $\pm 0,50$ m de altura por causa da ação meteorológica, com base nas diferenças



Figura 3 - Modelo físico da Baía e Estuário de Santos e São Vicente.

observadas nos registros do marégrafo da Ilha das Palmas em relação às previsões astronômicas (SONDOTÉCNICA, 1977).

Construção dos molhes guia-corrente em modelo físico

Como o modelo físico foi projetado utilizando a batimetria do canal de acesso ao Porto de Santos com profundidades de 13,3 m DHN, adotou-se essa condição como inicial (referência).

Para a condição projetada foram utilizadas as informações disponibilizadas pela Secretaria Especial de Portos (SEP), mantendo-se o eixo original do canal, alargando-o de 150 para 220 m nos trechos retos, e nos trechos curvos, para 330 m. Nesta configuração, foram propostos os alinhamentos dos molhes guia-corrente.

O molhe direito foi enraizado na Ponta da Praia de Santos, enquanto que o esquerdo foi fixado na Ponta da Fortaleza, na Ilha de Santo Amaro. Ambos se estendem até a isóbata de 12 m DHN, resultando num comprimento total de 4.435 m para o molhe direito e 3.776 m para o molhe esquerdo (Figura 4).

O dimensionamento em corte da estrutura foi realizado levando-se em consideração as recomendações do U.S. ARMY/Coastal Engineering Research Center (2002). A seção do molhe foi desenvolvida considerando uma largura de crista igual a 5 m, inclinação dos taludes igual

a 1V:2H. A altura de onda de projeto variava à medida que os molhes ficavam abrigados do efeito delas. Na seção do cabeço, a altura da onda de projeto foi adotada como $H_p=5$ m. Para os cálculos, foi considerada uma maré meteorológica de $\pm 0,5$ m e uma maré astronômica de 1,5 m.

A construção dos molhes no modelo físico foi realizada empregando-se pedra britada catalogada como 7, cuja dimensão característica é da ordem de 0,5 cm, dimensão esta correlacionável ao peso dos blocos no protótipo. Entretanto, em função da dificuldade em simular o material do núcleo e em manter a estrutura em função da distorção do modelo, foi adotado o emprego de um septo de madeira no eixo das obras, resultando na estrutura apresentada na Figura 5.

Eficiência na manutenção dos fundos

A metodologia empregada para a avaliação da eficiência dos molhes projetados na manutenção das profundidades foi realizada de forma indireta, a partir da medição da velocidade das correntes em quatro pontos ao longo do eixo do canal (Figura 4), nos cenários com e sem a presença dos molhes guia-corrente.

A velocidade superficial das correntes nos pontos foi medida empregando-se um micromolinete (Figura 6), acoplado a um contador de rotações. Por meio de sua equação de calibração, determina-se a velocidade

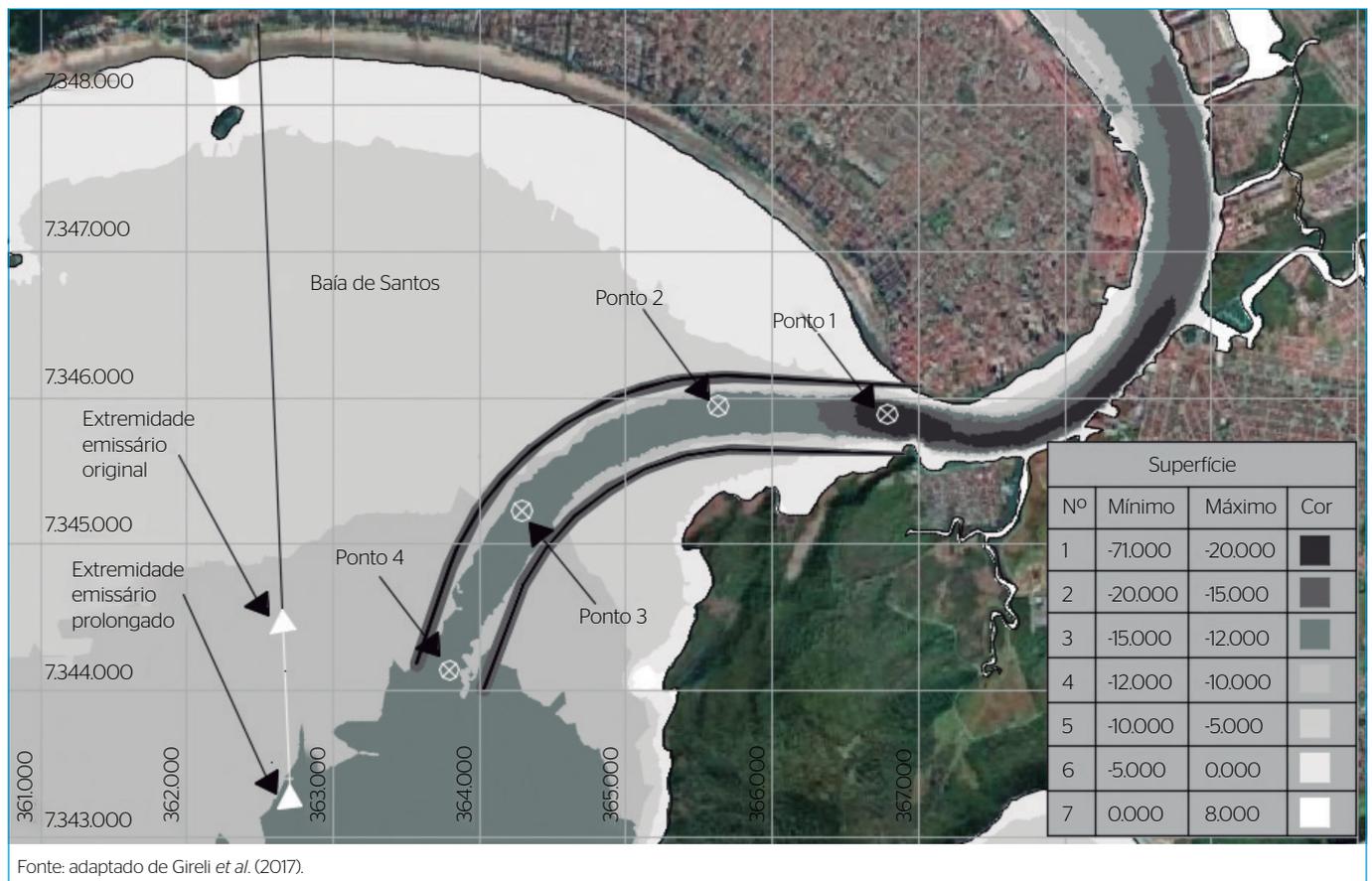


Figura 4 - Posição dos molhes guia-corrente, dos pontos de observação e das extremidades do Emissário Submarino de Santos estudadas.

da corrente de acordo com o número de rotações registrado em um tempo prefixado. Esse equipamento foi fabricado no LHEPUSP e tem como principais características técnicas: alimentação de $\pm 12\text{VDC} \pm 5\%$; corrente consumida de 4,82 mA; temperatura máxima de 50°C ; micromolinete capacitivo Kent; saída de onda quadrada com período proporcional à variação da capacitância; caixa envolvente de latão; limitações em frequência de acordo com a ponta utilizada (ALFREDINI; ARASAKI; AMARAL, 2008).

