

Análise Computacional Comparativa da Dispersão da Pluma do Efluente dos Emissários Submarinos do Tebar – Petrobrás

Ricardo de Mattos Fortis, Jayme Pinto Ortiz

Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária/USP

ricardo.fortis@poli.usp.br, jportiz@usp.br.

Claudia Condé Lamparelli, Regis Nieto

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB

claudial@cetesbnet.sp.gov.br, regisn@cetesbnet.sp.gov.br

Recebido: 14/03/06 – revisado: 31/10/06 – aceito: 09/01/07

RESUMO

O Terminal Almirante Barroso – TEBAR, de propriedade da Petrobrás, está localizado no Canal de São Sebastião – CSS, onde lança seus efluentes através de dois emissários submarinos de polietileno de alta densidade, contendo, cada um deles, uma tubulação difusora em sua extremidade. Cada tubulação difusora é constituída de três risers com 0,15m de diâmetro e 1,5m de altura, a uma profundidade que varia entre 19,15 e 25,45m. A intensidade média de corrente no canal é da ordem de 0,40 e 0,60m/s, com direção preferencial NE. O efluente possui altas concentrações de amônia (máxima de 125,5mg/L em abril de 2001) que ultrapassam o padrão de emissão estabelecido pela Resolução Conama 20/86 (Artigo 21 - 5,0 mg NH_3 /L), além de ser caracterizado como um efluente denso devido a alta concentração de salinidade.

Para compreender o processo de dispersão do contaminante amônia e o perfil hidrodinâmico da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR, utilizou-se a modelagem computacional baseada no método dos volumes finitos (DFC – software FLUENT) e no método integral (CORMIX) como ferramenta de análise do processo da dispersão de efluentes no corpo d'água, e também como ferramenta no suporte a decisão da agência ambiental e da própria Petrobrás, frente a exigência de atendimento à legislação.

Os resultados apresentaram uma pluma com empuxo negativo, que submerge após alguns metros do lançamento, acarretando um forte impacto benthico na área circunvizinha do sistema difusor. Os resultados de dispersão da aplicação do FLUENT mostraram uma boa concordância com os resultados de dispersão obtidos a partir das medições de campo com traçador fluorimétrico, mas os resultados de dispersão de aplicação do CORMIX foram muito mais conservadores quando comparados com estes mesmos dados de campo.

Palavras-chave: emissário submarino; modelagem computacional; canal de São Sebastião.

INTRODUÇÃO

A região litorânea do Estado de São Paulo, a cada ano, apresenta um aumento no contingente populacional, fixo e flutuante, devido às oportunidades profissionais, comerciais, e de lazer e turismo.

Segundo Afonso (1999), dentre os impactos ambientais ou problemas ambientais emergentes no litoral paulista, referentes ao aproveitamento de recursos hídricos, podemos citar: a contaminação das águas superficiais e subterrâneas e a contaminação dos manguezais, provocadas pela existência do Pólo Industrial de Cubatão, do Porto de Santos e de São Sebastião, as fontes difusas decorrentes da disposição inadequada dos efluentes sanitários e as

fontes pontuais provenientes principalmente das indústrias e dos emissários submarinos.

Segundo Ragas & Leuven (1999), dois princípios básicos podem ser estabelecidos no controle da poluição dos recursos hídricos: o da prevenção da poluição na fonte geradora e o da utilização da capacidade assimilativa do corpo d'água.

Na região litorânea do Estado de São Paulo utiliza-se como um dos principais sistemas de tratamento de efluentes, a disposição oceânica através dos emissários submarinos, seja de efluentes sanitários (Marcellino & Ortiz, 2001), seja de efluentes industriais, escopo principal do trabalho aqui apresentado. Neste sentido, a utilização de modelos computacionais para a análise da dispersão da pluma de efluente no ambiente aquático é extrema-

mente importante. O litoral paulista, possui 7 emissários submarinos de esgoto sanitário (2 em Praia Grande, 1 em Santos, 1 em Guarujá, 2 em São Sebastião e 1 em Ilha Bela), além de um emissário submarino industrial, também no município de São Sebastião, de propriedade da Petrobrás, e que é o objeto de estudo para as simulações computacionais aqui apresentadas.

O emissário submarino é uma estrutura física hidráulica linear que conecta a superfície terrestre ao corpo d'água receptor constituindo-se basicamente de 3 componentes principais: a estação de lançamento localizada na parte terrestre, e que pode conter uma estação de tratamento de efluentes industrial ou doméstico; o emissário, cuja função é transportar o efluente (por gravidade ou bombeamento) para o local exato de disposição; e, o sistema difusor, onde um orifício ou bocal, ou um conjunto destes, lançam e dispersam o efluente.

A utilização de sistemas difusores multiorifícios, definidos a partir de projetos adequados é fundamental para garantir a qualidade da água após o processo de diluição inicial do efluente na zona de mistura.

No processo de dispersão de um efluente na massa líquida, duas fases distintas devem ser consideradas. A primeira, referente à mistura inicial, ocorre na região chamada "campo próximo" (*near-field*), e depende, basicamente, das condições ambientais (nível de turbulência das águas, velocidade da corrente e estratificação térmica) e das características geométricas do difusor (número de orifícios, diâmetro, alinhamento, etc...). Como valor padrão, para um sistema difusor ser considerado eficiente, este deve alcançar diluições mínimas da ordem de 100 ($D_0 = C_0 / C$; sendo D_0 = Diluição inicial, C_0 = Concentração inicial, C = Concentração final), no campo próximo.

Os jatos lançados em alta velocidade através do sistema difusor podem ser afetados pela corrente do ambiente e pela estratificação térmica e de densidade. As correntes irão defletir gradualmente o jato flutuante na direção do seu escoamento induzindo um aumento da mistura. Por outro lado, um ambiente estratificado, irá agir na retração da aceleração vertical do jato (empuxo), aprisionando a pluma de efluente em um certo nível da coluna d'água.

Conforme a pluma se afasta do ponto de lançamento, as características geométricas do difusor passam a ter menor influência no processo de dispersão, e uma segunda fase se inicia, na qual a turbulência do ambiente irá controlar a trajetória e a taxa de diluição da pluma. Esta região é chamada

de campo distante (*far-field*). Existe uma série de condições hidrodinâmicas, que variam conforme as condições locais de cada região, e para cada caso, deve-se realizar intensivos estudos e medições de campo para que se possa compreender melhor os fenômenos físicos que envolvem a mistura hidrodinâmica oceânica (Fortis et al, 2005a).

O desenvolvimento de modelos computacionais tem facilitado a análise hidrodinâmica do lançamento de efluentes domésticos e industriais em corpos d'água, e mais especificamente, tal uso tem-se desenvolvido na aplicação aos emissários submarinos do litoral paulista, sendo alvo de pesquisas na área da Engenharia Hidráulica, com o intuito de subsidiar ações de controle ambiental (Arasaki & Ortiz, 2004).

O projeto e o desenvolvimento de sistemas de tratamento de efluentes e o adequado lançamento no corpo receptor, analisando-se os processos de mistura e diluição através da utilização de *softwares* de previsão do comportamento da descarga em relação às condições oceanográficas, tem tido importantes avanços nos últimos anos.

Segundo Ortiz & Bessa (2004), a utilização de modelagem computacional para a simulação do processo de dispersão da pluma de efluente, reproduzindo-se a zona de mistura em qualquer tipo de corpo d'água, constitui-se hoje em ferramenta imprescindível no processo de decisão, tanto para os órgãos ambientais, como para as indústrias.

No presente trabalho, apresenta-se uma comparação entre a técnica baseada em *DFC – Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics)*, que utiliza o método dos volumes finitos, através do *software FLUENT*, e a técnica baseada no método integral, utilizando-se o *software CORMIX*, que é um modelo especialista na análise da diluição inicial a partir de fontes pontuais de lançamento.

ESTUDO DE CASO

Sistema de emissários submarinos do TEBAR

O TEBAR está localizado no município de São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo, tendo sido construído no ano de 1967 pela empresa PETROBRÁS - Petróleo Brasileiro S.A.

