

Utilização da Modelagem Matemática para o Planejamento e Gestão de Descargas de Poluentes em Zonas Litorâneas “O Caso do Estuário de Santos”

Gilberto Berzin

Resumo — Utilizando técnica de modelos matemáticos hidrodinâmicos, e campanha de medidas oceanográficas, analisa-se a operação de emissários submarinos e as áreas de lançamento do lodo dragado para a manutenção do Porto de Santos.

Os modelos matemáticos permitem estudar o comportamento hidrodinâmico de áreas estuarinas e costeiras, verificando as correntes provenientes de marés, ventos e ondas, auxiliando os estudos de descargas de poluentes, seus reflexos e a evolução de manchas de poluição.

Neste trabalho será descrito as Metodologias, Campanhas, Calibração e discutido os Resultados.

Palavras-chave — modelação matemática, controle de poluição, zonas costeiras.

1.OBJETIVO

O presente é resultado dos estudos realizados pelo NPH - Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas da Universidade de Santa Cecília – UNISANTA, para a Companhia Docas do Estado de São Paulo – CODESP, com objetivo de pesquisar a atual área de descarte de material de dragagem na zona oceânica exterior à baía de Santos, utilizando o modelo matemático de circulação oceânica. Este lodo é proveniente da dragagem dos canais de navegação do porto, sendo avaliando os possíveis impactos relativos às operações de lançamento e transporte de materiais sedimentáveis.

Com este modelo também se estudou a variação dos despejos de esgotos dos emissários submarinos da SABESP na região e circulação de poluentes diversos na área do estuário e baía de Santos, tais como despejos de áreas sem rede de esgoto, churume de aterros sanitários e lixões diversos, canais de drenagem e a natural poluição provocada pelas atividades portuárias.

Foi dado ênfase para os efeitos das grandes frentes meteorológicas, ciclones extra-tropicais, que influenciam as correntes oceânicas geradas pelo vento na área de lançamento do lodo e também a interação da interface destas com as correntes provocadas pelas marés que circulam no interior da baía de Santos. Teve o intuito de verificar se as correntes resultantes desses dois fenômenos provocam impactos ambientais, pelo arraste do material sedimentado no fundo do mar, até as praias e às áreas internas da Baía de Santos.

gberzin@uol.com.br, Av. Bartolomeu de Gusmão, 124, apto.22, Santos - SP-Brasil – 11045-401, Tel.-55-13-3236.4187, Universidade Santa Cecília. Este tema é parte integrante da tese de doutoramento a ser defendida pelo autor na área de Engenharia do Ambiente no IST - Instituto Superior Técnico de Lisboa.

2.METODOLOGIA

Itens desenvolvidos na pesquisa :

a - Aplicação de base de dados de medidas oceanográficas locais, para definição dos parâmetros das estações e atividades correspondentes à calibração do modelo. Obtenção de maior quantidade de dados oceanográficos de campo no período compreendido de 12 meses, necessários para a perfeita calibração do modelo. Medidas adicionais de ventos, pressão, ondas e marés, são necessárias para se estabelecer melhor a correlação com as correntes marítimas, pois se verificou nos resultados obtidos nas campanhas anteriores, que apesar do vento ser o principal agente indutor das correntes externas na zona de descarte, havendo necessidade de complementação de medidas para identificação da interface entre estas correntes, com aquelas provocadas pelas variações de marés na zona interna do estuário de Santos.

b - Adaptação e aplicação do modelo interno de circulação proveniente das variações das marés na zona interna do estuário de Santos, visando o estudo da interface já citada. Calibração final do modelo com os dados de campo.

c - Aprimorar a modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos mediante a as pesquisas e simulações, com calibração utilizando medições “in loco”.

d - Estudo e fixação de opções (áreas) de descarte, em função das diversas condições climáticas das épocas do ano.

e - Estudo de quantificação do lodo depositado e seu campo de influência ao longo da costa, sua movimentação – dispersão devido a passagem de frentes meteorológicas mais intensas.

f - Estudo da circulação os lançamentos de esgotos efetuadas continuamente pelos emissários submarinos e também pelas diversas fontes de poluição marinha existentes na região, tais como poluição provocada pela própria atividade portuária, lixões, áreas sem rede de esgoto, desobstrução de canais de drenagem e outros mais.