O micromolinete, porém, atua somente numa faixa de velocidade, não sendo eficiente para medir velocidades muito baixas. Assim, antes da construção dos molhes, somente o ponto 1 possuía velocidade suficiente para ser mensurada pelo equipamento. Nos outros três pontos, a velocidade era muito baixa, sendo medida, então, com o uso de confetes, uma haste metálica de 30 cm de comprimento e um cronômetro. Assim, jogava-se confete na água e cronometrava-se o tempo que ele levava para percorrer os 30 cm.

As velocidades foram medidas nas condições de meia maré vazante e meia maré enchente, as quais apresentam maiores velocidades. Era possível controlar o momento exato da medição pelo relógio de maré do modelo físico, que indica todas as fases da maré: preamar, meia vazante, baixa mar e meia enchente.

Avaliando os perfis de velocidade medidos pela Sondotécnica (1977) na região, percebe-se que, próximo aos instantes de meia maré, as componentes horizontais da velocidade se distribuem verticalmente de forma similar à curva logarítmica de velocidades, dada pela Equação 1.

$$\frac{v(y)}{v^*} = \frac{2,3}{k} \cdot \log \left(\frac{y}{k_s} \right) + 8,5 \tag{1}$$

Em que:

v = velocidade numa dada profundidade;

v^* = velocidade de atrito do escoamento;

k = constante de Von Karman;

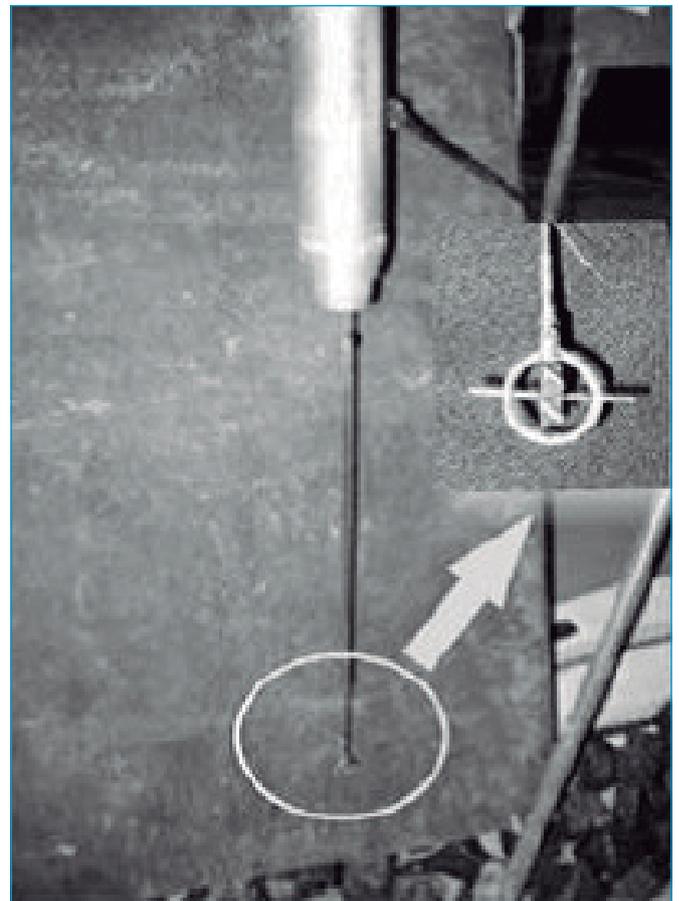
y = profundidade em que foi medida a velocidade v ;

k_s = rugosidade equivalente do leito.

Sendo assim, foram calculadas as velocidades médias a partir das velocidades superficiais medidas. Para tal, considerou-se a granulometria do material para a determinação de k_s , considerando a possibilidade da existência de conformações de fundo pelo método de Van Rijn (1984), conforme equações de 2 a 5. A partir da Equação 1, foi traçado o perfil logarítmico de velocidades, determinando-se a relação entre as velocidades superficial medida e média na seção. A seguir, as velocidades médias foram plotadas sobre a curva de Sundborg-Hjulström em função do diâmetro médio da amostra coletada em cada ponto de medição.



Figura 5 - Configuração final dos molhes implantada no modelo físico.



Fonte: adaptado de Alfredini, Arasaki e Amaral (2008).

Figura 6 - Micromolinete utilizado nas medições. Detalhe do sensor à direita.

$$\frac{\Delta}{h} = 0,11 \cdot \left(\frac{D_{50}}{h}\right)^{0,3} \cdot (1 - e^{-0,5T})(25 - T) \quad (2)$$

$$T = \left\{ \frac{\sqrt{g} \cdot v_m}{18 \cdot \log \left[\frac{12 \cdot h}{3 \cdot D_{90}} \right]} \right\}^2 = u_c^2 / u_c^2 \quad (3)$$

$$\Lambda = 7,3h \quad (4)$$

$$k_s = 3D_{90} + 1,1\Lambda \cdot (1 - e^{-25 \frac{\Lambda}{\Lambda}}) \quad (5)$$

Em que:

D = altura da duna;

h = profundidade;

D_{50} e D_{90} = os diâmetros dos sedimentos correspondentes a dimensões em que 50 e 90% dos grãos têm dimensões inferiores;

v_m = velocidade média do escoamento;

L = comprimento da duna;

u_c = velocidade de atrito crítica, segundo o critério de Shields;

T = Parâmetro de mobilidade do grão.

Sunborg (1956) relaciona a velocidade média do escoamento com a dimensão dos grãos, estabelecendo graficamente limites de tendências de erosão, transporte e sedimentação das partículas. Assim, comparando-se o ponto 1 (referência), que mantém naturalmente profundidades superiores a 17 m DHN, com os demais pontos medidos, é possível inferir os comportamentos destes após a introdução dos molhes.

Influência na dispersão dos efluentes

Para a avaliação da influência da presença dos molhes na dispersão dos efluentes do Emissário de Santos, a vazão de saída do emissário no modelo físico foi simulada conforme Arasaki, Alfredini e Gireli (2008), empregando-se o corante azul de metileno como traçador, dosado a partir de um sistema de tubos e reservatório de forma a manter uma vazão constante equivalente à vazão média projetada para o emissário.

Em seguida, foram realizados ensaios na presença dos molhes e com duração de 6 ciclos de maré, considerando 2 cenários, a saber:

- cenário 1: emissário com seu comprimento original de 4,0 km e implantado em 1978;
- cenário 2: emissário prolongado em 1.200 m, conforme proposição de Arasaki, Alfredini e Gireli (2008).

Por fim, foi feita a comparação da dispersão do corante em relação aos obtidos nos ensaios realizados por Arasaki, Alfredini e Gireli (2008), nos quais os molhes não existiam.

