UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA

RICARDO DE MATTOS FORTIS

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA DISPERSÃO DA PLUMA DO EFLUENTE DOS EMISSÁRIOS SUBMARINOS DO TEBAR - PETROBRÁS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

SÃO PAULO
2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E SANITÁRIA

RICARDO DE MATTOS FORTIS

MODELAGEM COMPUTACIONAL DA DISPERSÃO DA PLUMA DO EFLUENTE DOS EMISSÁRIOS SUBMARINOS DO TEBAR - PETROBRÁS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica

Orientador: Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz

SÃO PAULO
2005

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 06 de janeiro de 2006.

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Fortis, Ricardo de Mattos
Modelagem Computacional da Dispersão da Pluma dos Emissários Submarinos do TEBAR – PETROBRÁS /
Ricardo de Mattos Fortis. – São Paulo, 2005.
181p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil.

1.Emissário Submarino 2.Modelagem Computacional 3. Canal de São Sebastião.
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sérgio e Vera.

AGRADECIMENTOS

Ao Profº Dr. Jayme Pinto Ortiz, que mostrou-me os percursos hidrodinâmicos seguros que deveriam ser seguidos para a realização desta dissertação.

A Bióloga Dra. Claudia Conde Lamparelli - Gerente do Setor de Águas Litorâneas da CETESB, pela valiosa contribuição direta na realização desta Dissertação.

Ao Eng. MSc. Kleiber Lima de Bessa e a Bióloga Dra. Emilia Arasaki, pelo incentivo e apoio em todas as etapas deste trabalho.

Aos demais colegas do Grupo de Mecânica dos Fluidos aplicada às Ciências Ambientais e Bioengenharia: Daniel, Edward e Christian.

Ao Prof. Dr. Paolo Alfredini que, como componente da Comissão Julgadora, deu valiosa contribuição na realização deste trabalho.

Ao Eng. Dr. José Eduardo Bevilacqua – Gerente da Divisão de Qualidade das Águas e ao Eng. Dr. Regis Nieto – Gerente do Setor de Efluentes Líquidos, da CETESB.

Aos colaboradores do Setor de Águas Litorâneas, em especial à Bióloga MSc. Débora Orgler de Moura, e aos Técnicos do Setor de Amostragem de Efluentes Líquidos da CETESB .

Ao Profº Dr. Robert Doneker e ao Eng. Tobias Blenninger da Universidade de Karlsruhe, pelas estimadas contribuições referentes ao *software* CORMIX.

Aos meus pais Sérgio e Vera, a minha irmã Valéria e a minha namorada Érica, cuja presença são fundamentais todo o dia.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS
LISTA DE SÍMBOLOS
RESUMO
ABSTRACT

CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES GERAIS
1.1. Introdução 01
1.1.1. Emissário Submarino 04
1.1.2. Legislação Brasileira: Resolução CONAMA 20/86 e Resolução CONAMA 357/05 07
1.1.3. Zona de Mistura Regulatória 11
1.2. Objetivos 14

CAPÍTULO II – PROJETO, INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS COM SISTEMAS DIFUSORES
2.1. Critérios de Projeto e Dimensionamento 15
2.1.1. Levantamento da rota subaquática 15
2.1.2. Tipos de material de construção: vantagens e desvantagens 17
2.1.3. Hidráulica interna de difusores 27
2.1.3.1. Parâmetros básicos de projeto de sistemas difusores 29
2.1.3.2. Análise hidráulica detalhada 30
2.1.3.3. Hidráulica dos difusores com válvulas de orifício variável (válvulas *duckbill*) 35
2.1.4. Principais aspectos de dimensionamento de projeto para tubos de PEAD 48
2.2. Técnicas de Instalação 50
2.2.1. *Float-and-Sink* 50
2.2.1.1. Modelos, dimensionamento e instalação dos pesos de lastro para tubulações de PEAD 52
2.2.1.2. A instalação dos Emissários Submarinos do TEBAR 64
2.2.2. Outras técnicas de instalação 67

2.2.2.1 *Pulling / Bottom Pull* 67
2.2.2.2.. *Pipe-by-Pipe* 69
2.2.2.3. Técnicas alternativas 71
2.3. Manutenção de emissários submarinos e sistemas difusores 75
2.3.1. Inspeções Periódicas 75
2.3.2. Fenômenos *flooding* e *purging* 78
2.3.3. Limpeza externa e interna 82

CAPÍTULO III – MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA A MODELAGEM COMPUTACIONAL DA DISPERSÃO DA PLUMA DE EFLUENTES
3.1. Processos intervenientes a disposição oceânica no estabelecimento do campo próximo e do campo distante. 85
3.2. Modelo computacional CORMIX 87
3.2.1. Introdução 87
3.2.2. Geometria de sistemas difusores multiorifícios 88
3.2.3. Descrição do modelo matemático CORMIX 2 93
3.3. Modelo Computacional FLUENT 97
3.3.1. Introdução 97
3.3.2. Descrição do Método dos Volumes Finitos 99
3.3.2.1 Equações governantes de escoamento de fluidos 99
3.3.2.2. Modelo k/e de turbulência 103
3.3.2.3. Modelagem de transporte de espécies químicas 104
3.4. Análise dos modelos matemáticos computacionais utilizados para o estudo da dispersão da pluma de efluentes: CORMIX e FLUENT 107

CAPÍTULO IV - MATERIAL E METODOLOGIA
4.1. Estudo de Caso: Terminal Aquaviário de São Sebastião – TEBAR 111
4.1.1. Descrição do Empreendimento 111
4.1.1.1 Emissário Submarino do TEBAR 113
4.1.1.2. Sistema de Tratamento de Efluentes 114
4.1.2. Características geográficas e hidrológicas do Canal de São Sebastião 116
4.1.3. Análise do parâmetro amônia na qualidade do efluente 118
4.1.4. Análise do parâmetro amônia na qualidade das águas do Canal de São Sebastião 120

CAPÍTULO V – RESULTADOS
5.1. Cálculo da hidráulica interna de difusores dos emissários submarinos do TEBAR 125
5.1.1. Resultados analíticos 125
5.2. Modelo computacional CORMIX 129
5.2.1. Cenários 129
5.2.2. Resultados 132
5.3. Modelo Computacional FLUENT 139
5.3.1. Construção e discretização da geometria do Canal de São Sebastião (batimetria) – *software* Gambit 139
5.3.2. Cenários 149
5.3.3. Resultados 152
5.4. Análise comparativa dos resultados da modelagem computacional e estudo de dispersão com traçador fluorimétrico. 166

CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES 170

CAPÍTULO VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 174

LISTA DE FIGURAS pág.

Figura 1.1: Configuração de um emissário submarino com sistema difusor 05

Figura 1.2: Esquematização da zona de mistura regulatória com dois níveis de critérios proposto pela USEPA 12

Figura 2.1: Área de construção dos tubos de concreto reforçado (10m de comprimento, diâmetro interno de 1600 mm e espessura da parede de 200 mm) do emissário de Thessaloniki, Grécia 21

Figura 2.2: Linhas de emissário de PEAD 23

Figura 2.3: Conexão de tubulação de ferro fundido através de juntas *ball-and-socket* 25

Figura 2.4: Comparativo do processo de intrusão de cunha salina e sedimentos para o interior da tubulação entre orifícios simples e a utilização de válvulas *duckbill*) 36

Figura 2.5: Relação da vazão com a abertura do bocal da válvula *duckbill*, em relação a válvulas de área fixa 37

Figura 2.6: Relação da vazão com a velocidade efetiva do jato através da válvula *duckbill*, em relação a válvulas de área fixa 38

Figura 2.7: Relação da vazão com a perda de carga total, utilizando-se válvula *duckbill*, em relação a válvulas de área fixa 38

Figura 2.8: Válvula duckbill EVR Check Valve, série CPF 40

Figura 2.9: Modelo de válvula *duckbill* com bico curvado, para prevenção máxima a entrada de sedimentos em áreas de erosão ou alagadas 43

Figura 2.10: Válvula *duckbill Tideflex Effluent Diffuser* 44

Figura 2.11: Fixação com flange quadrada na estrutura da tubulação e modelo com cotovelo a 45º 46

Figura 2.12: Risers e válvulas *duckbill* de material elastomérico, anexados ao tubo de PEAD 47

Figura 2.13: Válvula de controle de liberação de ar do interior da tubulação 51

Figura 2.14: Afundamento da tubulação de PEAD com colares de lastro anexados 51

Figura 2.15: Colar de lastro de concreto retangular 53

Figura 2.16: Colar de lastro com base em concreto e chapa de ferro 54

Figura 2.17: Colar de lastro de concreto piramidal 55

Figura 2.18: Modelos de colares de lastro com identificação das seções referentes ao dimensionamento da Tabela 4 57

Figura 2.19: Colchão de lastro para estabilização de tubulação submarina 58

Figura 2.20: Gráfico da relação entre máximo espaçamento de lastro e diâmetro Externo 60

Figura 2.21: Esquema de instalação de pesos de lastro em tubos de PEAD 63

Figura 2.22: Planta de **l**ocalização dos emissários submarinos do TEBAR acompanhando a estrutura do píer até a parte sul 66

Figura 2.23: Sistema de rampa com rolamentos 68

Figura 2.24: Inclinação da rampa de lançamento emissário de Kadikoy, Istanbul, Turquia 68

Figura 2.25: Estrutura de instalação "Horse" utilizada para assentar seções de tubos pesando 283kN, do emissário de Thessaloniki, Grécia (SPYROPOULOS, 2003) 70

Figura 2.26: Esquema ilustrativo da instalação pelo processo *off bottmo tow* para tubos de plástico reforçado com fibra de vidro 72

Figura 2.27: Mapa da Baía de Chesapeake. 76

Figura 2.28: Emissário de concreto danificado, e novos tramos com cintas de amarração 76

Figura 2.29: Substituição da tubulação vertical – *risers* com braçadeiras de apoio 77

Figura 2.30: Seção difusora com perda de material de recobrimento por ação hidrodinâmica 77

Figura 2.31: Esquema ilustrativo de limpeza interna de tubo por *pigging* 83

Figura 3.1: Esquematização das condições geométricas e do ambiente nas vizinhanças do lançamento 92

Figura 3.2: As imagens **a** (vista em 3D), **b** (vista lateral) e **c** (vista em planta), correspondem a configuração geométrica unidirecional com os orifícios perpendiculares ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor ($\beta = 90°$). As imagens **d** (vista em 3D), **e** (vista lateral) e **f** (vista em planta), correspondem a configuração geométrica unidirecional com os orifícios mais ou menos perpendiculares ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor – em foram de leque ($\beta \cong 90º$) 93

Figura 3.3: As imagens g (vista em 3D), h (vista lateral) e i (vista em planta), correspondem a configuração geométrica onde os orifícios apontam alternadamente e em direção oposta perpendicular em relação a estrutura física do sistema difusor ($\beta = \pm 90°$). As imagens j (vista em 3D), k (vista lateral) e l (vista em planta), correspondem a configuração geométrica onde os orifícios apontam alternadamente e em direção oposta, em ângulos que variam de $\pm 90°$ 94

Figura 3.4: As imagens m (vista em 3D), n (vista lateral) e o (vista em planta), correspondem a configuração geométrica em série, onde os orifícios apontam na direção da estrutura física do sistema difusor ou com pequenos ângulos de abertura, formando um leque, como visto acima (β=30º) 95

Figura 3.5: Perfis representativos de densidade estáveis no ambiente aquático 98

Figura 3.6: Exemplo de Volume de Controle, representado por uma célula hexaédrica quadrada, onde consideramos as faces N, S, L, O, T e C, como sendo: Norte, Sul, Leste, Oeste, Teto e Chão, respectivamente, em relação ao ponto central do volume na coordenada (x,y,z) 101

Figura 4.1: Disposição das 2 linhas do emissário submarino em relação ao píer de acesso e o pier sul. (Fundespa, 2003a) 112

Figura 4.2: Vista do Píer Sul onde o sistema difusor dos emissários submarinos estão assentados no leito de fundo 114

Figura 4.3: Resultados do parâmetro amônia das amostras coletadas no efluente tratado do TEBAR durante o período de abril de 2000 a março de 2002 119

Figura 4.4: Posicionamento das estações oceanográficas no canal de São Sebastião e localização do Terminal TEBAR 121

Figura 4.5: Posicionamento das estações oceanográficas amostradas trimestralmente na área de dispersão do emissário submarino 122

Figura 4.6: Concentrações máximas, médias e mínimas, de amônia, determinadas nos pontos apresentados nas figuras 4.4 e 4.5 124

Figura 5.2.1: Esquematização retangular da área circunvizinha ao sistema difusor do Emissário Submarino do TEBAR. Observa-se que o modelo exige uma simplificação, não possibilitando representar a batimetria do Canal de São Sebastião 130

Figura 5.2.2: Fluxograma de classificação de fluxo com empuxo negativo em camada de ambiente uniforme (classes MNU). O tipo MNU2 é a classe de fluxo determinada em todos os cenários apresentados 133

Figura 5.2.3: Vista lateral da pluma no campo próximo referente ao Cenário C9 134

Figura 5.2.4: Vista lateral em planta no campo distante referente ao Cenário C9 134

Figura 5.2.5: Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo próximo, para os cenários C1 a C10 137

Figura 5.2.6: Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo próximo, para os cenários C1 a C10, com o limite (linha preta, C = 0,4mg/L) estabelecido pela Resolução CONAMA 20/86 (para amônia) e Resolução CONAMA 357/05 (para NAT) 137

Figura 5.2.7: Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo distante (até 915m), para os cenários C1 a C10 138

Figura 5.2.8: Diluição da amônia a jusante do lançamento, no campo próximo (até 100m), para os cenários C1 a C10 138

Figura 5.3.1: Carta Náutica n° 1643 – Canal de São Sebastião (parte Norte), com perímetros dos dois volumes de controle (Linha preta – Malha 1; Linha azul – Malha 2), criados no *software* GAMBIT 139

Figura 5.3.2: Tela principal do *software* GAMBIT 140

Figura 5.3.3: Vista lateral da geometria do CSS (Malha 1) a partir da cota –10m de profundidade, com os 6 orifícios de saída plotados. Geometria realizada no *software* GAMBIT 143

Figura 5.3.4: Vista em planta da geometria do CSS (Malha 1) a partir da cota –10m de profundidade, com os 6 orifícios de saída plotados. Geometria realizada no *software* GAMBIT 143

Figura 5.3.5: Vista lateral da geometria do CSS (Malha 2) a partir da cota –10m de profundidade, com os 6 orifícios de saída plotados. Geometria realizada no *software* GAMBIT 144

Figura 5.3.6: Vista em planta da geometria do CSS (Malha 2) a partir da cota –10m de profundidade, com os 6 orifícios de saída plotados. Geometria realizada no *software* GAMBIT 144

Figura 5.3.7: Detalhamento da malha estruturada hexaédrica Malha 1, de uma parte da geometria do CSS, realizada no *software* GAMBIT 145

Figura 5.3.8: Detalhamento da malha estruturada hexaédrica da Malha 1 na região próxima aos seis difusores do Emissário Submarino do TEBAR, realizada no *software* GAMBIT146

Figura 5.3.9: Detalhamento da malha estruturada hexaédrica da Malha 2, de uma parte da geometria do CSS, realizada no *software* GAMBIT 147

Figura 5.3.10: Condições de fronteira estabelecidas na geometria do CSS, realizada no *software* GAMBIT 148

Figura 5.3.11: Perfil transversal do escoamento da pluma do efluente. As 6 primeiras seções transversais estão coincidentes aos 6 orifícios de descarga (difusores) do emissário Submarino 152

Figura 5.3.12: Perfil longitudinal do escoamento da pluma do efluente coincidente aos 6 orifícios de descarga do emissário submarino do TEBAR 153

Figura 5.3.13: Perfil longitudinal do escoamento da pluma do efluente coincidente ao ponto central do sistema difusor no campo próximo (impacto bêntico) 153
Figura 5.3.14: Imagem em 3D do escoamento da pluma do efluente coincidente ao ponto central do sistema difusor no campo próximo (impacto bêntico) 154
Figura 5.3.15: Imagem 3D do escoamento da pluma do efluente rente ao leito de fundo do Canal 154
Figura 5.3.16: Detalhamento da vista em planta do escoamento da pluma do efluente rente ao leito de fundo do Canal 155
Figura 5.3.17: Gráfico da concentração de amônia a jusante do lançamento até o término do campo próximo, para o Cenário FA-1. A linha vermelha representa o limite de 0,4mg NH_3/L estabelecido pela CONAMA 20/86 156
Figura 5.3.18: Gráfico da concentração de amônia a jusante do lançamento até o término do campo próximo, para o Cenário FA-2. A linha vermelha representa o limite de 0,4mg NH_3/L estabelecido pela CONAMA 20/86 157
Figura 5.3.19: Gráfico da concentração de amônia a jusante do lançamento até o término do campo próximo, para o Cenário FB - 1. A linha vermelha representa o limite de 0,4mg NH_3/L estabelecido pela CONAMA 20/86 157
Figura 5.3.20: Vista geral da geometria do canal (contorno em linhas cinzas) com as 6 seções longitudinais coincidentes aos 6 orifícios de descarga do emissário submarino do TEBAR 158
Figura 5.3.21: Perfil longitudinal do escoamento da pluma do efluente coincidente aos 6 orifícios de descarga do emissário submarino do TEBAR, a partir de cerca de 250m dos orifícios 159
Figura 5.3.22: Perfil longitudinal do escoamento da pluma do efluente coincidente aos 6 orifícios de descarga do emissário submarino do TEBAR, a cerca de 450m do 1° orifício (mais próximo a amargem) e de 600m do 6° orifício (mais afastado da margem) 159
Figura 5.3.23: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 0,05s 160
Figura 5.3.24: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 0,5s 160
Figura 5.3.25: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 2,5s 161
Figura 5.3.26: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 7,5s 161
Figura 5.3.27 Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 29,5s 162
Figura 5.3.28: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 53,5s 162
Figura 5.3.29: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 81,5s 163
Figura 5.3.30: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 105,5s 163

Figura 5.3.31: 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) 164

Figura 5.4.1.: Posição dos pontos de amostragem dos perfis hidrográficos (temperatura, salinidade, densidade e fluorescência) em vermelho e a posição dos "*risers*" em azul (1s, 2s e 3s – linha sul , 1n – linha norte), para a Campanha 1 167

Figura 5.4.2.: Posição dos pontos de amostragem dos perfis hidrográficos (temperatura, salinidade, densidade e fluorescência) em vermelho e a posição dos "*risers*" em azul (1s, 2s e 3s – linha sul , 1n – linha norte), para a Campanha 2 167

Figura 5.4.3: Análise comparativa da taxa de diluição entre o *software FLUENT* e *CORMIX* e estudo de dispersão com traçador fluorescente 169

Figura 6.1: Comparação dos resultados entre o CORMIX e FLUENT, no campo próximo 171

Figura 6.2: Comparação dos resultados entre o CORMIX e FLUENT, no campo distante 172

LISTA DE TABELAS pág.

Tabela 1: Padrões de qualidade das águas e do lançamento de efluentes dos parâmetros amônia (Resolução CONAMA 20/86) e NAT – Nitorgênio Amoniacal Total (Resolução CONAMA 357/05). 10

Tabela 2: Valores das seções da válvula *duckbill* em função do diâmetro interno 41

Tabela 3: Características mecânicas do material PEAD 48

Tabela 4: Fator de correção da pressão de flambagem em relação a ovalização 49

Tabela 5: Valores de dimensionamento dos colares de lastro 56

Tabela 6: Critérios de decisão entre o *software* CORMIX e FLUENT 110

Tabela 7: Posicionamento dos emissários submarinos 113

Tabela 8: Comparativo dos padrões de emissão com os resultados das análises físico-químicas do efluente do Tebar 120

Tabela 9: Resumo das principais variáveis selecionadas para os cenários simulados no CORMIX 131

Tabela 10: Resultados dos cenários simulados, no campo próximo e distante 135

Tabela 11: Dimensões dos volumes 1 e 2 criados para as simulações computacionais do FLUENT 142

Tabela 12: Resumo das condições de contorno das simulações computacionais do FLUENT 151

Tabela 13: 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 165

Tabela 14: Resultado dos perfis fluorimétricos 168

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{or} - área do orifício (m^2)

C - concentração (mg/L)

C_d - coeficiente de descarga

C_0 - concentração inicial (mg/L)

D_i - diâmetro interno (m)

D_e – diâmetro externo (m)

D – diluição

D_0 - diluição inicial

D_{or} - diâmetro do orifício (m)

D_r - diâmetro do *riser* (m)

e – espessura (m)

Fr_d - número de Froude densimétrico

F - fator de atrito de Darcy-Weisbach

g - aceleração gravitacional (m/s^2)

$g' = \dfrac{g\Delta\rho}{\rho_e}$ - aceleração da gravidade modificada (m/s^2)

H - carga média total na tubulação (m)

H - altura do corpo d'água nas proximidades do lançamento (m)

h - altura do orifício de saída do difusor em relação a parede externa da tubulação.

h_i - perda de carga distribuída (m)

J_0 – fluxo de empuxo (m^4/s^3)

j_0 – fluxo de empuxo por quantidade de movimento (m^3/s^3)

k - fator de afundamento

L_D – comprimento da seção difusora (m)

M_0 - fluxo de quantidade de movimento (m^4/s^2)

m_0 - fluxo de quantidade de movimento por unidade de comprimento (m^3/s^2)

N - número total de difusores

n - n *ésimo* difusor

n = 1 - difusor mais afastado da margem

p - pressão na tubulação (kgf/cm^2)

Q - vazão (m^3/s)

Q_o; Q_e - vazão do efluente (m^3/s)

q_0 – fluxo de volume por unidade de comprimento (m^2/s)

s – espaçamento entre orifícios (m)

S - espaçamento entre lastros (m)

u_a; V_a – velocidade da corrente (m/s)

V - velocidade de descarga na tubulação (m/s)

v_j - velocidade do jato (m/s)

z_{s1} - profundidade da superfície até a linha de centro do primeiro orifício (m)

z_{sn} - profundidade da superfície até a linha de centro do $n_{ésimo}$ orifício (m)

ρ_a – massa específica da água (kg/m^3)

γ_a - peso específico do líquido ambiente (kgf/m^3)

γ_e - peso específico do efluente (kgf/m^3)

θ - ângulo de inclinação da tubulação ou orifício com a horizontal

σ - ângulo orientado no sentido anti-horário em relação a direção do escoamento do fluxo do ambiente

β - ângulo de orientação em relação ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor

ν - viscosidade cinemática (m^2/s)

$\Delta\rho = \rho_a - \rho_e$ - diferença da massa específica entre o ambiente e o efluente

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 com sistema difusor, ambos de polietileno de alta densidade - PEAD. Cada seção 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 a 0,60m/s, com direção preferencial NE. O efluente possui altas concentrações de amônia (máxima de 125,5,mg/L em abril de 2001) que ultrapassam o padrão de emissão estabelecido pela Resolução Conama 20/86 (Artigo 21 - 5,0mg 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 como uma ferramenta de análise do processo da dispersão de efluentes em corpos d'água, e também como suporte na decisão das agências ambientais e dos processos industriais frente a exigência de atendimento à legislação. Dois diferentes métodos foram utilizados, o método integral (*software* CORMIX) e o método dos volumes finitos (*software* FLUENT). O CORMIX é um programa especialista largamente utilizado na análise do campo próximo do lançamento de efluentes por emissários submarinos, enquanto que, no FLUENT pode-se considerar os efeitos da batimetria (Carta Náutica n^0 1643 da Marinha do Brasil) e analisar tanto o campo próximo quanto o campo distante.

Os resultados de ambos os métodos apresentaram uma pluma com empuxo negativo, que submerge após alguns metros do lançamento, acarretando em um forte impacto bêntico na área circunvizinha do sistema difusor. Os resultados da dispersão do contaminante apresentados pelo CORMIX, para este estudo, foram extremamente conservadores, onde o padrão de qualidade das águas somente é atingido a grandes distâncias do lançamento (200m). Os resultados do FLUENT estão de acordo com os estudos de monitoramento da qualidade da água e de diluição de traçadores fluorimétricos, atingindo o padrão de qualidade das águas a poucos metros do lançamento (15m).

ABSTRACT

The Almirante Barroso Oil Terminal – TEBAR, property of Petrobrás, is located at São Sebastião Channel – CSS, which effluent is discharged through two submarine outfalls build of HDPE – High Density Polyethylene. Both of them has three risers with 0.15m of diameter and 1.5m of height, and are located between 19.15m and 25.45m of depth. The medium current velocity is between 0.40m/s and 0.60m/s to northward (NW). The effluent was sampled from April 2000 to March 2002 by Petrobrás. In this period, it was founded high concentrations of ammonia (125.5mg/L in April 2001), trespassing the limit value for emission of CONAMA 20 Resolution – Art.21 (5mg/L). The salinity of effluent is of order 52.8% at a temperature of 27.3ºC for the same period. This range of values results in a density of 1037 kg/m^3.