O terminal é constituído de um oleoduto ligando duas plataformas, situadas no meio do Canal de São Sebastião (a 1km da costa aproximadamente), a um conjunto de 40 tanques de armazenamento (na parte terrestre). As plataformas foram cons

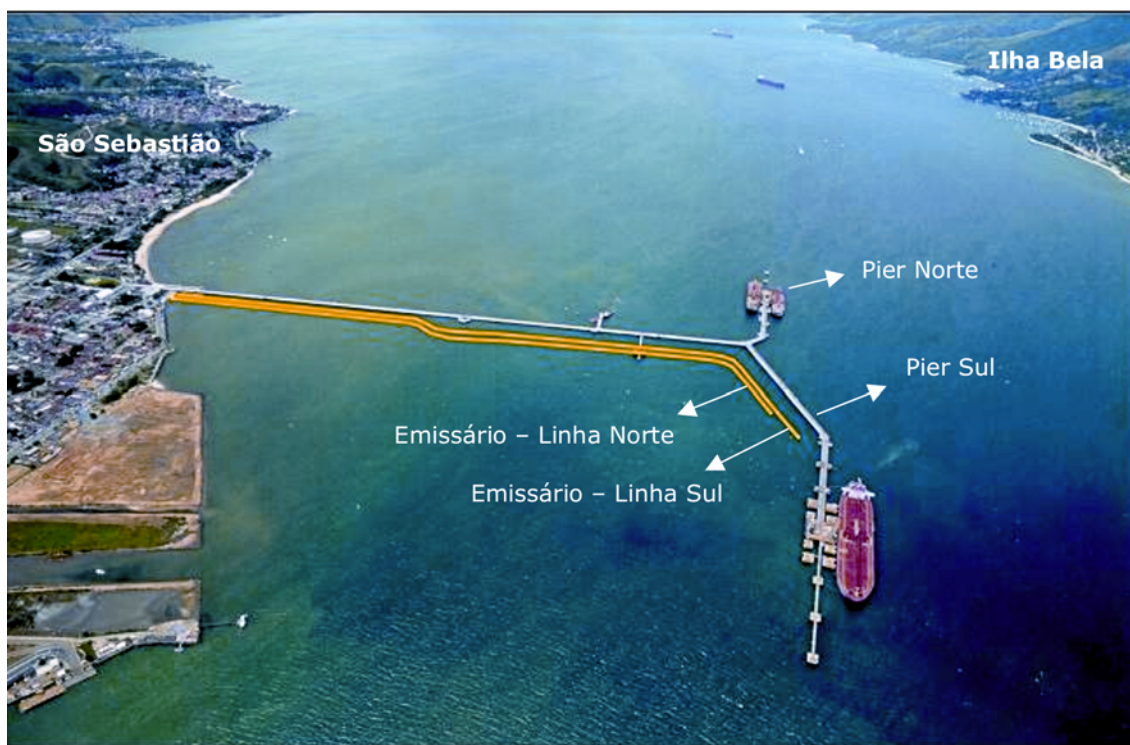


Figura 1 - Vista aérea do Píer com a localização (em amarelo) dos emissários submarinos assentados no leito de fundo (Fundespa, 2003).

truídas nessa distância devido as profundidades do canal serem da ordem de até 40m, o que permite aos navios de maior porte poderem atracar (até 300.000 toneladas).

Na ligação entre as plataformas e a parte terrestre existe uma rede de canalizações, incluindo as várias tubulações que escoam o petróleo e os produtos derivados até os tanques de armazenamento, e as duas tubulações de esgoto que encaminham o efluente para os dois emissários submarinos situados perto da plataforma Pier Sul.

O terminal emite dois tipos de efluentes líquidos, que são misturados, antes de serem enviados para os emissários, sendo:

- os efluentes líquidos gerados na drenagem dos fundos dos tanques e dos navios (enviado para o terminal após o atracamento);
- as águas pluviais e industriais contaminadas com óleo (águas de incêndio, vazamento de válvulas, etc).

As duas tubulações dos emissários submarinos de PEAD – Polietileno de Alta Densidade são

chamadas de Linha Norte e Linha Sul. Estas correm paralelas ao terminal, assentadas no fundo, acompanhando seu contorno - figura 1. A Linha Sul tem um comprimento aproximado de 1600 metros e a Norte de 1400 metros.

Na ponta de cada linha existe uma seção difusora com 3 "risers" de PEAD, com saídas verticais, de aproximadamente 1,5m de altura e diâmetro igual a 0,15m, cada. Segundo Fundespa (2003), foram realizadas inspeções submarinas, onde verificou-se que, todo o sistema estava em funcionamento.

Os dois emissários do TEBAR em seu trecho final, incluindo os sistemas difusores, estão assentados no fundo, ao lado da plataforma Pier Sul – figura 2. O emissário correspondente à linha Norte está situado a uma profundidade de 19,45m; e, o emissário correspondente à linha Sul, a uma profundidade de 25,15m.

As análises do efluente pós tratado, antes do lançamento, realizadas entre abril de 2000 a março de 2002 (Fundespa, 2002), apresentaram valores de amônia ultrapassando várias vezes o padrão de emissão. Neste período, a concentração média de amo-



Figura 2 - Vista lateral do Pier Sul - emissários submarinos assentados no leito de fundo, ao lado do pier (Fortis, 2005).

nia no efluente foi de 76,7 mg/L, sendo o máximo atingido igual a 125,5 mg/L em abril 2001.

Segundo Cetesb (2001), o sistema de tratamento de efluentes (gerados na drenagem dos fundos dos tanques e dos navios atracados no terminal aquaviário; e das águas pluviais e industriais contaminadas com óleo) tem capacidade de tratar uma vazão máxima total de 750m³/h (0,208m³/s).

Ressalta-se ainda, na avaliação da qualidade do efluente, os altos valores encontrados para o parâmetro salinidade, sendo determinado, entre abril/2000 e março/2002, uma média de 52,8‰ no efluente final a uma temperatura média de 27,3°C. Tal faixa de valores exprime uma massa específica do efluente da ordem de 1037 kg/m³.

Características hidrodinâmicas do Canal de São Sebastião - CSS

O canal de São Sebastião (CSS) está localizado entre o continente (Município de São Sebastião) e o Município de Ilhabela (ou Ilha de São Sebastião), e possui uma extensão de cerca de 25km,

orientando-se mais ou menos na direção NE-SW, com larguras em suas extremidades de mais de 7 km ao Sul e 5,5 km ao Norte.

Na porção central do canal, em frente ao porto de São Sebastião e ao ponto de lançamento do efluente, há um estreitamento para menos de 2 km de largura. A porção adjacente ao canal é bastante rasa, com profundidades inferiores a 10 metros.

Já a calha central é bastante profunda, superando os 40 metros. Também foram analisados dados hidrográficos e correntométricos, amostrados no Canal de São Sebastião, no período de fevereiro de 1994 a março de 1995 (Silva *et al*, 2001).

Uma forte influência advectiva, fluindo para NE através da entrada sul, ocasiona a formação de termoclinas e haloclinas nas camadas mais profundas do canal, geralmente nos meses de verão ($\rho = 1022 \text{ kg/m}^3$ a 1026 kg/m^3), que contrastam com as condições hidrográficas quase homogêneas observadas no inverno ($\rho \approx 1022 \text{ kg/m}^3$).

Um conjunto de dados correntográficos coletados no CSS, durante os anos de 1992 e 1993, foi analisado, evidenciando um padrão sazonal de circulação com velocidades médias entre 0,40 e 0,60 m/s (Fontes, 1995). Em campanha realizada em janeiro de 2003 verificou-se um padrão de circulação com velocidades médias entre 0,03 e 0,95 m/s (Fundespa, 2003). A circulação mostrou-se essencialmente barotrópica e com movimento unidirecional predominantemente para NE durante o outono, inverno e primavera. No verão, ocorreram movimentos com natureza baroclínica em duas camadas, onde os fluxos baroclínicos estariam associados à tensão de cisalhamento do vento para SW na camada superficial, e à penetração das Águas Costeiras do Atlântico Sul - ACAS, pela extremidade sul do canal para NE na camada profunda.

Aplicação de DFC - programa FLUENT

O *software* FLUENT é baseado na Dinâmica dos Fluidos Computacional – DFC, que consiste na utilização de métodos numéricos para transformar as equações de derivadas parciais, que dirigem o escoamento (continuidade, quantidade de movimento, energia, transporte de espécies), em equações algébricas, aplicando-se técnicas computacionais, destacando-se a técnica de volumes finitos (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Para a aplicação de DFC, é necessário desenhar a geometria de interesse e dividi-la (discretizá-la) em um número de células computacionais.

A discretização é o método de aproximação das equações diferenciais parciais por um conjunto de equações algébricas que contêm variáveis do sistema em uma localização discreta no espaço e no tempo. As localizações discretas são referidas como malha ou *grid* do sistema. Após a criação da malha, é necessário definir as condições de contorno. Podemos especificar como entrada no sistema, variáveis como: pressão, velocidade, vazão, temperatura e concentração; para a parede do sistema, podemos definir variáveis como: temperatura, tensão de cisalhamento, ou fluxo de calor; e para a saída do sistema, podemos definir a pressão ou fluxo de saída.

