

Modelação física da Baía e Estuário de Santos e São Vicente (SP) – estudo da dispersão de efluentes de emissários submarinos

Emilia Arasaki⁽¹⁾, Paolo Alfredini⁽²⁾ & Juliano Philippi Gerent⁽³⁾

⁽¹⁾ Professora Dra. da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Especialista em Gestão Ambiental Marítima da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - earasaki@usp.br

⁽²⁾ Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Professor Titular da Escola de Engenharia Mauá e Engenheiro Coordenador da Área de Hidráulica Marítima do Centro Tecnológico de Hidráulica do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE - alfredin@usp.br

⁽³⁾ Mestrando pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Engenheiro da Área de Hidráulica Marítima da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - gerent@usp.br

RESUMO: A disposição oceânica de esgotos domésticos através de emissários submarinos é o principal sistema em operação na costa do Estado de São Paulo. O estudo de dispersão de efluentes foi realizado em modelo físico de fundo fixo, construído no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. A área de 750 m² representa cerca de 1000 km² da região do Estuário e Baía de Santos. Pode reproduzir marés, ondas regulares, vento e descarga de efluente. O modelo, com escala geométrica horizontal de 1:1200 e escala vertical de 1:200, inclui os municípios de Guarujá, Santos e Praia Grande, região com 4 emissários em operação.

PALAVRAS-CHAVE: emissário submarino, modelação física, túnel de vento

ABSTRACT: The ocean disposal via sea outfall for domestic sewage is the main system in operation in São Paulo State coast. The effluent dispersion study was carried out in physical fixed bed model, built in the Hydraulic Laboratory, Polytechnic School - University of São Paulo. The area of nearly 750 m² represents about 1000 km² of Estuary and Santos Bay. It can reproduce local tide, regular waves, wind and the effluent discharge. The model, with geometric scale horizontal - 1:1200 and vertical – 1:200, includes Guarujá, Santos and Praia Grande, region with 4 sea outfalls in operation.

KEYWORDS: Sea outfall, physical modelling, wind tunnel

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo iniciou-se em junho de 2007 e neste trabalho são apresentados alguns resultados dos vários ensaios realizados em modelo físico. Este estudo regional abrange a área costeira entre a Praia do Forte (Município de Praia Grande) e a Praia da Enseada (Guarujá),

interessando a disposição oceânica e o impacto sobre as costas dos municípios de Praia Grande, São Vicente, Santos e Guarujá.

O modelo físico da Baía e Estuário de Santos e São Vicente (ver Figura 1) foi construído, calibrado e validado para os estudos do projeto PROBIO (MMA/Banco Mundial/GEF/CNPq), com o intuito de produzir diagnóstico sobre os efeitos da elevação do nível do mar, decorrente do aquecimento global da atmosfera sobre a região. O modelo apresenta escalas horizontal e vertical de 1:1200 e 1:200, área útil de 750 m² e representa aproximadamente 1000 km² da região estudada. O modelo é froudiano, de fundo fixo, com escala de vazão de 1:3394113 e escala de tempo de correntes de maré de 1:84,85 [1].



Figura 1 - Modelo físico da Baía e Estuário de Santos e São Vicente

A bacia onde está instalado o modelo físico conta com geradores de ondas e de marés. O registro da agitação de ondas é feito através de pontas capacitivas e a circulação de correntes com micro-molinetes de fibra ótica (Figura 2). Tanto as pontas capacitivas como os micro-molinetes estão situados em pontos estratégicos no modelo. Para a reprodução das correntes de maré criou-se um software no próprio Laboratório de Hidráulica. O esquema de funcionamento da maré no modelo é mostrado na Figura 3. A aquisição de dados a analisar é obtida digitalmente na cabine de operações situada num canto do modelo. Também se dispõe de uma instalação zenital para a documentação fotográfica e de vídeo, cobrindo a área principal do modelo.