Computer modeling uses for the waste water dispersion process and the hydrodynamic profile description in water bodies is a modern tool as a decision support for the environmental agencies and for the industries in order to verify the standard water quality. Two different computer techniques are used in this present work, integral methods (*software* CORMIX)), which conduct to the dilution results of the plume in the near field, and finite volume methods (*software* FLUENT) where its possible to analyze the effects of a variable batimetries (Nautical Map n^0 1643 - Marinha do Brasil) and to consider the near and far dispersion process.

Both softwares showed that effluent plume has negative buoyancy, ocurring a strong impact benthic in the vicinity area of submarine outfall. The FLUENT application permits obtain results for *near-field* and *far-field* with no restrictions of bathymetry and port discharge geometry but the computational cost is higher compared with classical software used to prevent plume dispersion from submarine outfalls and which are based in gaussian integral methods (CORMIX). In this present work, the CONAMA 20 Resolution for ammonia (C = 0,4mg/L) is attended around 15m for FLUENT and 200m for CORMIX, far from ports.

CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1. INTRODUÇÃO

A região litorânea do Estado de São Paulo, a cada ano, apresenta um aumento no contigente populacional, fixo e flutuante, devido às oportunidades profissionais, comerciais, e de lazer e turismo. Decorrente da falta de planejamento territorial e a aplicação de políticas de desenvolvimento social e econômico, a região é vítima de uma série de impactos ambientais que ao longo do tempo vem comprometendo o uso do solo e a qualidade das águas.

Segundo AFONSO (1999), podemos classificar os impactos ambientais ou problemas ambientais emergentes no litoral paulista, em três categorias:

- Perda dos recursos natural, histórico e cultural:
  - contaminação das águas superficiais, das águas subterrâneas e do solo; contaminação dos manguezais; e, contaminação do ar; provocadas pela existência do Pólo Industrial de Cubatão, do Porto de Santos e de São Sebastião, fontes difusas decorrentes da disposição inadequada dos efluentes sanitários urbanos e dos resíduos sólidos, e de fontes pontuais provenientes principalmente das indústrias e dos emissários submarinos.
  - desmatamentos para construção de loteamentos, áreas de mineração e a extração vegetal (palmito, banana, plantas ornamentais, etc...);
  - pesca indiscriminada e em locais proibidos; e,
  - extração mineral de areia e de pedras.
- Conflitos de uso do solo:
  - Presença de urbanização desordenada, indústrias e portos em áreas de conservação ou próximas a ecossistemas sensíveis.

    A sensível interrelação entre turismo, lazer e atividades portuárias verifica-se, como exemplo, no Canal de São Sebastião, local com alta procura pelo turismo de Ilhabela e que sofre com a iminência de derramamentos de óleo provenientes do terminal petrolífero – TEBAR (Terminal Almirante Barroso da PETROBRÁS S.A.), e da descarga dos efluentes líquidos domésticos provenientes dos três emissários submarinos da SABESP e do emissário submarino de efluente industrial do TEBAR. Tal problema também ocorre, e ainda de forma mais acentuada na Baixada Santista.

- Riscos de acidentes:
  - Acidentes em áreas industriais e portuárias;
  - Acidentes no transporte de produtos perigosos através de oleodutos, ou e portos e terminais;
  - Erosão e deslizamento nas encostas serranas e praias.

Destaca-se, entre as fontes de poluição hídrica que afetam os recursos hídricos do litoral paulista, o esgoto doméstico e os efluentes industriais. A falta de sistemas de coleta e tratamento adequados é grande, tornando a maioria dos corpos d'água receptores em veículos de transporte de despejos *in natura*, e como agravante de que, ao desaguarem no mar esses corpos d'água podem, em determinadas circunstâncias, comprometer a balneabilidade das praias e os demais usos previstos (recreação e lazer, pesca, manutenção da vida aquática, etc...). Outro aspecto importante é a utilização da disposição oceânica através de emissários submarinos de efluentes domésticos (operados pela SABESP) e industrial (TEBAR/PETROBRÁS) cada vez mais difundida no litoral, e que acarreta em um aumento do aporte de matéria orgânica e substâncias tóxicas ao mar, caracterizando-se como fontes de poluição pontual. (CETESB, 2004).

Tal diagnóstico ambiental vem chamando a atenção da opinião pública e de órgãos ambientais e de pesquisas, como as Universidades, para a análise, monitoramento e desenvolvimento de massa crítica e de tecnologia, na busca da solução para a poluição dos recursos hídricos desta região.

Segundo RAGAS et al (1998), dois princípios básicos podem ser estabelecidos no controle da poluição dos recursos hídricos: o princípio de prevenção da poluição na fonte geradora e o princípio de capacidade assimilativa do corpo d'água.

O primeiro princípio, é baseado na idéia de que qualquer forma de poluição deve ser evitada para minimizar o impacto negativo no corpo receptor. Dentro desta perspectiva, as medidas de controle ambiental, com a instalação de sistemas de tratamento de efluentes domésticos e industriais, dependem das possibilidades tecnológicas, econômicas e sociais de cada região; e, concomitantemente são estabelecidos valores máximos restritivos para a emissão.

Os chamados países em desenvolvimento, e no qual o Brasil está inserido, geralmente, apresentam baixos índices de instalação de redes coletoras e sistemas de tratamento de efluentes, e além de que, quando existentes, são na maioria dos casos ineficientes na remoção qualitativa e quantitativa dos poluentes.

O segundo princípio, o de capacidade assimilativa, é baseado na idéia de que o meio ambiente pode suportar uma certa carga de poluição, desde que a capacidade de assimilação do corpo d'água não seja excedida, e sem efeitos adversos significativos, duradouros, e permanentes. Neste caso, a qualidade das águas é estabelecida por padrões de qualidade, que estabelecem limites de concentração para um certo número de substâncias cujas concnetrações não devem ultrapassar valores máximos permitidos, e que variam em função do uso previsto para a respectiva água.

A tendência das diretivas para o gerenciamento dos recursos hídricos referente ao controle da poluição e a melhoria da qualidade das águas superficiais, é basear-se na harmonização destes dois princípios citados acima, e estes serem complementares entre si, ao invés de soarem como discrepantes ou alternativos (HAANS et al, 1998).

Uma série de situações paralelas pode existir em relação a estes dois princípios, cuja utilização em separado é enfraquecida, conforme exemplos a seguir:

- um lançamento de efluente que atende ao padrão de emissão mas a carga poluidora remanescente é elevada para a assimilação do corpo d'água, causando efeitos de toxicidade crônica e aguda; e,
- o custo para a remoção de uma certa quantidade de poluente ou a tecnologia necessária para a remoção de um único poluente, pode se tornar inviável para certos países ou regiões, tornando os padrões de emissão e de qualidade das águas uma utopia.

Dentro desta linha de raciocínio e considerando-se que a região litorânea do Estado de São Paulo apresenta, como um dos principais sistemas de tratamento de efluentes, a disposição oceânica através dos emissários submarinos, procurou-se, ao longo deste trabalho, desenvolver o tema dentro do estado da arte dos emissários submarinos utilizando-se modelos computacionais para a análise da dispersão da pluma de efluentes com vista ao atendimento do padrão de qualidade das águas. O litoral paulista, possui 7 emissários submarinos de esgoto doméstico (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 será o objeto de estudo para as simulações computacionais deste trabalho.

Além do emissário submarino do TEBAR, tem-se conhecimento que a Transpetro – Petrobrás Transportes S.A. (empresa subsidiária da PETROBRÁS S.A.) opera outros terminais que lançam seus efluentes através de emissários submarinos, como é o caso do Terminal Aquaviário de São Francisco do Sul (SC) e do Terminal Aquaviário de Osório (RS).

A CETREL S.A. – Empresa de Proteção Ambiental, responsável por tratar os efluentes líquidos, resíduos sólidos e monitoramento ambiental do Pólo Petroquímico de Camaçari, lança seus efluentes líquidos através de um emissário submarino, com 4,8km de extensão e a uma profundidade média de 25m.

SALAS (2000) cita os seguintes emissários submarinos industriais no Brasil, todos situados na região Norte / Nordeste e com data de construção que varia de 1978 a 1982:

- Aracruz Celulose S.A. (2 emissários):
- Nitrofertil;
- Salgema;
- Titânio do Brasil – TIBRAS (2 emissários);
- Distrito Industrial de Manaus.

1.1.1. EMISSÁRIO SUBMARINO

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. Na figura 1.1 podemos visualizar estes três constituintes em vista lateral e planta.

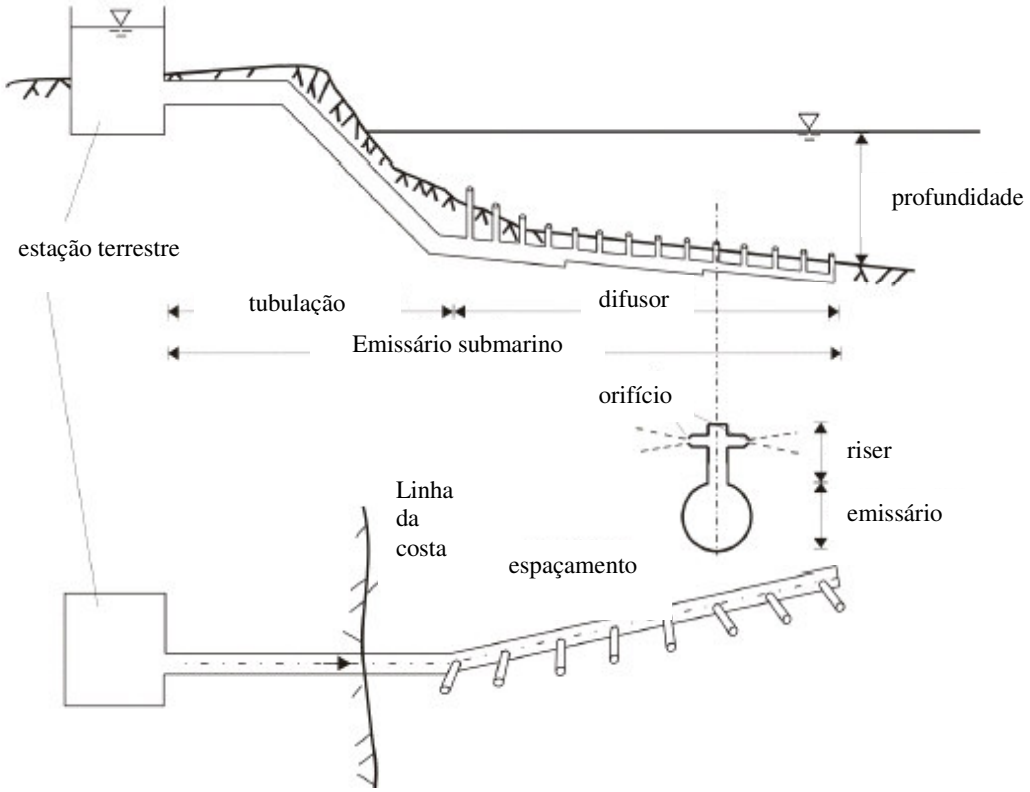


Figura 1.1: Configuração de um emissário submarino com sistema difusor.

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 (n° de orifícios, diâmetro, alinhamento). 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. 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. Ambas situações podem ocorrer, como é o caso de águas profundas (geralmente com mais de 10m), estratificadas (com variação de temperatura ao longo da coluna d'água) e passíveis de fortes correntes marinhas.

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 compreender melhor os fenômenos físicos que envolvem a mistura hidrodinâmica oceânica.

O projeto e desenvolvimento de sistemas de tratamento de efluentes e o adequado lançamento no corpo receptor, analisando os processos de mistura e diluição através da utilização de *softwares* de previsão do comportamento da descarga em relação às condições oceanográficas, tem tido um avanço muito importante na área da Engenharia Hidráulica.

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. Neste presente trabalho, utilizam-se duas técnicas computacionais, para a simulação do processo de dispersão de um efluente industrial, cujo lançamento ocorre no Canal de São Sebastião - CSS. A primeira técnica, baseada no método integral, utiliza o *software CORMIX,* que permite a previsão da concentração do efluente ao longo do eixo da pluma e a estimativa da largura da pluma. Os resultados permitem uma conclusão sobre a diluição no campo próximo. A segunda técnica, baseada em *CFD – Computational Fluid Dynamics (DFC – Dinâmica dos Fluidos Computacional) ,* utiliza o método dos volumes finitos, através do *software FLUENT* que conduz a resultados de diluição nos campos próximo e distante. Os resultados obtidos permitem concluir que o uso de *CFD,* em particular do *software FLUENT,* permite obter resultados tanto no campo próximo, como no campo distante, mostrando a abrangência e a potencialidade deste uso, que pode ser estendido para a simulação de plumas de efluentes em corpos d'água receptores com batimetrias variadas e considerando descargas de sistemas difusores com geometrias complexas.

1.1.2. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL: RESOLUÇÃO CONAMA 20/86 E RESOLUÇÃO CONAMA 357/05

A seguir serão apresentadas, de forma sintetizada, estas duas legislações, devido a sua aplicabilidade no estudo de caso deste presente trabalho, por referirem-se a classificação dos corpos d'água por usos preponderantes e ao estabelecimento de condições e padrões de qualidade das águas naturais e de lançamento de efluentes nos recursos hídricos superficiais do Brasil.

Destaca-se a criação de novas classes para águas salinas (como exemplo, as águas do Canal de São Sebastião) disposta na Resolução CONAMA 357/05 em relação a CONAMA 20/86.

Ressalta-se aqui, que a Resolução CONAMA n° 20 de 18 de julho de 1986 foi revogada pela Resolução CONAMA n° 357 em 17 de março de 2005.

Adotou-se para a análise da dispersão da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR o parâmetro amônia e os seus respectivos padrões de qualidade da água e de lançamento de efluentes estabelecidos pela Resolução CONAMA 20/86. Serão apresentados os padrões de qualidade das águas e de lançamento de efluentes para o parâmetro amônia (Res. CONAMA 20/86) e parâmetro NAT – Nitrogênio Amoniacal Total (Res. CONAMA 357/05).

- **Resolução CONAMA 20/86:**

A Resolução CONAMA 20/86 classificava as águas doces, salobras e salinas do Território Nacional, em nove classes, segundo seus usos preponderantes, da seguinte maneira:

ÁGUAS DOCES (águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 $^{o}/_{oo}$)

- Classe Especial - águas destinadas:
  a) ao abastecimento doméstico sem prévia ou com simples desinfecção;
  b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
- Classe 1 - águas destinadas:
  a) ao abastecimento doméstico após tratamento simplificado
  b) à proteção das comunidades aquáticas;
  c) à recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho);
  d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvem rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película;

e) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

- Classe 2 - águas destinadas:
  a) ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional;
  b) à proteção das comunidades aquáticas;
  c) à recreação de contato primário (esqui aquático, natação e mergulho);
  d) à irrigação de hortaliça e plantas frutíferas;
  e) à criação natural e/ou intensivas (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.
- Classe 3 - águas destinadas:
  a) ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional;
  b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
  c) à dessedentação de animais.
- Classe 4 - águas destinadas:
  a) à navegação;
  b) à harmonia paisagística;
  c) aos usos menos exigentes.

ÁGUAS SALINAS (águas com salinidade variando entre 0,5 $^{o}/_{oo}$ e 30 $^{o}/_{oo}$)

- Classe 5 - águas destinadas:
  a) à recreação de contato primário;
  b) à proteção das comunidades aquáticas;
  c) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.
- Classe 6 - águas destinadas:
  a) à navegação comercial;
  b) à harmonia paisagística;
  c) à recreação de contato secundário.

ÁGUAS SALOBRAS (águas com salinidade igual ou superior a 30 $^{o}/_{oo}$)

- Classe 7 - águas destinadas:
  a) à recreação de contato primário;
  b) à proteção das comunidades aquáticas;

c) à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.

- Classe 8 - águas destinadas:
  a) à navegação comercial;
  b) à harmonia paisagística;
  c) à recreação de contato secundário.

Durante a vigência desta legislação, as águas do Canal de São Sebastião eram classificadas como Classe 5. No artigo 8º, onde são estabelecidos os limites e condições para as águas de Classe 5, o teor máximo para o parâmetro amônia não ionizável (NH_3) é igual a 0,4mg NH_3/L.

Em relação aos padrões de emissão, o artigo 21 da Resolução CONAMA 20/86 estabelecia que o valor máximo admissível do parâmetro amônia no efluente de qualquer fonte poluidora que poderá ser lançado, direta ou indiretamente, nos corpos d'água, é igual a 5,0mg NH_3/L.

- **Resolução CONAMA 357/05:**

De acordo com a Resolução CONAMA 357/05, que: "dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências"; estabelece que, as águas salinas (águas com salinidade igual ou superior a 30 $^{o}/_{oo}$), sejam classificadas da seguinte maneira, conforme seus usos preponderantes:

- Classe Especial - águas destinadas:
  a) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral;
  b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
- Classe 1 - águas que podem ser destinadas:
  a) à recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;
  b) à proteção das comunidades aquáticas; e
  c) à aqüicultura e à atividade de pesca.
- Classe 2 - águas que podem ser destinadas:
  a) à pesca amadora; e,
  b) à recreação de contato secundário.
- Classe 3 - águas que podem ser destinadas:

a) à navegação; e

b) à harmonia paisagística

Portanto, verifica-se uma alteração na classificação das águas salinas, frente a Resolução CONAMA 20/86, definindo novas classes de águas salinas segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes.

Na Resolução CONAMA 357/05, as águas do Canal de São Sebastião estão enquadradas como classe 1. Os critérios de qualidade das águas salinas de classe 1, estão definidos no artigo 18, onde se estabelecem as condições e padrões de qualidade para vários parâmetros inorgânicos e orgânicos. A Resolução CONAMA 357/05 substituiu o parâmetro amônia pelo nitrogênio amoniacal total, mantendo o mesmo valor máximo permissível igual a 0,4mg N/L.

Em relação as condições e padrões de lançamento de efluentes, o artigo 34 (equivalente ao artigo 21 da Resolução CONAMA 20/86), substituiu o parâmetro amônia pelo nitrogênio amoniacal total, com valor máximo igual a 20,0mg/L.

Tabela 1: Padrões de qualidade das águas e do lançamento de efluentes dos parâmetros amônia (Resolução CONAMA 20/86) e NAT – Nitrogênio Amoniacal Total (Resolução CONAMA 357/05).

	Resolução CONAMA 20/86	**Resolução CONAMA 357/05**
Parâmetro	Amônia (NH_3)	NAT – Nitrogênio Amoniacal Total ($NH_3 + NH_4^+$)
Padrão de Qualidade das Águas	0,40 mg/L (artigo 8)	0,40 mg/L (artigo 18)
Padrão de Lançamento de Efluentes	5,0 mg/L (artigo 21)	20,0 mg/L (artigo 34)

Ressalta-se todavia que, apesar da substituição do parâmetro amônia pelo nitrogênio amoniacal total, tanto como parâmetro de qualidade dos corpos d'água quanto no padrão de emissão de efluentes, para este presente estudo, trabalhou-se com a amônia, pois os dados referentes a qualidade do efluente do TEBAR, analisados pela PETROBRÁS, no período de abril de 2000 a março de 2002 (CASCARDI, 2002), referem-se a esta substância e não ao nitrogênio amoniacal total (devido a legislação em vigor na época). Além disso, a partir de abril de 2002 até a presente data, não se obteve informações sobre a qualidade do efluente da PETROBRÁS para o parâmetro amônia e demais formas nitrogenadas.

1.1.3. ZONA DE MISTURA REGULATÓRIA

A zona de mistura de um efluente em um corpo d'água pode ser definida como uma zona de impacto onde o parâmetro de qualidade da água pode ser excedido, dentro de novos valores limites, e no qual o processo de diluição inicial de um efluente pode ser considerado como um *pós-tratamento*. É comum estabelecer a zona de mistura, somente para um constituinte, ou um conjunto destes, a partir do momento em que a relação de custo/benefício para sua remoção em uma estação de tratamento de efluentes terrestre, se torne inviável economicamente ou operacionalmente.

Na prática, para se determinar a zona de mistura regulatória, estipula-se uma área, comprimento, largura ou volume, o menor possível e de fácil identificação, variando em função das características ambientais do corpo receptor (lagos, reservatórios, rios e oceanos), não interferindo nos usos previstos para a água (1984 USEPA Water Quality Handbook *apud* www.cormix.info).

A zona de mistura regulatória deve estar livre das seguintes substâncias, seja de origem de uma fonte pontual ou não-pontual:

- Substâncias em concentração que possam causar toxicidade aguda à vida aquática;
- Substâncias em concentração que possam sedimentar e causar assoreamento;
- Sólidos flutuantes, escumas, óleos e qualquer outra matéria em concentrações que cause incômodo;
- Substâncias em concentração que possam produzir cor, odor, sabor ou turbidez objetável;
- Substâncias em concentração que possam produzir efeitos indesejáveis à vida aquática e que resultem no surgimento ou dominância de espécies indesejáveis.

Além disso, a agência ambiental americana, United States Environmental Protection Agency – USEPA, recomenda três níveis de critérios para o estabelecimento da zona de mistura (ver figura abaixo), sendo: o Critério de Concentração Máxima (Criterion Maximum Concentration - CMC) para prevenir o efeito tóxico agudo na vida aquática; o Critério de Concentração Contínua (Criterion Continuous Concentration - CCC) para prevenir o efeito tóxico crônico na vida aquática; e, a Concentração de Referência Ambiental (Reference Ambient Concentration - RAC) para a proteção da saúde humana. A zona de mistura é limitada pelo valor do CCC, ou seja, um dado constituinte, pode existir em concentração superior ao CCC até o limite espacial estabelecido. Para o caso americano, cada Estado tem

competência em definir os valores das concentrações, assim como a frequência e a duração do evento. (RAGAS et al, 1998).

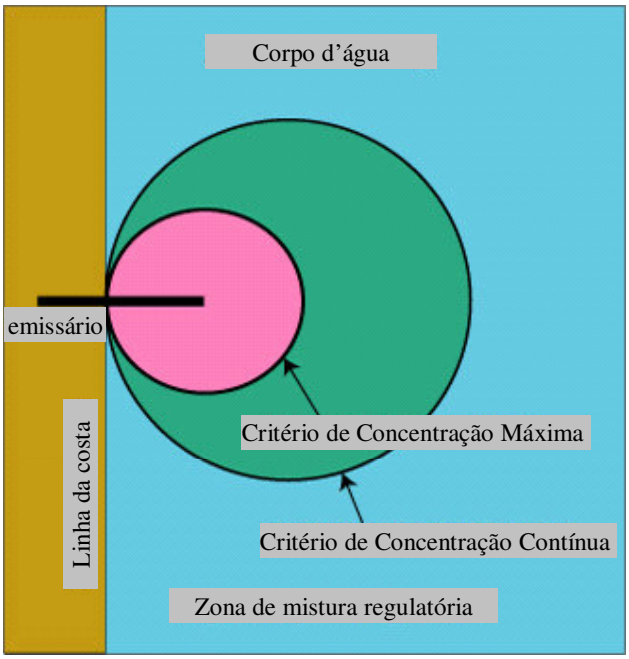


Figura 1.2: Esquematização da zona de mistura regulatória com dois níveis de critérios proposto pela USEPA (www.cormix.info).

No Brasil a Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005, que revogou a Resolução CONAMA 20/86, demonstra um avanço na questão do estabelecimento de uma zona de mistura, quando da descarga de efluentes em corpos d´água, apesar de não especificar em seu texto, valores específicos, ou diretrizes para a definição de uma área ou volume que represente a zona de mistura, seja qual for o tipo de corpo d'água.

No Artigo 33, A Resolução CONAMA 357 / 05 descreve em relação a zona de mistura de efluentes:

> "... o órgão ambiental competente poderá autorizar, levando em conta o tipo de substância, valores em desacordo com os estabelecidos para a respectiva classe de enquadramento, desde que não comprometam os usos previstos para o corpo de água."

E continua em seu Parágrafo único:

> "A extensão e as concentrações de substâncias na zona de mistura deverão ser objeto de estudo, nos termos determinados pelo órgão

ambiental competente, às expensas do empreendedor responsável pelo lançamento."

Maiores detalhes sobre critérios de implantação de uma zona de mistura regulatória , no Brasil e no Mundo (Comunidade Européia, Mar Mediterrâneo e China), podem ser obtidos na Tese de Doutoramento de ARASAKI (2004).

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- Apresentar o estado da arte de emissários submarinos utilizando sistemas difusores multiorifícios, destacando o PEAD – Polietileno de Alta Densidade, como material de construção, discutindo as principais técnicas de instalação e manutenção de emissários submarinos, com destaque para a técnica de instalação *float-and-sink* para tubos de PEAD;

- Analisar a dispersão da pluma de uma determinada substância constituinte do efluente industrial do Terminal Almirante Barroso – TEBAR, localizado no Canal de São Sebastião – CSS, quanto ao atendimento do padrão de qualidade das águas, e estudar o comportamento físico hidrodinâmico, com a utilização de técnicas computacionais baseadas no método integral (CORMIX) e no método de volumes finitos (FLUENT), comparando os resultados obtidos com estudos de diluição com traçador fluorescente.