Modelagem de transporte de espécies químicas

O programa FLUENT permite modelar a mistura e o transporte de espécies químicas resolvendo a equação geral de conservação que descreve, simultaneamente, os fenômenos de convecção, difusão e reação química para cada espécie introduzida no caso. A modelagem de transporte de espécies

químicas pode ser realizada, considerando ou não as reações químicas entre as espécies.

A partir da escolha da solução das equações de conservação através do transporte de espécies químicas, é necessário introduzir a fração em massa de cada espécie química, Y_i , para solucionar a equação de advecção-difusão para as N_{especies} espécies. Esta equação de conservação possui a seguinte forma geral:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

sendo: R_i , a taxa de produção de espécie i por reação química; S_i , a taxa de criação por adição na fase dispersa;

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i)$ a taxa de variação local da propriedade (concentração);

$\nabla(\rho \vec{V} Y_i)$ o termo advectivo da propriedade;

$-\nabla \vec{J}_i$ o termo difusivo da propriedade.

Uma equação deste tipo é resolvida considerando $N-1$ espécies, sendo N , o número total de espécies químicas na fase fluída presente no sistema. Considerando que, a fração em massa das espécies existentes, devem somar uma unidade (igual a 1), a N_{especies} fração em massa é determinada como um menos a soma das $N-1$ frações em massa restantes. Com o intuito de minimizar erros, a N_{especies} espécie deve ser selecionada como a espécie com a maior fração em massa de todo o sistema. Como exemplo, podemos citar, a água do mar, como sendo a N_{especies} espécie, e que, existe em muito maior quantidade do qualquer outra espécie química dentro de um sistema aquático marítimo (Fluent, 2003).

Para o presente estudo, não foram levadas em conta as taxas de reações químicas, (R_i e S_i), sendo considerados somente os fenômenos de advecção e difusão, podendo ser introduzido o modelo de turbulência mais adequado para o caso. Portanto a equação anterior simplifica-se:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i \quad (2)$$

Considerou-se, portanto, o parâmetro amônia como substância conservativa. Esta adoção é palpável, e vem de encontro com a proposta de desenvolvimento do trabalho, calibrando os resultados, através de estudo com a Rodamina, como traçador conservativo, a partir de medições em campo da dispersão do efluente do TEBAR.

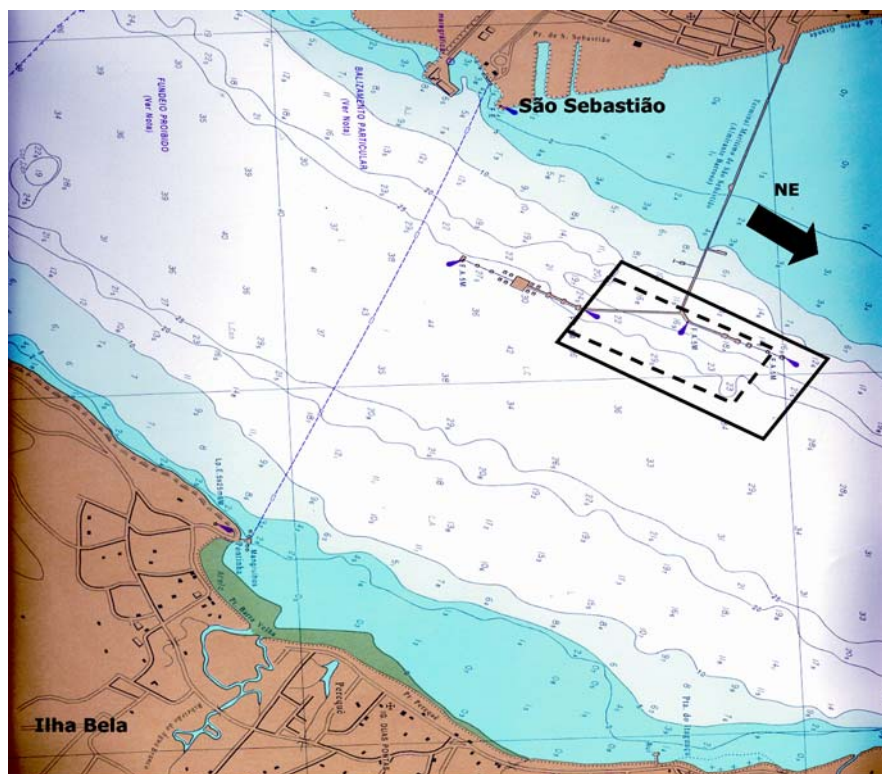


Figura 3 - Carta Náutica nº 1643 – Canal de São Sebastião, com perímetros dos dois volumes de controle (Linha contínua – Malha 1; Linha pontilhada – Malha 2), criados no *software* GAMBIT.

Construção e discretização da geometria do Canal de São Sebastião

A figura 3 mostra o trecho do CSS cuja geometria foi utilizada para a discretização da malha computacional. Construíram-se duas malhas da área circunvizinha ao sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR, utilizando-se para isso o programa GAMBIT. A partir da Carta Náutica nº1643 da Marinha do Brasil, de 30 de junho de 2003, determinou-se duas áreas circunvizinhas ao sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR (perímetros com linha contínua e pontilhada - figura 3), que diferem em suas dimensões e no refinamento da malha criada.

Para ambos os volumes de controle foram traçadas seções transversais perpendiculares as margens, e considerando-se os pontos batimétricos pela Carta Náutica nº 1643.

O limite superior dos volumes de controle inicia-se na isolinea de -10m de profundidade, considerando-se assim a altura a partir do leito de fundo até esta cota.

Esta simplificação foi possível, a partir de conclusões preliminares obtidas com o uso do programa CORMIX (ver item 2.4) devido a alta densidade do efluente ($\approx 1036,7 \text{ kg/m}^3$). Isto possibilitou a otimização do custo computacional e consequentemente, um melhor refinamento da malha. Adotando-se o sentido preferencial e de maior intensidade da corrente para NE, tem-se o Município de São Sebastião à esquerda e o Município de Ilha Bela, à direita.

O desenho tridimensional (3D) realizado no programa GAMBIT, do canal com os 6 orifícios de saída está representado na figura 4 (referente a Malha 1) e na figura 5 (referente a Malha 2). As coordenadas do eixo geométrico x,y,z foram definidas da seguinte maneira: eixo Gx: sentido da corrente; eixo Gz: largura do canal; e, eixo Gy: profundidade do canal.

As dimensões geométricas, dos dois volumes de controle, da área circunvizinha ao sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR, são dadas na tabela 1.

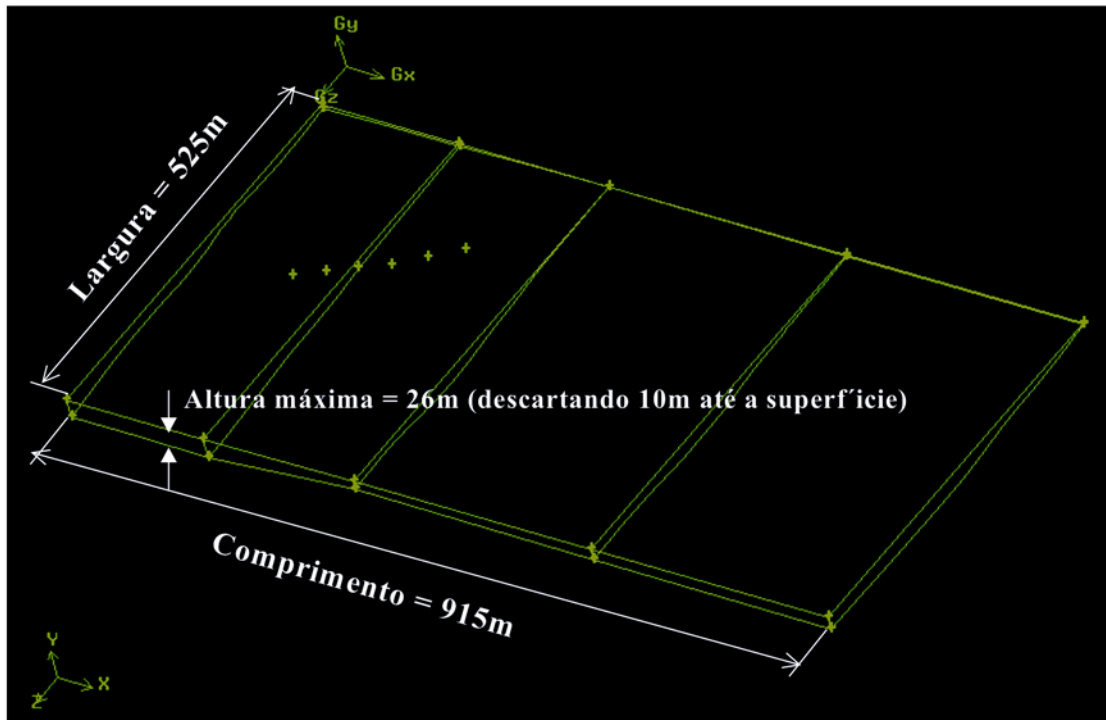


Figura 4 - Desenho em 3D da Malha 1 realizado no programa GAMBIT.