3.ETAPAS DESENVOLVIDAS

Neste trabalho, procurou-se desenvolver as medidas simultâneas dos principais agentes forçadores da hidrodinâmica e da circulação de poluentes líquidos e sólidos, com enfoque no transporte do lodo na área costeira exterior à Baía de Santos.

A medição simultânea de um vasto conjunto de parâmetros foi importante para o estabelecimento e calibração de modelos matemáticos e para uma eficiente caracterização do sistema,

identificando os agentes forçadores e seus efeitos nas correntes costeiras.

A pesquisa da hidrodinâmica da região, baseou-se primeiramente nos estudos anteriores desenvolvidos para a CODESP pelo NPH-UNISANTA [1] e nas atuais medidas e simulações realizadas pelo presente contrato, cuja análise final obedeceu ao seguinte roteiro :

- 1 – Base de Dados Coletados da Campanha de Medidas 2002
- 2 – Modelagem com o MOHID-3D
- 3 – Análise das Medidas Meteo-Oceanográficas no verão e inverno de 2002.
- 4 – Estudo dos Resultados das Campanhas das Radiais.
- 5 – Hidrodinâmica Geral da Região Costeira de Santos.
- 6 - Cenários de Lançamento de Poluentes no Estuário de Santos

4.CAMPANHAS OCEANOGRÁFICAS

4.1 - Os equipamentos oceanográficos: Correntógrafo -ADCP, Marégrafos e Estações Meteorológicas, foram instalados sempre nos mesmos locais nas campanhas de verão e de inverno.

O ADCP, marégrafo-1 e a estação meteorológica foram retirados após 45 dias de medições ininterruptas.

4.2 – A Campanha de Radiais, registrando as condições do mar, sua estrutura termohalina, na situação de verão e de inverno, no período de 8:00 até as 23:00 horas.

O dia escolhido foi em função das maiores variações das marés (sizígia) e também registrando dados da entrada de frente meteorológica, por meio da estação meteorológica e *sites* da internet relatando a situação do tempo na costa brasileira no mês.

Foram escolhidos 10 pontos baseados na carta náutica da Marinha nº 1701, os quais estão representados na Fig.1, além da localização dos equipamentos instalados nos dois períodos. Estes pontos foram escolhidos em função dos estudos [2].

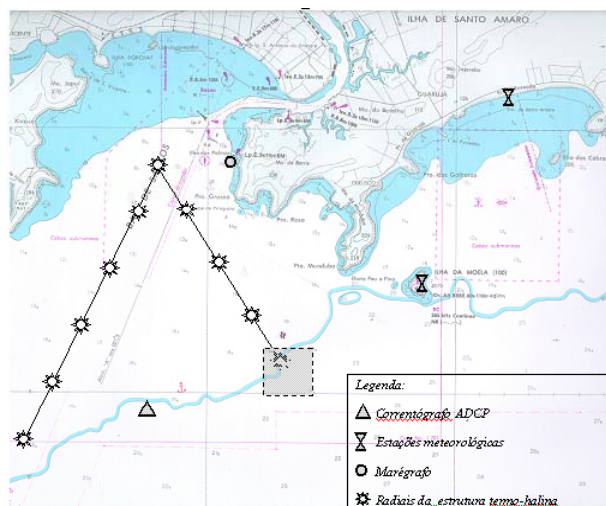


Fig.1- Posicionamento dos equipamentos e das radiais

5. ESTUDOS REALIZADOS

Na seqüência dos trabalhos elaborados em anos anteriores, apresenta-se os principais resultados obtidos para a caracterização da circulação oceânica na zona costeira de Santos e para a dispersão do lodo dragado pelo Porto de Santos.