CAPÍTULO II – PROJETO, INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS COM SISTEMAS DIFUSORES

2.1. CRITÉRIOS DE PROJETO E DIMENSIONAMENTO

2.1.1. LEVANTAMENTO DA ROTA SUBAQUÁTICA

O levantamento da melhor rota subaquática para instalação de um emissário submarino geralmente se inicia por uma batimetria detalhada da superfície do leito de fundo, e análise das características mecânicas e físicas do solo e do subsolo. Também deve ser realizada a análise das propriedades físicas e químicas do corpo d'água e de sua hidrodinâmica, assim como, a obtenção de dados de corrente para cálculo da capacidade de diluição do efluente.

A utilização de cartas náuticas, sonar, exame de acústica, imagens de vídeos e fotografias, é importante para que se evite qualquer obstáculo na rota ou áreas sensíveis, como: recifes de coral, áreas com vida aquática intensa, solos instáveis, fracos, suscetíveis à erosão ou deposição excessiva e com pedregulhos grandes, precipícios, quedas, cumes e áreas próximas a marinas e ancoradouros. Porém, algum detalhe pode não ser detectado pelos equipamentos de medição e inspeção, causando sérios problemas estruturais a tubulação, acarretando atraso no cronograma do projeto e custos adicionais, os quais sempre são indesejáveis.

Sendo assim, a exploração subaquática deve ser conduzida por experientes mergulhadores, onde, pelo menos um destes deve ser engenheiro com conhecimento de análise estrutural de materiais e hidráulica de tubulação. É importante frisar que, devido a maioria dos mergulhos ser realizada em águas turvas, com pouca visibilidade, há necessidade do mergulhador saber analisar e diagnosticar o problema pelo tato ou pela visão aguçada, transmitindo em seguida as informações para um relatório escrito.

Para a realização do mergulho comercial deve-se checar as normas regulatórias locais, definindo os exames médicos periódicos. Tais procedimentos devem ser de interesse do mergulhador e do empregador, e podem ser garantidos através de certificado médico e de treinamento. DALE (2002) discute e enumera uma série de considerações referentes a saúde e segurança do mergulhador para inspeção subaquática, considerando o mergulho uma atividade perigosa onde seus riscos devem ser entendidos e conhecidos de local para local. De uma forma geral as principais preocupações são: falhas no fornecimento de oxigênio e na comunicação com o barco de apoio; fraca amarração contra correntezas em rios com altas velocidades; choques com embarcações, guindastes, estruturas submersas e rochas; visibilidade ruim, entre outros.

Durante a exploração preliminar os mergulhadores devem estar munidos de bússola e trena, fazendo marcações desde o ponto de entrada do emissário no corpo d'água até o extremo final da área de prospecção, devendo ser instaladas bóias numeradas e coloridas identificando e mensurando a distância entre cada obstáculo ou áreas problemáticas que o processo de instalação possa encontrar; caso, a área problemática seja pequena, as bóias devem ser ancoradas ou amarradas firmemente no centro do obstáculo, porém, se a área for de grandes dimensões as bóias devem ser amarradas no início e no final identificando-a como uma área única (CEPIS, 2002). O mergulhador deve anotar a descrição das condições para cada bóia numerada correspondente, sendo de grande utilidade a filmagem e fotografias das áreas críticas. A utilização de GPS é essencial nos estudos e inspeções de rotina (NRCC, 1994).

Em uma segunda pesquisa exploratória, os mergulhadores devem buscar determinar a melhor rota desobstruída em ambos os lados do obstáculo. Caso obtenha sucesso, o mergulhador deve marcar com bóias de diferente coloração daquelas dos obstáculos, o comprimento inteiro da rota. Próximo aos obstáculos é recomendável um espaçamento de cinco em cinco metros, porém, na extensão da rota, um espaçamento de 50 metros é usualmente adequado. Caso seja necessário fazer curvas extremamente agudas para desviar dos obstáculos, será necessário instalar conexões pré-fabricadas. Por ser a instalação de tubulações em curvas de maior complexidade, deve-se prevalecer pela escolha de rotas de maior extensão sem curvas, principalmente para os materiais convencionais pouco flexíveis.

Durante o período de construção em locais com tráfego intenso, é importante instalar placas com aviso nas próprias bóias, nas marinas e ancoradouros mais próximos e notificar aos barqueiros e pescadores da região para evitarem a área de construção em progresso. Ao mesmo tempo, se faz necessário adicionar a localização do emissário em cartas náuticas e mapas, o mais breve possível, com aviso de proibição de ancoragem das embarcações nas vizinhanças.

Em rios de águas rasas a exploração e o levantamento da rota submarina, intrinsicamente, se torna muito mais rápida e segura, podendo em certos casos onde a profundidade for muito baixa e a topografia do leito de fundo ser de fácil compreensão, se tornar desnecessária.

2.1.2. TIPOS DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO: VANTAGENS E DESVANTAGENS

A construção de emissários submarinos enfrenta alguns problemas relacionados à preparação e assentamento da tubulação em terra e na água, principalmente, devido à variação da hidrodinâmica do corpo d'água, devendo a construção ser estudada, planejada e integrada ao projeto, estabelecendo-se uma harmonia entre os materiais da tubulação, tipos de juntas, tipos de suportes, equipamentos e técnicas desenvolvidas e disponíveis pelos empreiteiros selecionados para a obra (CHAO&MOTTA PACHECO, 1979; WRc, 1990). Segundo KOMEX (2002) dois aspectos distintos podem determinar a seleção do material de construção de um emissário:

- Instalação de dispendiosos sistemas projetados para resistir a qualquer força, interna e/ou externa ao longo do seu ciclo de vida;
- Instalação de sistemas mais baratos e com resistência relativa, mas que possam ser substituídos rapidamente e a um baixo custo.

Para AVANZINI (2000), além de se considerar a expectativa de vida útil e custos de manutenção, a escolha do material depende não somente de aspectos puramente técnicos, mas sim, da familiaridade e da habilidade do corpo de engenheiros e da construtora responsável pela obra em lidar com o material a ser utilizado e da disponibilidade de fabricação do material próximo à área de trabalho, pois, o fator econômico mais importante é a questão do transporte da tubulação, que pode representar, para tubos com diâmetro maior que 1200 mm (um tramo de tubo por caminhão) acréscimo de 30% do valor total da obra.

Outros requisitos para a seleção do material da tubulação são: possibilidade do material possuir diâmetro adequado para o projeto, resistência à corrosão, juntas seladas contra vazamentos, e alto grau de resistência e integridade, como: flexibilidade axial, flambagem e torção.

Além desses fatores construtivos, as estruturas submersas são passíveis de danos e falhas devido a vários fatores que podem ser divididos em quatro categorias (NRCC, 1994): corrosão, colisão (usualmente com barcos, barcaças, balsas, âncoras e equipamentos de pesca), ações do vento e das marés e outros fatores (tipo de material, evento sísmico, variação de vazões ocasionando pressão interna negativa na tubulação, etc...). Conforme os fatores mencionados a estimativa de danos causados em tubulações distribui-se da seguinte maneira: 50% devido a corrosão, 25% devido a colisões e ações do vento e das marés e 25% devido a outros tipos de forças (KEMP et al, 2002).

O Instituto de Hidromecânica da Universidade de Karlsruhe (IFH, 2002) dispõe de uma base de dados de emissários submarinos que permite concluir, apesar de não ser possível a distinção da localização por tipo de corpo d'água (rios, lagos, estuários, águas costeiras, oceano, etc...), quais os materiais de construção mais utilizados, sendo estes:

- aço carbono: 28,15%;
- aço inoxidável: 0,97%;
- concreto reforçado: 19,4%;
- polietileno de alta densidade – PEAD: 16,5%;
- ferro fundido: 6,8%;
- plástico reforçado com fibra de vidro - PRFV (glass fiber reinforced pipes - GRP): 5,8%;
- polipropileno: 1,95%;
- outros / desconhecidos: 20,42%.

De acordo com SALAS (2000), até o ano de 1993, tinha-se a seguinte distribuição, por tipo de material de construção, para um total de 65 emissários submarinos com comprimento maior que 500m, em cidades costeiras da América Latina e Caribe.

- aço (carbono ou inoxidável, com ou sem revestimento protetor): 40%;
- concreto reforçado: 21,6%;
- polietileno de alta densidade – PEAD: 20%;
- ferro fundido: 10,8%;
- plástico reforçado com fibra de vidro - PRFV (GRP - glass fiber reinforced pipes): 4,6%;
- polipropileno: 3%.

A seguir, será apresentada uma breve caracterização dos principais materiais de construção para emissários submarinos: Aço, Concreto, PEAD, Ferro Fundido, PRFV e PVC, destacando-se suas vantagens e desvantagens (AVANZINI, 2000; DALE, 2002; GRACE, 1978; KOMEX, 2002; LINGURI&LISSONI, 2000; MATSUSHITA, 1979; PPI, 2004). As considerações a seguir, não têm como intenção excluir ou priorizar um tipo de material especificamente, mas sim, otimizar os fatores de escolha apresentados anteriormente, para uma adequada seleção do material.

- **Aço**

É o tipo de material mais comum a ser fabricado para vários diâmetros, estando relativamente disponível praticamente em qualquer região, além de largamente utilizado na indústria *offshore* de óleo e gás. O transporte de tubos de grande diâmetro e comprimento pode se tornar um transtorno, mesmo para pequenas distâncias, encarecendo demais o custo total de construção do emissário. A instalação geralmente é feita pelo método *pulling* / *bottom-pull*, com a presença de revestimento externo, tanto para proteção a corrosão, quanto para o lançamento, neste caso agindo como peso de lastro.

Quando a tubulação de aço estiver totalmente preenchida por água ou efluente irá possuir uma flutuação negativa, e esta não terá peso suficiente para assegurar uma estabilidade contra forças externas (correntes marítimas, ventos, ondas, etc...) ou contra forças de flutuação extra, como a liquefação do solo de suporte da tubulação, necessitando de técnicas de estabilização.

As principais vantagens são:

- Mais resistente, leve, barato e fácil de construir que os tubos de ferro fundido;
- Em certas condições hidrodinâmicas, não há necessidade de pesos estabilizadores, porém, é passível de enterramento em grandes profundidades;
- Relativa resistência a impactos em condições mais severas.

As principais desvantagens são:

- Alto custo de implantação e fabricação, tornando-se ainda menos econômico para pequenos comprimentos;
- Sensibilidade à corrosão, necessitando além da proteção por revestimento interna (epoxy) ou externa (betume, polietileno, poliuretano ou concreto), também da necessidade de proteção catódica ou anódica;
- Utilização de equipamentos pesados para a instalação;
- Não se conforma facilmente no leito de fundo do corpo d'água, onde tubulações com diâmetro grande podem sofrer ovalização.

- **Concreto**

Tubulações de concreto, usualmente do tipo Portland, são largamente utilizadas para coleta e transporte de esgotos domésticos e drenagem urbana, tendo também grande aplicabilidade para emissários submarinos devido à alta resistência do material, porém, por ter peso elevado, comparado a materiais plásticos, podem ter a sua estrutura comprometida no processo de submersão em corpos d'água com margem íngrime, além do risco de falhas nas juntas devido a instabilidade do solo podendo provocar danos irreparáveis ao sistema como um todo. A instalação é feita por tramos, de comprimento de até 75m através de uma estrutura com moldura de aço chamada de "Horse". Por ser o concreto longitudinalmente rígido, é necessário um entrincheiramento linear no leito de fundo para evitar qualquer *stress* ou dano as juntas de conexão do tipo ponta e bolsa.

Para elevadas pressões de trabalho, podem ser inseridos no interior da tubulação cilindros de aço que reforçam estruturalmente a tubulação de concreto. Em outros casos, malhas de aço são amarradas em torno do diâmetro externo da tubulação resultando no chamado tubo de concreto protendido.

As principais vantagens são:

- Tubos de concreto são tubos rígidos, possuindo significativa resistência estrutural;
- Devido ao seu alto peso, não há a necessidade de pesos estabilizadores, sendo considerado uma estrutura tubo-solo. Porém, podem ser anexados tanques de flutuação, para melhor controle do processo de submersão;
- Mudanças moderadas no leito de fundo, onde possa ocorrer uma leve erosão na superfície em contato com a base do tubo, não influenciará na integridade estrutural;
- Estruturas pré-fabricadas são facilmente produzidas em qualquer região a baixos custos.

As principais desvantagens são:

- Apurada técnica para fabricação da estrutura do acoplamento (juntas tipo ponta e bolsa), a fim de assegurar perfeita estanqueidade, sem a qual os vazamentos poderão ser consideráveis;

- Os problemas de vazamento desse tipo de tubulação são agravados pelo grande número de juntas necessárias, permitindo uma deflexão da ordem de 30' a 1°30', dependendo do grau de tolerância obtido na fabricação;
- A rugosidade absoluta é relevante, prejudicando o comportamento hidráulico do sistema, causado por corrosão, abrasão e sujeira;
- Exigência de regularização do leito em grau muito maior do que os tubos de estrutura mais contínua;
- Utilização de equipamentos pesados para posicionamento e assentamento;
- Apesar de resistente ao ataque de organismos marinhos, é suscetível ao ataque de ácidos e do sulfeto de hidrogênio presente no efluente doméstico. Alguns tipos de revestimento de proteção podem ser utilizados, como: cimento (o qual é resistente aos ácidos); vinil ou placas de aço inoxidável colocadas como forros no interior da tubulação.

Figura 2.1: Área de construção dos tubos de concreto armado (10m de comprimento, diâmetro interno de 1600 mm e espessura da parede de 200 mm) do emissário de Thessaloniki, Grécia (SPYROPOULOS&ANDRIANIS, 2003).

- **PEAD – Polietileno de Alta Densidade**

O início da utilização deste tipo de material para instalações subaquáticas ocorreu na década de 60, nos países nórdicos, e vem se tornando familiar em projetos de emissários submarinos e para a travessia submersa de tubulações entre margens distantes. O material apresenta atualmente ótimas características de tensão e módulo de elasticidade, podendo ser produzidos com $\sigma = 8$ N / mm^2; existindo uma íntima relação entre a espessura da parede do tubo, a profundidade e a curvatura de submersão; com sua instalação geralmente realizada pela técnica *float-and-sink*. Por ser, a fusão de tramos ainda uma dura tarefa, necessitando de 6 a 8 horas para tubos com 1600 mm de diâmetro (máximo disponível no processo de extrusão), tem-se optado pela fabricação de tubulações de grande comprimento (figura 2.2).

As principais vantagens são:

- Flexibilidade, podendo ser submerso gradualmente e, com facilidade na adaptação da conformidade do leito de fundo do corpo d'água;
- Peso leve, (a densidade do PEAD é aproximadamente 96% da água doce) requerendo equipamentos leves para o posicionamento por flutuação até o local exato de submersão, assentamento e ancoragem;
- Prazo de construção menor permitindo a implantação de sistemas de emissários por etapas construtivas, diminuindo o investimento inicial;
- Não há a necessidade de revestimento ou proteção contra corrosão;
- Fusão por calor, resultando numa estrutura única, comprida e resistente, eliminando o risco de vazamento pelas juntas;
- Não há necessidade de juntas mecânicas (braceletes, conexões, parafusos, etc...);
- Inerte a efeitos da corrosão de substâncias químicas presentes nos efluentes industrial e doméstico e da ação da salinidade do ambiente aquático;
- Ductibilidade: a tubulação de PEAD possui uma alta capacidade relativa de absorver tensões;

As principais desvantagens são:

- Relativamente menos resistente do que outros materiais convencionais contra choques com embarcações e âncoras, podendo ser arrastado devido a seu leve peso;

- Necessidade de pesos de lastro para a estabilidade e maior rigidez da estrutura, evitando a flambagem do emissário.

Figura 2.2: Linhas de emissário de PEAD (OZEL et al, 2002).

- **Ferro Fundido**

No estudo realizado por PEARSON (1956) apud GRACE (1978), apresentou-se que 145 tubulações submarinas eram de ferro fundido, e representavam a alternativa de material de construção mais utilizada na época, sendo, este tipo de material, responsável por aproximadamente 45% do total. Observa-se em relação ao levantamento realizado por IfH (2002), que hoje em dia, este tipo de material representa cerca de apenas 6,8%. Este valor é ligeiramente maior para os países latino-americanos, com uma média de 10,8% (SALAS, 2000). O tubo de ferro fundido cinzento é uma liga de ferro com uma elevada proporção de carbono na forma de grafite.

Os tubos de ferro fundido são uma alternativa de baixo custo em relação ao aço carbono revestido, se utilizado em tubulações com diâmetro de até 0,3m.

Embora seja resistente ao ataque de determinados efluentes, alguns líquidos e a própria água, por muitas vezes podem causar incrustações no interior da tubulação. Por este motivo, são revestidos interiormente com uma camada de cimento. Tal camada aumenta também a capacidade de escoamento da tubulação.

Uma variação do tubo de ferro fundido é o ferro fundido dúctil, desenvolvido na época da Segunda Guerra Mundial. Suas vantagens são: uma superior resistência comparada a das tubulações de aço; maior resistência à corrosão que a tubulação de ferro fundido tradicional; boa flexibilidade; e excelente resistência a impactos.

O tubo de ferro fundido dúctil, com revestimento interno de polietileno, propicia um acabamento interno da tubulação mais liso fornecendo uma capacidade excelente de escoamento do fluxo. Também tem a vantagem a utilização deste tipo de material devido, a estabilidade química do polietileno ao ataque pelo sulfeto de hidrogênio e outros componentes presentes no esgoto.

Os tubos de ferro fundido são fabricados em vários diâmetros, até 1.372mm, e usualmente, em tramos de tubos com comprimento de 6,1m. A conexão rígida, do tipo ponta e bolsa (onde a ponta de um tubo é conectada como um "plug" na extremidade do outro tubo em forma de boca de sino) é uma grande desvantagem para os tubos de ferro fundido, existindo vários casos em que durante o processo de instalação, forças externas acarretaram o rompimento desta conexão.

É preferível a utilização de juntas *ball-and-socket*, consistindo em um final do tramo de tubulação com articulação esférica e outro tramo com final fêmea para encaixe (figura 2.3); este tipo de junta permite uma deflexão máxima de 15° permitindo uma maior flexibilidade durante o assentamento no leito de fundo do corpo d'água (DIPRA, 2001).

Outro tipo de junta, *ball-and-socket*, é a aparafusada, uma versão que minimiza a tensão de cisalhamento entre as extremidades das juntas, porém, diminui o ângulo de liberdade de deflexão.

Figura 2.3: Conexão de tubulação de ferro fundido através de juntas *ball-and-socket.*(DIPRA, 2001).

- **PRFV – Plástico Reforçado com Fibra de Vidro**

Sua técnica de instalação mais tradicional é pela técnica *pipe-by-pipe* (ou por uma técnica alternativa, chamada *off-bottom tow*, que é uma variante do método *pipe-by-pipe* para instalação de emissários deste tipo de material) realizada com a ajuda de dispositivos mecânicos e hidráulicos que permitem realizar um suave puxamento para evitar danos a conexão das juntas ponta e bolsa ou anéis de vedação. Os métodos de conexão mais utilizados são: a fusão por calor através da solda de tramos de tubulação impregnados em sua extremidade por uma resina catalisadora; e, a junção por flanges e gaxetas.

As principais vantagens são:

- Economicamente viável para tubos com grandes diâmetros, em dimensões disponíveis com diâmetro superior a 2,44 m e até 4,3m, e comprimento de 18m;
- São duráveis, relativamente rígidos e mais leve que o aço (chegando a pesar de 4 a 5 vezes menos que o aço carbono);
- Apresenta boas características de escoamento;

- São resistentes à corrosão; porém existem casos de emissários submarinos de indústrias de papel e celulose, que sofreram abrasão no leito de fundo do corpo d'água, devido a deficiência no entrincheiramento (ou cobertura da tubulação) e imobilização;
- Material de fácil manuseio;
- Passível de remendos nas falhas da tubulação ocorridas ao longo de sua vida útil.

As principais desvantagens são:

- Apresenta fragilidade estrutural a impactos;
- Não é disponível facilmente em qualquer região, onde mais do que nunca, o transporte pode representar valor relevante no custo total do projeto;
- Pouca experiência dos engenheiros e projetistas com este tipo de material em sistemas de emissários submarinos.

- **PVC - Cloreto de Polivinila**

Os tubos geralmente são fabricados em pequenos diâmetros (610mm), resultam em economia de custo de material, devendo ser utilizados para sistemas com pequeno comprimento (tramos de 6m) e sob baixas pressões de trabalho por apresentar baixa resistência estrutural. Embora não sofra ataque de líquidos corrosivos, apresenta uma curiosa força de atração a vida marinha, em que moluscos podem perfurar a tubulação comprometendo seriamente a utilização do emissário (GRACE, 1978).

2.1.3. HIDRÁULICA INTERNA DE DIFUSORES

Segundo WILKINSON&WAREHAM (1996), para uma dada vazão de efluente, em um sistema de emissário submarino com tubulação difusora curta (poucos orifícios de saída) ocorrem fortes descargas através de cada bocal, necessitando-se de uma maior coluna d'água para obter um adequado nível de diluição do efluente. Portanto, uma seção difusora mais curta requer, conseqüentemente, um alongamento da tubulação do emissário submarino, para atingir maiores profundidades no local de lançamento, acarretando, também, em maiores custos de construção e instalação. Por outro lado, para uma mesma vazão de efluente, o aumento do comprimento da seção difusora, ou seja, o aumento do número de orifícios de saída, permite que os difusores possam ficar mais próximos da linha da costa (ou margem), de modo que o comprimento da tubulação do emissário seja reduzido, assim como o seu custo.

Porém, a aproximação da seção difusora em direção a margem pode ter um limite, e não necessariamente sempre buscarmos um projeto de emissário mais curto. Conforme a seção difusora se aproxima da margem, chegará um momento em que o comprimento da tubulação será de tal modo, tão curto (podendo até mesmo ser menor que a seção difusora), que não conseguirá alcançar um nível adequado de diluição, e conseqüentemente, não alcançará os valores de concentração dos parâmetros de controle ambiental exigidos pela legislação.

Um projeto ideal de difusores deve ser calculado para que a vazão efluente seja distribuída uniformemente através de todos os orifícios do sistema difusor. Tais cálculos não são triviais, devido:

- o fluxo na tubulação varia em intervalos de tempo, o que pode fazer com que o sistema opere em alta pressão, causando grandes perdas de carga, sendo recomendável a prevenção desta situação;
- o acréscimo da coluna d'água ao longo do comprimento da seção dos difusores, ocasiona queda na pressão dinâmica de descarga nos orifícios mais afastados, ocasionando a diminuição gradativa da pressão ao longo da tubulação (GRACE, 1978; WRc, 1990).

Considerando uma configuração simples de sistema difusor, onde todos os orifícios estão espaçados igualmente e possuem o mesmo diâmetro de bocal de saída, esta irá apresentar uma descarga máxima através do orifício mais próximo a margem, e que se reduzirá gradualmente nos subseqüentes orifícios. Obviamente esta não é uma configuração ideal, pois, a seção difusora instalada na parte mais rasa estará descarregando um volume maior que aquela instalada em maior profundidade (WILKINSON&WAREHAM, 1996).

Além, da condição ideal de diluição uniforme para todos os orifícios como fator de projeto, os cálculos devem considerar outros requisitos básicos:

- Determinar uma região de contorno para o balanço de energia;
- Devem ocorrer velocidades adequadas do fluido na tubulação para impedir (ou prevenir ao máximo) o depósito dos sólidos carregados com o fluxo desde a seção terrestre. Esta é uma tarefa difícil de se conseguir quando se têm baixas vazões. As velocidades mínimas, na faixa entre 0.6 a 0.9 m/s (GRACE, 1978) e 0,7m/s (WILKINSON&WAREHAM, 1996), devem ser obtidas, para as vazões de pico, a fim de ocorrer o carreamento de todo o material depositado durante os períodos de baixa vazão. A velocidade de carreamento (limpeza) é função do nível do tratamento do efluente na estação terrestre, o qual irá determinar o tamanho das partículas sólidas. Para sistemas difusores com tubulações verticais – *risers,* e que operam sob o sistema *plug-flow* (ciclos de bombeamento) a velocidade de carreamento será ditada pela necessidade de expurgar a cunha salina que adentra na tubulação principal, onde, pode-se acumular um volume de efluente aproximadamente igual a metade do volume da tubulação do emissário. Neste caso, o efluente deve ser bombeado com uma velocidade da ordem de 1,5m/s (WOOD et al, 1993). É importante ressaltar que, o final da seção difusora deve ser fechado por uma flange cega, caso contrário, não haverá pressão suficiente na tubulação para o efluente ser descarregado pelos orifícios. A flange deve ser removível para permitir o escoamento do fluxo de limpeza da linha de tubulação (FISCHER et al, 1979).
- A perda de carga total deve ser mantida tão baixa quanto possível, para, minimizar o nível da carga manométrica a montante da linha da tubulação, e diminuir a quantidade de energia necessária para o bombeamento. Isto pode ser obtido através da utilização de tubos de material com menor rugosidade, como é o caso das tubulações de material plástico.
- Todos os orifícios devem estar inteiramente preenchidos pelo efluente; isto é, não devem permitir a intrusão da cunha salina durante a operação. A bibliografia sugere que os orifícios operem com o número de Froude densimétrico $Fr_d > 1$ (BROOKS, 1970; DAVIES, 2003; DUER&SALAS, 1995; WILKINSON; 1997).