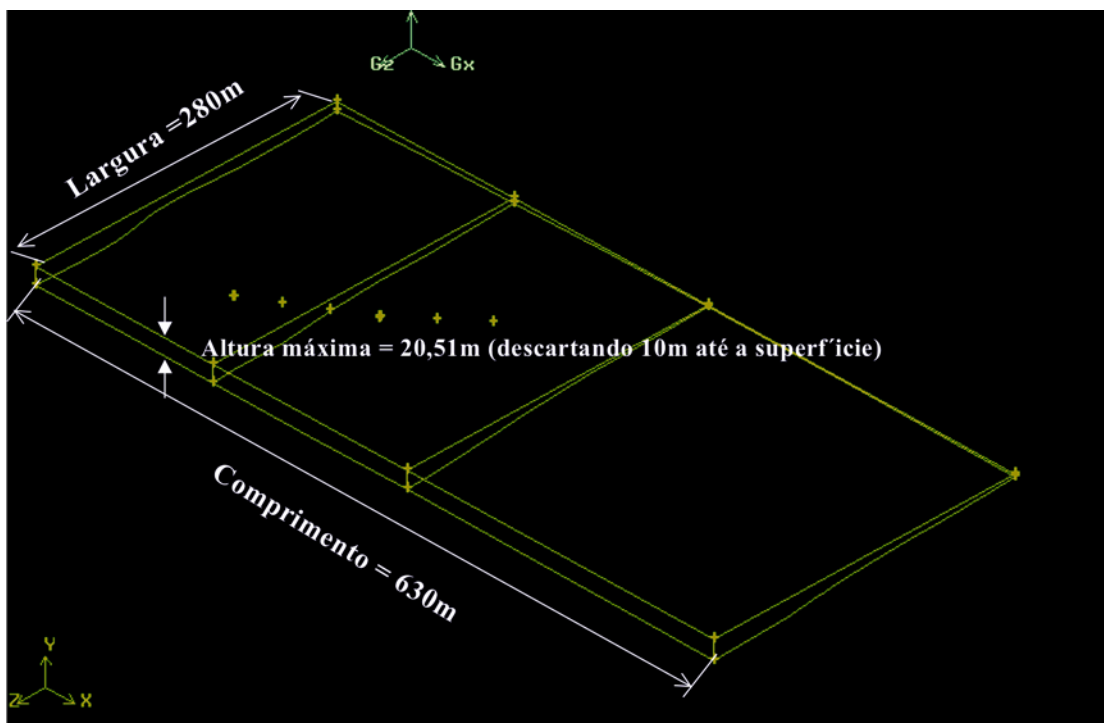


Figura 5 - Desenho em 3D da Malha 2 realizado no programa GAMBIT.

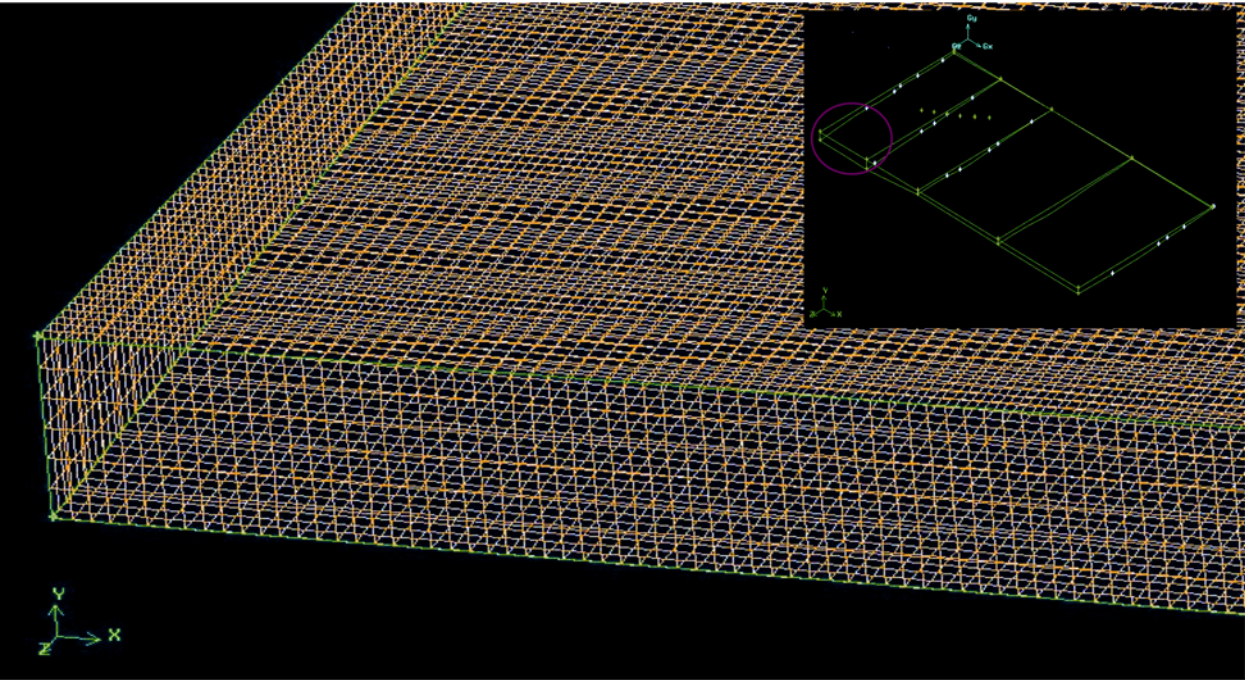


Figura 6 - Detalhamento da malha estruturada hexaédrica - Malha 1, de uma parte da geometria do CSS, utilizando o programa GAMBIT

Tabela 1 - Dimensões dos volumes 1 e 2 criados para as simulações computacionais do FLUENT.

Dados	Malha 1 (linha contínua)*	Malha 2 (linha pontilhada)*
Comprimento	915m	630m
Largura	525m	280m
Profundidade máxima	26m	20,51m
nº de células hexaédricas	655.452	761.320

* ver perímetro na figura 3.

A partir da geometria construída, realizou-se a discretização do volume de controle. Gerou-se uma malha estruturada do tipo hexaédrica em toda a dimensão do canal, inclusive na região de contorno dos difusores. Cada célula pertencente ao volume da Malha 1 tem as seguintes características: comprimento (Gx) e largura (Gz) de aproximadamente 2m e altura (Gy) de 4,33m. Em relação a Malha 2, as células tem as seguintes características: comprimento (Gx) e largura (Gz) de aproximada-

mente 1m e altura (Gy) de 2m. Ou seja, as células da Malha 2 têm aproximadamente a metade das dimensões das células que compõem a Malha 1, portanto, apresentando maior refinamento (Fortis et al, 2005b).

A figura 6 mostra em detalhe a discretização de um trecho de uma seção da geometria do Canal de São Sebastião. A altura da malha (Gy) corresponde a 26m, já descontados os 10m superiores até a superfície livre com grande economia no custo computacional, considerando que o jato/pluma é submerso sem nenhuma influência na região superior, como apresentado no item Resultados no Campo Próximo e Distante.

As condições de fronteira de ambos os volumes de controle foram estabelecidas com as seguintes características:

- Primeira seção transversal, representando a entrada do canal: velocidade da corrente da água do mar (0,5m/s) uniforme;
- Última seção transversal, representando a saída do canal: vazão de saída;
- Orifícios de saída do efluente: velocidade de descarga do efluente, considerando:

- o vazão nominal ($Q = 0,208\text{m}^3/\text{s}$ equivalente a uma velocidade igual a $1,96\text{m/s}$ por orifício);
- o vazão operacional ($Q = 0,128\text{m}^3/\text{s}$, equivalente a uma velocidade igual a $1,2\text{m/s}$ por orifício).
- leito de fundo: superfície sólida;
- lateral e superfície: simetria;
- seções transversais internas: interior.

Cenários

Para a análise hidrodinâmica da dispersão da pluma dos efluentes dos emissários submarinos do TEBAR, estabeleceu-se dois cenários distintos, referentes a condição ambiental média do Canal de São Sebastião (CSS) e as condições críticas (vazão e concentração) de descarga dos efluentes do TEBAR.