Avaliação da modificação da dinâmica sedimentar

Segundo Klein e Menezes (2001), a posição e a geometria de praias limitadas por promontórios, como é o caso de Santos, são dependentes do formato da baía, da obliquidade das ondas, do tamanho dos grãos, da declividade do perfil praiial e da distância entre promontórios. Já Alfredini e Arasaki (2005) afirmam que a distância para a costa na qual uma baía erode está diretamente relacionada com a distância entre promontórios.

Assim, a partir da introdução dos molhes, a distância entre promontórios se reduziria em cerca de 20%, provocando não só uma tendência de realinhamento da linha de costa como uma de acresção ao longo de toda a praia, sendo o sedimento necessário carregado do largo em direção à costa, conforme mostra o modelo de sedimentação proposto por Fúlfaro e Ponçano *apud* Fukumoto (2003) para a Baía de Santos.

Como o modelo físico empregado é a fundo fixo, não seria possível simular a complexa dinâmica de sedimentação da região. Ainda assim, a partir da técnica de pasta de areia, descrita a seguir, é possível avaliar qualitativamente o transporte de sedimentos na parte mais rasa do perfil de praia e a tendência de evolução da linha de costa.

Para tanto, foi utilizada a técnica de traçadores de fundo fixo, aplicando-se no modelo uma camada de 3 ± 1 mm de pasta de areia na região em que se encontra a areia da praia no protótipo. A pasta de areia é composta por areia fina seca e água, na proporção de 3:1, respectivamente. Em cada ensaio foram realizados 20 ciclos de maré, tanto iniciando quanto terminando na preamar. A seguir, verificava-se o padrão de deposição final na área em que a pasta de areia foi aplicada. Na Figura 7, é apresentada a camada de areia aplicada no modelo no instante inicial do ensaio.

A semelhança de Froude não se verifica para o material empregado no modelo, material este que se configura apenas como um traçador qualitativo da tendência de movimentação da areia que compõe

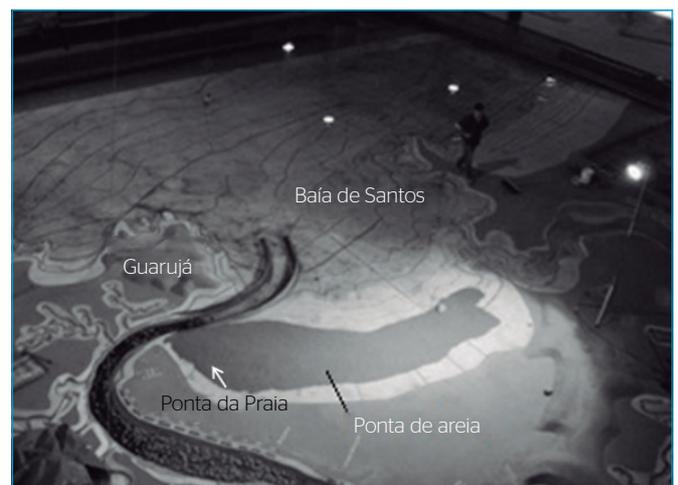


Figura 7 - Representação do molhe instalado e da pasta de areia aplicada com camada de 3 ± 1 mm.

a Praia de Santos, com a inserção dos molhes. Metodologia similar foi utilizada por Alfredini e Gois (2004).

No ensaio, em função da escala do modelo, as menores ondas que ainda se caracterizavam como ondas de gravidade equivalentem, no protótipo, a ondas de tempestade. Assim, o ensaio teve duração em modelo de 3h35min, equivalente a 23 dias e 21 horas no protótipo, e empregou ondas com H=3,5 m e período de 8,5 s, também em escala de protótipo. Após esse ciclo, foram avaliadas as alterações do perfil praiial conformado pelo traçador empregado, buscando identificar padrões que indicassem a tendência de alteração na morfodinâmica da Praia de Santos, em especial no trecho da ponta da praia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das simulações hidrodinâmicas realizadas no modelo físico com a introdução dos molhes guia-corrente em condições similares às realizadas por Arasaki, Alfredini e Gireli (2008) sem a obra, puderam ser observadas alterações nas velocidades no canal em escala de protótipo, conforme apresentado na Tabela 1.

Os levantamentos realizados no trecho estudado da Baía de Santos mostraram a ocorrência de areia fina, com $D_{50}=0,11$ mm e $D_{90}=0,12$ mm (SONDOTÉCNICA, 1977) na região de praia. Já no

Tabela 1 - Comparação das velocidades superficiais para os quatro pontos de medição antes e após a inclusão dos molhes guia-corrente.

Comparação entre as velocidades nos pontos analisados				
Método confete		Sem molhes	Com molhes	Resultado
Ponto	Período da maré	Velocidade (m/s)	Velocidade (m/s)	Aumento percentual da velocidade (%)
1 REF.	1/2 V	0,97	0,93	-5
	1/2 E	0,78	1,03	32
2	1/2 V	0,39	0,72	88
	1/2 E	0,40	0,90	123
3	1/2 V	0,19	0,83	332
	1/2 E	0,11	0,72	556
4	1/2 V	0,15	0,79	408
	1/2 E	0,13	0,61	369