2.1.3.1. PARÂMETROS BÁSICOS DE PROJETO DE SISTEMAS DIFUSORES

Para se ter uma idéia inicial da configuração do projeto de difusores, é necessário inicialmente, estimar alguns dados de entrada para realizar um primeiro esboço das análises hidráulicas, sendo este processo, uma seqüência de tentativas e erros, até a obtenção do projeto final.

A seguir são apresentadas recomendações de valores para os parâmetros de projeto:

⇒ **Espaçamento entre *risers* / orifícios:** o espaçamento recomendado entre orifícios adjacentes deve ser 25% a profundidade do corpo d'água receptor, minimizando-se assim a interferência entre as plumas (WILKINSON&WAREHAM, 1996). Caso o diâmetro dos orifícios seja constante, com um aumento da profundidade, ocorrerá uma diminuição do fluxo de descarga para os orifícios mais distantes da margem. Entretanto, orifícios igualmente espaçados e com diâmetros constantes, podem ser aplicados desde que os efeitos da interação da pluma sejam evitados, compensados pelo aumento da profundidade ao longo do difusor.

⇒ **Diâmetro do orifício:** existe uma limitação de projeto devido ao risco de entupimento, restringindo-se em 50mm o diâmetro do orifício, para efluentes após um tratamento a nível terciário (WILKINSON&WAREHAM, 1996). Na prática, esta escolha deve estar relacionada com o nível de tratamento que o efluente recebe na estação de tratamento de efluente terrestre; porém, se o efluente recebe somente um tratamento preliminar (gradeamento, peneira e caixa de areia) é recomendável que o diâmetro mínimo esteja na faixa entre 70mm e 100mm (WILKINSON&WAREHAM, 1996; WOOD et all, 1993). Para GRACE (1978), a área total do bocal dos orifícios a jusante de uma seção da tubulação não deve exceder de 0,5 a 0,7 da área dessa seção.

⇒ **Número de orifícios:** o número de orifícios necessários varia de acordo com a necessidade de atender a diluição inicial no corpo d'água no campo próximo – *near field*. (BLENINGER et al, 2002).

⇒ **Diâmetro da tubulação da seção difusora:** É um dos principais fatores de elevação do custo do projeto, pois quanto maior o diâmetro, mais caro será o emissário. Existe, também, uma limitação de diâmetro máximo, relacionada à velocidade de deposição das partículas, e uma limitação de um diâmetro mínimo, relacionada às perdas de carga totais (distribuída, e localizada) e carga manométrica. A princípio, o diâmetro da tubulação pode ser determinado em função da velocidade de carreamento das partículas. A tubulação do difusor pode ser convenientemente

afunilada (o diâmetro da seção difusora é diminuído gradativamente ao longo da tubulação, em trechos de seções com um conjunto de *risers*) para se obter velocidades mais altas de escoamento no interior da tubulação, com o intuito de reduzir a pressão de trabalho e equalizar a distribuição do fluxo pelos orifícios. As perdas locais devido as contrações ao longo da tubulação, também devem ser consideradas.

⇒ **Comprimento da tubulação da seção difusora:** é simplesmente o resultado das análises hidráulicas, sendo definido pela somatória do comprimento dos diâmetros dos orifícios, e o espaçamento entre estes.

⇒ **Comprimento total da tubulação do emissário submarino:** o comprimento, e conseqüentemente o custo de um emissário submarino, são determinados pelos requisitos de diluição inicial. O local exato de posicionamento do sistema difusor deve ser estudado cuidadosamente para se obter as melhores condições hidrodinâmicas de diluição.

Alguns autores apresentam diferentes procedimentos de cálculo para a hidráulica interna de difusores. Será apresentado, a seguir, uma linha clássica de cálculo hidráulico de sistemas difusores.

2.1.3.2. ANÁLISE HIDRÁULICA DETALHADA

O procedimento de cálculo hidráulico desenvolvido por WOOD et al (1993) será apresentado a seguir:

A vazão através de um orifício único é dada por:

$$Q = C_d \mathrm{A}_{\mathrm{or}} (2gH)^{1/2}; \qquad (1)$$

onde:

C_d = coeficiente de descarga;

A_{or} = área do orifício;

g = aceleração gravitacional;

H = carga total na tubulação.

A carga média total *H* na seção da tubulação é calculada da seguinte maneira:

$$H = \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\gamma_e} - \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_e}\right) Z_s; \qquad (2)$$

onde:

V = velocidade de descarga na tubulação;

p = pressão na tubulação;

γ_a e γ_e = pesos específicos do líquido ambiente e do efluente, respectivamente;

$\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_e}\right) Z_s$ = pressão diferencial no orifício de saída do efluente devido a diferença de densidade entre a água do corpo d'água e o efluente. Por conveniência, $\left(\frac{\gamma_a}{\gamma_e}\right) Z_s$ será escrito como: $(1+\beta_d) Z_s$.

Experimentos mostram que a equação empírica do coeficiente de descarga para orifícios cavados na própria tubulação em formato de boca de sino preenchidos completamente pelo efluente, é dada por:

$$C_d = 0{,}975\left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right)^{3/8} \qquad (3)$$

Segundo GRACE (1978), esta equação é válida somente para orifícios com taxa de contração em relação ao diâmetro do tubo principal igual ou maior que 4:1 , e somente para $D_{or} < 0{,}1\ D_i$

Para orifícios com o bocal de saída não arredondado (isto é, orifícios com o bocal de saída afunilado), o coeficiente de descarga é dado pela seguinte equação:

$$C_d = 0{,}63 - 0{,}58\left(\frac{V^2}{2gH}\right) \qquad (4)$$

Para tubulações verticais – *risers*, o coeficiente de descarga C_d é função da geometria, onde sempre deve-se ter em mente a minimização das perdas de carga locais. Para este caso, a

perda de carga está localizada no ponto de convergência entre a tubulação principal do emissário com o *riser*, devendo-se otimizar o projeto de tal forma que este ponto de entrada do efluente, da tubulação principal para o *riser*, seja liso e realizado de maneira suave, evitando-se "quinas", enquanto que o diâmetro do *riser*, em geral, deve ser maior que o diâmetro do orifício.

O coeficiente de descarga C_d, obtido a partir de um modelo físico com o diâmetro do *riser* constante ao longo de toda a tubulação e trabalhando com um número de Reynolds elevado, é dado por:

$$C_d = 0{,}88\left(1 - \frac{0{,}5V^2}{2gH}\right) \qquad (5)$$

Para se obter uma diluição inicial maior, recomenda-se diminuir o diâmetro do orifício de saída em relação ao diâmetro do *riser*, assumindo uma taxa de contração de 0,95. A equação para o coeficiente de descarga C_d, é dado por:

$$C_d = \frac{\left[1 - \left(\frac{0{,}5V^2}{2gH}\right)\right]}{\left[1{,}13 + 0{,}65\left(\frac{D_{or}}{D_r}\right)^4\right]^{1/2}} \; ; \qquad (6)$$

sendo:

D_r = diâmetro do *riser*.

Para um sistema difusor multiorifícios, a vazão através de cada orifício varia em função da carga média total na entrada da tubulação do sistema difusor. A carga total de energia, H aumenta no sistema difusor quanto mais distante o orifício (ou *riser-orifício*) estiver da margem, devido a perda de carga distribuída, e, se o difusor estiver localizado em terreno com declive (devido ao aumento da profundidade do corpo d'água), então a equação será dada por:

$$H_n = H_1 + \sum_{i=1}^{i-n} h_i + \beta_d\left(z_{s1} - z_{sn}\right); \qquad (7)$$

onde:

z_{s1} e z_{sn} = profundidades, da superfície até a linha de centro do primeiro e do $n_{ésimo}$ orifício, respectivamente;

h_i = perda de carga distribuída entre o $i_{ésimo}$ e o $(i-1)_{ésimo}$ orifício [onde "i" é o orifício, ou *riser-orifício*, localizado na seção mais distante da margem, e o (i-1)*ésimo* o orifício anterior], sendo dada por: $h_i = \left(\frac{fs}{2gDi}\right)V_i^2$; onde: V_i é a velocidade entre o i*ésimo* e o (i-1)*ésimo* orifício, D_i é o diâmetro interno da tubulação, *s* é o espaçamento entre o orifício, H_1 é a carga total na tubulação na seção mais distante da margem; e "*f*"é o fator de atrito de Darcy-Weisbach.

Desde que o fluxo de vazão no 1° orifício será levemente maior que o do orifício mais distante da margem, então, pode-se adotar um valor, $Q_1 = 0{,}95\ \overline{Q}$, levemente inferior do que o valor de projeto.

Partindo do princípio, que o diâmetro e vazão de descarga, são conhecidos, ou pelo menos, já pré-determinados, então, o valor de H_1 (carga no ponto 1 – orifício mais afastado da margem), pode ser computados da seguinte maneira:

$$H_1 = \frac{\left(\frac{Q_1}{C_d A_{or}}\right)^2}{2g}; \qquad (8)$$

Utilizando a fórmula apropriada para o coeficiente de descarga - C_d; a velocidade através do difusor 1, é dada por:

$$V_1 = \left(\frac{4Q_1}{\pi D_{or}^{\ 2}}\right); \qquad (9)$$

A perda de carga distribuída, entre o orifício 1 (mais afastado) e 2, é dada por:

$$h_1 = f\left(\frac{s}{D_i}\right)\left(\frac{V_1^2}{2g}\right). \qquad (10)$$

O fator de atrito é função, da rugosidade relativa ($k_r = k_s / D$) e do nº de Reynolds [$R_e = \left(\frac{VD_i}{v}\right)$; onde, v é a viscosidade cinemática do efluente], e pode ser calculado utilizando-se o Diagrama de Moody. O valor de rugosidade da tubulação varia em relação do tipo de material da camada interna do tubo.

As equações empíricas descritas, devem ser programadas e utilizadas com o apoio de um computador, permitindo a investigação de numerosas alternativas de projeto. Dessa maneira, as cargas para o segundo orifício e os subsequentes, podem ser calculadas, conforme a seguir:

$$H_n = H_1 + \sum_{i=1}^{i-n} h_i + \beta_d \left(z_{s1} - z_{sn}\right); \qquad (11)$$

e,

$$Q_2 = C_d\, a_2 \left(2gH_2\right)^{1/2}; \qquad (12)$$

onde, a relação $\left(\frac{V_1^2}{2gH_2}\right)^{1/2}$, é utilizada na equação do coeficiente de descarga correspondente, para cálculo no segundo orifício.

A partir deste ponto, o procedimento é repetido, passo a passo, para todos os orifícios, ordenadamente, do mais afastado ao mais próximo da margem.

No item 5.1. está apresentado o cálculo da hidráulica interna de difusores dos emissários submarinos do TEBAR, conforme o procedimento de cálculo citado acima.

2.1.3.3. HIDRÁULICA DOS DIFUSORES COM VÁLVULAS DE ORIFÍCIO VARIÁVEL (VÁLVULAS *DUCKBILL*)

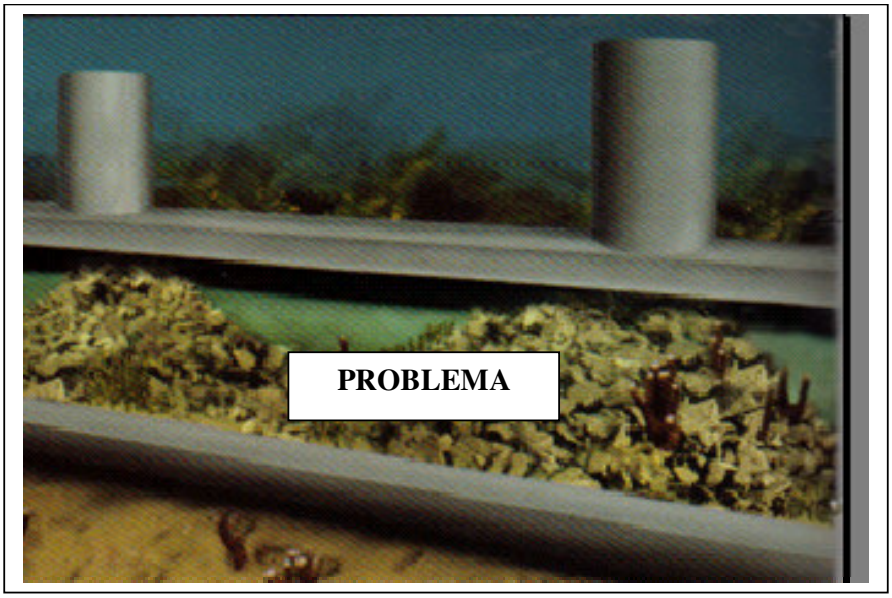
Características hidráulicas

As válvulas de orifício com abertura variável, também chamadas de válvulas *duckbill* ou "bico de pato", previnem a intrusão da cunha salina (em estuários e áreas costeiras), de sedimentos e de organismos marinhos no interior da tubulação de emissários submarinos, resultando em considerável economia nos custos de operação e manutenção.

Durante baixas vazões a cunha salina irá adentrar vagarosamente na tubulação através dos orifícios ou *risers*, onde continuamente, em direção a montante (a margem) irá ocupar sensível área no interior do tubo, causando o fenômeno *flooding* (WILKINSON, 1997) e acarretando a diminuição da eficiência dos difusores, além da redução de sua capacidade hidráulica. Isto ocorre porque a água salgada é em média 2,5% mais pesada que do efluente, estabelecendo-se, neste caso, o decaimento do número de Froude densimétrico.

A intrusão de sólidos pode também ocorrer devido ao transporte de sedimentos marinhos carreados em suspensão pelo ambiente aquático e que se depositam ao longo do comprimento da tubulação, ocorrendo a formação de dunas de material sólido cobrindo a abertura do orifício. Outro problema ocorre em regiões de águas rasas e estuarinas, onde o movimento das ondas e correntes marítimas pode causar a erosão e a liquefação do material de fundo existente nas vizinhanças do emissário propiciando condições de revolvimento e acelerando o processo de entupimento da tubulação (DUER&SALAS, 1995).

A figura abaixo apresenta em um primeiro momento os impactos que podem ser causados devido aos efeitos citados acima. Quando, o sistema difusor possuir orifícios feitos na própria tubulação ou anexados a *riser*s, é possível visualizar o entupimento parcial no interior da tubulação, causando um aumento expressivo da perda de carga e conseqüentemente a diminuição da eficiência do sistema difusor. Na seqüência da figura, observa-se a válvula *duckbill* (REDVALVE COMPANY Brochure, 1998) instalada, podendo ser anexada por braçadeiras, flanges ou risers, neste caso, apresenta-se a válvula fixada por flanges (ver capítulo posterior).



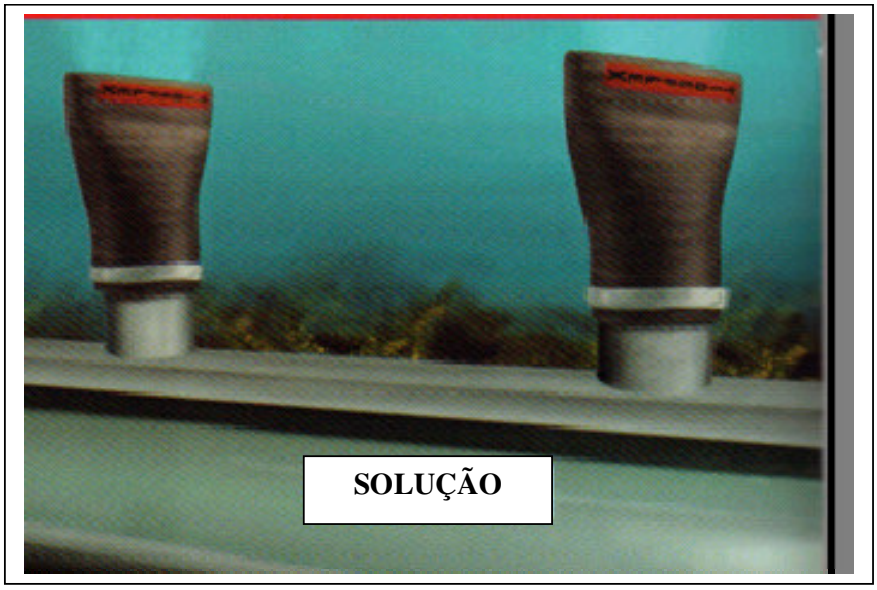


Figura 2.4: Comparativo do processo de intrusão de cunha salina e sedimentos para o interior da tubulação entre orifícios simples e a utilização de válvulas *duckbill* (REDVALVE, 1998).

Ressalta-se em seguida, para as válvulas bico de pato, as vantagens hidráulicas em termos da performance do sistema para realizar uma eficiente mistura do efluente com a massa d'água, comparando-se com as válvulas de orifício fixo (DUER, 2000; DUER, 2002; LEE et al, 2002):

- abertura progressiva do bico em função da vazão, acarretando um perfil não linear da velocidade do jato (figura 2.5), enquanto que, o perfil de velocidade do jato para orifícios fixos é uma função linear da vazão.
- Para vazões baixas, as velocidades do jato geradas são maiores, decorrente de uma área efetiva de abertura do bocal menor (figura 2.6).
- A perda de carga, tanto para válvulas *duckbill*, quanto para orifícios fixos, é função do quadrado da velocidade do jato. Em baixas vazões, a alta velocidade do jato propiciada pelas válvulas *duckbill,*acarretam perdas de carga maiores do que em relação a válvulas com orifício fixo. Nas vazões de pico, o processo será o inverso (figura 2.7). Deve-se destacar que, é nas vazões de pico que a perda de carga se torna um problema mais sério, portanto, a baixa perda de carga nas vazões de pico para válvulas *duckbill* é uma vantagem.
- Aumento na eficiência da diluição inicial do efluente, devido a maior velocidade do jato nas menores vazões e da influência da geometria elíptica da pluma. O aumento da velocidade do jato gera uma maior turbulência, aumentando o fluxo da quantidade de movimento do jato, o qual contribui para uma diluição inicial maior. A geometria elíptica da pluma melhora a diluição propiciando uma dispersão mais rápida, pois o fluído do ambiente (corpo d'água) alcança mais rápido a linha central, do que uma pluma em formato circular.

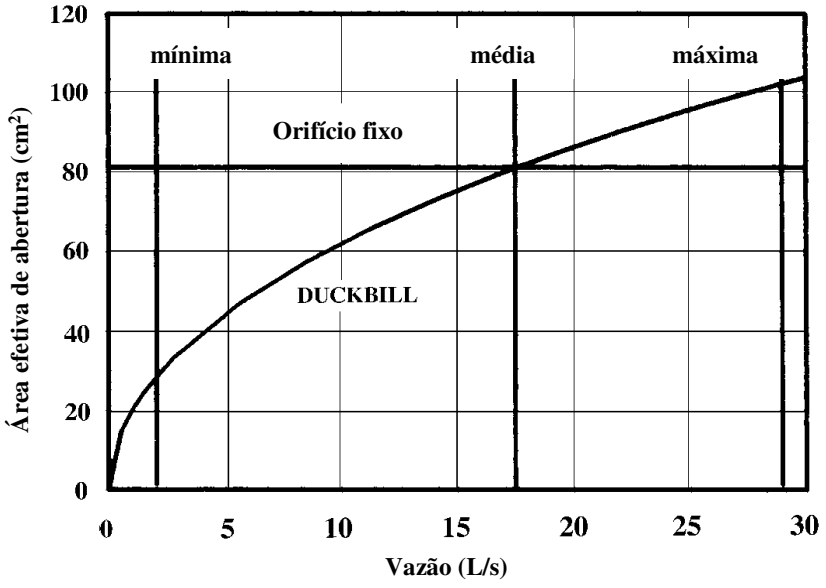


Figura 2.5: Relação da vazão com a abertura do bocal da válvula *duckbill*, em relação a válvulas de área fixa (DUER, 2000).

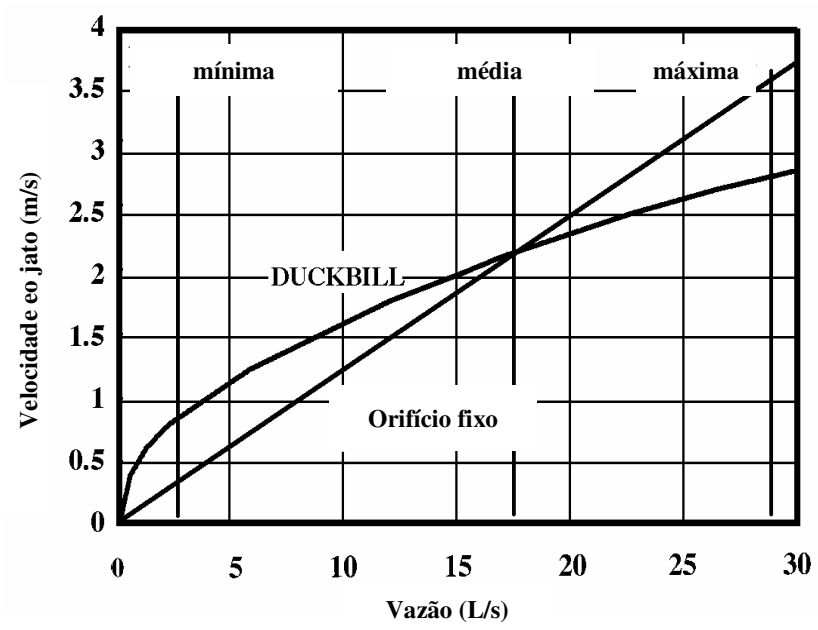


Figura 2.6: Relação da vazão com a velocidade efetiva do jato através da válvula *duckbill*, em relação a válvulas de área fixa (DUER, 2000).

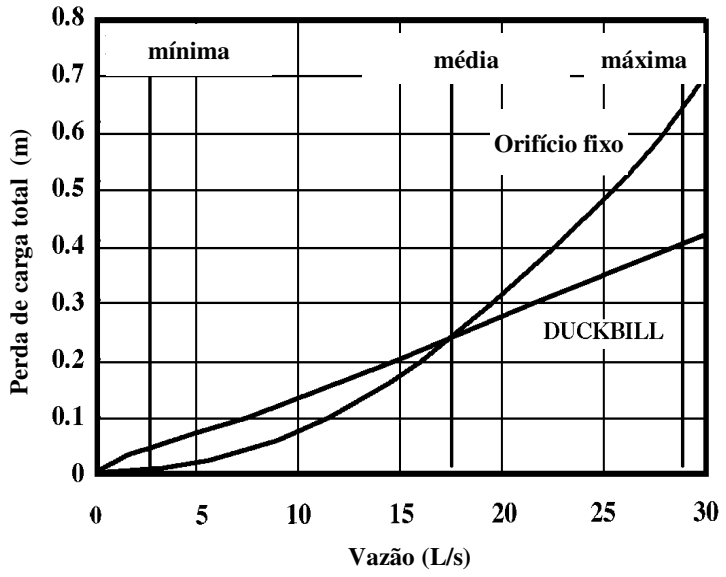


Figura 2.7: Relação da vazão com a perda de carga total, utilizando-se válvula *duckbill*, em relação a válvulas de área fixa (DUER, 2000).

Modelos e tipos de material de fabricação

A válvula de orifício variável é fabricada em material de borracha vulcanizada reforçada com nylon ou poliéster (similar a pneu de caminhão). As válvulas podem ser fornecidas com flanges quadradas permitindo a conexão em tubos de concreto e em *risers* (com ou sem cotovelos) do mesmo material (DUER, 2002). A porção de entrada do efluente na válvula é circular e seu bocal é em forma de um lábio, conhecido como *duckbill*, ou bico de pato. Utilizando um modelo bi-dimensional de membrana de borracha, a válvula é considerada um bocal convergente e a área de abertura é prevista em função da carga manométrica (LEE et al, 2001). A elasticidade da borracha mantém o bico fechado na ausência de pressão, e no momento de aumento de pressão ocorre a abertura progressiva do bico que permite a passagem do efluente.

As duas principais empresas fabricantes deste tipo de válvula para sistemas difusores são:

⇒ EVR – ELASTOMER VALVE RUBBER, com sua sede localizada em Ontário (Canadá). O modelo existente para sistemas difusores de emissários submarinos é o EVR Check Valve, Série CPF, produzido como uma peça única, o "bico de pato", mais a flange, ambos de material de borracha (figura 2.8), fixada por parafusos na retaguarda, através de uma flange de metal diretamente em contato com a tubulação principal ou *riser*.

O custo desta válvula é alto e pode se tornar um fator importante de decisão nas planilhas de custo total de projeto de um sistema difusor. A cotação de junho de 2004, para o modelo CPF com diâmetro interno - D_i igual a 5-1/2" ($\cong$ 14cm) apresentou custo unitário de US$387,00 (trezentos e oitenta e sete dólares), enquanto que, para o mesmo modelo CPF com D_i igual a 10-1/2" ($\cong$ 26,7cm) a válvula teve custo unitário de US$808,00 (oitocentos e oito dólares).