Para o primeiro cenário, realizaram-se duas simulações, chamadas de FA-1 e FA-2 referentes as simulações na Malha 1 e 2, respectivamente. Trabalhou-se com a vazão máxima do sistema igual a $0,208\text{m}^3/\text{s}$ (Cetesb, 2001), como situação crítica. A intenção de simular as mesmas condições de contorno, variando somente o refinamento da malha, foi para analisar a influência do refinamento no processo de dispersão da pluma do efluente.

Para o segundo cenário (FB), a vazão utilizada foi a operacional, igual a $0,128\text{m}^3/\text{s}$, medida durante a campanha realizada pela Fundespa (2003). O cenário FB foi simulado somente na Malha 1.

Na aplicação do programa FLUENT (licença acadêmica), trabalhou-se com a modelagem de transporte de espécies químicas que permitiu estudar o transporte difusivo-advectivo de uma substância conservativa (amônia) na pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR ao longo do CSS.

Para as simulações realizadas, utilizou-se um microcomputador Pentium 4 – 1,5 GHz de velocidade de processador e 1,0 GB de memória RAM.

O tempo de escoamento da pluma do efluente (*Flow Time*) em todas as simulações foi aproximadamente igual a 17.000s (4h40min). Estabeleceu-se tal valor, a partir do momento em que, após um tempo de escoamento aproximado de 9.000s, o perfil da pluma não variou mais, ou seja, o intervalo de tempo de 0s a 9.000s, foi o tempo necessário para a estabilização do comportamento hidrodinâmico da pluma, frente a ação dos fenômenos intervenientes no processo de dispersão.

Para atingir o tempo de escoamento ($t=17.000\text{s}$), foi necessário um tempo computacional em torno de 7 dias de processamento ininterrupto. Destaca-se aqui, que este tempo computacional refere-se somente ao tempo de processamento pelo método dos volumes finitos, ou seja, somente após todo o processo de criação da geometria, discretização do volume de controle, definição das condições de fronteira e dos dados de entrada, e dos modelos matemáticos a serem computados pelo programa.

Cenários FA-1 e FA-2:

- Geometria e discretização da área circunvizinha do sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR - CSS com batimetria variável (conforme Carta Náutica n° 1643 da Marinha do Brasil), reproduzida pelo programa GAMBIT;
- o Simulações FA-1 sob as condições da Malha 1; e, Simulação FA-2 sob as condições da Malha 2;
- Velocidade média no eixo longitudinal do CSS igual a $0,5\text{m/s}$ com sentido preferencial a NE (Fontes, 1995);
- Vazão máxima de descarga do efluente para os emissários submarinos igual a $0,208\text{m}^3/\text{s}$ (Cetesb, 2001);
- Densidade média da coluna d'água próxima ao sistema difusor igual a 1026kg/m^3 (Fundespa, 2003);
- Densidade média do efluente equivalente a 1037kg/m^3 (Fundespa, 2002); parâmetro conservativo amônia; fração em massa do elemento (amônia) no efluente igual a 0,0001205, equivalente a uma concentração máxima igual a $125,5\text{mg/L}$ (Fundespa, 2002). Descarga horizontal através de 6 orifícios de seção quadrangular (área equivalente ao orifício circular com diâmetro de $0,15\text{m}$).

Cenário FB - 1:

- Geometria e discretização da área circunvizinha do sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR – CSS com batimetria variável (conforme Carta Náutica n° 1643 da Marinha do Brasil), reproduzida pelo programa GAMBIT;

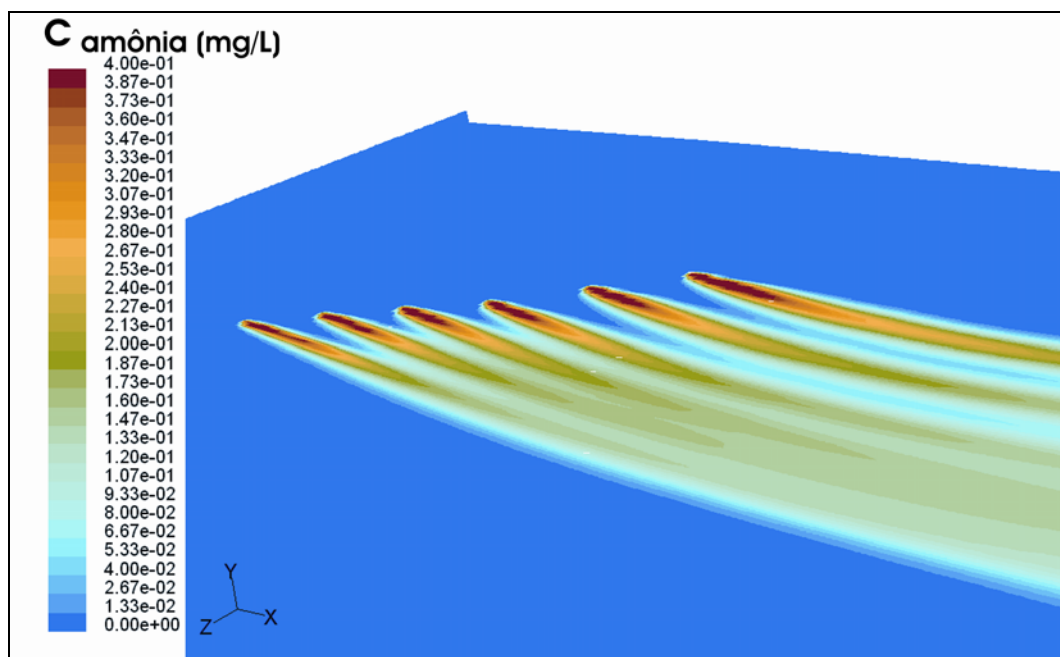


Figura 7 - Detalhamento da vista em planta do escoamento da pluma do efluente rente ao leito de fundo do Canal.

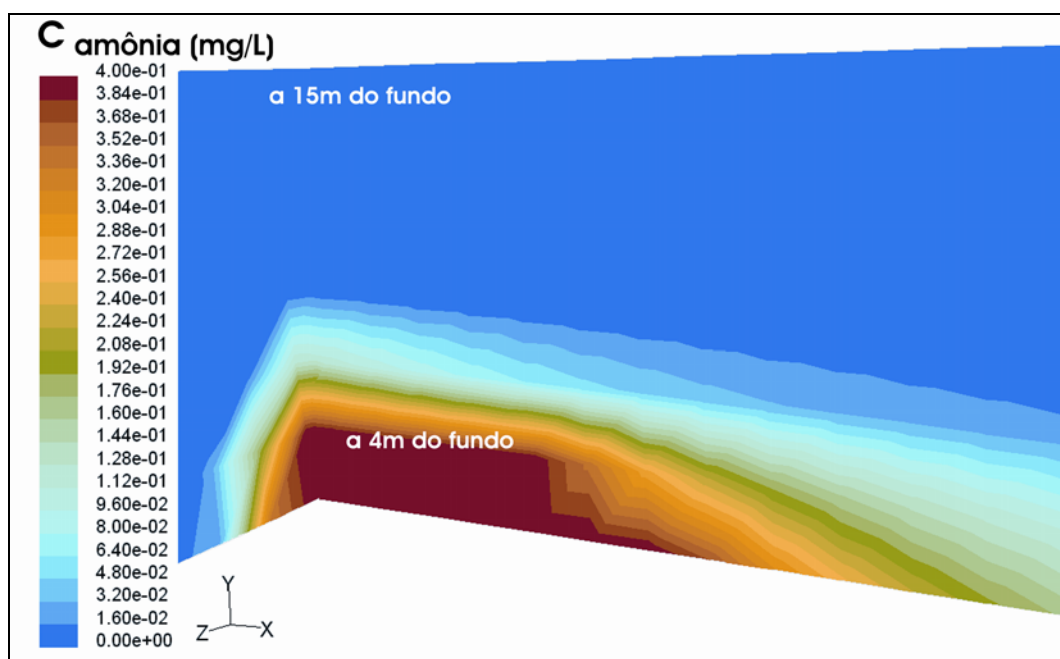


Figura 8 - Imagem em 3D do escoamento da pluma do efluente coincidente ao ponto central do sistema difusor no campo próximo (impacto bêntico).

- o Simulação FB - 1 sob as condições da Malha 1;
- Vazão operacional média de descarga do efluente para os emissários submarinos igual a $0,128 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fundespa, 2003);

Os itens restantes são idênticos ao Cenário FA-1.

Tabela 2 - Resumo das condições de contorno das simulações computacionais do FLUENT.