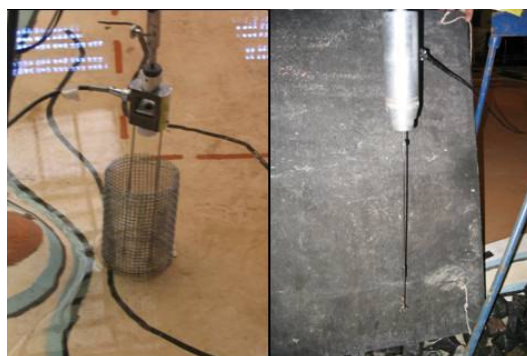


Figura 2 - Ponta capacitiva (esquerda) e micro-molinete (direita)

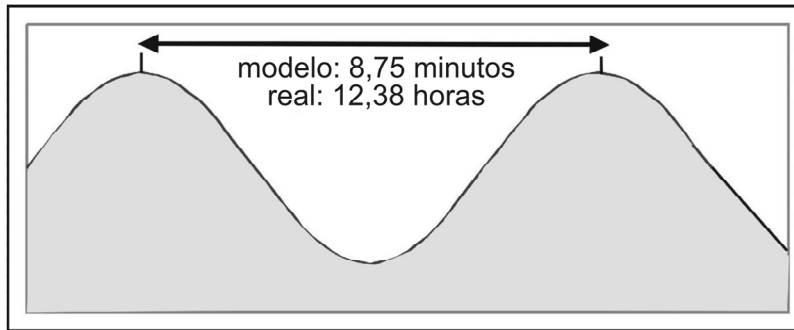


Figura 3 - Esquema de funcionamento da maré no modelo

O objetivo geral do presente estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de dispersão de despejo de esgoto em modelo físico. Para tanto as técnicas de representação de descarga do efluente com a utilização do traçador colorimétrico azul de metileno foram aprimoradas, assim como foram avaliados conceitualmente dispositivos que melhor representaram a condição de vento na região de estudo.

2. RESULTADOS

2.1. Simulação da descarga de efluente oriundo de emissário submarino

Para a elaboração do sistema simulador de descarga de efluente, utilizou-se o princípio do Frasco de Mariotte. Este frasco apóia-se no fato de que a pressão interna do recipiente e externa a ele tendem a se equilibrar. Isto é feito através de um tubo que insere ar externo para dentro do recipiente (Figura 4). Sendo assim, garante-se o preenchimento do tubo com ar quando há escoamento do fluido, tornando a pressão na extremidade do tubo igual à pressão atmosférica.

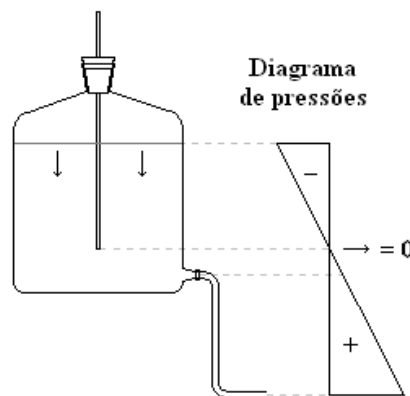


Figura 4 – Esquema de funcionamento do Frasco de Mariotte

Quanto à obtenção de diferentes vazões necessárias para o estudo, estas foram conseguidas variando a altura do frasco para se adicionar uma maior (ou menor) carga hidráulica ao sistema.

Notou-se que o frasco acoplado diretamente ao emissário conferia ainda vazões muito altas (aproximadamente 5 l/h), mesmo quando posicionado próximo ao piso do modelo. Para isso, foi desenvolvida uma peça que tem a finalidade de dissipar a energia excedente, permitindo o posicionamento do frasco a alturas maiores. Essa peça é composta por um tubo fino de plástico (com aproximadamente 50 metros de comprimento) que é enrolado em um cilindro semelhante a uma serpentina, permitindo a dissipação uniforme da energia ao longo de seu comprimento. Ela é posicionada entre a saída do frasco de Mariotte e o emissário do modelo, como esquematizado a seguir (ver Figuras 5 e 6).

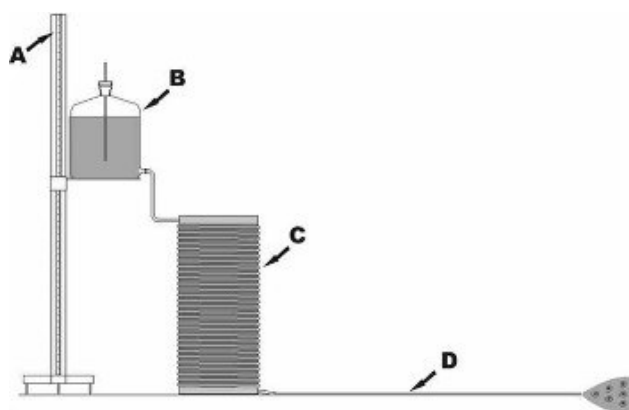


Figura 5 – Esquema do sistema composto por um pedestal (A), frasco de Mariotte (B), cilindro dissipador de energia (C) e tubo de aço inox (D), representando o emissário