A tabela 2, mostra as dimensões existentes para o modelo EVR – CPF, com as siglas referentes de cada seção da válvula. A seção D_i – diâmetro interno da válvula é a referência para a escolha do modelo disponível, sendo o D_i da válvula igual ao D_e – diâmetro externo do orifício de saída da tubulação ou do *riser*:

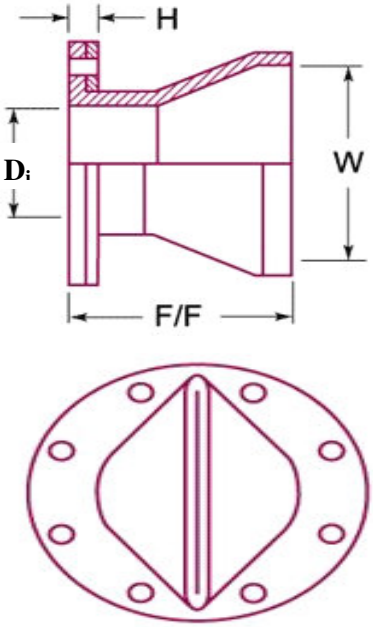


Figura 2.8: Válvula duckbill EVR Check Valve, série CPF (EVR, 2003).

Tabela 2: Valores das seções da válvula *duckbill* em função do diâmetro interno

DI (cm)	F/F (cm)	H (cm)	W (cm)	Peso (kg)
2,54	7,62	2,22	6,03	1,14
3,81	9,84	2,22	6,67	1,82
5,08	13,34	2,22	9,84	2,27
6,35	15,88	2,22	11,75	3,63
7,62	19,05	2,86	13,97	4,99
10,16	22,86	2,86	18,73	6,81
12,70	27,94	2,86	20,96	7,72
15,24	30,48	3,49	26,67	9,53
20,32	35,56	3,49	34,93	11,35
25,40	40,64	3,49	43,18	16,80
30,48	45,72	3,49	49,85	26,79
35,56	50,80	3,49	62,87	34,05
40,64	58,42	3,49	67,31	56,30
45,72	63,50	3,49	75,57	93,07
50,80	81,28	4,76	80,01	143,01
60,96	104,14	4,76	109,22	181,60
71,12	111,76	4,76	116,84	215,65
76,20	116,84	4,76	124,46	250,15
81,28	132,08	4,76	129,54	273,31
91,44	147,32	4,76	140,34	296,92
106,68	154,94	6,03	168,28	431,30
121,92	177,80	6,03	189,23	452,64
137,16	187,96	6,03	199,39	485,78
152,40	203,20	6,03	215,90	577,03
160,02	223,52	6,03	233,68	594,74
182,88	246,38	6,03	266,70	671,92

⇒ RED VALVE COMPANY, situada no estado da Pennsylvania (Estados Unidos) detentora da marca Tideflex - modelo Tideflex Effluent Diffusers, sendo produzidas com as mesmas dimensões das tradicionais válvulas contra-fluxo Tideflex Check Valves, nas séries TF1, TF2 e 35 .

As válvulas contra-fluxo (*check valves*), foram inicialmente fabricadas apenas com o intuito de evitar o contra fluxo para o interior da tubulação no momento da descarga das águas de drenagem e não permitir a entrada de sedimentos como: areia, pedregulhos e pequenos organismos aquáticos (figura 2.9). Para este caso, a tubulação ou o chamado "cano de descarga", pode estar submersa ou na superfície, sendo as válvulas acopladas no final da tubulação, fixadas geralmente por braçadeiras ou flanges.

As séries TF1, TF2 e 35, apresentam basicamente a mesma função, porém com uma série de peculiaridades interessantes, como: o modelo TF1 é mais fácil de se assentar no solo, pois, a ponta inferior é alinhada horizontalmente; enquanto que, o modelo TF2 deve ficar suspenso, devido a proeminência da ponta do bico inferior (evitando o atrito da ponta do bico com o solo). O modelo 35 é flangeado, sendo fabricado em peça única, ou seja, o "bico de pato" mais a flange são ambos de material de borracha, ao contrário dos modelos TF1 e TF2, que são fixados por braçadeiras (encaixe do tipo *slip over*).

Para o caso das válvulas terem somente a função de evitar o contra-fluxo, estas, são fabricadas com o bico enrolado, o que irá propiciar maior selamento. Porém, ao mesmo tempo, acarretará um aumento da perda de carga e uma maior pressão de trabalho, sendo fabricadas somente para diâmetro interno maior que 45,72cm (18"). Estes modelos não são adequados para a utilização em sistemas difusores.

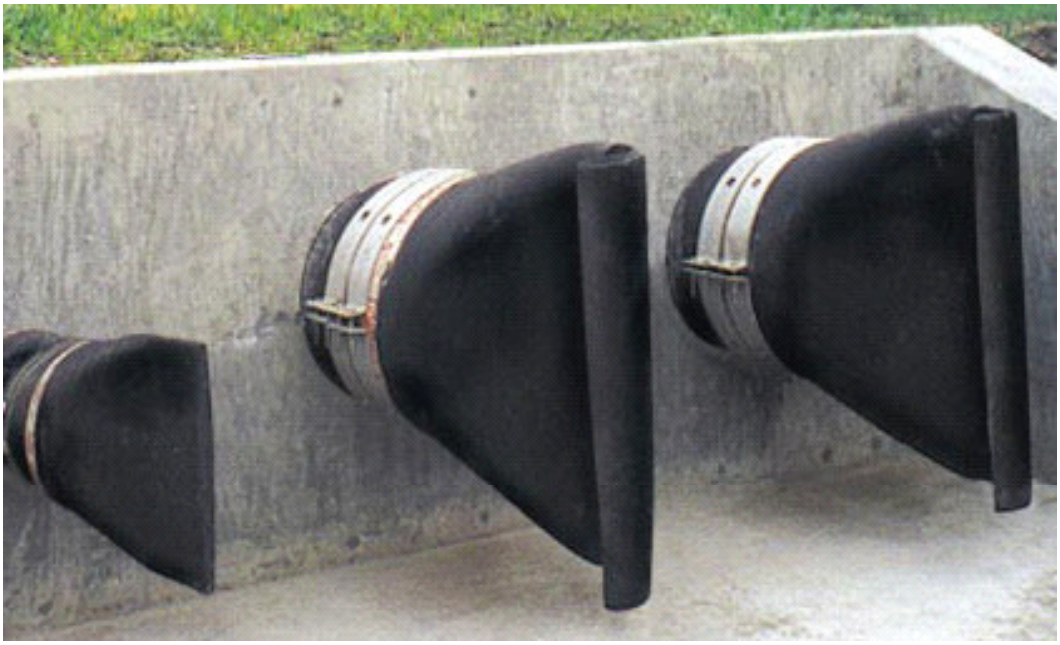


Figura 2.9: Modelo de válvula *duckbill* com bico curvado, para prevenção máxima a entrada de sedimentos em áreas de erosão ou alagadas (REDVALVE, 2004).

As válvulas *duckbill Tideflex Effluent Diffuser* (figura 2.10) correspondem ao modelo recomendado para sistemas difusores em emissários submarinos, e são similares a da marca EVR. São dimensionadas com as mesmas referências do modelo Tideflex Check Valves, séries TF1, TF2 e 35.

Obviamente, não devem possuir o bico curvado, para não comprometer a velocidade e o direcionamento do jato, o que poderia diminuir seriamente o efeito de diluição inicial do efluente no corpo d'água.

Podem ser produzidas especialmente para atender a conformidade da tubulação, como é o caso da substituição de um sistema difusor com orifício simples (um buraco feito no próprio tubo) por válvulas *duckbill* com flanges quadradas e *risers* verticais ou em cotovels de 45° e 90° do mesmo material de borracha da válvula, para elevar o orifício de saída nos casos em que a tubulação está enterrada e para melhorar a eficiência da diluição do efluente (ver maiores detalhes no subitem seguinte "Instalação com braçadeiras, flanges e *risers*").

Não foi possível obter a cotação das válvulas *duckbill* da marca Red Valve, apesar de insistentes solicitações, inclusive para projetos em andamento.

O diâmetro interno da válvula é a referência para a escolha do modelo disponível, pois o D_i da válvula é igual ao diâmetro do orifício de saída do efluente da tubulação ou do diâmetro do *riser*.

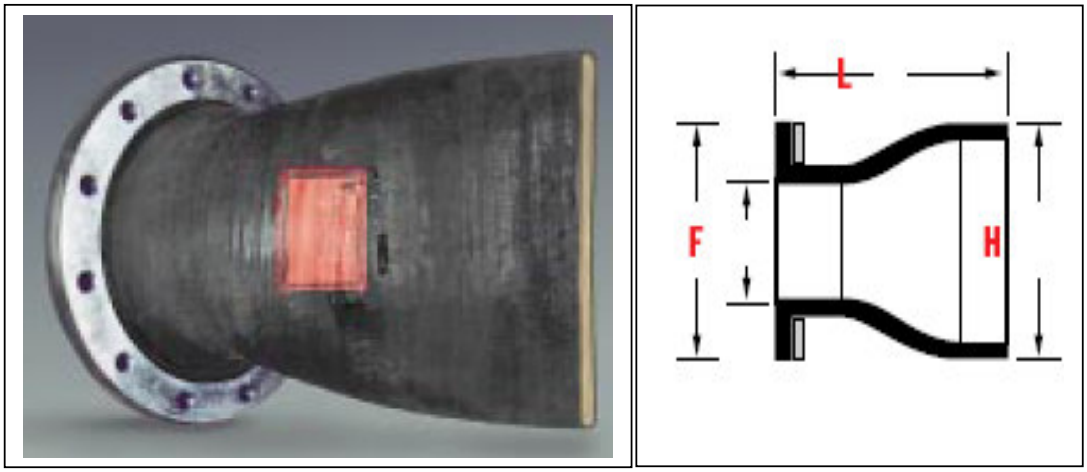


Figura 2.10: Válvula *duckbill Tideflex Effluent Diffuser* (REDVALVE, 2004).

Os materiais de fabricação das válvulas, variam em função do tipo de substância química, viscosidade e temperatura do efluente. Ambas as empresas citadas acima não possuem exclusividade de material, trabalham com os mais variados tipos, que levam o nome da patente ou são chamados pelo nome de mercado, sendo os seguintes:

- EPDM – Ethylene Propylene Rubber: também conhecido como Nordel, efetivo para a aplicação de descargas para controle de fluxo de água, vapor d'água, cetonas e efluentes de ácidos diluídos. Boa resistência a abrasão com efluentes em altas temperaturas de até 160,5°C durante períodos curtos de tempo. Adequado para trabalhar em temperaturas na faixa de –59,5°C a 133°C;
- Viton™: para solventes fortes, hidrocarbonetos halogenados, óleos, substâncias químicas em geral, e efluentes oxigenados e ozônio. Adequado para trabalhar na faixa de temperatura entre –37,5°C a 188°C. Viton é uma marca registrada da Du Pont Dow Elastomer;
- Buna N: resistente a querosene, substâncias químicas moderadamente agressivas, gordura, óleo, graxa e alguns hidrocarbonteos. Adequado para trabalhar na faixa entre –48,5 a 94,5°C;
- Borracha natural: boa resistência a abrasão, resistência a tensão e resiliente. Também, adequado para efluentes de ácidos orgânicos, álcoois, cetonas e substâncias químicas moderadamente agressivas a fracas. Adequado para trabalhar na faixa entre –4,5°C a 67°C;

- Hypalon™: resistente a ácidos e bases fortes, ozônio, substâncias químicas oxidadas e efluentes com temperatura elevada. Adequado para trabalhar na faixa entre –59,5°C a 94,5°C. Hypalon é uma marca registrada da Du Pont Dow Elastomer;
- Butyl ou Chlorobutyl: boa resistência a efluentes com gordura animal e vegetal, substâncias químicas agressivas e oxidadas, óleos e graxas, e efluentes com temperatura elevada. Apresenta a menor permeabilidade entre todas as borrachas sintéticas. Adequado para trabalhar a temperaturas extremamente baixas a -108°C, podendo chegar a 133°C em períodos moderados de tempo;
- Neoprene: geralmente resistente a óleos e graxas, substâncias químicas moderadamente agressivas, gordura, hidrocarbonetos, ozônio e ao crescimento de organismos aquáticos como mariscos e moluscos, que ficam aderidos na parede externa da válvula. Adequado para trabalhar na faixa entre –59,5C a 94,5°C.

Instalação com braçadeiras, flanges e *risers*

Sistemas difusores assentados sobre a superfície do leito de fundo do corpo d'água que foram planejados e construídos com orifícios escavados na própria tubulação, podem ser substituídos por válvulas *duckbill* com anéis adaptadores com o mesmo diâmetro do orifício existente no emissário, através de flanges quadradas com quatro furos para fixação na própria estrutura da tubulação e/ou com inclinação diversas (figura 2.11).

Esta técnica permite uma rápida substituição sem a necessidade de inserir um novo trecho de tubo com difusores, além de não ter que realizar o recorte do trecho atual submerso, sendo dessa maneira, um processo fácil, ágil e de menor custo.

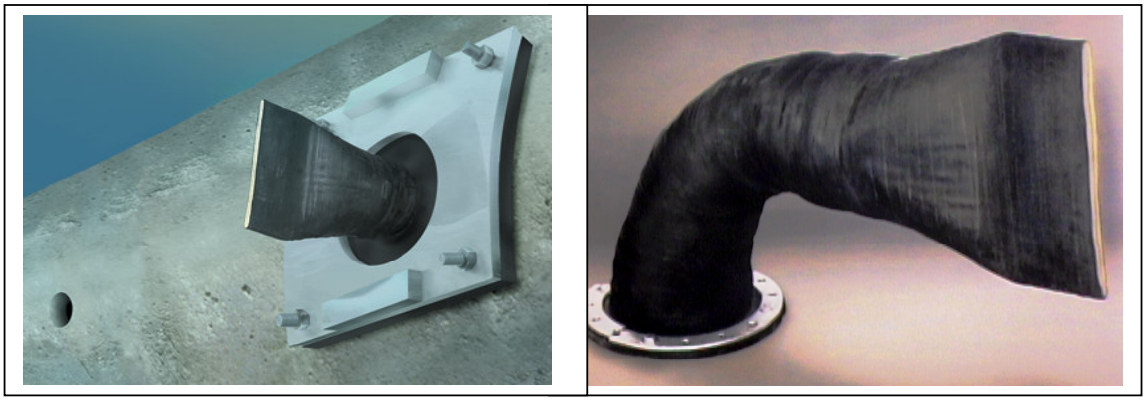


Figura 2.11: Fixação com flange quadrada na estrutura da tubulação e modelo com cotovelo a 45º (REDVALVE, 2004).

Para os emissários submarinos enterrados ou entrincheirados existe a opção da válvula *duckbill* ser produzida como uma peça única, em conjunto com o *riser*. Um exemplo que pode ser ilustrado para a instalação de válvulas *duckbill* acopladas em *risers* do mesmo material, é o da estação de tratamento de esgotos de Taylor, em Enoree River, Carolina do Sul (RedValve, 2004), onde, originalmente o sistema possuía somente uma "tubulação de descarga" (orifício único), e foi modificada por um sistema de difusores, acarretando na minimização de impacto ambiental e rápida dispersão neste rio, com características rasas - profundidade média de aproximadamente 1,83 m. Na figura 2.12, mostra-se trecho da tubulação difusora de PEAD com válvulas *duckbill* de 150 mm de diâmetro, inclinadas a 30^0 com a horizontal e prolongadas com risers de 1 m de comprimento, podendo desta maneira toda a estrutura ser enterrada, com somente as válvulas protuberantes acima do solo.

Figura 2.12: Risers e válvulas *duckbill* de material elastomérico, anexados ao tubo de PEAD (REDVALVE, 2004).

A instalação das válvulas com braçadeiras, normalmente utilizadas para tubulações de descarga com orifício único ou multiorifícios (quando anexadas em *risers* do mesmo material do emissário), deve ser realizada na posição vertical, em áreas limpas e afastadas de materiais cortantes. Toda e qualquer irregularidade ou pontas cortantes da extremidade do tubo ou *riser* deve ser removida. A válvula deve ser encaixada suavemente, agasalhando a ponta da tubulação, sem a necessidade de lubrificantes para facilitar sua instalação, que posteriormente possam fazer a válvula "escorregar" ou "dançar", deslocando-se do lugar exato de fixação. As braçadeiras são fixadas com furadeiras e brocas de aço perfurando o tubo e a válvula, inserindo parafusos e porcas de aço inoxidável; caso, duas braçadeiras sejam necessárias, estas devem ser rotacionadas e posicionadas a 90° uma da outra em relação ao fecho (EVR, 2003).

2.1.4. PRINCIPAIS ASPECTOS DE DIMENSIONAMENTO DE PROJETO PARA TUBOS DE PEAD

Os tubos em geral, são classificados em classes PN (como: PN4, PN6,3, PN10, PN16, etc...), que corresponde à pressão nominal (em bar ≡ kg/cm^2) a uma temperatura de +20°C, durante seu ciclo de vida, multiplicado por um fator de segurança de 1,25. A influência da temperatura é de extrema importância nas propriedades de resistência do material. Conforme a temperatura aumenta, o módulo elasticidade E decresce, ou seja, o material começa a se tornar mais "mole", assim como, também irá decrescer a resistência a longo prazo (BJORKLUND et al, 2002).

No trecho dos emissários submarinos do TEBAR, a tubulação é de classe PN4, enquanto que no trecho do sistema difusor, a tubulação é de classe PN6 (SONDOTECNICA, 1990).

Uma classificação especial para os tubos de polietileno (PE), também é dada, sendo identificados pelas iniciais PE seguidas por uma numeração (63, 80 ou 100); tais números significam a resistência do material a longo prazo, durante seu período de uso (ciclo de vida) a temperatura de +20°C.

Tabela 3: Características mecânicas do material PEAD.

Características de Material		PE80	PE100
Tensão de projeto	MPa	6,3	8,0
Massa específica	Kg/m^3	945-956	957-961
Vazão de fusão (190°C/5kg)	g/10min	0,4-0,7	0,2-0,4
Resistência a tração	MPa	18-23	23-25
Alongamento até a ruptura	%	>600	>600
Temperatura de fragilidade física	°C	< -70	< -70
Módulo de Elasticidade E	MPa	650-1000	1000-1200
Coeficiente de expansão linear	mm/m°C	0,17	0,17

Fonte: KWH Pipe – PE Pressure Pipe Systems (2002)

Uma outra maneira de classificar os tubos de PE, além da pressão interna, é utilizando-se da relação dimensional – RD.

Esta metodologia é útil para tubulações subaquáticas que são instaladas pelo método *float-and-sink* (ou qualquer outro, no qual o tubo, durante o procedimento de afundamento, sofra uma deformação na forma de "S"). A relação dimensional - RD pode ser comparada

diretamente, tanto com a rigidez (propriedade importante durante operação em pressão negativa ou habilidade de resistir a cargas externas), quanto com a flexão do tubo (flambagem).

A rigidez do tubo é dada pela seguinte equação:

$$R = \frac{EI}{D^3} \qquad (13)$$

onde:

R = rigidez do tubo (normalmente expressa em kN / m^2)

E = módulo de elasticidade do material

I = momento de inércia da parede do tubo ($I = e^3 / 12$, para paredes sólidas; onde e = espessura da parede)

D = diâmetro externo do tubo

A equação (13), relacionando-se com a relação dimensional – RD (relação entre o D_e – diâmetro externo, e a espessura – e, da parede do tubo), pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$R = \frac{0{,}083E}{(RD-1)^3} \qquad (14)$$

A resistência a flambagem do tubo de PE - Polietileno, relacionada com a RD, pode ser expressa da seguinte maneira:

$$P_b = \frac{2{,}83cE}{(RD-1)^3} \qquad (15)$$

onde:

P_b= a pressão de flambagem do tubo;

E = módulo de elasticidade do material;

c = fator de correção da ovalização do tubo.

Tabela 4: Fator de correção da pressão de flambagem em relação a ovalização.

Ovalização (%)	0	2	4	6
c	1,0	0,83	0,69	0,57

2.2. TÉCNICAS DE INSTALAÇÃO

2.2.1. *FLOAT-AND-SINK*

Desde a década de 60, países do norte europeu como a Suécia, Finlândia, Noruega e Alemanha, vem utilizando emissários de PE – polietileno, produzidos em longo comprimento através do processo de extrusão. Um dos primeiros a se ter notícias foi o de Vlissingen, em 1967 na Holanda, para o lançamento do efluente químico de uma planta, que consistia de três tubulações em paralelo, com 1000mm de diâmetro e 400m de comprimento cada um (AVANZINI&MARCHETTI, 1994). A empresa norueguesa, Pipelife Norge AS, especialista na produção deste tipo de tubulação, fabrica tubos de até 600m, com 1600mm de diâmetro externo (D_e) e espessura da parede de até 100mm (BLOMSTER, 2002). Este processo de produção de tubulações de PE por extrusão se desenvolveu devido à deficiência de métodos e a inerente possibilidade de falhas na produção de juntas e conexões de tramos de menor comprimento, que só foram resolvidos com a utilização da junção de tramos de PE por fusão quente (butted fusion).

A técnica *float-and-sink* foi desenvolvida especificamente para ser utilizada na instalação de tubulações submersas de PEAD, porém, emissários de aço e material plástico em geral podem ser instalados através deste método, sendo propicia para vários tipos de corpos d'água, como: estuários, rios, lagos, águas costeiras rasas com ondas de até 0,5m, e águas marinhas com alta profundidade e que demandem tubulações de grande comprimento.

Existem basicamente, duas alternativas para a instalação dos pesos de lastro utilizando esta técnica: o lançamento do emissário no corpo d'água com a tubulação com os pesos de lastro previamente anexados, ou sem os pesos de lastro; ou seja, a instalação dos pesos de lastro pode ocorrer em terra ou na água, puxado por barcaças pela superfície, onde flutua até o local exato de submersão e assentamento.

Esta metodologia é possível pois emissários submarinos de PEAD são leves e podem ser projetados para flutuar com os pesos de lastro anexados ao tubo quando preenchidos por ar no seu interior, adquirindo uma forte flutuação negativa quando, gradativamente, a água adentra para o interior da tubulação no sentido terra-água (CEPIS, 2002). O ar é mantido no interior do tubo, pois a seção inicial (seção que está sendo guinchada) está selada por um flange cego, que funciona como uma tampa, a qual está acoplada uma válvula reguladora de ar (OZEL et al, 2002). Gradualmente o ar é liberado do interior do tubo por esta válvula e é permitida a entrada de água na seção mais próxima a margem. É importante que a tubulação

seja afundada progressivamente do sentido da margem para a seção final para impedir dessa maneira o aprisionamento do ar em seções do tubo o que poderia causar flambagem da estrutura no momento da submersão.

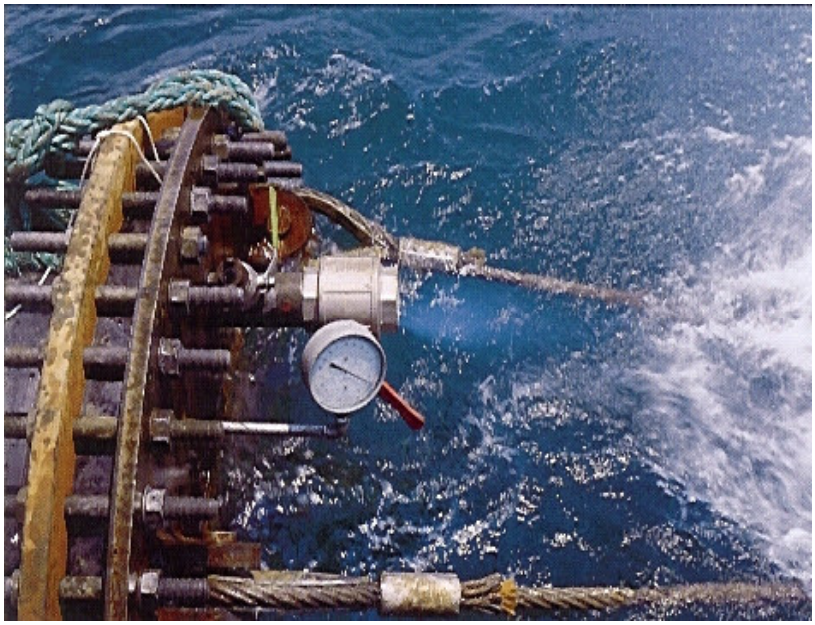


Figura 2.13: Válvula de controle de liberação de ar do interior da tubulação (OZEL et al, 2002).

Figura 2.14: Afundamento da tubulação de PEAD com colares de lastro anexados (OZEL et al, 2002).

BLOMSTER (2002) confirma que, a técnica de puxamento por reboque, tem se mostrada segura, também para tubos de grande diâmetro, apesar de alguns insucessos já terem acontecidos. Para a operação ocorrer com segurança, os mergulhadores devem estar em

contato com os barcos de posicionamento e o barco de controle de liberação de ar, alertando os movimentos necessários para manter a tubulação no alinhamento da rota pré-determinada e a quantidade de ar que deve ser liberada para ocorrer um assentamento correto e seguro no leito de fundo. Como via de regra, KWH PIPE (2002) recomenda uma taxa de submersão de no máximo 304,8 m/h para tubos de grande diâmetro. O ar é liberado através da válvula por pequenas descompressões em intervalos suficientes de tempo para o recebimento da comunicação do mergulhador. É preferível que a liberação do ar seja feita bem devagar do que rapidamente, para evitar danos estruturais na tubulação e permitir a segurança dos mergulhadores que devem estar sempre acima da tubulação submersa. Adicionalmente, a flange cega deve estar muito bem fixa para não ser liberada e agir como uma bala de canhão, além de também ser necessário a utilização de resistentes cabos de guincho.