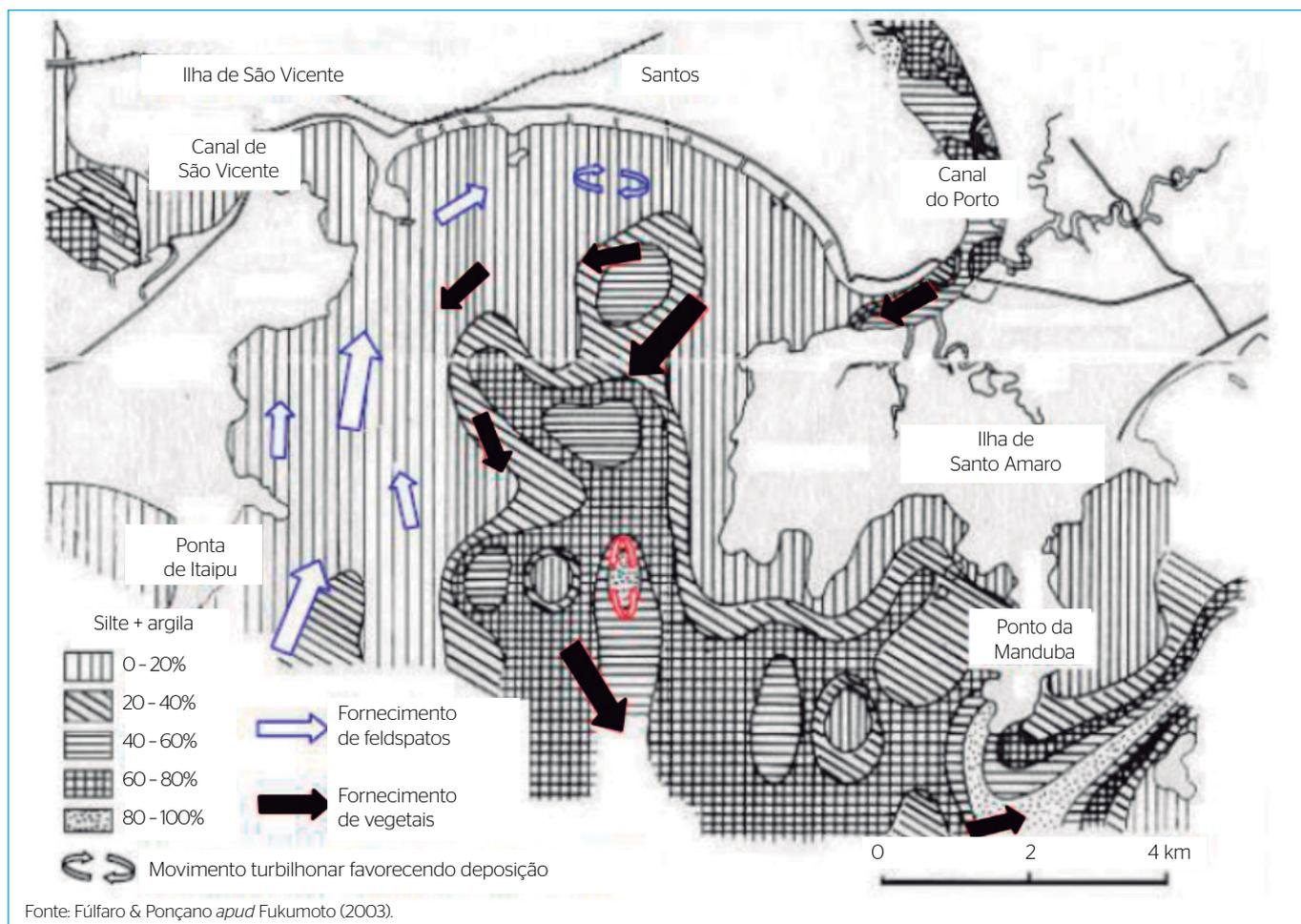


Figura 8 - Modelo de sedimentação para a Baía de Santos.

trecho do canal de acesso externo do Porto, onde permanentemente ocorre dragagem, o material de fundo exposto tem granulometria menor, da ordem de $D_{50}=0,016$ mm, segundo INPH (2006). Contudo, para análise da eficiência dos molhes na manutenção dos fundos, é importante utilizar o sedimento característico que se deposita no local em função da hidrodinâmica. Na Figura 8, é apresentado o modelo de sedimentação na Baía de Santos (FÚLFARO & PONÇANO *apud* FUKUMOTO, 2003), onde é possível verificar que a deposição de material na região do Canal do Porto é promovida pelo sedimento que sai da praia, justificando assim sua utilização nas análises que seguem.

Aplicando-se o método de Van Rijn (1984), considerando ainda a profundidade média do canal no modelo igual a 13,87 m, o valor

do parâmetro T calculado é negativo, concluindo-se que a rugosidade de forma $(1,1\Delta (1-e^{-25 \Delta/\Lambda}))$ é desprezível. Logo, a rugosidade (k_s) utilizada no cálculo do perfil de velocidades é composta apenas pela parcela correspondente à rugosidade do grão, igual a $3,6.10^{-4}$ m a partir da Equação 5. Sendo assim, aplicando-se esse valor à Equação 1 do perfil logarítmico de velocidades, leva a uma relação entre as velocidades superficiais e médias nas seções transversais de 92,9%.

Assim, as velocidades médias dos quatro pontos foram grafadas na curva de Sundborg-Hjulström, nas condições de meia maré de enchente e vazante, com e sem os molhes, conforme apresentado na Figura 9.

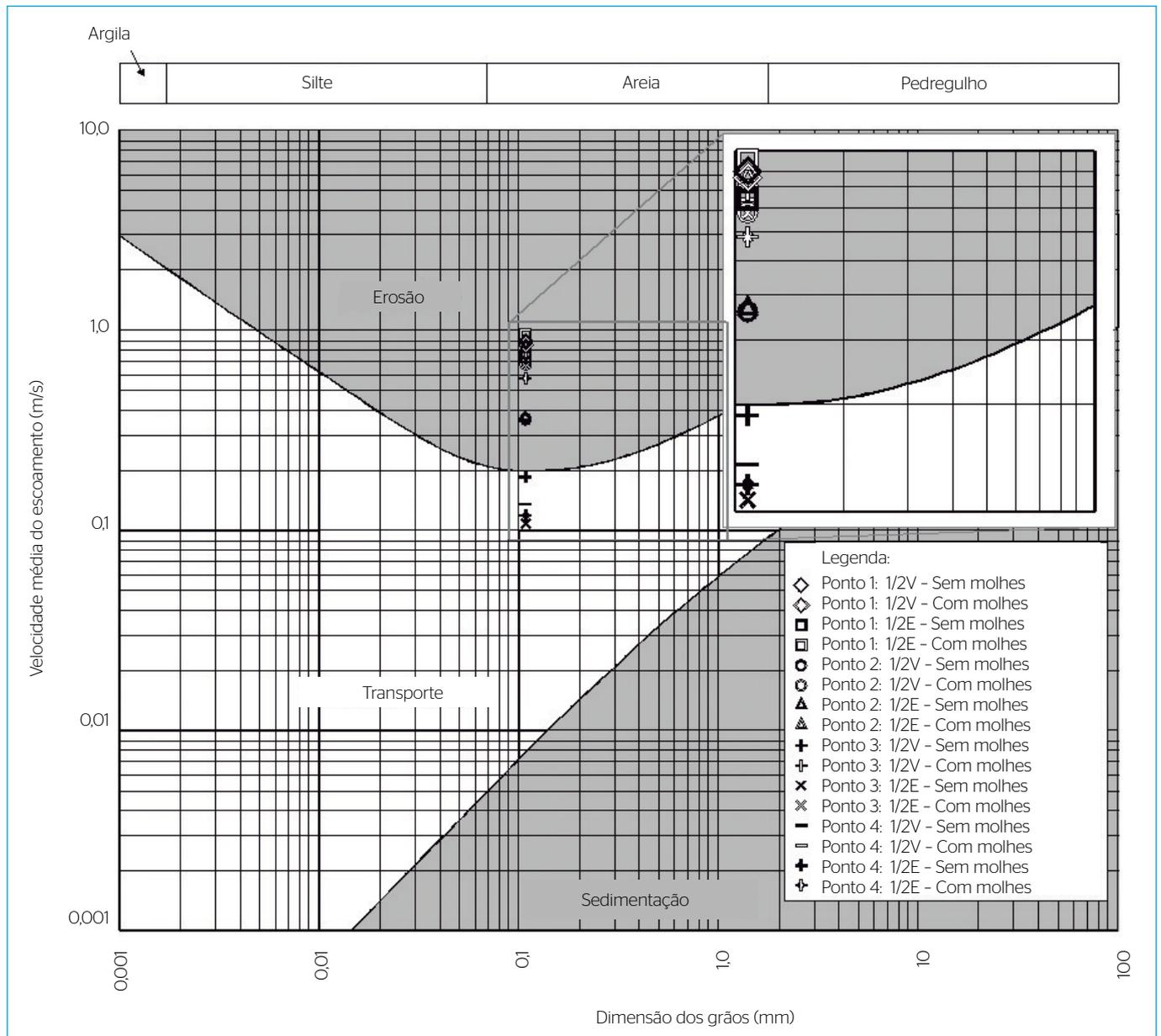


Figura 9 - Curva de Sundborg-Hjulström com as velocidades médias dos pontos de medição.