Figura 6 – Sistema de suporte do frasco de Mariotte acoplado ao dissipador

Com o sistema montado e calibrado, o próximo passo foi determinar a concentração de azul de metileno a ser empregada nos ensaios, isto porque esta variável afeta significativamente a dispersão da mancha no modelo físico. Adotou-se a concentração de

0,25% de azul de metileno como a ideal, pois esta concentração confere uma dispersão intermediária da mancha, compatível com cenários de ondas e ventos aliados às correntes de marés.

2.2. Representação do vento no modelo físico da Baixada Santista

O principal parâmetro que induz a fortes ondas na região da Baixada Santista é o vento, principalmente os ventos de SW provenientes de passagens de frentes frias.

Para simular essa situação, foi construído um túnel de vento como mostra a Figura 7. O túnel é feito com placas de acrílico (comprimento total de 7,5 m e largura de 3 m), o que permite a sua montagem e desmontagem. As laterais são removíveis e servem para evitar o escape do vento, podendo ser posicionadas a alguns milímetros acima do nível de água do modelo, com o auxílio de grampos (vide Figura 7). Em outras partes, a placa lateral foi substituída por um plástico cristal para permitir melhor ajuste nas áreas onde não há o contato com a água. O sistema está apoiado em calantes usados para ajustar o mesmo sobre o modelo. O túnel de vento está posicionado com rumo de $232^{\circ}30'$, posição representativa de vento proveniente de SW. A velocidade do exaustor foi calibrada de acordo com os resultados de modelação numérica [3]:

- Maré de sizígia do dia 07 de fevereiro de 1997 às 19h00 locais, correspondendo na Tábua de Marés à uma vazante de 1,3 m de amplitude (marégrafo de Torre Grande) – preamar de 1,4 m às 15h36 e baixamar às 21h32.
- Ventos intensos reproduzindo aproximadamente o efeito de frentes frias, com ventos de SW 50 km/h na Baía de Santos.
- Sobrelevação devido aos ventos de 50 cm no nível do mar além da previsão da Tábua de Marés.

O campo de circulação de correntes vigente na situação acima descrita nos resultados da modelação numérica apresenta os seguintes aspectos mais notáveis:

- Junto à embocadura do Canal do Porto observa-se uma deflexão das correntes de maré associadas às eólicas num rotacionamento horário rumo à Ponta da Praia. Esta convergência das correntes resultantes atingem valores de até 60 cm/s no real, correspondendo no modelo a 4,2 cm/s.
- Nas proximidades da Ilha das Palmas também se observam velocidades convergentes à costa da mesma ordem de grandeza.
- Como se pode observar na Figura 8, o túnel de vento atua sobre uma área na qual os resultados do modelo numérico indicam correntes resultantes rumo à costa.

Este ajustamento deu-se por tentativa e erro, medindo-se as velocidades na água correspondentes às diferentes rotações do exaustor, escolhendo-se o melhor. Esta condição foi monitorada através de uma ponta capacitiva para medição do nível de água em ponto homólogo ao marégrafo da Torre Grande e através de derivadores para a estimativa das velocidades nos pontos citados anteriormente.