2.2.1.1. MODELOS, DIMENSIONAMENTO E INSTALAÇÃO DOS PESOS DE LASTRO PARA TUBULAÇÕES DE PEAD

A causa mais comum de falhas em emissários de PEAD, especialmente com pequeno diâmetro, é devido à ancoragem inadequada. Esta deficiência permite que a tubulação se movimente em função da ação de ondas, correntes e arrebentações; passível de ocorrer, porém indesejável, mesmo sendo o PEAD mais tolerante a movimentos devido a sua flexibilidade em relação a outros materiais. Emissários de PEAD com pequeno diâmetro estabilizados com pesos de lastro de concreto raramente falham devido à erosão subsuperficial, pois, devido a flexibilidade do material, este tende a se depositar no espaço escavado, se conformando nas irregularidades do terreno, sem causar danos estruturais. Outra causa de falha é devido à corrosão e desgaste das peças de metal (parafusos, roscas, etc...) que fixam os pesos, podendo permitir a liberação e a flutuação do tubo para a superfície. A seguir estão descritas as etapas básicas de dimensionamento e seleção dos pesos de lastro para emissários submarinos (CEPIS, 2002; KWH PIPE, 2002; PPI, 2004).

Modelos de peso de lastro

A ancoragem de lastro, para emissários submarinos de PEAD, é usualmente feita com concreto reforçado para obter uma adequada densidade e durabilidade do material no meio aquático. Existem vários formatos, porém os mais usuais são: o trapezoidal ou quadrado utilizado em alto mar resistindo ao rolamento quando submetido a forças laterais provenientes

das correntes marítimas e da ação de ondas, e o colar circular que é geralmente empregado quando o emissário está enterrado em trincheira ou quando se prevê assentar a tubulação em solo arenoso ou levemente argiloso (CEPIS, 2002).

A figura 2.15 ilustra uma ancoragem de lastro usual para tubos com diâmetro pequeno (menor que 20 cm), apresentando dois colares retangulares de concreto de maneira que possam *abraçar* o diâmetro externo do tubo. Esse tipo de ancoragem utiliza dois parafusos (tirantes com rosca) resistentes a corrosão da água, podendo ser feitos de fibra de vidro ou polietileno. Esse tipo de ancoragem não possui o centro de gravidade (colar inferior maior e mais pesado) abaixo do centro de flutuação e portanto o torna propenso a balançar e rolar sob condições severas (KWH PIPE, 2002). Outro comentário que pode ser feito a respeito desta ancoragem é que os parafusos são difíceis de serem alinhados com os buracos (inferior e superior), dos respectivos colares, tornando mais difícil a injeção de argamassa no espaço anular.

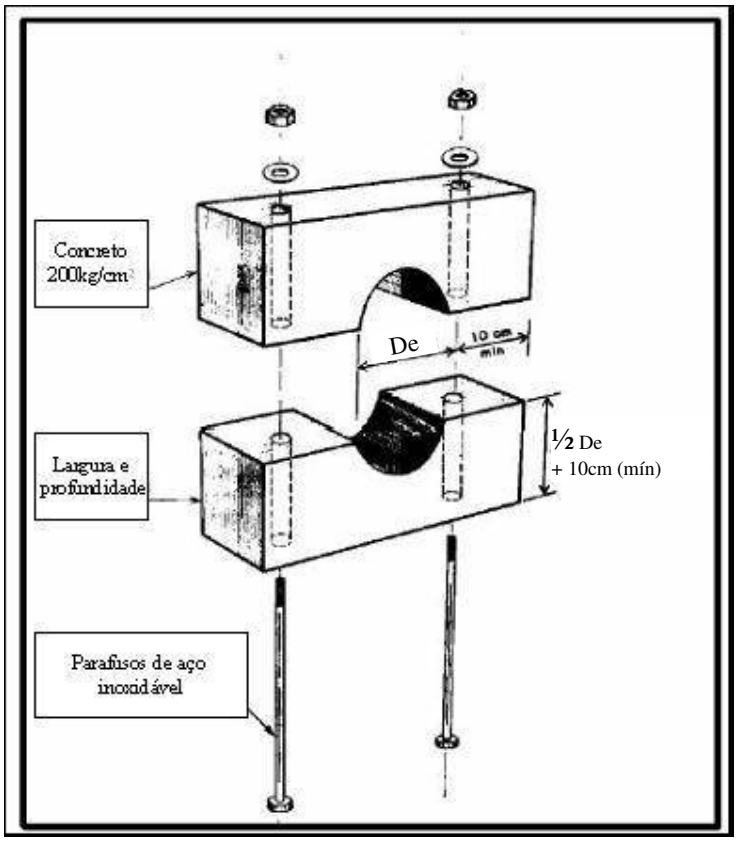


Figura 2.15: Colar de lastro de concreto retangular (CEPIS, 2002).

Outro tipo de ancoragem para tubulações de PEAD, é apresentado na figura abaixo. O espaçamento da ancoragem é usualmente limitado pelo tipo de equipamento disponível para manuseio ao invés de considerarmos a deflexão ou deformação linear. A principal desvantagem para este tipo de ancoragem é que não existe área de contato suficiente entre o tubo e as barras, para firmar na posição, podendo resultar no retorcimento do tubo com RD – Relação Dimensional (relação entre o D_e – diâmetro externo, e a espessura – e, da parede do tubo) alta durante o lançamento e afundamento do tubo.

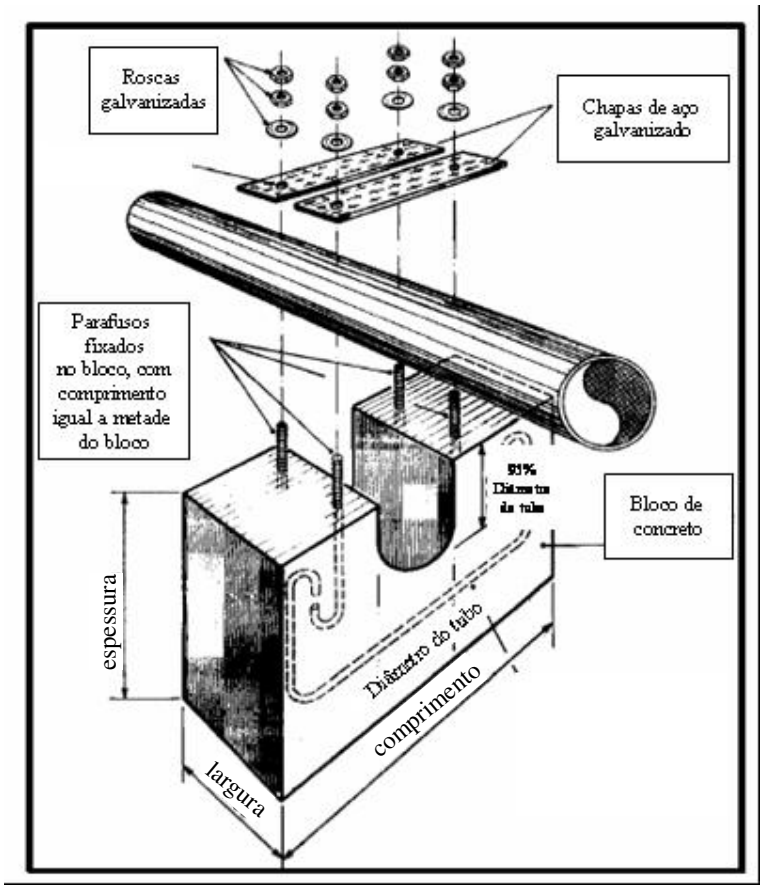


Figura 2.16: Colar de lastro com base em concreto e chapa de ferro (CEPIS, 2002).

Um modelo de fácil instalação e que apresenta menores problemas de corrosão devido à ausência de parafusos para a junta dos colares é apresentado na figura abaixo. A sua instalação é feita espremendo o tubo de PEAD com o auxílio de duas braçadeiras diminuindo o diâmetro do tubo para passar pelo gargalo onde a ancoragem será posicionada. A inserção do temporário tubo deformado, é realizada através de um estreitamento de 0,6 - 0,7d (ver figura 2.17), em seguida as braçadeiras são afrouxadas permitindo ao tubo agarrar-se com a forma interna arredondada da ancoragem. Este método só é possível para tubos de PEAD e polipropileno**.**

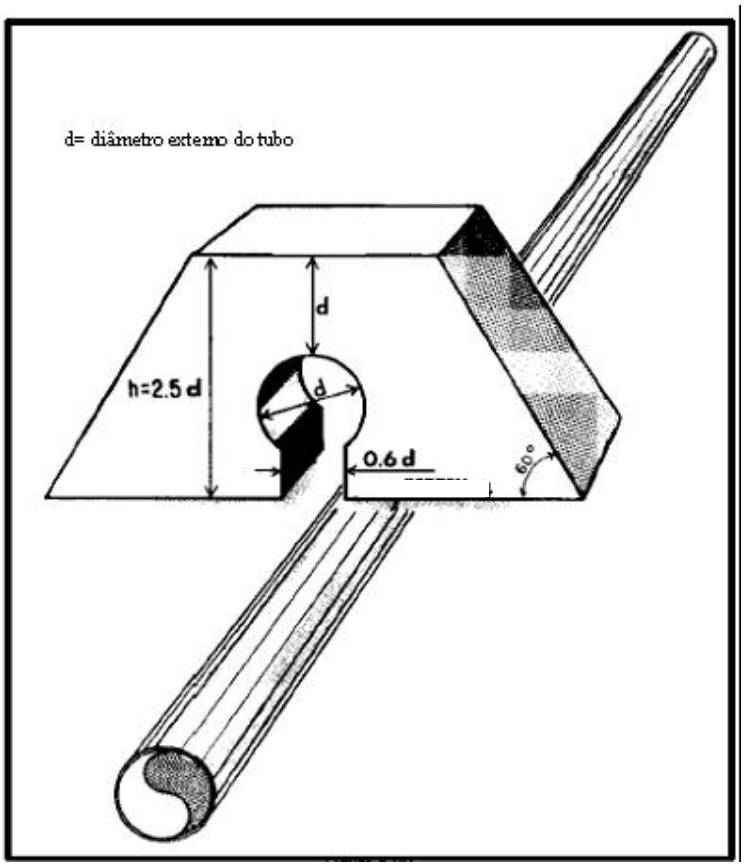


Figura 2.17: Colar de lastro de concreto piramidal (CEPIS, 2002).

Catálogos de empresas especializadas na fabricação de tubos de PEAD para instalações subaquáticas, apresentam tabelas com sugestões de dimensionamento de vários modelos de pesos de lastro em função do diâmetro externo da tubulação (Tabela 5).

Tabela 5: Valores de dimensionamento dos colares de lastro.

DE - Diâmetro Externo (cm)	Peso aproximado dos colares de lastro de concreto (kg)		Dimensões aproximadas do colar de lastro de concreto (cm)						Dimensões dos parafusos (cm)	
	no ar	na água	"D"	"X"	"Y"	"T"	"S(min)"	"W"	diâmetro	comprimento
8,89	5,45	3,18	10,16	22,86	9,53	6,35	3,81	6,35	1,91	30,48
11,43	9,08	4,54	12,70	27,94	12,07	6,35	3,81	7,62	1,91	30,48
14,12	13,62	8,17	15,24	30,48	13,34	8,89	3,81	7,62	1,91	30,48
16,84	15,89	9,08	18,10	33,02	14,61	8,89	3,81	7,62	1,91	30,48
18,11	20,43	11,80	19,37	34,29	15,24	10,80	3,81	7,62	1,91	30,48
21,92	24,97	13,62	23,50	38,74	17,46	10,80	3,81	7,62	1,91	30,48
27,31	43,13	24,97	28,58	48,90	21,91	11,43	5,08	10,16	1,91	30,48
32,39	56,75	34,05	33,66	53,98	24,45	12,70	5,08	10,16	1,91	33,02
33,99	79,45	45,40	35,24	60,96	27,94	13,34	5,08	12,70	1,91	33,02
35,56	102,15	59,02	36,83	62,23	28,58	16,51	5,08	12,70	2,54	33,02
40,64	113,50	65,83	41,91	67,31	31,12	16,51	5,08	12,70	2,54	33,02
45,72	163,44	95,34	46,99	72,39	33,66	20,96	5,08	12,70	2,54	33,02
50,80	181,60	106,69	52,07	77,47	36,20	20,96	5,08	15,24	2,54	33,02
55,88	242,89	140,74	57,15	87,63	41,28	21,59	5,08	15,24	2,54	33,02
60,96	276,94	163,44	62,23	92,71	43,82	22,23	5,08	15,24	2,54	33,02
71,12	408,60	236,08	72,39	102,87	48,90	28,58	5,08	15,24	2,54	33,02
80,24	517,56	299,64	81,28	111,76	53,34	31,12	5,08	15,24	2,54	33,02
91,44	649,22	376,82	92,71	123,19	59,06	34,29	5,08	15,24	2,54	33,02
100,25	803,58	463,08	101,92	132,08	63,50	38,74	5,08	15,24	2,54	33,02
106,68	873,95	510,75	107,95	138,43	66,68	38,10	5,08	15,24	2,54	33,02
120,35	1135,00	662,84	122,56	153,04	73,98	43,18	5,08	15,24	2,86	33,02
140,46	1539,06	898,92	141,61	172,72	83,82	47,63	5,08	15,56	2,86	38,10
160,55	2020,30	1180,40	161,93	198,12	96,52	46,99	5,08	18,10	2,86	38,10

Fonte: adaptado de KWH PIPE Brochure, 2002.

Observa-se na figura a seguir, quatro esquemas de dimensionamento de modelos de pesos de lastro. Os modelos “a”, “b” e “c” têm suas seções identificadas por letras, cuja tabela acima apresenta os valores correspondentes para cada seção, variando em função do diâmetro do tubo. Para tais modelos, nota-se também, argolas para guinchos de suspensão devido a necessidade da utilização de guindastes para o transporte dos colares da área de produção para o local de instalação. Em relação ao modelo “d”, similar ao modelo “b”, sua amarração é feita utilizando cintas de aço inoxidável ao invés de parafusos, ressaltando a necessidade das quinas serem chanfradas com ranhuras para encaixe, evitando a cinta “dançar” de um lado para o outro, o que poderia ocasionar o desprendimento do colar de lastro.

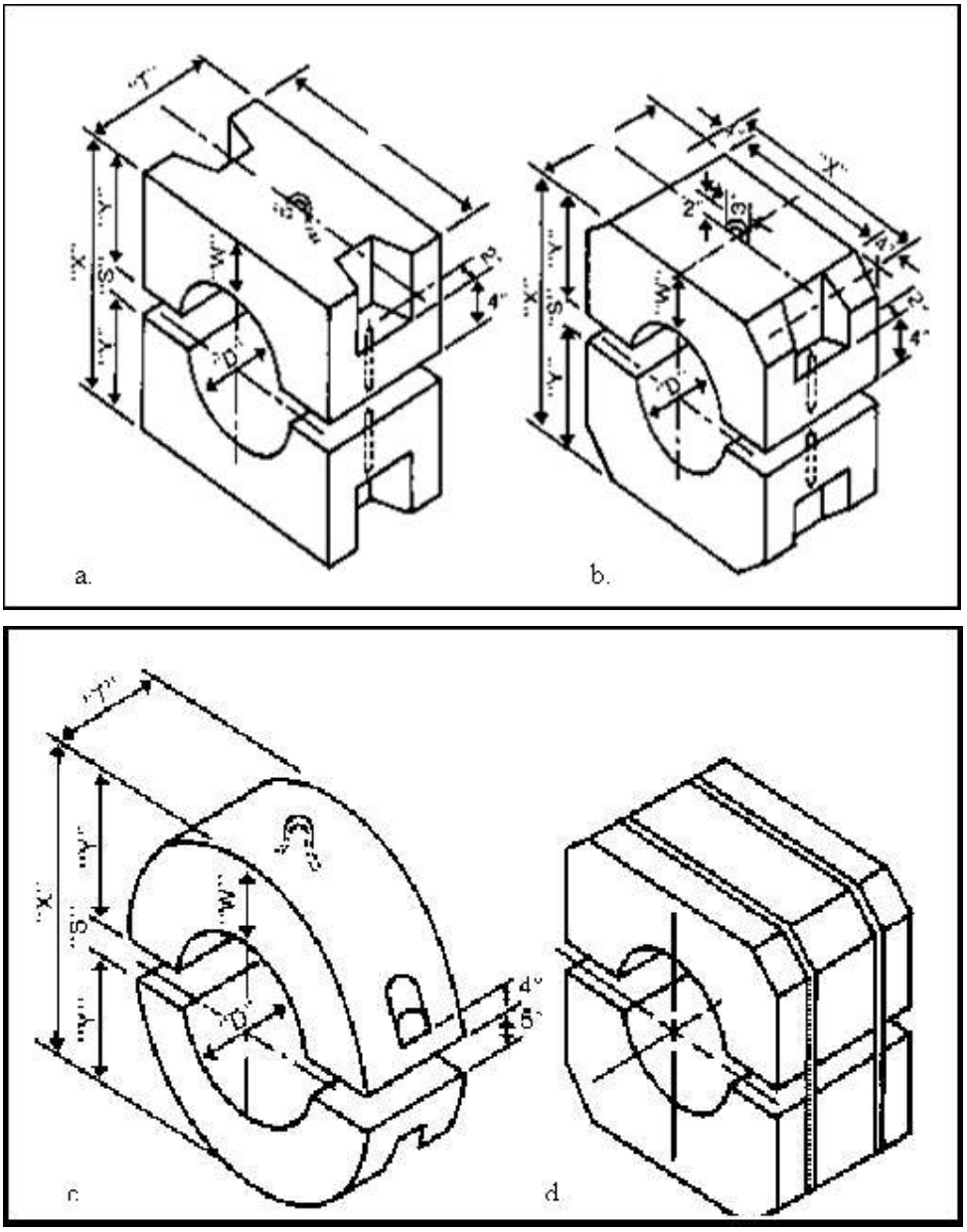


Figura 2.18: Modelos de colares de lastro com identificação das seções referentes ao dimensionamento da Tabela 5 (KWH, 2002).

O cronograma de montagem dos colares de ancoragem deve estar adiantado em no mínimo 1 mês da data de início de instalação do emissário para propiciar um tempo adequado para a *cura* da fabricação dos blocos. Deve-se levar em consideração a definição do local de montagem dos colares ser realizada próxima a área de trabalho do emissário, evitando perda de tempo para transporte e manuseio. Também é recomendado numerar os pares de colares no momento de remoção do bloco da forma, para assegurar a compatibilidade dos buracos dos parafusos. Segundo CEPIS (2002) o concreto utilizado para ancoragem de lastro deve ter no

mínimo 375 kg/m^3 de cimento e uma resistência de 28 dias de 300 kg/cm^2, para resistir ao ambiente marinho e reduzir o potencial de corrosão do aço reforçado. Cimento de alta resistência pode ser utilizado quando da necessidade de remover o colar da forma, reduzindo o número de formas durante o período de montagem. É recomendável fazer um número extra de colares de ancoragem para substituir peças quebradas.

Colchões de lastro

Uma opção interessante para a estabilização de emissários é a utilização de colchões de lastro, recheados com pedra calcárea misturada com resina betuminosa, fixada internamente, através de uma malha de aço duplamente trançada e envoltos por uma geomembrana de poliéster não tecida (figura 2.19). A principal vantagem deste tipo de estabilização é a flexibilidade do material em se moldar em torno do emissário acompanhando as alterações do leito de fundo, sendo o tempo necessário para a completa adaptação da estrutura, função da espessura do colchão, do diâmetro da tubulação, da temperatura da água e das propriedades do betume (VICARI&BRANZANTI, 2002).

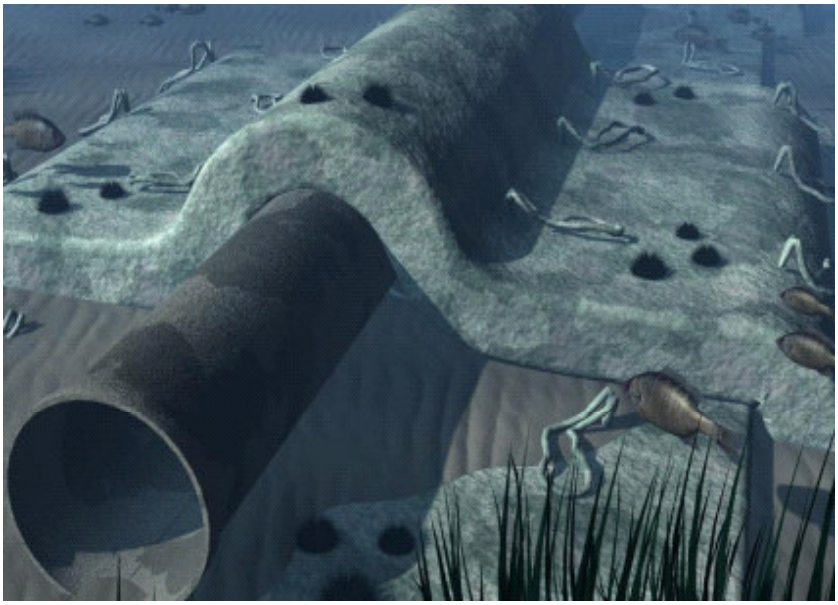


Figura 2.19: Colchão de lastro para estabilização de tubulação submarina (VICARI, 2000).

Segundo VICARI (2000), testes com os colchões de lastro “Sarmac” foram realizados para apresentar a performance mecânica e ambiental de quatro propriedades importantes referentes a estabilização de emissários e tubulações submarinas, sendo estas: flexibilidade, resistência a impactos, indentação e acessibilidade ambiental (ataque de produtos químicos). Os resultados apresentaram uma alta flexibilidade mesmo a baixas temperaturas (5° C no leito

de fundo); alta resistência contra impactos, em teste com energia de 16kJ (penetração não maior que 8 cm da espessura total do colchão); capacidade de suportar capacidades permanentes de 95 kN (indentação não maior que 55 mm na espessura do colchão); e liberação de materiais tóxicos desprezível, como metais pesados (proveniente da malha de aço, e do recheio de pedra e betume) ou HAPs - hidrocarbonteos aromáticos policíclicos (provenientes do betume).

Determinação do espaçamento entre os pesos de lastro

A pior condição de fadiga do tubo de PEAD pode ocorrer durante o processo de afundamento da tubulação na forma de "S" com os pesos de lastro atachados e a um possível afundamento em solo macio. É importante que a distância entre os colares não seja muito espaçada. Deve-se limitar a deflexão em 5% e a deformação linear em 1%.

Na figura 2.20, é apresentado um gráfico, com o máximo espaçamento permitido, entre os estabilizadores, para várias RD (Relação Dimensional = D_e / e), para tubos de PEAD. Podemos observar que, para RD menores, embora o espaçamento entre os estabilizadores possa ser maior, geralmente é limitado um espaçamento de 5 a 6 metros pela praticidade da construção.

Também, como regra geral, do ponto de vista das ações das forças hidrodinâmicas, é preferível ter estabilizadores mais próximos e de menor peso do que mais distantes e de maior peso, pois, quanto mais próximo o tubo estiver do leito de fundo, menos exposto estará a correntes marinhas e forças de arrebentação. Uma outra razão para evitar a deflexão é prevenir a formação de "calombos" por acumulação de ar.

Em zonas de forte arrebentação, pode ser importante a construção de uma parede mais espessa (menor valor da RD) na zona de entrada com o propósito de suportar impactos, esforços axiais, torção e tensão de cisalhamento. A RD na faixa entre 11 e 21 é recomendável nas zonas de arrebentação e na faixa entre 19 e 26, nas áreas fora dessas zonas (CEPIS, 2002).

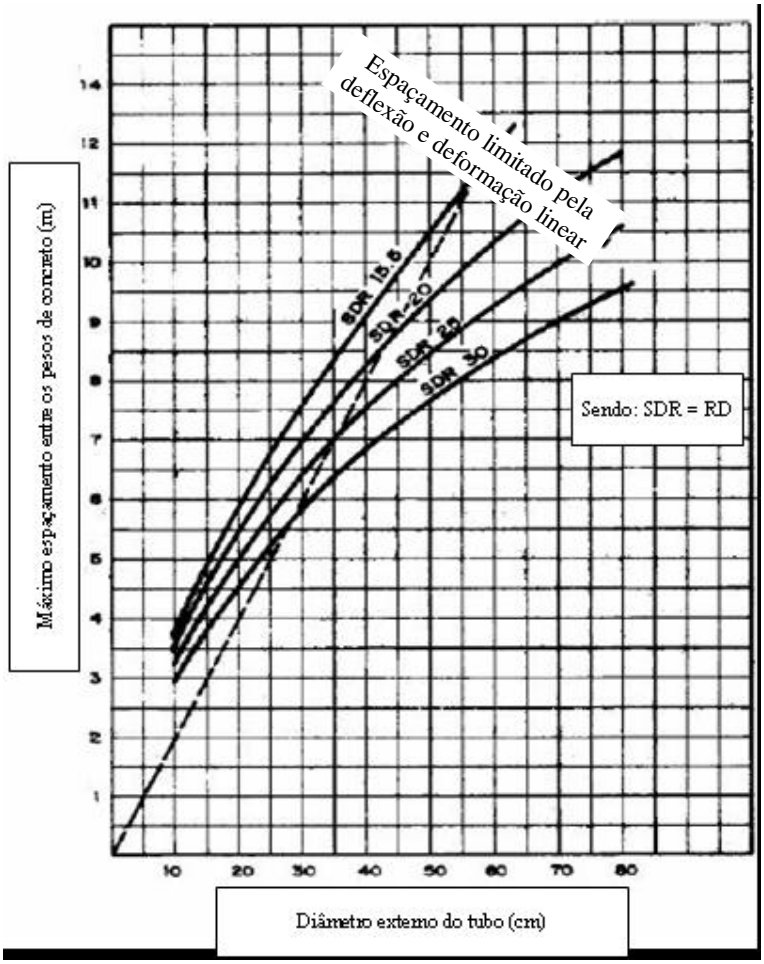


Figura 2.20: Gráfico da relação entre máximo espaçamento de lastro e diâmetro externo (CEPIS, 2002).