Essa afirmação pode ser confirmada analisando-se a Figura 9, em que, na condição sem os molhes, apenas os pontos 1 e 2 se encontravam na região de erosão, enquanto, após a inserção dos molhes, os quatro pontos analisados passaram a se situar na região de erosão.

Cabe ressaltar que, por se tratarem de velocidades médias na seção, mas próximas às máximas temporais, o fato de um ponto se situar na região de erosão da curva de Sundborg-Hjulström, por si só, não garante que a seção mantenha as profundidades desejadas. Isso pode ser exemplificado observando-se o ponto 2 na condição sem molhes que, apesar de estar nesta região, não mantém naturalmente tais profundidades.

Entretanto, é sabido que o ponto 1 apresenta, mesmo na condição sem molhes, profundidades superiores a 17 m em toda a largura do canal de acesso, ficando perceptível que, com a construção dos molhes guia-corrente, as velocidades dos demais pontos se aproximam da velocidade no ponto 1.

Isso posto, pode-se inferir que com a implantação das obras propostas, o trecho da barra marítima do canal de acesso tenderá a manter, naturalmente, profundidades superiores a 17 m DHN na região confinada.

Quanto à influência da inserção dos molhes na dispersão dos efluentes do Emissário Submarino de Santos, as Figuras 10A e 10B apresentam a dispersão do corante no modelo físico para os cenários 1 e 2, sem a presença dos molhes obtida por Arasaki, Alfredini e Gireli (2008). Já nas Figuras 11 e 12 são apresentados, para os cenários 1 e 2, os resultados obtidos na presença dos molhes.

Para o cenário 1, sem a presença dos molhes, a Figura 10A mostra que, apesar de o corante não apresentar dispersão significativa para o largo, ao menos não se verifica seu retorno para as praias.

O mesmo não ocorre na presença das obras propostas, visto que, analisando a Figura 11, verifica-se que com o comprimento original do emissário há um considerável retorno de efluentes em direção às praias, em função da redução da circulação na baía. Além disso, o efeito de chamada criado pelos molhes na maré de enchente faz com que o efluente adentre o canal do porto ainda em concentrações elevadas. Cabe ressaltar que Arasaki, Alfredini e Gireli (2008) já consideravam esse cenário insatisfatório.

Entretanto, analisando a Figura 12, percebe-se que, com o prolongamento do emissário, há uma melhora substancial na dispersão dos efluentes, que passa a ter uma tendência bem definida em direção ao largo, superando, inclusive, a condição obtida por Arasaki, Alfredini e Gireli (2008).

Por fim, a partir dos ensaios utilizando a pasta de areia em modelo, foram verificadas as tendências de movimentação dos sedimentos na Ponta da Praia, com a presença das obras. Na Figura 13 são apresentadas as correntes induzidas junto ao molhe proposto. Já na Figura 14 são apresentadas as tendências de movimentação do traçador empregado no modelo físico.

Analisando-se a Figura 13A, nota-se o surgimento de uma corrente de retorno (*rip current*) junto ao molhe. Observa-se também uma tendência de movimentação de sedimentos na direção do molhe. A análise da Figura 13B permite verificar que após o término do ensaio, o traçador assumiu tanto feições típicas de movimentos transversais de sedimentos, que são provocados em praias sujeitas a ondas de ressaca, quanto de movimento longitudinal de sedimentos, indicando a tendência do sedimento de se deslocar em direção ao enraizamento do molhe.

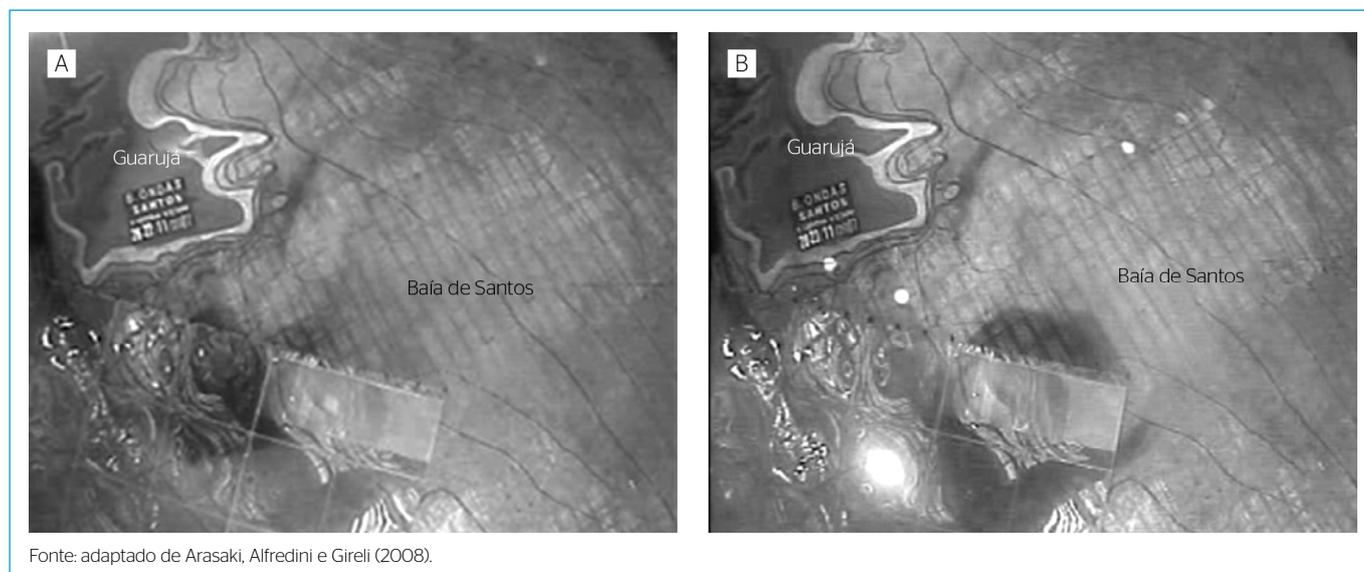


Figura 10 - (A) Dispersão do corante para $Q=3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ sem molhes e considerando emissário sem ampliação - cenário 1; (B) dispersão do corante para $Q=3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ sem molhes e considerando a ampliação do emissário original - cenário 2.