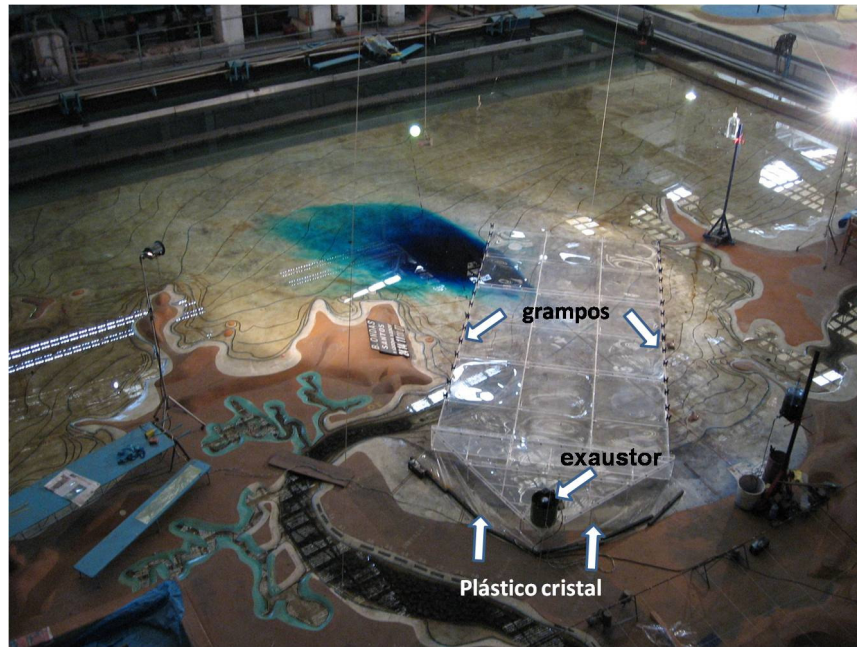


Figura 7 – Foto do túnel de vento simulando a ação de vento sobre a pluma

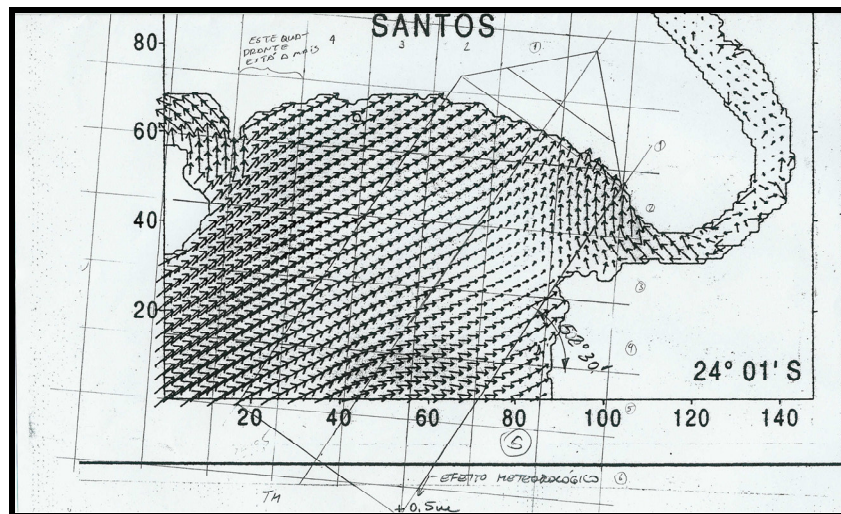


Figura 8 – Resultado da modelação numérica com a inserção do túnel de vento

2.3. Emissário de Santos

Sobre a possibilidade de extensão do emissário de Santos, testes com diferentes comprimentos (4 e 5 km) e vazão máxima de descarga ($Q_{max}= 5,6 \text{ m}^3/\text{s}$) e descarga volumétrica média de operação ($Q_{média}= 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$) foram simulados (ver Figuras 9a e 9b, respectivamente). Em ambos os casos, a condição de vento de SW foi simulado com o rumo à praia.

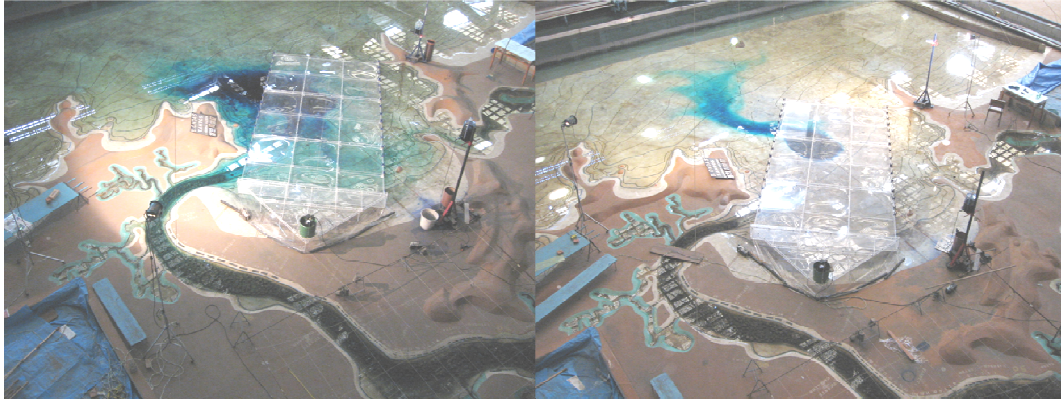


Figura 9a – Ensaios no emissário de Santos com 4 km de extensão. À esquerda, vazão máxima ($5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ – ensaio 13) e com vazão média de operação ($3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ – ensaio 25)