Determinação do peso do colar de lastro

O termo fator de afundamento "K" é utilizado em tubulações submarinas de PEAD para descrever a relação entre a força total de submersão e a força total de flutuação do conjunto da tubulação, que inclui: o tubo, seus componentes (válvulas, *risers*, flanges, etc...) e pesos estabilizadores (âncoras). Este termo nada mais é do que a gravidade específica, utilizada como indicador da estabilidade da tubulação e resistência as várias forças hidrodinâmicas exercidas pelo corpo d'água; tendo valores apropriados variando de 1,1 a 1,5.

O fator de afundamento K é expresso pela seguinte fórmula:

$$K = \frac{(pesodotubo + componentes) + (pesodolastrodeconcretonoar)}{(pesodaáguadeslocadapelotubo) + (pesodaáguadeslocadapelolastrodeconcreto)} \quad (16)$$

onde:

P_B = peso total de cada bloco estabilizador no ar (kgf);

P_C = peso unitário dos componentes do tubo (kgf/m);

P_T = peso unitário do tubo (kgf/m);

ρ_a = massa específica da água do mar ou água doce (kg/m^3); sendo: 998 kg/m^3 para a água doce e 1025,3 kg/m^3 para a água salgada.

S = espaçamento dos lastros selecionado (m) através da figura 2.20;

V = volume de água deslocada pelo volume externo do tubo por unidade de comprimento (m^3/m);

ρ_c = massa específica do concreto (kg/m^3); 2306,9 kg/m^3 para o concreto comum e 2403 kg/m^3 para o concreto armado;

K = adimensional (relação das forças de submersão e de flutuação).

Reescrevendo a equação, teremos:

$$K = \frac{S(P_T + P_C) + P_B}{SV\rho_a + P_B\rho_a / \rho_C} \quad (17)$$

Rearranjando a equação, teremos:

$$P_B = \frac{S(KV\rho_a - P_T - P_C)}{1 - K\rho_a / \rho_C} \quad (18)$$

Instalação dos pesos de lastro para tubos de PEAD

Para a instalação e lançamento dos pesos de lastro previamente anexados a tubulação, em terra, é necessária a construção de um sistema de rolagem da tubulação através de trilhos ou rampas (de aço ou madeira) com mínimo de atrito possível com a tubulação, onde todos os componentes previamente instalados: peso de lastro, flange cego, cabeceira para guincho e difusores com as saídas fechadas, são encaminhados para a entrada e flutuação no corpo d'água sendo puxados por barcaças até o local exato de submersão. Uma área adjacente ao

lançamento deve ser reservada para a fabricação e armazenamento dos pesos de lastro e a fusão dos tramos de tubos. Para tubos de grande diâmetro serão necessários guindastes para carregar os colares ao trilho e levantar a tubulação para a colocação dos pesos de lastro. Para tubos de pequeno diâmetro não se fará necessário os guindastes.

Para, um segundo caso, onde o lançamento do emissário no corpo d'água será sem os pesos de lastro, a instalação dos colares será realizada na água. Deve-se assegurar que a área do terreno na interface terra-mar, esteja limpa, sendo necessária a remoção de qualquer tipo de sólidos, como pedras e detritos, que possam danificar a tubulação. O puxamento do tubo é feito por cabo, onde, de maneira nenhuma deve-se amarrá-lo a flange; sendo a operação melhor conduzida com equipamentos que combinam a ação de empurrar a seção em terra com puxar o tubo paralelamente a barcaça de instalação e ao longo do corpo d'água.

Devido ao leve peso da tubulação, geralmente são necessárias barcaças de pequeno ou médio porte, munidas de guindaste e com área exclusiva para armazenamento dos colares. As etapas de instalação (figura 2.21), são as seguintes:

- Etapa 1: o guindaste posiciona a seção inferior do colar em uma plataforma anexa a barcaça (o mais próximo possível ao nível da água para reduzir a necessidade de levantamento do tubo);
- Etapa 2: retira a tubulação da água utilizando cordas ou cabos (de nylon em formato de "y" invertido ou com o tubo apoiado em vigas funcionando como uma tipóia) e posiciona o tubo em cima do colar inferior;
- Etapa 3: a seção superior do colar é encaixada com a parte inferior envolvendo a tubulação;
- Etapa 4: após as seções dos colares de lastro estarem fixadas, com parafusos ou amarras, o guindaste retorna o tubo a água e empurra-o ao longo do corpo d'água para um novo conjunto ser instalado.

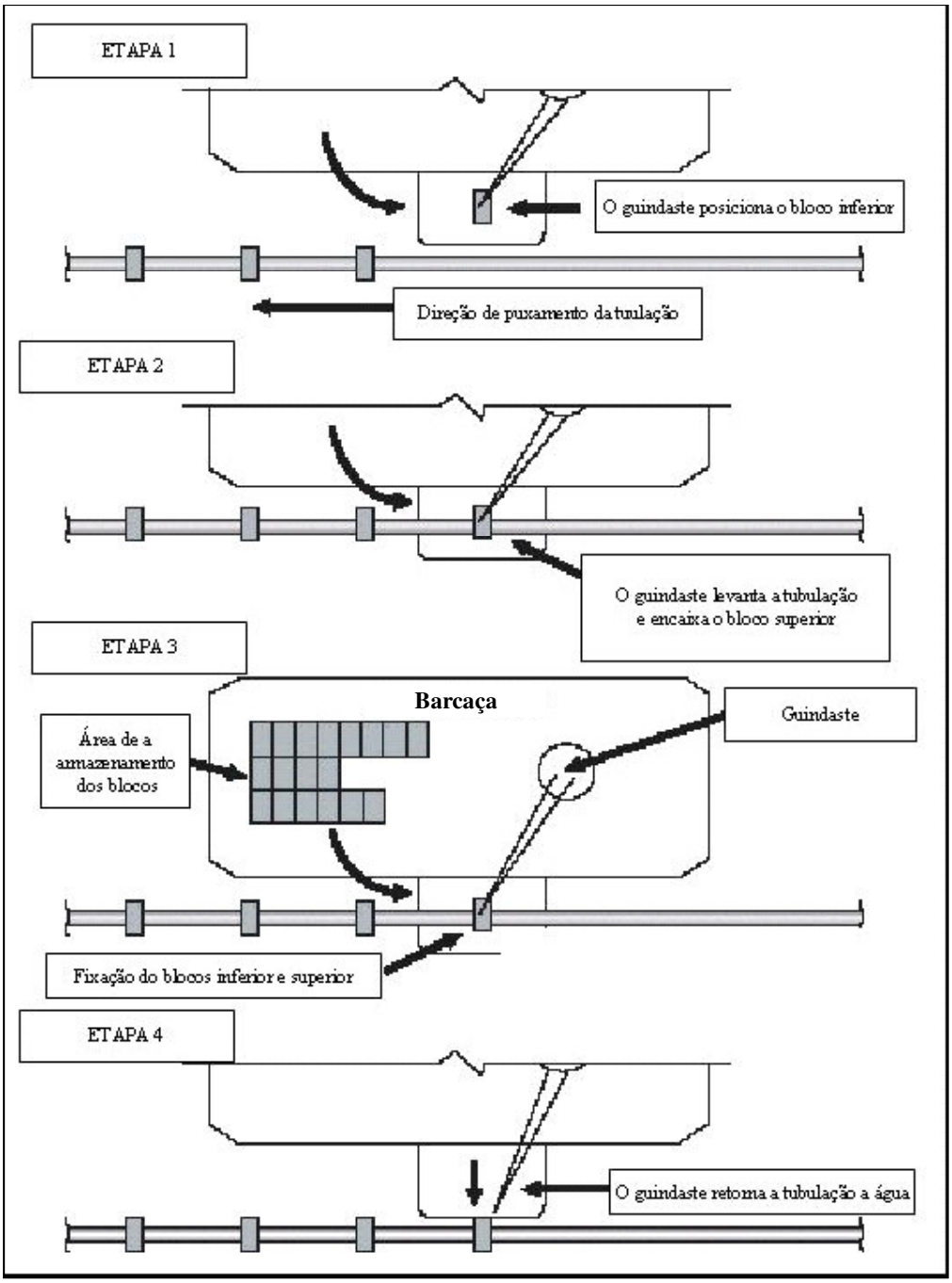


Figura 2.21: Esquema de instalação de pesos de lastro em tubos de PEAD (KWH PIPE, 2002).

Para qualquer das duas metodologias a serem utilizadas para instalação de pesos de lastro, é importante selecionar a área de trabalho para facilitar a construção, transporte e manipulação dos pesos de lastro (com maior atenção aqueles de maior porte) e a fusão do

tubo na transição da área de montagem para a área de lançamento. A ancoragem deve ser colocada após algumas horas da fusão dos tubos, no momento que os mesmo estiverem em temperatura ambiente.

Uma terceira metodologia de instalação que pode ser utilizada, é o lançamento em tramos e a fusão das juntas e colocação da ancoragem de lastro ao mesmo tempo em que a tubulação está sendo guinchada. Para isso, deve-se posicionar uma série de barcos, distantes 100 metros cada um ao longo do comprimento do tubo, onde esta medida pode variar em função das condições atmosféricas e de corrente. Algumas observações devem ser feitas no caso desta aplicação: limitação para tubulações com diâmetro pequeno, variação de maré pequena (regiões estuarinas) e condições hidrodinâmicas do corpo d'água relativamente calma.

2.2.1.2. A INSTALAÇÃO DOS EMISSÁRIOS SUBMARINOS DO TEBAR

Segundo SONDOTECNICA (1990), o sistema de disposição oceânica do efluente do TEBAR, é constituído de dois emissários submarinos de PEAD – Polietileno de Alta Densidade, com diâmetro nominal de 250mm cada, assentados sobre o solo marinho, fixados por blocos bipartidos de concreto espaçados de 4,0m. Os emissários estendem-se próximos e por toda a extensão da ponte de acesso aos píers, infletindo ao final desta em direção ao píer sul (figura 2.22).

Os trechos de tubos de PEAD foram lançados à água no rio Branco, em São Vicente (litoral paulista), onde a condução dos tramos por esse rio até a saída pela barra de São Vicente, demandou quatro a cinco barcos motorizados do tipo catraia e um rebocador com potência de 400 a 800 hp. O reboque marítimo até o Canal de São Sebastião foi efetuado com emprego do mesmo rebocador, e mais duas a três embarcações motorizadas. Para evitar abalroamento, o comboio marítimo foi sinalizado de acordo com as exigências da Capitania do Porto de Santos.

A vala para assentamento das tubulações no trecho em terra, foi escavada manualmente e/ou com auxílio de escavadeira de porte adequado a obra e dimensão da tubulação, observando a profundidade imposta pela caixa de registro, pela câmara de compensação e pelo recobrimento recomendado para o tipo de tubulação. No trecho em terra, as tubulações são de aço carbono, estendendo-se por sobre a tubovia, infletindo após atravessar por baixo da rodovia Rio-Santos, até duas câmaras de compensação de pressões, de onde são substituídas por tubos de PEAD aflorando sob o solo marinho.

O trecho de transição terra-mar seguiu esquema proposto pela empresa STER Engenharia S.A.. No trecho acima do nível d'água do mar foram utilizados sacos de juta ou plástico (tipo trançado) enchidos com areia, que servem de pontos de apoio para as tubulações. Os sacos foram posicionados sobre a rampa de transição, com espaçamento de aproximadamente 4,0m, e segundo informações, foram tomados os cuidados necessários para que os níveis de apoio resultantes assegurassem uma linha razoavelmente reta para as tubulações de PEAD.

No trecho de transição terra-mar, situado abaixo do nível d´água mínimo do mar, a solução foi idêntica a descrita no parágrafo anterior. Todavia, no trecho abaixo do nível d´água, as tubulações foram imersas com os pesos de lastro (blocos de ancoragem) previamente montados em terra (ver item **"**Instalação dos pesos de lastro para tubos de PEAD" para detalhamento deste procedimento).

Após a imersão, os mergulhadores fizeram um ajuste de nível manual, (facilitado pelo leve peso do material, mesmo com os pesos de lastro, proporcionado pela força de empuxo), onde, preliminarmente fizeram uma vala para ajuste de nível e criaram entre os blocos de ancoragem um apoio a tubulação, feito de sacos preenchidos com uma mistura de cimento Portland, areia e pedrisco. Ainda, foram posicionados sacos nas laterais das tubulações e, finalmente, uma camada de sacos por cima, para segurança contra forças externas que possam causar dano estrutural a tubulação.

A técnica de instalação dos emissários submarinos do TEBAR foi a chamada *Float and Sink* (ou, conforme o relatório de impacto ambiental da Sondotecnica, que a nomeia de *air venting*). A técnica *Float and Sink* foi descrita em detalhes no item 2.2.1.

Os primeiros tramos de tubos submarinos têm aproximadamente 250m de comprimento, enquanto que os demais tramos a serem submersos têm aproximadamente 500m, reduzindo-se a aproximadamente quatro operações de submersão por emissário submarino considerado.

O acoplamento dos tramos foi realizado no fundo do mar, com emprego de mergulhadores, pela emenda manual de flanges. Esse procedimento é facilitado em águas com fraca ocorrência de ondas, e é realizado somente quando o tramos em submersão estiver a poucos metros do leito de fundo, para evitar esforços na tubulação. Ressalta-se que tal técnica de acoplamento se mostra ultrapassada comparada com técnicas mais modernas de fusão a quente que permitem a submersão de tramos maiores de tubos, evitando possíveis falhas mecânicas na junção.

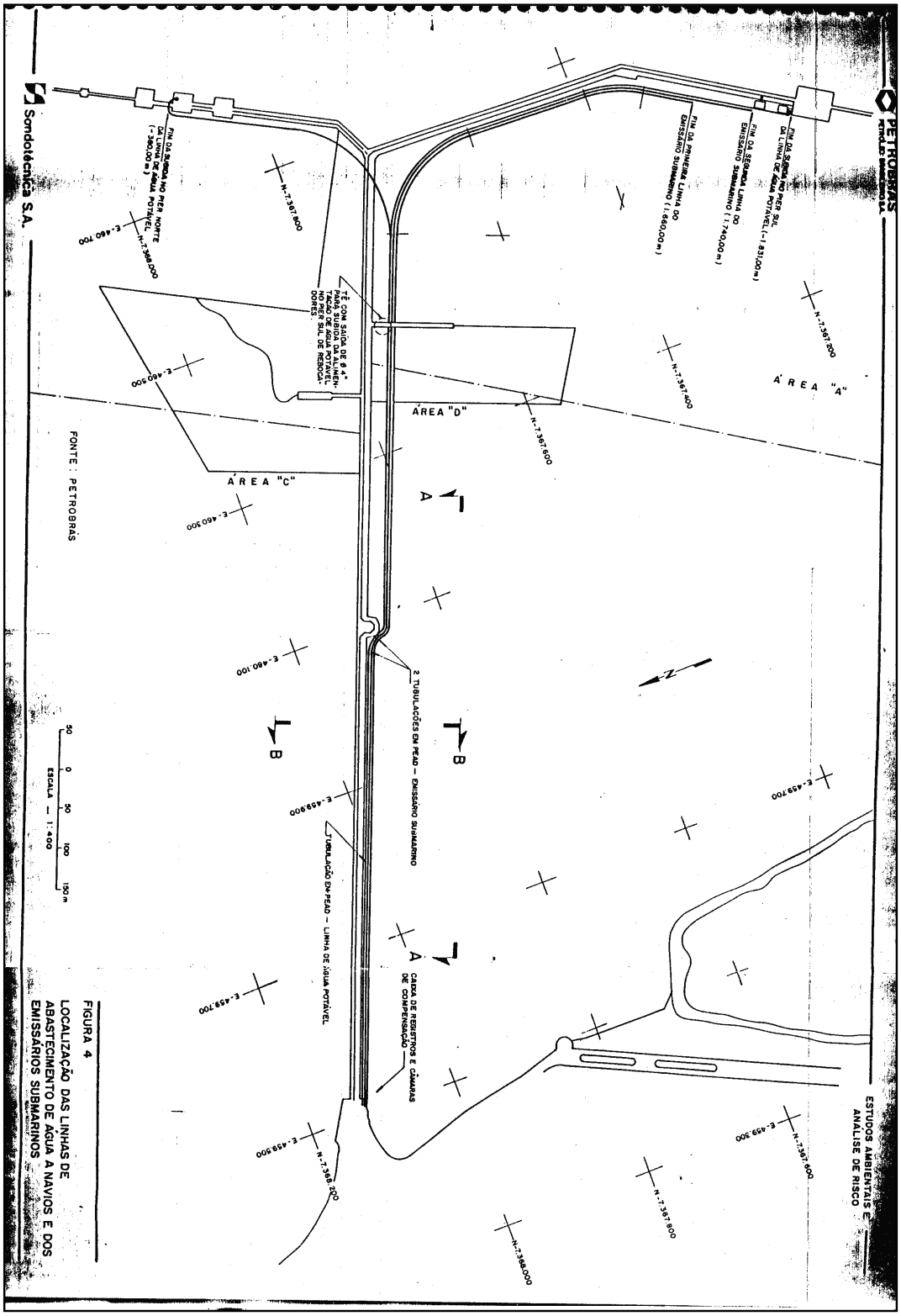


Figura 2.22: Planta de **l**ocalização dos emissários submarinos do TEBAR acompanhando a estrutura do píer até a parte sul.

2.2.2. OUTRAS TÉCNICAS TRADICIONAIS

2.2.2.1. *PULLING / BOTTOM PULL*

A técnica consiste no preparo de tramos de tubulação em terra, próxima a área de lançamento, onde inicialmente é feita a proteção anticorrosiva da tubulação de aço carbono (tubos de concreto também podem ser instalados com esta técnica), soldada continuamente em linha reta com a rota de instalação, não sendo boa prática a utilização de juntas mecânicas, porém, para este tipo de material é necessário o revestimento de concreto para servir de lastro e em certos casos devem-se amarrar tambores de ar que irão fornecer uma força de flutuação positiva (empuxo) para facilitar o puxamento. Esta técnica é geralmente utilizada para emissários de pequeno comprimento, não sendo necessariamente uma regra geral, embora existem casos relatados de emissários com diâmetro superior a 3m e comprimento de 5km instalados por este método (MATSUSHITA, 1979; WRc, 1990).

A tubulação formada pelos tramos soldados deve estar apoiada em trilhos para realizar uma suave transição da terra para o mar até o momento em que o peso da tubulação será aliviado pela flutuação exercida pela água. Usualmente são utilizados trilhos ou rampas equipadas com rolamentos (figura 2.23), onde o tubo é alinhado, soldado, testado com raios gama para verificar falhas e possíveis vazamentos, e aplicado o revestimento contra corrosão.

As ondas de tamanho de 2 a 3m limitam a segurança do método, mesmo o aço garantindo uma certa resistência à flexão e à tensão. O controle do sistema de liberação de ar e injeção de água, deve ser suficiente apenas para garantir que o tubo siga o perfil do leito de fundo enquanto o mesmo é guinchado para o local de instalação.

Na área de lançamento do emissário de Kadikoy, Istanbul, Turquia (figura 2.24), foi construída uma rampa de lançamento, com ângulo de inclinação adequado para realizar o assentamento do tubo com o leito de fundo, o mais próximo da margem, porém, dentro de um perfil longitudinal estruturalmente seguro para o tubo, evitando-se dessa maneira, suportes intermediários que conduzam a tubulação durante a seção de arrebentação. Para este caso em particular, também foi necessária a utilização de conexões flexíveis devido ao perfil do leito de fundo apresentar um canal de navegação e não ser propício escavações profundas (AVANZINI&QUIRICI, 1994b; AVANZINI&QUIRICI, 2002).

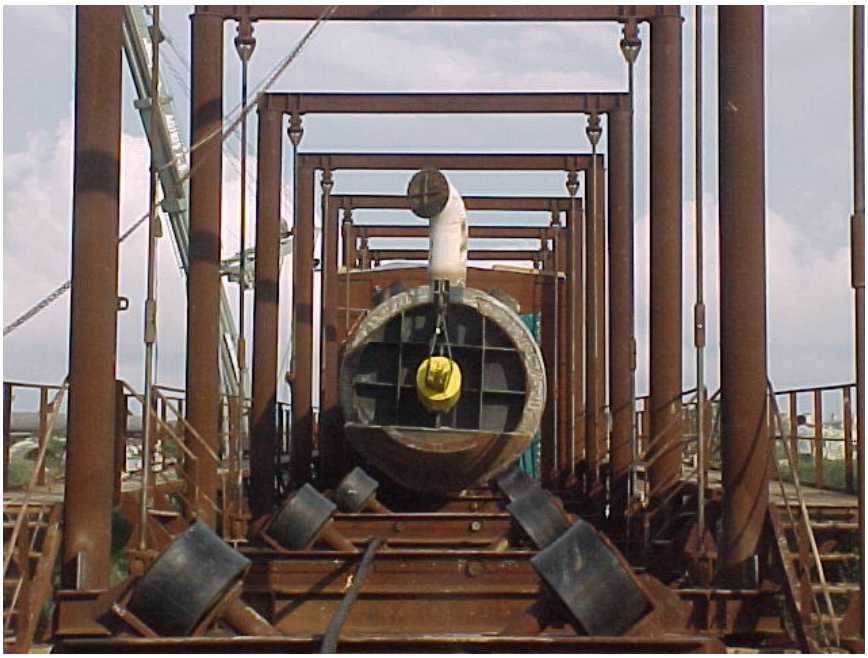


Figura 2.23: Sistema de rampa com rolamentos (AVANZINI&QUIRICI, 2002).

Figura 2.24: Inclinação da rampa de lançamento emissário de Kadikoy, Istanbul, Turquia (AVANZINI&QUIRICI, 2002).

O procedimento mais comum e preciso, apesar de maior tempo gasto, é o de realizar pequenos puxamentos – "short pulling", em distâncias de 300 a 500m, e então reposicionar e

reancorar a barcaça para o próximo puxamento, de 200 a 300m. Para um puxamento único, onde a barcaça estará posicionada a uma distância muito grande da margem, não é possível operar o processo com precisão devido a possibilidade do cabo "dançar" de um lado para o outro, além de uma maior probabilidade da tubulação ser danificada ou até mesmo rompida no leito de fundo.

Para AVANZINI&QUIRICI (1994a), alguns detalhes devem ser analisados quando da aplicação desta técnica, como:

- a escavação da trincheira ou a regularização do perfil do leito de fundo devem ter um alto grau de precisão, devido a maior rigidez do aço (comparado com materiais plásticos); e,
- necessidade de maiores forças de puxamento devido ao maior peso estrutural submerso, sendo recomendado o monitoramento de nível de profundidade e a medição contínua da força exercida na cabeceira, o qual é de extrema importância para a indicação da situação do tubo em relação a parâmetros, como: peso de submersão, fator de fricção com o solo e possível acúmulo de material sólido na parte frontal do tubo. Também se faz necessário a medição da velocidade de puxamento e tração no cabo para compararar a tensão exercida com a máxima de projeto.

2.2.2.2 *PIPE-BY-PIPE*

Este método é recomendado para a instalação de emissários em pequenos comprimentos de tramos de tubos, sem restrição ao diâmetro, podendo variar entre 4 e 6m, situados em águas rasas, estuários, rios e lagos. Este método não é um procedimento rápido, onde as condições climáticas influenciam severamente o processo, sendo limitado a locais com ondas de até 0,5m.

Vários tipos de materiais podem ser aplicados, como: concreto, PRFV – plástico reforçado com fibra de vidro, PEAD e outros materiais plásticos, além de tubos de aço e ferro fundido. Uma vantagem para esta técnica é a possibilidade de utilizar conexões mecânicas do tipo "ponta e bolsa" com anéis de borracha para vedação, ou flanges aparafusadas.

Barcos equipados com guindastes armazenam, e assentam horizontalmente os tubos através de cabos na posição desejada no leito de fundo ou em trincheiras pré-construídas. É necessário utilizar uma moldura rígida submersa para alinhar e posicionar um novo tramo de tubo, cuja ponta será conectada com a extremidade em forma de bolsa (boca de sino) da

tubulação pré-existente. Uma outra barcaça faz o aterramento da tubulação com material de recobrimento adequado importado de alguma área o mais próximo possível da margem, e o material escavado para a construção da trincheira é succionado por bombas para evitar um maior assoreamento (WRc, 1990).