Na Figura 14, é apresentada a tendência de evolução da linha de costa obtida na presença dos molhes durante o ensaio, o que permite inferir que, com a construção destes, a difração das ondas tenderá a carrear os sedimentos no sentido da ponta da praia, fazendo com que haja uma acreção marinha na região.

CONCLUSÃO

Os ensaios realizados em modelo físico demonstraram a eficiência dos molhes propostos por Gireli *et al.* (2010) na manutenção das profundidades no trecho da barra marítima, devendo minimizar substancialmente o volume de dragagem até a isóbata de 12 m DHN, onde ele

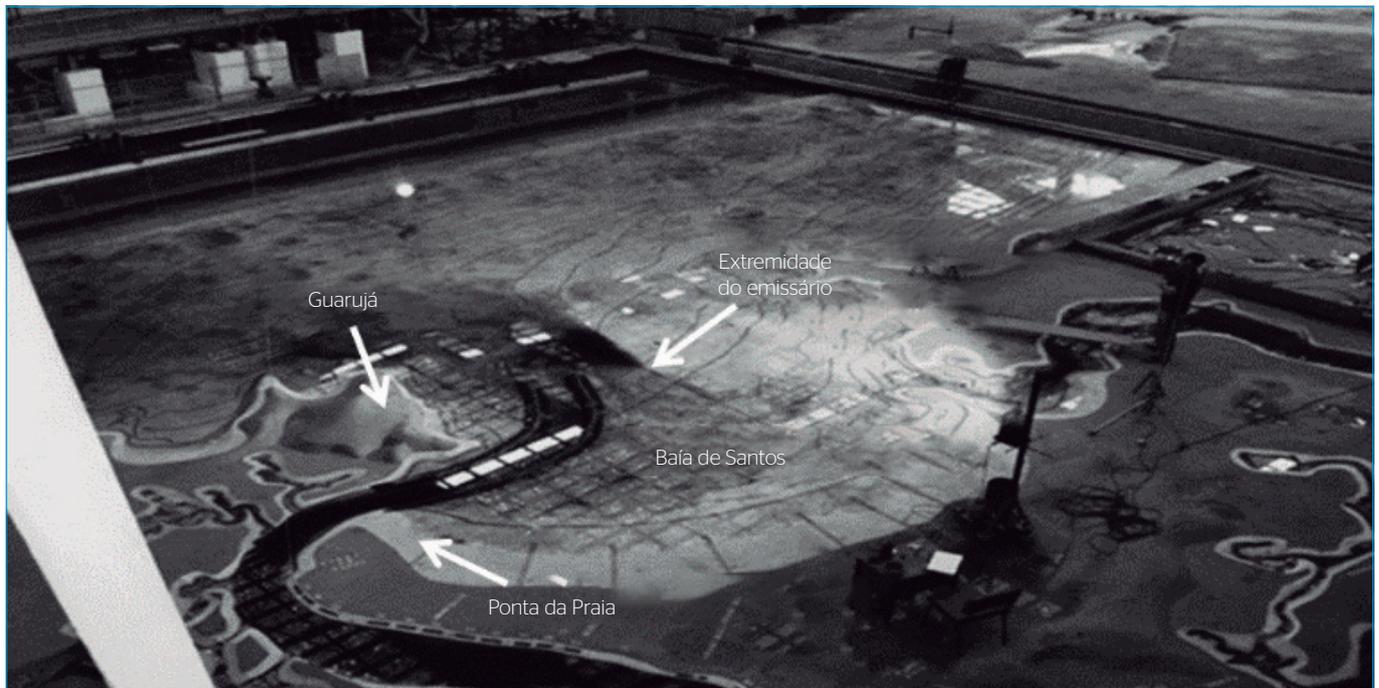


Figura 11 - Dispersão do corante para $Q=3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ com molhes e sem a ampliação do emissário - cenário 1.

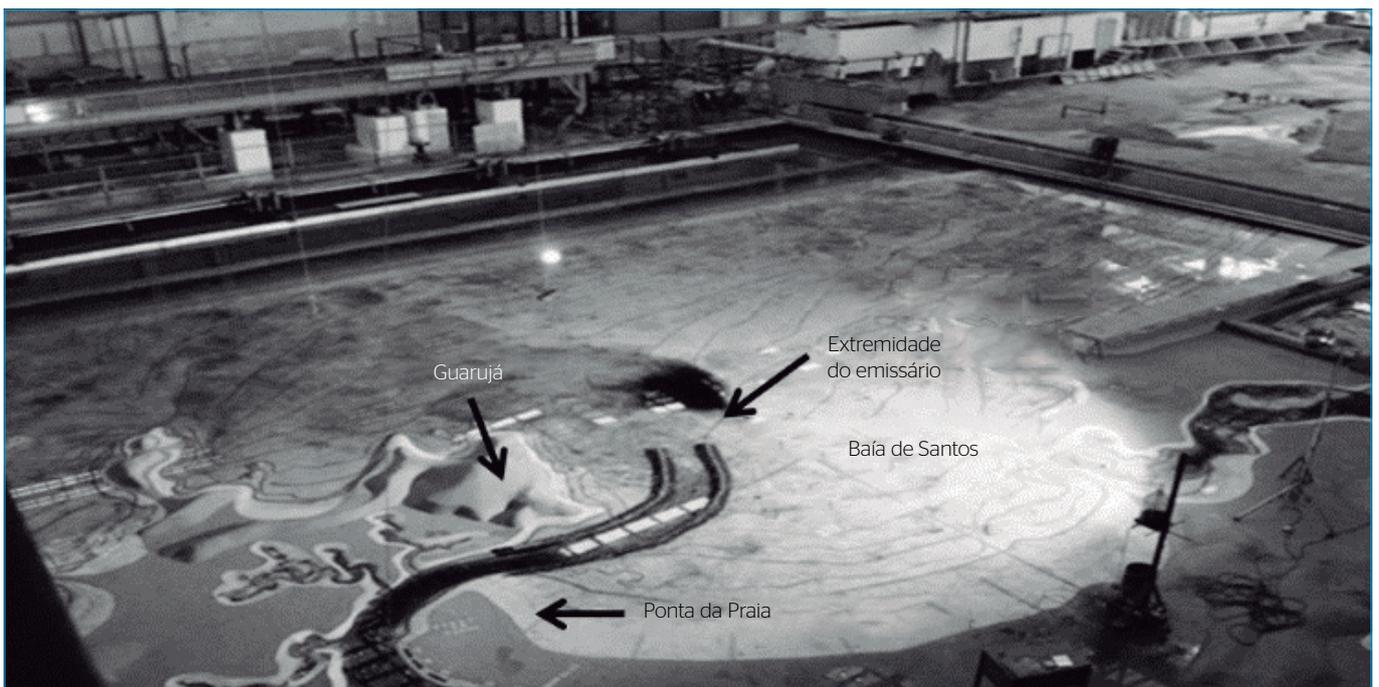


Figura 12 - Dispersão do corante para $Q=3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ com molhes e emissário ampliado em 1,2 km - cenário 2.