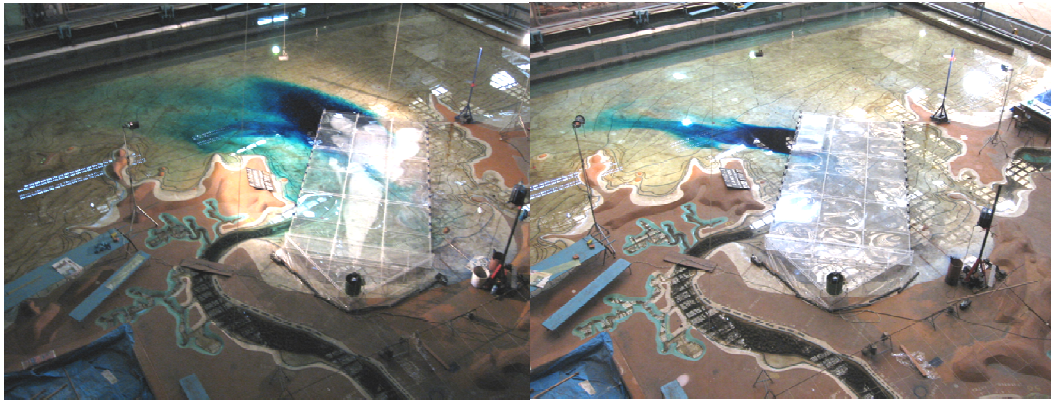


Figura 9b – Ensaios em Santos com 5 km de extensão. À esquerda, vazão máxima ($5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ – ensaio 23) e com vazão média de operação ($3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ – ensaio 27)

Estes testes ilustram que a pluma do efluente tende a se dispersar em direção ao mar, especialmente para o cenário de vazão média $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Para a vazão máxima, parte da pluma retorna ao Canal de Acesso ao Porto. Esse resultado confirma a presença de uma pluma com maior dimensão para uma descarga maior de efluente.

A comparação com a condição de 5 km de extensão mostra que a dispersão tende a seguir para o mar aberto (menor ação de correntes de maré enchente e transporte de ondas) devido ao prolongamento do emissário, mostrando uma tendência similar ao apresentado na situação atual de 4 km, mas com menor intensidade de dispersão rumo à praia. Os resultados da modelação física com o túnel de vento mostraram que a dispersão no campo afastado neste cenário adverso poderia ser melhorada com o aumento no comprimento do emissário.

Outros ensaios estão relacionados com o cenário de elevação do nível do mar de 1,5 m, situação apontada pelo comitê americano de especialistas em Engenharia Costeira [2], como mais crítica para o ano de 2100. Dessa forma, os ensaios 30 e 31 simularam este cenário sem o prolongamento do emissário (comprimento atual de 4 km) e vazão máxima de projeto de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 10).

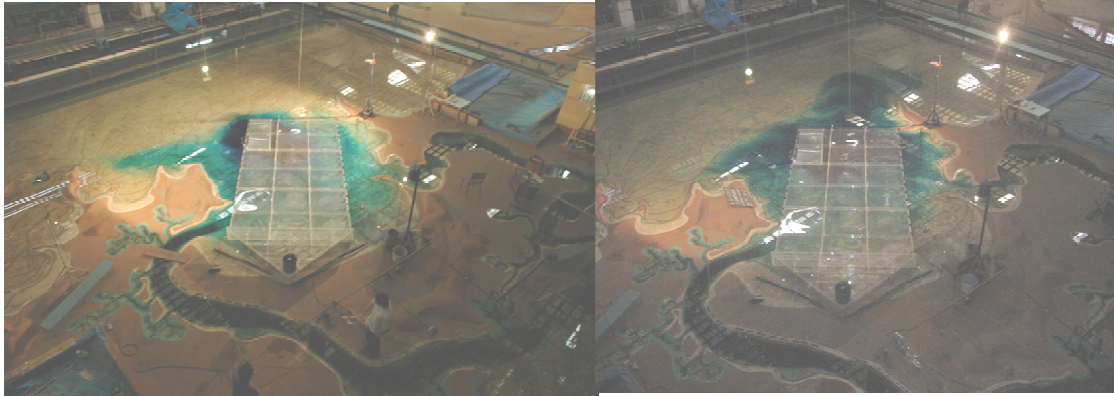


Figura 10 – Ensaio de elevação média do nível do mar em Santos com emissário de 4 km. À esquerda, ensaio 30 com simulação de vento rumo à praia; à direita, ensaio 31 sem vento