O trabalho elaborado tem como suportes principais a Campanha de Medidas de 2002 e a Modelação Matemática.

As campanhas de medidas efetuadas pretenderam caracterizar diversos parâmetros meteo-oceanográficos, nas épocas de Verão e de Inverno, de forma a se conhecer o regime hidrodinâmico que se estabelece na zona costeira da Baixada Santista.

A modelação matemática teve como objetivo descrever em toda a zona costeira da Baixada Santista, incluindo o interior do estuário, o regime hidrodinâmico. Este regime hidrodinâmico é o suporte principal da simulação, em modelo matemático, da dispersão do lodo dragado pela CODESP, e também na circulação de poluentes gerados e lançados por diversas fontes já citadas.

O modelo matemático para a hidrodinâmica e o modelo de dispersão do lodo faz parte do sistema de modelos MOHID utilizados pela UNISANTA através do seu Núcleo de Pesquisas Hidrodinâmicas – NPH, adaptado ao desenvolvido pelo IST-Instituto Superior Técnico de Lisboa e pela firma HIDROMOD.[3]

5.1. Modelo Conceitual da Evolução do Nível Médio

Os resultados de ADCP da campanha de verão e inverno de 2002 mostraram de uma forma clara que o perfil de correntes na zona de descarte tende a ser homogêneo, o que é um sinal que as correntes nesta zona são forçadas por um gradiente de nível.

Os gradientes de nível nesta zona são condicionados de uma forma dominante por processos meteorológicos (*storm surges*) e pela maré. A costa atlântica situada na parte sul da América do Sul, é caracterizada por uma intensa influência meteorológica sobre o oceano, sendo registradas com uma elevada periodicidade oscilações de grande período (dias) nos níveis médios [4].

5.2 - Modelagem pelo MOHID-3D

O modelo final utilizado foi o Mohid-3D, mas no entanto, no caso das condições externas, as medidas comprovam claramente que o comportamento no exterior do estuário é predominantemente 2D. No modelo estudado, a campanha de verão mostrou que para o interior do estuário deve ser utilizada uma metodologia 3D, já que estão representadas as diversas camadas estratificadas. Para o modelo exterior utilizou-se no 3D apenas uma camada.

O esforço de cálculo requerido pelos equipamentos de computação, para se fazer as simulações com mais camadas não compensou pela precisão dos resultados obtidos. Os diversos cenários apresentados com uma camada mostraram-se tão precisos como para com duas ou três camadas.

O modelo lagrangeano funciona em 3D, assumindo um determinado perfil para as velocidades. Neste estudo, o perfil é constante porque as medidas conduzem a isso, e sendo constante também induz uma maior dispersão dos sedimentos devido a maiores velocidades junto ao fundo do outro perfil.

5.3– Análise da Medidas Meteo-Oceanográficas Campanha de Verão e Inverno de 2002

Os resultados de ADCP da campanha de verão e inverno de 2002 mostram de uma forma clara que o perfil de correntes na zona de descarte tende a ser homogêneo, o que é um sinal claro que as correntes nesta zona são forçadas por um gradiente de nível.

Os gradientes de nível nesta zona são condicionados de uma forma dominante por processos meteorológicos (*storm surges*) e pela maré. A costa atlântica da parte sul da América do Sul é caracterizada por uma intensa influência meteorológica sobre o oceano, sendo registradas com uma elevada periodicidade oscilações de grande período (dias) nos níveis médios.

O resultado da análise espectral da velocidade média do ADCP durante o período de Verão permite concluir que a variabilidade das correntes é principalmente devido a processos com escalas da ordem das 200 horas (8 dias), escalas essas que só podem ser associados a processos de origem atmosférica como é caso das “*storm surges*”. Na análise espectral, de ambas as componentes, é visível um pico de energia semi-diurno associado à maré.