Cenário	FA-1	FA-2	FB - 1
Malha	1	2	1
Q_{efluente}	$0,208 \text{ m}^3/\text{s}$ (nominal)		$0,128 \text{ m}^3/\text{s}$ (operacional)
V_{ambiente}	$0,5 \text{ m/s}$ no sentido NE		
ρ_{efluente}	1037 kg/m^3		
Parâmetro	Amônia		
C_{efluente}	$125,5 \text{ mg/L}$ (fração em massa da amônia = $0,0001205$)		

Resultados no campo próximo e distante

Campo próximo

As figuras 7 e 8 referem-se ao comportamento hidrodinâmico da pluma no campo próximo (cenário FA-1). Nas figuras está inserida a legenda da faixa de valores de 0 (zero igual a somente água do mar) a $0,4 \text{ mg NH}_3/\text{L}$ limite estabelecido para o padrão de qualidade das águas. Também é apresentado na figura, o eixo x referente ao sentido da corrente; o eixo z a largura do canal; e, o eixo y a profundidade do canal. Como, fisicamente, as demais simulações (FA-2 e FB -1), apresentaram exatamente o mesmo comportamento, tais figuras também podem ser consideradas para os demais cenários.

Na figura 9, apresenta-se a evolução da concentração no eixo da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR para as simulações FA-1, FA-2 e FB -1. Para a obtenção dos valores a jusante do sistema difusor, traçou-se uma linha paralela ao leito de fundo na altura dos orifícios de descarga. Comparando-se as curvas das simulações FA-1 e FA-2, que referem-se as simulações com malhas de menor e maior refinamento, respectivamente, verifica-se uma alteração nos resultados do campo próximo, observando-se que, para a malha com maior refinamento (FA - 2) o processo de dispersão da pluma do

efluente é mais apurado, acarretando valores mais conservadores.

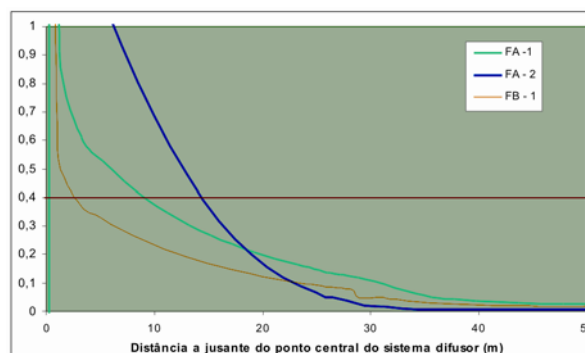


Figura 9 - Gráfico da concentração de amônia a jusante do lançamento até o término do campo próximo. A linha horizontal, em vermelho, representa o limite de $0,4 \text{ mg NH}_3/\text{L}$ estabelecido pela CONAMA 20/86.

O padrão de qualidade das águas para o parâmetro amônia ($0,4 \text{ mg/L NH}_3$ – CONAMA 20/86) é atingido a cerca de 10 a 20m a jusante do ponto central do sistema difusor. Considerou-se o padrão estabelecido pela Resolução CONAMA 20/86, apesar de ter sido revogada pela Resolução CONAMA 357/05, pois o parâmetro amônia, que foi monitorado e analisado tanto no efluente quanto na qualidade das águas, não é especificado na nova resolução, tendo sido substituído pelo Nitrogênio Amônico Total –NAT. Para a simulação FB – 1, que se refere a uma vazão de efluente menor que as demais, a curva está deslocada ligeiramente para a esquerda, o que significa que o padrão de qualidade é atingido mais rapidamente.

Campo distante

Verifica-se, através da figura 10, que a pluma do efluente submerge rapidamente acarretando um forte impacto bêntico, subindo novamente até a alguns metros acima do leito de fundo (aproximadamente 4m).

Tal fenômeno pode ser observado claramente, com os “altos” e “baixos” da concentração da pluma do efluente mostrados na figura 10. Nesta figura os valores de concentração foram obtidos ao longo da pluma para uma altura fixa de 1,5m do fundo.

Os resultados abaixo apresentados referem-se as 3 simulações (FA-1, FA-2 e FB-1) realizadas no FLUENT. O ponto inicial ($x = 0 \text{ m}$), coincide com o ponto central do sistema difusor, a 1,5m do fundo.

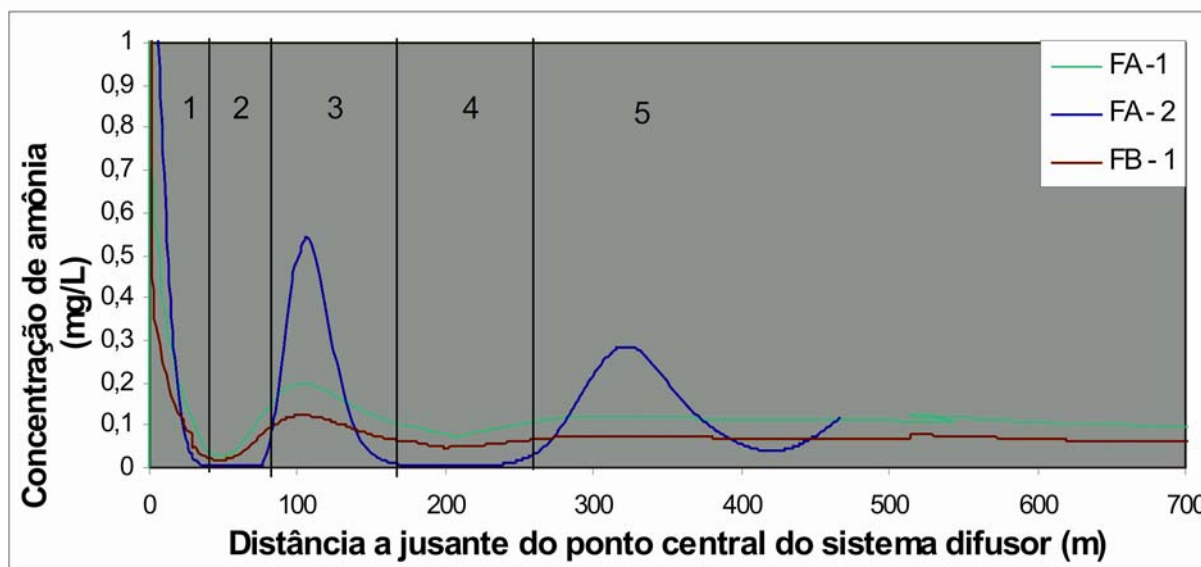


Figura 10 - Concentração da pluma do efluente do TEBAR, a 1,5m acima do leito de fundo, simulados no FLUENT (cenários FA-1, FA-2 e FB - 1).

Destacam-se os seguintes comentários relativos a interpretação dos resultados do processo de dispersão da pluma (figura 10):

1 – Campo próximo: região onde ocorre a elevação da pluma do efluente até cerca de 4m acima dos orifícios (cerca de 5,5m acima do leito de fundo) decorrente da quantidade de movimento na saída do sistema difusor dos emissários submarinos. Devido a alta densidade do efluente, a pluma submerge em torno de 10 a 20 m do lançamento, limitando espacialmente a diluição inicial. Observa-se uma brusca queda nos valores de concentração até o término do campo próximo;

2 – Impacto Bêntico: início da região de forte impacto bêntico decorrente da alta densidade do efluente. Observa-se que a concentração nesta zona é baixa, devido a faixa de análise da dispersão do poluente estar posicionada paralelamente a 1,5m acima do leito de fundo, ou seja, com a submersão da pluma, as concentrações mais elevadas desaparecem temporariamente desta faixa de análise, estando rente a camada bêntica;

3 e 4 – Faixa de Transição: devido ao forte impacto bêntico ocorre um revolvimento da pluma ressurgindo em alturas mais elevadas (da ordem de 3 a 4m do leito de fundo) e submergindo novamente devido a sua elevada densidade. Neste trecho, o fenômeno é similar a oscilação de uma onda (ver figura

10). Observa-se que, com a malha 1 (cenários FA -1 e FB - 1) este efeito é mais suave, ou seja, os fenômenos são menos perceptíveis do que em relação a malha 2 (cenário FA-2).

5 – Campo Distante: início do campo distante, com a estabilização do comportamento hidrodinâmico da pluma, passível somente da ação do ambiente no processo de dispersão.

No final do campo distante, a 750m, para os cenários FA -1 e FB - 1; e a 460m, para o cenário FA-2; os valores de concentração e diluição observados para os 3 cenários foram os seguintes:

Tabela 3 - Valores de concentração e diluição da pluma dos emissários submarinos do TEBAR no final do campo distante, na altura dos orifícios de descarga, para os 3 cenários analisados no FLUENT.