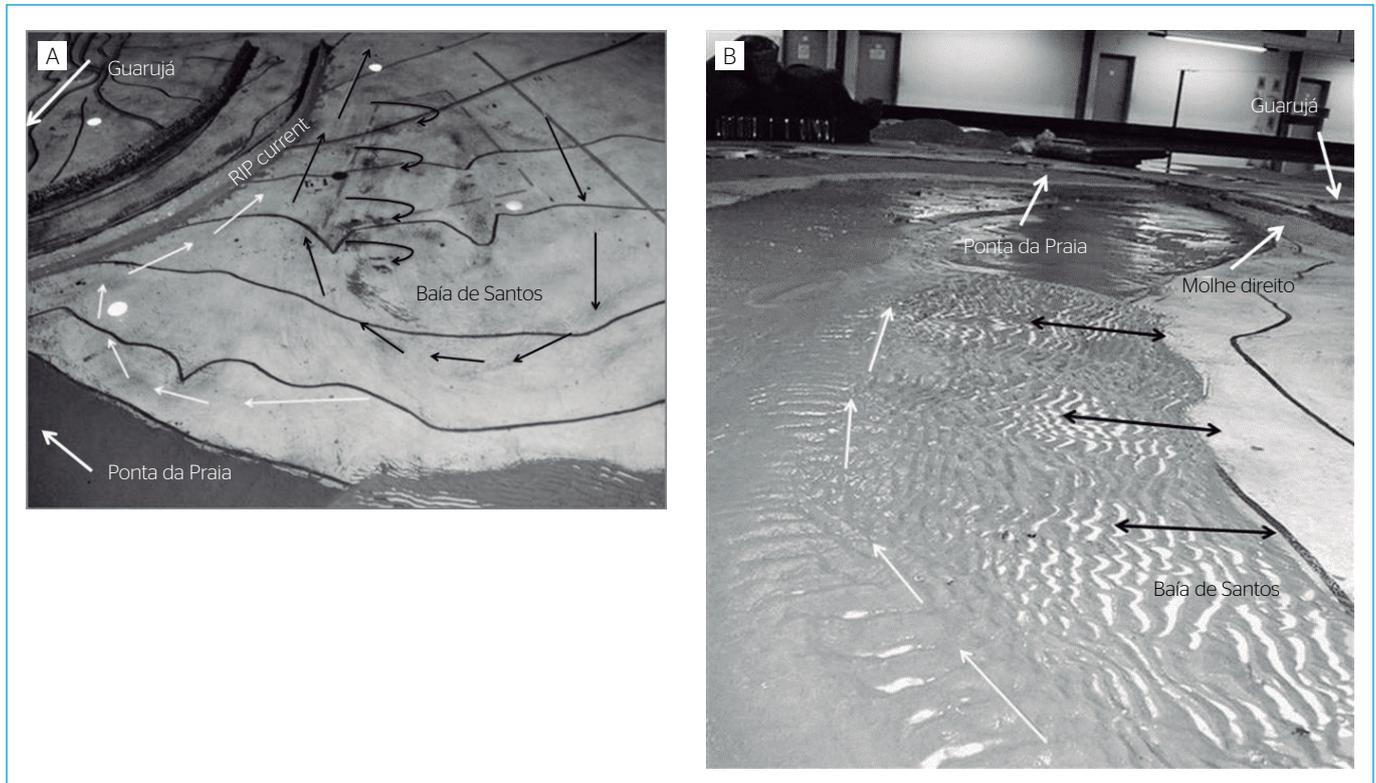


Figura 13 - (A) Correntes induzidas junto ao molhe direito durante o ensaio sob a ação de ondas no modelo físico; (B) transporte de sedimentos ao longo da Praia de Santos induzidos pelas ondas no modelo físico.

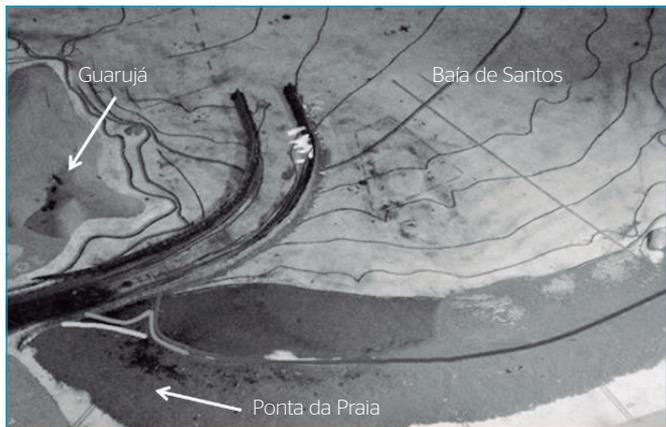


Figura 14 - Tendência de evolução da linha de costa obtida durante o ensaio em modelo físico.

termina. O trecho adjacente do canal continuaria sendo mantido por dragagem. Entretanto, espera-se que o volume seja bem menor do que o dragado atualmente, uma vez que a diferença entre a profundidade natural e a do gabarito de dragagem é inferior a 50%, e esta região está longe da zona de arrebenção.

Com relação à influência da presença dos molhes na dispersão dos efluentes do Emissário Submarino de Santos, ficou claro que o seu prolongamento em 1,2 km não só seria suficiente para minimizar esse efeito, como também melhoraria substancialmente a dispersão dos efluentes para o largo.

A partir dos ensaios com pasta de areia, foi possível verificar o aparecimento de uma corrente de retorno de grande magnitude, que é de fundamental importância, visto que as obras não promoveriam estagnação de águas, o que, certamente, poderia comprometer a balneabilidade das praias em caso de contaminação acidental das águas.

Além disso, a partir do ensaio realizado com traçador sedimentométrico, é possível verificar que, com a inserção dos molhes, a linha de costa passaria a sofrer um processo de acreção marinha, revertendo a tendência atual da ponta da Praia de Santos, que é de forte erosão.

Na continuidade deste estudo, acredita-se ser pertinente uma avaliação mais detalhada da configuração final dos fundos entre os molhes, empregando-se um modelo numérico. Além disso, a modificação da condição de equilíbrio das praias pela presença dos molhes também poderia ser mais bem avaliada, empregando-se tanto a modelagem física quanto a numérica.

Por esse motivo, vem sendo aprimorado, no âmbito do grupo de pesquisa, um modelo hidrodinâmico da região do Porto de Santos, que atualmente se encontra calibrado e que está sendo empregado para melhorar a análise do cenário de inclusão dos molhes guia-corrente, uma vez que a escala demasiadamente reduzida do modelo físico traz limitações às análises.

Poder-se-ia ainda estudar, tanto no modelo físico quanto no matemático, uma opção de obras niveladas abaixo da superfície do mar,

semelhante a recifes artificiais, para minimizar o impacto visual da presença dos molhes para os banhistas da Orla de Santos e melhorar a circulação no interior da baía, uma vez que os ensaios mostraram que ela é bastante afetada pela presença das obras propostas.