Este pico relativamente aos picos associados aos processos atmosféricos é mais intenso na componente Y, que neste caso corresponde à componente perpendicular à costa, do que na componente X – componente paralela à costa). Este maior efeito da maré sobre a componente Y está associado às correntes de enchente e vazante do estuário de Santos estarem alinhadas na zona do ADCP com a direção Sul-Norte. Na componente paralela à costa o efeito das *storm surges* é mais visível sendo o efeito da maré no período analisado residual.

6. CONCLUSÕES DA MODELAGEM

6.1 – Estudo dos Resultados das Campanhas da Radiais.

O intuito principal da campanha foi medir simultaneamente correntes e a estrutura termohalina, no interior e exterior da baía de Santos, em marés enchente e vazante, em condições simultâneas.

As comparações dos resultados das correntes, obtidas pelas campanhas das radiais, no verão e inverno se caracterizam por não se constatar tendências marcantes para a circulação na baía de Santos e na sua área imediatamente externa..

A seguir é apresentado um resumo geral da campanha, com base na Fig. 1, cujos resultados coincidiram em muito com as situações descritas em [3].

Pontos Internos (3, 4, 5 e 6) : São influenciados diretamente pelas correntes provocadas pelas marés, não se notando influencia do vento e nem da circulação externa.

Pontos Externos (1, 2, 7, 8, 9 e 10) : Basta uma rápida observação para se verificar que em várias situações as correntes ocorridas nos pontos externos, tem direção até contrária ao da maré e do vento predominante na área.

Muitas vezes a inversão na direção ocorreu sem o registro de nenhuma alteração nas condições meteorológicas, por exemplo, 26/08/02.

Estas observações reforçam ainda mais o constatado pela análise dos resultados do ADCP, pois as correntes não se alteram significativamente com a entrada de frentes intensas, cuja

meteorologia chama de anticiclone de grande intensidade no Atlântico Sul, gerando ventos até de 50 km/h, por várias horas.

6.2– Hidrodinâmica Geral da Região Costeira de Santos.

Uma das principais conclusões quanto à hidrodinâmica, estudada através das campanhas de medidas e da modelação matemática, tem a ver com a correlação encontrada entre a variação do nível médio medido na Ilha das Palmas e as correntes paralelas à costa medidas no ADCP. Os coeficientes de regressão apresentam valores elevados quer para as medidas de Verão quer para as medidas de Inverno.

Concluiu-se que o forçamento das correntes e níveis na zona do estudo, além do forçamento da maré e dos ventos locais, tem também origem remota devido aos fenômenos já descritos. Estes identificaram uma perturbação no nível que se propaga ao longo da costa Brasileira para o equador a uma velocidade de 10 m/s com um período de 6 a 7 dias. Considera-se que a perturbação de nível subinercial, que se detectou pelas campanhas da UNISANTA nos níveis medidos na Ilha das Palmas, tende a ser gerada na parte Sul da costa Leste da América do Sul por ação do vento e tende a propagar-se para o equador na forma de uma onda da plataforma continental.

Como esta perturbação tem a forma de uma onda, as correntes geradas na zona costeira de Santos derivam principalmente do equilíbrio geostrofico que se estabelece devido ao gradiente de nível perpendicular à costa. Sendo um fenômeno oscilatório, este gradiente pode ser positivo ou negativo, gerando correntes nas duas direções paralelas à costa.

Vem reforçar estas conclusões os resultados obtidos e comentados pela campanha de medidas da estrutura termohalina, onde mediu-se as variações da direção e módulo das velocidades em várias camadas no interior e exterior da baía de Santos.

Pode-se então concluir assim que, os fenômenos geradores das correntes mais intensas detectadas nas campanhas de medidas, não foram locais e sim as remotas. A ação do vento na área abrangida pelo modelo geral (correspondente a toda a costa paulista), representa apenas uma parte das correntes geradas na zona em estudo e a propagação da maré outra parte.