Cenário	Concentração (mg/L)	Diluição
FA - 1	0,0879	1426,6
FA - 2	0,1163	1079
FB - 1	0,0559	2243

Apesar dos resultados da simulação do cenário FA-2 (região 3 da figura 10), onde ocorre o

revolvimento da pluma após o impacto bêntico, ultrapassarem o padrão de qualidade das águas, de uma forma geral, pode-se concluir, através dos cenários simulados, que a amônia atende ao padrão de qualidade das águas a poucos metros do lançamento.

Modelo Computacional CORMIX

O Sistema Especialista *CORMIX* (*Cornell Mixing Zone Expert System*) é um programa de análise e prognóstico do lançamento e dispersão de efluentes domésticos e industriais em diversos tipos de corpos d'água, permitindo a verificação do atendimento dos parâmetros de qualidade da água em relação a legislação vigente. Este sistema baseia-se na técnica do método integral em que equações de derivadas parciais são transformadas em equações diferenciais ordinárias e integradas na seção, a partir do conceito de solução de similaridade aplicado a jatos e plumas turbulentas e admitindo-se distribuição gaussiana de velocidade, temperatura e concentração (Pope, 2000). O programa permite o cálculo dessas variáveis no eixo do jato ou pluma, além de permitir a avaliação de sua largura. Maiores detalhes sobre a aplicação do método são encontrados em Jirka & Doneker, 1991; Jirka & Akar, 1991; Jirka et al, 1996.

Cenários:

Na Tabela a seguir, estão discriminados os principais parâmetros de entrada da simulação para as condições ambientais, do efluente e da geometria do sistema difusor.

Resultados

Para todas as simulações realizadas no CORMIX, o resultado do comportamento físico hidrodinâmico foi similar aos apresentados pelo FLUENT. Devido o efluente possuir alta densidade, $\rho = 1036,7 \text{ kg/m}^3$, o CORMIX indicou um único modelo de classificação de fluxo, com empuxo negativo. Isso representa que, a "força" da descarga (fluxo de saída) é relativamente fraca em relação a profundidade da coluna d'água e ao efeito de flutuação negativa.

Esta constatação foi muito importante no sentido de tornar mais seletiva o uso de DFC, limitando-se o volume de controle na isolínea -10m, conforme mencionado no item 2.3.2 e portanto

reduzindo o custo computacional (Fortis et al, 2005a; Fortis, 2005).

Tabela 4 - Resumo das condições de contorno das simulações computacionais do CORMIX.

Cenários	Verão: estratificação forte linear (1022 a 1026 kg/m³)	
C1	Va = 19,16 cm/s	Qe = 0,128 m³/s
C2	Va = 10,56 cm/s	
C3	Va = 9,7 cm/s	
	Verão: estratificação média linear (1022 a 1025 kg/m³)	
C4	Va = 14,3 cm/s	Qe = 0,128 m³/s
C5	Va = 2,8 cm/s	
C6	Va = 6,7 cm/s	
	Inverno: sem estratificação; densidade uniforme (1022 kg/m³)	
C7	Va = 17 cm/s	Qe = 0,128 m³/s
C8	Va = 95 cm/s	
	Verão: estratificação forte linear (1022 a 1026 kg/m³).	
C9	Va = 50 cm/s	Qe = 0,208 m³/s
C10		Qe = 0,128 m³/s

Observa-se na figura 11 que, para as velocidades de correntes mais baixas (2,8; 6,7; 9,7 e 10,56 cm/s) o limite do campo próximo e o seu efeito na diluição inicial será menor quanto menor for a velocidade da corrente, o que causará um incremento no impacto ambiental ao redor do lançamento, especialmente na camada bêntica, devido a maior concentração local do poluente, o que é favorecido pela fraca ação advectiva do ambiente.

Para a simulação com vazão máxima de projeto igual a 0,208m³/s (Cenário 9), observa-se a mesma tendência de diluição inicial, porém, devido a um volume maior de poluente, esta diluição se dará de maneira mais lenta. Para a velocidade igual a 0,5m/s (intensidade média da corrente no canal) o arraste da pluma é mais significativo, ocasionando o término do campo próximo cerca de 20 a 30m do lançamento.

Analisando-se o término do campo próximo em relação ao perfil de estratificação do meio e a intensidade de corrente, verifica-se que, a densidade do efluente limita a diluição inicial. O jato atinge alturas máximas da ordem de até 4,5m acima do orifício de saída, quando, a partir daí, inicia seu processo de submersão.

Análise comparativa dos resultados da modelagem computacional e do estudo de dispersão com traçador fluorimétrico.

O estudo de dispersão com traçador foi realizado com a aplicação da RODAMINA WT como

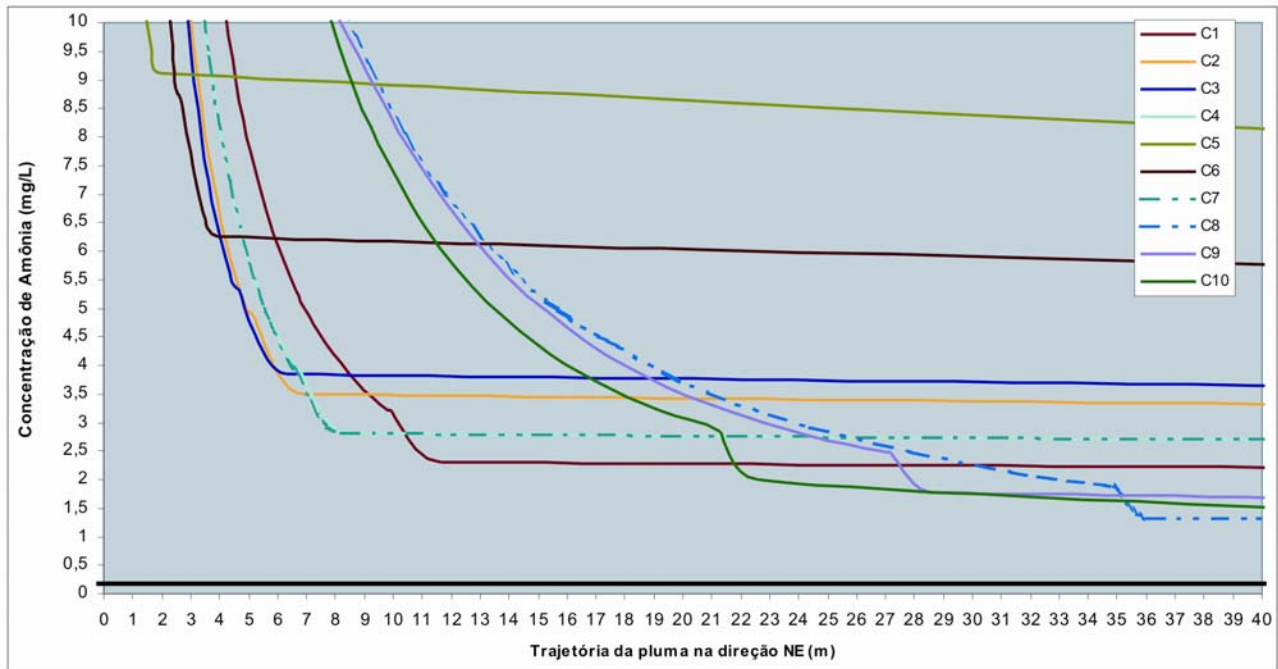


Figura 11 - Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo próximo, para os cenários C1 a C10, com o limite (linha preta, $C = 0,4 \text{ mg/L}$) estabelecido pela Resolução CONAMA 20/86 (para amônia) e Resolução CONAMA 357/05 (para NAT).