Observa-se na figura que a pluma apresenta melhor dispersão rumo ao mar aberto na situação sem vento, havendo o retorno de parte da pluma tanto para o Canal de Acesso ao Porto quanto para o Canal de São Vicente, situação que também ocorre para o ensaio 30 com vento SW. Neste ensaio, a pluma concentra-se na parte central e área externa da Baía, porém sem a dispersão apresentada no ensaio 31.

Para a situação atual de funcionamento do emissário de Santos, a vazão média de $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ tem a dispersão favorecida no caso do prolongamento do emissário, como mostra a figura seguinte, sem a atuação de vento SW (Figura 11).

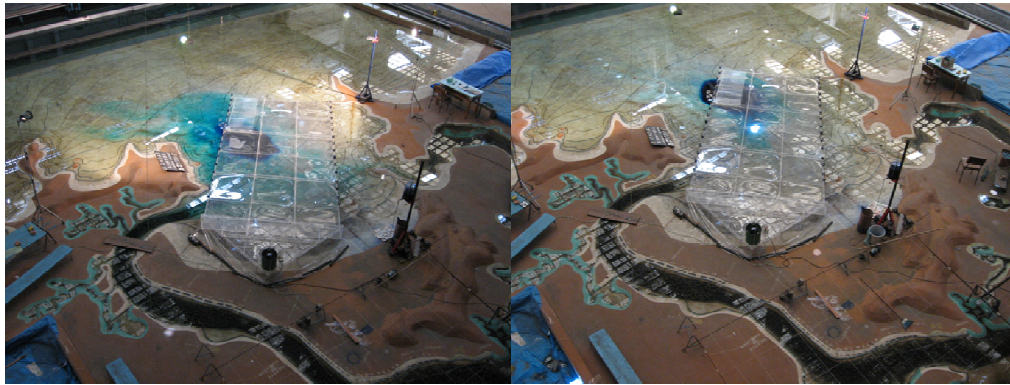


Figura 11 – Ensaio no emissário de Santos com vazão média atual de operação ($3,5 \text{ m}^3/\text{s}$). À esquerda, comprimento atual do emissário de 4 km; à direita, emissário com extensão total de 5 km

Na referida figura, observa-se que o prolongamento propicia uma melhor dispersão da pluma. Na situação atual, há o retorno da pluma para o interior da Baía e em direção à Ponta Grossa e Ponta Rasa.

3. CONCLUSÕES

Os ensaios em modelo físico para a avaliação da dispersão da pluma de efluente oriundo de descarga de emissários submarinos mostraram ser uma ferramenta importante para a tomada de decisão quanto ao sistema de saneamento adotado no litoral paulista.

As simulações na área do emissário de Santos mostraram que a pluma do efluente apresenta a tendência de uma dispersão rumo ao mar para os cenários de vazão média atual. Para um cenário de elevação relativa do nível do mar e prevendo-se um aumento de vazão, parte da pluma retorna ao Canal de Acesso ao Porto de Santos.

Avaliando-se a extensão do emissário em mais 1 km e com a atuação do vento de SW, a dispersão da pluma é melhorada para o cenário de vazão média assim como o de elevação relativa do mar.

REFERÊNCIAS

1. ALFREDINI, P., ARASAKI, E., AMARAL, R.F. *Mean sea-level rise impacts on Santos Bay, Southeastern Brazil – Physical modelling study*. Environmental Monitoring and Assessment 144 : 377-387, 2008.
2. U. S., NATIONAL RESEARCH COUNCIL, COMMITTEE ON ENGINEERING IMPLICATIONS OF CHANGES IN RELATIVE MEAN SEA-LEVEL 1987. *Responding to changes in sea level – Engineering Implication*. September 1987.
3. HARARI, J., GORDON, M. Simulações numéricas da dispersão de substâncias no Porto e Baía de Santos, sob a ação de marés e ventos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 6(2), 115-131, 2001.