6.3– Estudos Complementares da Dispersão do Lodo Lançado

O lodo que se deposita no fundo no ato do descarte, habitualmente a parcela mais significativa do volume descartado, vai sendo disperso pela ação conjugada das correntes marítimas e das ondas.

Procurou-se avaliar neste estudo a zona de dispersão e as alterações na sua contaminação quando está em suspensão na coluna de água, utilizando um modelo de transporte lagrangeano. Para cada origem possível de descarte apresentou-se uma zona de possível dispersão do lodo de fundo.

Os valores apresentados para a variação da contaminação do lodo são estimativas que necessitam futuramente serem confirmadas com análises do sedimento do fundo e do lodo em suspensão. Existem lacunas quanto aos valores dos coeficientes de partição e à taxa de dessorção dos contaminantes mais importantes (notadamente o benzoapireno).

Na Fig.2 apresentadas a seguir, constata-se aspectos importantes da variação da concentração:

a) As menores concentrações ocorrem no lodo em suspensão que no lodo no fundo, porque o processo de dessorção é mais rápido quando o sedimento está em suspensão do que quando está depositado no fundo.

b) É conveniente que sejam feitos futuramente estudos dos processos dispersão do lodo e de dessorção de contaminantes do lodo. Estes estudos de processos seriam realizados através de campanhas de medidas incluindo coleta do lodo, análises de laboratório e a modelação.

As campanhas de medidas e os resultados da modelação hidrodinâmica desenvolvidos durante o presente trabalho, permitiram aprimorar em muito a capacidade de previsão da hidrodinâmica na zona do descarte de lodo proveniente das dragagens da CODESP.

Verificou-se que em situações de correntes elevadas, a atual zona de bota-fora é extremamente dispersiva e que o lodo se dispersa de forma paralela à costa e acompanhando a batimétrica dos 20 m.

6.4 - Pesquisa de Novas Áreas de Lançamento de Lodo Dragado .

Foram estudadas cinco áreas possíveis de lançamento de lodo dragado, nas seguintes coordenadas centrais:

A seguir, na Fig.2 verifica-se o deslocamento dos poluentes nos diversos pontos estudados

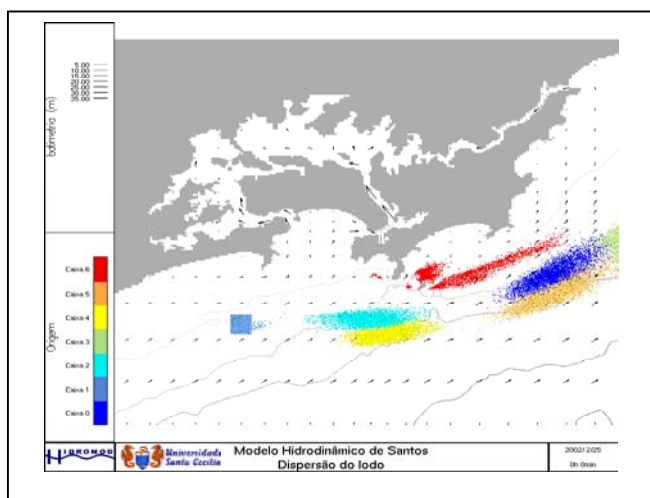


Fig.2- Cenário Dispersão dos Lodos nos pontos ensaiados.

Dos cinco locais alternativos simulados, excluindo a antiga área de descarte próxima à Ponta. do Munduba (em vermelho), e tomando como referência a atual área de descarte Área-0 (azul escuro), que apresenta boas condições de dispersão, pode-se concluir com precisão que existem áreas com condições menos dispersivas (azul claro), outras mais dispersivas e ainda outras iguais em condições com a área atual de descarte.