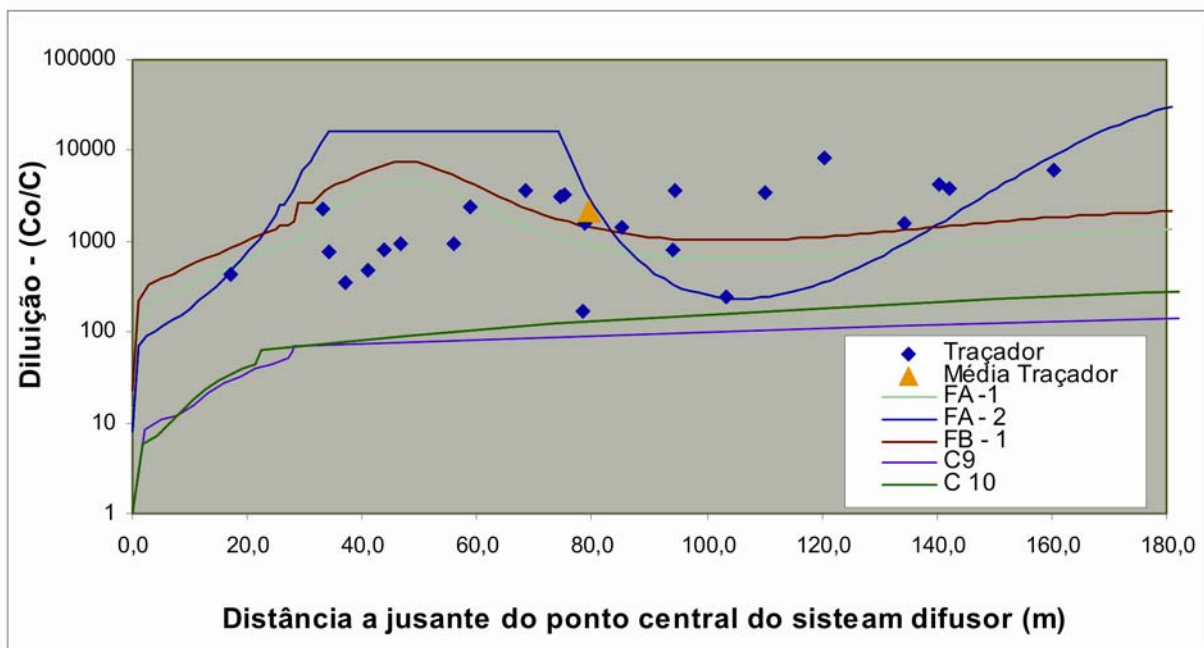


Figura 12 - Análise comparativa da taxa de diluição considerando a aplicação dos programas FLUENT e CORMIX e dos dados de campo do estudo de dispersão com traçador fluorescente.

traçador/corante para esta atividade. O procedimento de lançamento do traçador consistiu na injeção de uma solução saturada a 50% do corante fluorescente *Keyacid Rhodamine WT*, na diluição de 1/10 em água pura, no poço de inspeção do emissário a uma taxa contínua.

No procedimento de amostragem *in situ*, utilizou-se um fluorímetro com sensibilidade de $0,03 \mu\text{g/L}$. As medições correntográficas realizadas para este estudo de dispersão resultaram em uma direção preferencial da corrente no sentido NE (a jusante dos orifícios), ocasionando a advecção da pluma neste sentido, justificando a escolha da localização dos pontos de amostragem para a análise do perfil fluorimétrico na coluna d'água (Fundespa, 2003).

Comparando-se os resultados de simulações no CORMIX com os resultados do FLUENT, observam-se valores muito mais conservadores com maiores concentrações e menores diluições no caso de aplicação do CORMIX (figura 12).

Comparando-se os resultados da taxa de diluição entre as simulações realizadas no FLUENT com os resultados obtidos pela dispersão do corante, tem-se que ambos apresentam ordens de grandeza bem próximas (Fortis, 2005).

CONCLUSÕES

Pode-se concluir que, a modelagem computacional é uma poderosa ferramenta de aplicação para:

- o entendimento do comportamento hidrodinâmico da pluma do efluente industrial dos emissários submarinos do TEBAR;
- o estabelecimento de melhorias do sistema de tratamento visando ao atendimento à legislação de qualidade dos corpos d'água e a minimização dos impactos ambientais na coluna d'água e no sedimento;
- a orientação de planos de monitoramento de qualidade das águas.

O presente trabalho mostra claramente que a densidade do efluente em função de sua alta salinidade condiciona a dispersão da pluma próxima ao fundo do canal, percorrendo grandes distâncias nessa situação. Esse resultado indica que o maior efeito dessa descarga se dá principalmente na cama-

da bêntica desse corpo d'água, onde se deve concentrar os maiores esforços das pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, C.M.. *Uso e ocupação do solo na zona costeira do Estado de São Paulo, uma análise ambiental*. FAPESP, 185p. 1999.
- ARASAKI, E.; ORTIZ, J.P. *Sistemas predominantes de tratamento de esgoto na costa paulista – metodologia para a tomada de decisão*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PHD/132, 20p., 2004.
- CETESB. *Caracterização qualitativa dos despejos líquidos do Terminal Marítimo Almirante Barroso- TEBAR da Petrobrás Brasileiro S.A. Petrobrás*. Relatório técnico nº 010/01/EEAL São Paulo, 2001.
- FLUENT INC. *Tutorial*. Version 6.1.22. 2003.
- FONTES, R.F.C. *As correntes no Canal de São SEBASTIÃO*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 159p., 1995.
- FORTIS, R.M. *Modelagem computacional da dispersão da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR – PETROBRÁS*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 188p., 2005.
- FORTIS, R.M.; ORTIZ, J.P.; LAMPARELLI, C.C.; NIETO, R. *Modelagem computacional da dispersão da pluma do efluente do Tebar – Petrobras*. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa, Brasil, 2005a.
- FORTIS, R.M.; ORTIZ, J.P.; LAMPARELLI, C.C.; NIETO, R. *Computer modelling dispersion plume of Tebar - Petrobrás submarine outfall*. XXXI IAHR Congress. Korea, 2005b.
- FUNDESPA. *Estudo das condições de dispersão dos efluentes do sistema de emissários submarinos do Terminal Aquaviário de São Sebastião – PETROBRÁS/TRANSPETRO*, 2003.
- FUNDESPA. *Monitoramento Ambiental do Emissário do Terminal Aquaviário de São Sebastião - Relatório Técnico Final*. São Paulo, 2002.
- JIRKA, G.H.; DONEKER, R.L.. *Hydrodynamic classification of submerged single-port discharges*. Journal of Hydraulic Engineering (117), nº 9, p. 1095 – 1111, 1991.
- JIRKA, G.H.; AKAR, P.J.. *Hydrodynamic classification of submerged multiport-diffuser discharges*. Journal of Hydraulic Engineering (117), nº 9, p. 1113 - 1128, 1991.
- JIRKA, G.H.; DONEKER, R.L.; HINTON, S.W. *User's manual for CORMIX: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into*

- surface waters. DeFrees Hydraulics Laboratory, Cornell University, Ithaca, New York, 1996.
- MARCELINO, E.B.; ORTIZ, J.P. Sistematização dos projetos de emissários submarinos da SABESP e avaliação de desempenho através do modelo computacional CORMIX. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. BT/PHD/79, 20p., 2001.
- ORTIZ, J.P.; BESSA, K.L. Modelagem computacional de descarga de efluente em canal com análise dos campos próximo e distante. In: IAHR – Congresso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, SP, Brasil, 2004.
- POPE, S.B. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press. First Edition, 771p., 2000.
- RAGAS, A.M.J.; LEUVEN, R.S.E.W. *Modelling of water quality-based emission limits for industrial discharges in rivers*. Water Science Technology. Vol. 39, 1999.
- SILVA, L.S.; MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M. Relatório do projeto “Oceanográfico da Plataforma Interna de São Sebastião” (OPISS). Relatórios Técnicos do Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo, Vol. 47, 31p., 2001.
- VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics – The finite volume method*. Prentice Hall, 257 p., 1995.

provides dilution results of the plume in the near and far field, allowing analysis of the effects of variable bathymetry. (Nautical Map nº 1643 - Marinha do Brasil).

The results showed an effluent plume with negative buoyancy, submerging a few meters after discharge, causing strong benthic impact in the vicinity of the submarine outfall. The dispersion results from FLUENT agreed with the field fluorimetric dispersion study, but the dispersion results of CORMIX were extremely conservative compared with the same field results.

Key-words: submarine outfalls, computer modeling, São Sebastião Channel.

Submarine Outfalls Of TEBAR – PETROBRAS: Computational Analysis Of Effluent Plume Dispersion

ABSTRACT

Almirante Barroso Oil Terminal – TEBAR, belonging to Petrobrás, is located at São Sebastião Channel – CSS, and discharges effluents through two submarine outfalls of High Density Polyethylene – HDPE. Both of them have three risers, 0.15m in diameter and 1.5m high, and are located at a depth of 19.15m to 25.45m. The mean current intensity is between 0.40m/s and 0.60m/s in the NE direction. The effluent has high concentrations of ammonia (maximum 125.5mg/L in April 2001), higher than the emission standard established by CONAMA Resolution 20/86 (5.0 mg/L), and a high salinity concentration.

To understand the ammonia dispersion process and the hydrodynamic profile of the TEBAR submarine outfall effluent plume, computer modeling was used as a modern tool to support the decision of the environmental agency and Petrobras, in order to verify the standard water quality. Two different computer techniques are used in the present work: integral method (software CORMIX, which leads to the dilution results of the plume in the near field; and finite volume methods (software FLUENT), which