Por fim, o estudo realizado corrobora com os resultados obtidos por Gireli *et al.* (2017), mostrando que a adoção de molhes guia-corrente curvos e levemente convergentes para a transposição da emboadura marítima da Baía de Santos é uma alternativa viável, podendo

se configurar como uma opção econômica, social e ambientalmente mais atraente para manter profundidades de 17 m do que a alternativa atual, que se vale apenas da dragagem.

Dessa forma, estas análises podem contribuir para que o Porto de Santos supere suas limitações e se consolide como o porto concentrador de cargas do Atlântico Sul, sem que, para isso, a população santista tenha que conviver com praias cada vez mais erodidas e inundações costeiras cada vez mais frequentes.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (1987). *NBR 9782 de 03/1987 - Ações em estruturas portuárias, marítimas ou fluviais*. Rio de Janeiro.
- ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. (2005) *Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental*. São Paulo: Edgard Blücher.
- ALFREDINI, P.; ARASAKI, E.; AMARAL, R.F. (2008) Mean Sea-level Rise Impacts On Santos Bay, Southeastern Brazil - Physical Modelling Study. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 144, n. 1-3, p. 377-387. <http://doi.org/10.1007/s10661-007-0001-z>
- ALFREDINI, P.; GOIS, J.S. (2004) Análise da evolução morfológica da linha de costa com a técnica de traçadores em modelo de fundo fixo de obras costeiras. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PHD*, São Paulo, n. 126, p. 1-12.
- ARASAKI, E.; ALFREDINI, P.; GIRELI, T.Z. (2008) Physical Modeling Study of Sea Outfall Plume Dispersion - The Case of Baixada Santista, Brazil. *Proceedings of Coastlab08*, Bari.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis. Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias. (1974) *Campanha de Medições na Baía de Santos*. Rio de Janeiro: Ministério dos Transportes.
- _____. Secretaria de Portos. *Sistema Portuário Nacional*. Disponível em: <<http://www.portosdobrasil.gov.br/>>. Acesso em: 26 jun. 2015.
- COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (CODESP) (Org.). (2015) *Calado de 13,2 metros no canal de navegação se estende até a Alemoa*. Disponível em: <<http://www.portodesantos.com.br/pressRelease.php?idRelease=820>>. Acesso em: 25 ago. 2015.
- _____. (Org.). (2016) *Santos sobe em ranking internacional de movimentação de contêineres*. Santos. Disponível em: <<http://www.portodesantos.com.br/pressRelease.php?idRelease=795>>. Acesso em: 28 jan. 2016.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). (2012) *Pesquisa CNT do transporte marítimo*. Brasília: CNT. Disponível em: <<http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/Publica%C3%A7%C3%B5es/Pesquisa%20Maritima/Pesquisa%20CNT%20do%20Transporte%20Maritimo%202012.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2015.
- FUKUMOTO, M.M. (2003) *Caracterização da sedimentação atual e reconstituição da história deposicional recente na Baía de Santos, a partir das características composicionais e isotópicas da matéria orgânica*. Dissertação (Mestrado) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- G1 SANTOS. (2015) MPF entra com ação para conter erosão em praias de Santos, SP. *G1*. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2015/06/mpf-entra-com-acao-para-contererosao-em-praias-de-santos-sp.html>>. Acesso em: 5 out. 2016.
- GARCIA, P.D.; ARAÚJO, R.N.; SILVA, G. da C.; BAPTISTELLI, S.C.; ALFREDINI, P. (2002) Preparo de Bases Batimétricas, de Agitação e Circulação para o Litoral do Estado de São Paulo. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PMI*, São Paulo, v. 1, n. 105, p. 1-56.
- GIRELI, T.Z.; RINKE, L.G.; ZANETTI, S.H. (2010) Estudo em Modelo Reduzido de Molhes Guia-Corrente Para o Porto de Santos - São Paulo - Brasil, 09/2012. *XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica*, Uruguai, v. 1, p. 1-10.
- GIRELI, T.Z.; SOUZA, C.M.M.A.; NOBRE, L.B.; GARCIA, P.D. (2017) The efficiency of curved jetties in Bay of Santos - SP: numerical modeling. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716092>
- GIRELI, T.Z.; VENDRAME, R.F. (2012) Aprofundamento do Porto de Santos: Uma Análise Crítica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 49-59. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p49-59>
- GOIS, J.S. (2004) *Análise da evolução morfológica da linha de costa com a técnica de traçadores em modelo de fundo fixo de obras costeiras*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

- INSTITUTO DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS (INPH). (2006) *Coleta e Análise de Material Superficial de Fundo: Canal de Acesso Externo e Estuário de Santos - Santos (SP) - Período: 14 e 15/02/2006*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Hidroviárias. Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/EIA_Dragagem_Porto_Santos2/Anexo%20C%20-%20Modelagem%20Matem%C3%A1tica/Relatorio_Granulometria_INPH.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2017.
- KLEIN, A.H.F.; MENEZES, J.T. (2001) Beach morphodynamics and profile sequence for a headland bay coast. *Journal of Coastal Research*, v. 17, n. 4, p. 812-835.
- LAMPARELLI, C.C.; ARASAKI, E.; ALFREDINI, P.; AMARAL, R.F. (2008) Os Efeitos no Ambiente Marinho da Elevação do Nível do Mar em Regiões da Baixada Santista, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 165-175. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n2.p165-175>
- PEZZOLI, A.; ALFREDINI, P.; ARASAKI, E.; ROSSO, M.; SOUZA JR., W.C. (2013) Impacts of climate changes on management policy of the harbors, land areas and wetlands in the São Paulo state coastline (Brazil). *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, v. 1, n. 2. <http://dx.doi.org/10.4172/2332-2594.1000101>
- REIS, L.F.B. (1978) *Estudo em modelo reduzido de fundo móvel do Porto de Santos*. Rio de Janeiro: INPH.
- SCHWAB, K. (2015) *The Global Competitiveness Report 2015-2016*. Genebra: World Economic Forum. 384 p. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/gcr/2015-2016/Global_Competitiveness_Report_2015-2016.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.
- SONDOTÉCNICA. (1977) *Comportamento hidráulico e sedimentológico do Estuário Santista*. Brasil: Empresas de Portos do Brasil S.A., Instituto de Pesquisas Hidroviárias.
- SUNBORG, A. (1956) The River Klaralven: A Study of Fluvial Processes. *Geografiska Annaler*, v. 38, n. 2-3, p. 125-316. <https://doi.org/10.1080/20014422.1956.11880887>
- U.S. ARMY/COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. (2002) *Coastal Engineering Manual*. Estados Unidos: U.S. Army/Coastal Engineering Research Center.
- VAN RIJN, L.C. (1984) Sediment Transport, part III: Bed Forms and Alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 110, n. 12, p. 1733-1754. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:12\(1733\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733))