Chegou-se a conclusão que conclusão que no local de descarte atual dos lodos dragados pela CODESP, e em outras áreas específicas pesquisadas, quando o lodo é ressuspensão do fundo, assim como quando do seu lançamento no local, o transporte dá-se paralelamente à costa, não atingindo a costa, como descrito com muitos detalhes em [1].

6.5 – Cenários de diversos lançamentos de poluentes no Estuário de Santos.

O cenário fixado na Fig.3, após alguns ciclos de marés, onde as correntes dispersaram os poluentes lançados de diversas fontes:

Azul – Emissário Submarino da SABESP – [4]

Verde – Esgotos da área denominada México-70, (sem rede de esgotos).

Vermelho – Vazamento de óleo no terminal da ilha Barnabé.

Laranja – Poluição geral da atividade portuária.

Pode-se verificar com muita clareza as áreas atingidas, o tempo necessário para que ocorra, assim como a sua concentração de poluentes nas suas diversas fases.

Foram realizadas também outras simulações tais como : Contaminação pelos canais de Santos e São Vicente que deságuam junto as praias, dispersão do chorume dos lixões, fenômeno da erosão da praia do Gonzaguinha – SV.

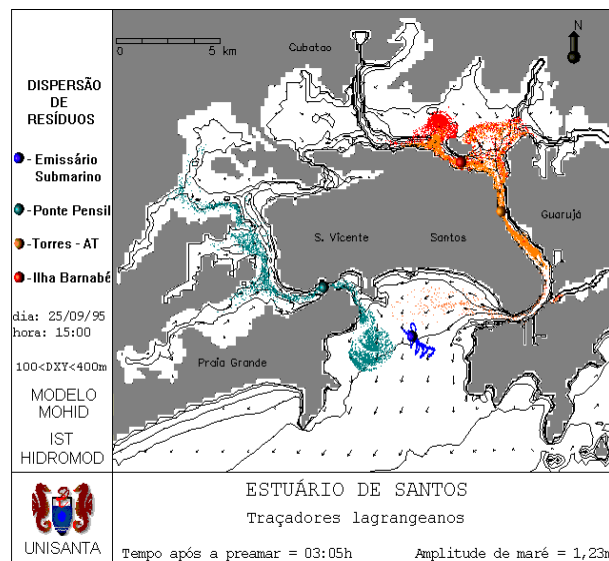


FIG.3 – CENÁRIO DE DISPERSÃO DE POLUENTES NO ESTUÁRIO

Atualmente, o descarte dos esgotos pelo emissário submarino de Santos/São Vicente é feito a 4,0 km da costa, no meio da baía de Santos, numa zona crítica de circulação de correntes, havendo, como já foi dito anteriormente uma interface entre as correntes internas de marés e as correntes externa a baía que influencia diretamente a circulação central.

Os cenários para os emissários submarinos de Guarujá e Praia Grande podem ser avaliados na Fig.2 considerando os resultados obtidos nas simulações da zona externa a baía de Santos, onde se constata que os poluentes assumem uma direção paralela a costa .zona de onde há uma corrente constante nesta situação.

Nas Fig.4 e Fig.5 a seguir, verificam-se a direção das correntes e a predominância de arraste de partículas.

Uma pequena parte dos esgotos poderá se depositar no fundo logo no ato de lançamento. Uma parte dos esgotos fica, no entanto em suspensão na coluna líquida sendo transportada pelas correntes imediatamente.

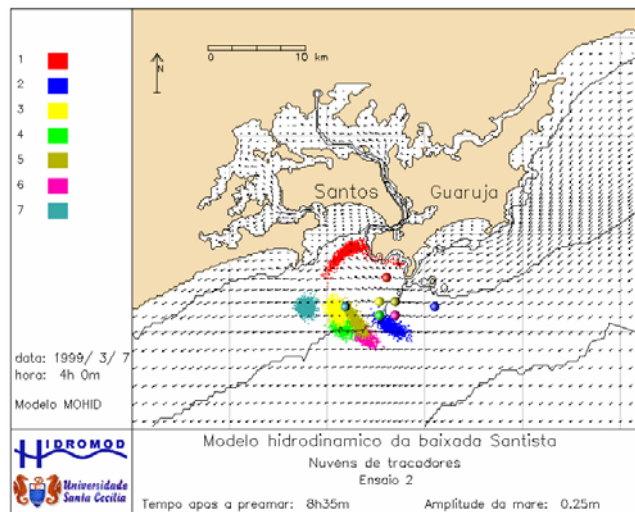


Fig.5 - Correntes para SW - (27 horas após o lançamento)

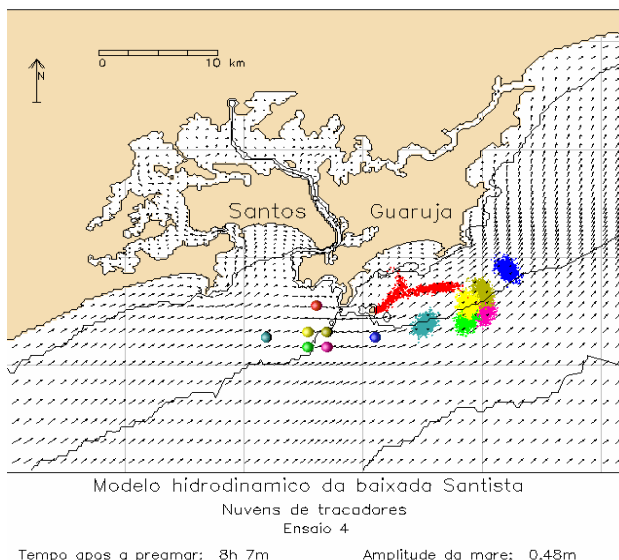


FIG.5 - Correntes para NE - (15 horas após o lançamento)

A zona costeira da Baixada Santista apresenta correntes com valores muito variáveis e que podem chegar a ser iguais ou superiores a 50 cm/s durante 12 h ou até mais.

Os resultados obtidos para as duas situações críticas: correntes para SW (27 horas após o lançamento e correntes para NE 15 horas após o lançamento, com estas condições foram simulados lançamento de traçadores que permitiram visualizar o deslocamento das manchas na coluna líquida.

Simulou-se também a dispersão dos lodos que se depositam no fundo para uma situação de entrada de frente fria. Os resultados permitiram verificar quais as zonas onde haverá maior probabilidade de se depositarem os lodos que forem arrastados do fundo no local de lançamento.

O transporte de nuvens de traçadores, simulando os esgotos que ficam em suspensão na operação de lançamento, também conduziu a resultados muito satisfatórios, gerando quadro a quadro, permitindo visualizar na tela do vídeo o dinamismo das correntes.

REFERÊNCIAS

- [1]- UNISANTA, Relatórios para CODESP – Pesquisa de áreas de Lançamento de Lodos Dragados.
- [2] Berzin, G. (1991) - “Monitoring of the Santos Submarine Outfall - 10 Years of Operation” - Anais da International Specialized Conference on Marine Disposal Systems - APESP-IST Lisboa - Portugal. – Publicado no Journal of Science - Water Science and Technology - London - Vol 25, n° 9, pg 59 a 71.
- [3] Berzin, G., Neves, R. J. J. & Leitão, J. C., "Modelação Matemática no Estuário de Santos e sua Importância no Controle da Poluição por Águas Residuárias", 19o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Foz do Iguaçu, 1997.
- [4] Camargo, R. e Harari, J. 1994. Modelagem Numérica de Ressacas na Plataforma Sudeste do Brasil a partir de Cartas Sinóticas de Pressão Atmosférica na Superfície. Inst. Oceanográfico, S Paulo, 42(1):19-34.