Em águas com regimes hidrodinâmicos mais severos é impraticável realizar a conexão dos tramo de tubo com uma seção de tubulação já assentada utilizando-se dos cabos do guindaste, devido a um insuficiente controle de posicionamento para o alinhamento, ocasionando "batidas" que podem causar a quebra dos tubos. Para estas situações foi desenvolvida uma estrutura chamada de "Horse" (figura 2.25), que fornece os requisitos de controle e precisão necessários para realizar a conexão dos tubos.

O "Horse" é constituído de duas partes principais: a primeira, que dá o nome a estrutura, sendo a armação rígida geralmente de aço ou ferro que segura o tramo de tubo a ser assentado, com quatro pernas e pés de apoio para dar estabilidade no fundo do leito do corpo d'água; e a segunda, chamada de "traveller", que consiste basicamente em uma ponte rolante suspensa que leva o tramo de tubo até o local de instalação e sendo baixado por um guindaste para o acoplamento.

Figura 2.25: Estrutura de instalação "Horse" utilizada para assentar seções de tubos pesando 283kN, do emissário de Thessaloniki, Grécia (SPYROPOULOS, 2003).

2.2.2.3. TÉCNICAS ALTERNATIVAS

Uma série de técnicas pode ser utilizada para a instalação de emissários submarinos, onde cada uma será mais apropriada que a outra em função de uma série de fatores, como: conhecimento e vivência prática do projetista, do corpo de engenheiros e da empreiteira da obra; o tipo de material da tubulação; condições hidrodinâmicas do corpo d'água; e facilidade de se estabelecer uma área de trabalho na parte terrestre do emissário.

Qualquer que for a tecnologia e metodologia utilizada deve-se sempre evitar obras "aventurescas", priorizando sob qualquer condição a segurança dos trabalhadores, minimizando o impacto ambiental tanto na parte terrestre quanto no corpo d'água durante o processo de construção e instalação da tubulação, e claro, recorrendo a um corpo técnico especializado naquele tipo específico de técnica, que irá variar também em função do tipo de material que será utilizado, evitando-se assim, danos físicos estruturais a tubulação, o que pode acarretar na elevação dos custos da obra.

Os métodos alternativos, assim chamados, visam atender as peculiaridades da obra decorrentes geralmente: da acessibilidade da área de construção e trabalho na parte terrestre, da topografia local do terreno, além das condições hidrodinâmicas que podem variar de caso para caso desde casos extremos de águas calmas (como rios e lagos de pequeno e médio porte ou regiões costeiras protegidas por baías) até águas rápidas e agitadas (como rios de grande velocidade e zonas de arrebentação, ou áreas *offshore* passíveis de correntes marítimas intensas). Outra razão para a escolha de uma determinada técnica de construção, é a facilidade de acesso tanto para a aquisição dos materiais de construção quanto aos equipamentos de apoio existentes próximos a região da obra, que podem vir a baratear o custo total a tal ponto de se tornar o principal fator de escolha do respectivo método.

As principais técnicas alternativas são:

⇒ **Off Bottom Tow**

É uma técnica que mistura aspectos técnicos do método *pipe-by-pipe* com o método *bottom-pull*, sendo chamado de ***off-bottom tow*.** PÁLSSON (2002), apresenta este método para a instalação de emissários de PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro). Com este método, tramos com grande comprimento podem ser lançados no corpo d'água, com tanques de flutuação e correntes de lastro anexadas ao tubo, onde um balanço de forças possibilita o

puxamento da tubulação a uma certa altura do leito de fundo (figura 2.26), ficando a estrutura protegida contra as ações do vento e da maré na superfície e contra obstáculos no leito de fundo, facilitando e agilizando todo o processo de instalação.

Os tanques de flutuação e as correntes de lastro são colocados em intervalos ao longo do comprimento a tubulação, onde esta é suportada elasticamente pelas correntes, que agem como molas, na posição de flutuação neutra. As correntes, simultaneamente, têm a função de suportar e estabilizar a estrutura que está sendo puxada, amortecer os efeitos adversos da topografia do solo, além de resistir a movimentos laterais devido a fricção com o terreno.

No local exato de instalação, os tanques de submersão e as correntes de lastro são retirados juntamente, um par de cada vez, onde, novamente, as correntes ao serem soltas, funcionam como molas amortecedoras ao suave curvamento em "s" formado no processo de assentamento.

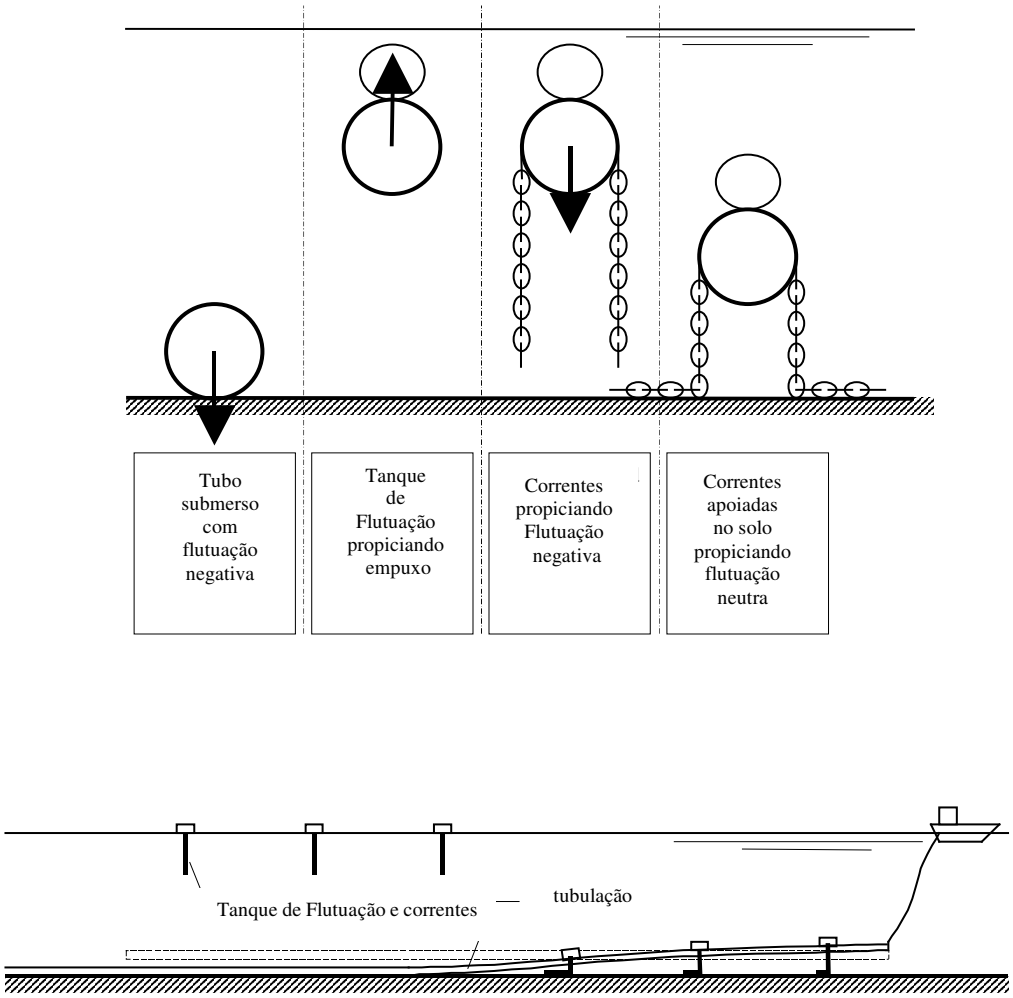


Figura 2.26: Esquema ilustrativo da instalação pelo processo *off bottmo tow* para tubos de plástico reforçado com fibra de vidro (PÁLSSON, 2002).

⇒ **Trestle – Ponte de Cavalete:**

Esta técnica é geralmente utilizada em águas muito rasas onde é inviável o tráfego de embarcações ou mesmo de barcaças de pequeno porte, e também, quando devido a pequena profundidade as ondas são ampliadas (ondas de arrebentação) aumentando a instabilidade de plataformas móveis com guindastes tornando o procedimento inseguro.

O procedimento de construção é o seguinte: duas fileiras de estacas de madeira, aparafusadas umas nas outras, são construídas e espaçadas lateralmente variando conforme o diâmetro da tubulação, não devendo ser cimentadas para facilitar sua retirada após o término da obra. Vigas de suporte são colocadas perpendicularmente no topo das estacas ao longo de todo o seu comprimento para a instalação dos trilhos que irá correr o conjunto cavalete/guindaste/cabos. A escavação e a preparação do solo com profundidade adequada pode ser realizada utilizando a draga do tipo *clamshell* ou uma draga hidráulica.

A seção inicial da tubulação é então assentada através da utilização de uma ponte de cavalete rolante munida com guindaste e cabos que se estende até o comprimento final da seção difusora (para emissários de pequeno comprimento) ou até a saída da zona de arrebentação (GRACE, 1978).

⇒ **Twin Tow Rope:**

É uma variante do método *bottom pull* utilizado para tubos de ferro fundido dúctil com juntas do tipo ponta e bolsa onde os tramos de tubos são conectados em terra firme e firmados com seus respectivos pares, anterior e posterior, evitando a desconexão durante o processo de puxamento, por uma braçadeira na seção da junta. Esta amarração é feita consecutivamente formando uma fileira de seções de tubos. Cada braçadeira possui duas argolas dispostas lateralmente, onde ambas devem permitir, tanto a passagem do cabo quanto a fixação do mesmo para o puxamento.

Esses dois cabos que estão presos nos dois lados de cada braçadeira e que correm toda a tubulação, estão amarrados a uma rédea que faz a ligação com um outro cabo que está conectado a uma barcaça munida de dois guinchos. O primeiro guincho precisa ter força suficiente para fazer o puxamento e uma roldana que é colocada a sua frente para suavizar o atrito, enquanto que, o outro guincho está posicionado do lado oposto do primeiro para fixar a âncora de estabilização da barcaça. Os cabos de puxamento e as braçadeiras não são recuperados, mas podem vir a servir como protetores de sacrifício contra a corrosão.

É necessário, para este método, uma preparação primorosa do solo de leito de fundo do corpo d'água para evitar que qualquer imperfeição do terreno venha a "rasgar" a tubulação. Pode-se revestir a seção inferior do tubo com cimento, tanto para proteção quanto para peso de lastro. A seção inicial da tubulação (a primeira que adentrou o corpo d'água) deve estar inicialmente fechada para impedir a entrada da água em seu interior e evitar a geração de uma força de flutuação (WRc, 1990).

2.3. MANUTENÇÃO DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS E SISTEMAS DIFUSORES

2.3.1. INSPEÇÕES PERIÓDICAS

Segundo Mousselli (1979) é prática corrente a coleta de amostras do solo, em intervalos regulares, na qual toda a extensão da tubulação está inserida. Tais amostras são analisadas para a determinação de parâmetros como: gravidade específica, granulometria, resistência ao cisalhamento e potencial de fluidização, onde tais medidas ajudarão no processo de reaterramento, escavação para reenterramento, revestimento protetor a corrosão e cálculo para um novo conjunto de pesos estabilizadores. O cadastro da profundidade de cobertura ao longo do tempo de vida útil resultando em uma base de dados é importante para entender o processo de erosão sofrido pelo empreendimento.

O NRCC - National Resource Council Committee (1994) recomenda a necessidade de estabelecer uma periodicidade na inspeção da profundidade de cobertura em intervalos determinados em função da dinâmica do solo subaquático e da ocorrência de tempestades severas.

GRACE (1978) sugere que, devem ser realizadas pelo menos duas inspeções subaquáticas ao longo do ano. O efeito das tempestades é de suma importância dentro dos parâmetros de decisão para determinação do local de instalação do emissário, agindo como catalisadores nos processos de corrosão e/ou colisão, por expor a tubulação normalmente protegida por sedimentos, as ações de correntes marítimas (induzidas por ações de ondas ou condições de tempo severas).

Um programa de inspeções subaquáticas foi realizado em 2000, pelo Hampton Roads Sanitation District (HRSD) em Virginia Beach, por uma equipe de engenheiros mergulhadores, em nove sistemas de emissários submarinos de estações de tratamento de esgotos utilizados para transportar efluentes através de tubulações com grande diâmetro, com lançamento no Rio James, Baía de Chesapeake no Oceano Atlântico (ver figura 2.27) (KEMP et al, 2002).

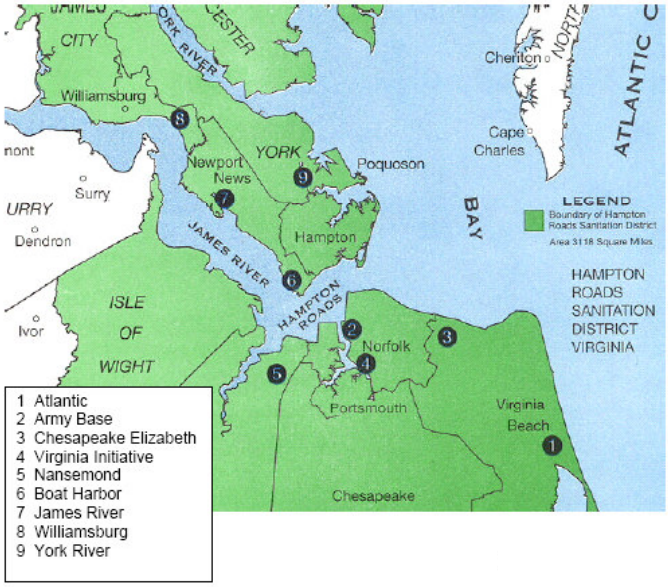


Figura 2.27: Mapa da Baía de Chesapeake (KEMP et al, 2002).

O relatório apresentou que, das nove instalações, quatro foram encontradas com sérias deficiências e necessitando de reparos imediatos, sendo três destas localizadas no Rio James (o Emissário de Boat Harbor, de Williamsburg, e de James River) e uma no Atlântico.

O emissário de concreto de Boat Harbor, localizado no James River, apresentou sérios danos estruturais nos últimos 30 metros da tubulação principal, provavelmente causado por colisão de embarcações. O trabalho de reparo incluiu a remoção e a substituição da porção danificada da tubulação dos difusores e da estrutura de suporte, por uma nova seção de 30 metros com cintas de amarração de madeira de construção, selantes de aço e bóias de aviso (figura 2.28).

Figura 2.28: Emissário de concreto danificado, e novos tramos com cintas de amarração (KEMP et al, 2002).

Os difusores do emissário de Williamsburg estavam originalmente localizados numa trincheira, com aproximadamente 1m de profundidade, na margem leste do Rio James. A trincheira foi naturalmente recoberta, e metade dos 36 pares de risers foram cobertos por sedimento e detritos causando entupimento, resultando na necessidade de modificação do sistema, estendendo-se os *risers* a uma elevação acima do fundo do leito do rio (figura 2.29).

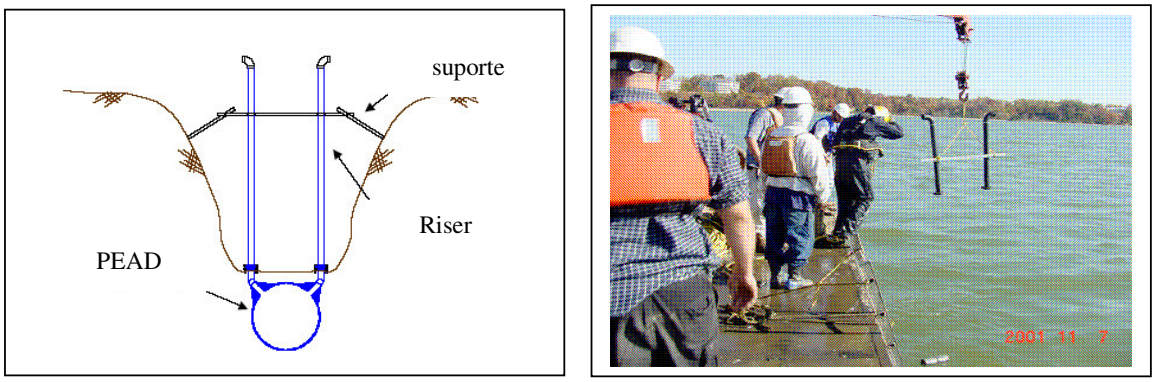


Figura 2.29: Substituição da tubulação vertical – *risers* com braçadeiras de apoio (KEMP et al, 2002).

A inspeção realizada no Emissário do Atlântico encontrou os últimos 6 metros do emissário com uma perda de 1m de material de recobrimento desde a sua instalação em 1981, expondo a tubulação da seção difusora em aproximadamente 0,5m (figura 2.30).

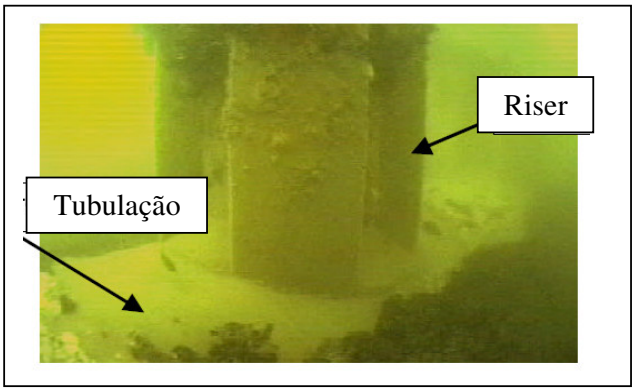


Figura 2.30: Seção difusora com perda de material de recobrimento por ação hidrodinâmica (KEMP et al, 2002).

2.3.2. FENÔMENOS *FLOODING* E *PURGING*

Flooding

A vazão de descarga do efluente de grande parte dos emissários submarinos é transiente, devido a fatores como: momentos de baixa vazão durante as estações secas do ano (outono e inverno), sensível oscilação do hidrograma diário, falhas de operação no sistema, e intervalos de bombeamento, ocasionando ciclos de vazão, que ocorre quando o sistema não é operado por gravidade.

A vazão intermitente do fluxo da estação terrestre para o sistema difusor propicia condições de intrusão da cunha salina (entrada da água salgada na tubulação através dos orifícios ou *risers*), que possui maior densidade que o efluente, podendo ocorrer simultaneamente o transporte de sedimentos marinhos, carreando material em suspensão, que se depositarão ao longo do comprimento da tubulação, formando dunas de material sólido no interior do tubo.

Outra forma de introdução de sedimentos e material particulado na tubulação é devido aos movimentos das ondas e correntes subaquáticas que causam a erosão e liquefação do material de fundo nas vizinhanças do emissário propiciando condições de revolvimento e acelerando o processo de entupimento por sedimentos marinhos (DUER&SALAS, 1995)

O problema é agravado quando o emissário possui longos risers e/ou é apoiado em solo com inclinação íngrime, podendo em certos casos, tornar o processo irreversível, ou seja, inviabilizando a remoção da cunha salina (WILKINSON, 1997). Apesar de, não ser possível evitar totalmente a intrusão da cunha salina em emissários com sistemas difusores com orifício fixo, o projetista pode prever a expulsão da água salgada em intervalos regulares de tempo, instalando bombas ou torres de carga que permitam uma velocidade acima de 1m/s durante pelo menos 15 minutos uma vez por semana (WRc, 1990). Esses valores devem ser melhores analisados, devendo cada projeto ser monitorado individualmente.

Numericamente, o processo de *flooding* ocorre quando a velocidade de descarga cessa ou diminui a tal ponto que ocorre um aumento da diferença de pressão no orifício do difusor, permitindo a entrada da cunha salina para o interior da tubulação.

Segundo DAVIES (2003), a prática usual tem sido projetar cada orifício operando com um número de Froude densimétrico (Fr_d) de valor mais baixo possível, para minimizar custos de operação (gasto de energia) com o bombeamento. Porém, devido a intrusão salina ter uma

tendência de ocorrer quando Fr_d alcança um valor crítico igual ou menor que 1, esse fenômeno deve ser sempre analisado com extremo cuidado.

O número de Froude densimétrico Fr_d, é dado por:

$$Fr_d = \frac{v_j}{(g' D_{or})^{1/2}}; \qquad (19)$$

onde:

v_j = velocidade do jato;

D_{or} = diâmetro do orifício;

g' = aceleração da gravidade modificada, dada por:

$$g' = \frac{g \Delta\rho}{\rho_e}; \qquad (20)$$

sendo:

$\Delta\rho = \rho_a - \rho_e$ = diferença de massa específica entre o ambiente e o efluente;

ρ_a = massa específica do ambiente;

ρ_e = massa específica do efluente.

O número de Froude densimétrico pode ser calculado, substituindo a velocidade do jato através do orifício, pela vazão e a área do respectivo orifício de saída do efluente, sendo dado por:

$$Fr_d = \frac{Q}{A_{or}\sqrt{g' D_{or}}}; \qquad (21)$$

onde:

Q = vazão do orifício de saída;

A_{or} = área do orifício;

D_{or} = diâmetro do orifício.

WILKINSON (1988) apresentou que a intrusão da cunha salina se desenvolve através de orifícios com 100mm de diâmetro quando a descarga for menor que 1,2L/s, e através de orifícios de 50mm de diâmetro quando a descarga for menor que 0,2L/s; também, assumindo que a água salgada adentrará a tubulação quando a pressão interna for menor que a pressão ambiente.

Uma série de experiências foi realizada (WILKINSON, 1997) indicando que, a intrusão da cunha salina, para emissários com orifícios horizontais, ocorre com o número de Froude densimétrico < 0,75, sendo que, a velocidade mínima para o orifício mais distante da margem, de modo a prevenir este fluxo reverso, é dada por:

$v_1 = 0{,}75\ (g\Delta D_{or})^{1/2}$; (22)

onde:

$\Delta = 0{,}025$ (diferença de massa específica entre a água salgada e o efluente);

g = aceleração da gravidade (9,8 m/s^2);

D_{or} = diâmetro do orifício do difusor.

O fluxo para os demais orifícios pode ser expresso em função de v_1, aplicando a equação da energia, e obtendo-se:

$$v_n = \left[\frac{2}{C_{LD}} g\Delta(n-1)(s) sen\theta + v_1^{\ 2} \right]^2 \text{ ; (23)}$$

onde:

C_{LD} = coeficiente de perda de velocidade na descarga do difusor;

s = espaçamento entre orifícios;

θ = inclinação da tubulação com a horizontal.

A vazão de descarga crítica de operação do sistema, Q_f, a qual a intrusão da cunha salina irá começar a adentrar na tubulação do emissário, é dada por:

$$Q_f = Ad \sum_{n=1}^{N} \left[C_1^{\ 2}\ (s)(n-1) sen\,\theta + 0{,}56 g\Delta d \right]^{1/2} ; \qquad (24)$$

onde:

N = número total de orifícios;

n = n *ésimo* orifício; sendo: n = 1, o difusor mais afastado da margem;

$$C_1 = \left(\frac{2g\Delta}{C_{LD}} \right)^{1/2} \qquad (25)$$

Purging

Se a vazão de descarga do efluente na partida da operação iniciar com valor baixo, e com o interior da tubulação do emissário preenchido inicialmente com água salgada (que é tipicamente 2,5% mais densa que o efluente), se formará uma cunha salina que irá de encontro ao "telhado" do tubo. Sendo as velocidades dentro da seção do difusor de um emissário geralmente baixas, os efeitos dinâmicos são também pequenos, ocasionando uma interface quase horizontal entre o efluente e a água salgada. Logicamente, o ângulo da cunha salina será igual à inclinação do tubo. O efluente começará ser descarregado a partir da extremidade da seção difusora mais próxima da margem e a cunha salina será purgada do emissário conforme o efluente avança nas seções difusoras mais distantes. Entretanto, se o fluxo for menor do que o valor crítico, o emissário remanescerá parcialmente preenchido por água salgada e somente uma parcela dos orifícios existentes funcionarão corretamente.

Segundo WILKINSON (1997), a vazão necessária para purgar toda a cunha salina pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Q_p = A_d \sum_{n=1}^{N} C_1 \left[s(n-1) \operatorname{sen} \theta + h \right]^{1/2} \; ; \qquad (26)$$

onde:

h = altura do orifício de saída do difusor em relação a parede externa da tubulação.

2.3.3. LIMPEZA EXTERNA E INTERNA

Limpeza externa

A limpeza externa é necessária, em primeiro lugar, para a inspeção estrutural da tubulação; e em segundo lugar, para a remoção de sedimentos em excesso depositados ao longo do tubo decorrente de ações hidrodinâmicas favoráveis para este processo (WRc, 1990).

Os principais métodos para a remoção da camada biológica (mexilhões, algas, bactérias, esponjas, etc...) depositada no lado externo do emissário são: limpeza manual (raspador, escova de aço ou martelo lascador), jato d'água de alta pressão, escova rotatória e revólver d'água. Para o jateamento d'água com alta pressão, a pistola deve possuir várias configurações de orifícios para possibilitar desde um jato fino e penetrante, até um jato largo para o acabamento. Os fluidos de limpeza normalmente utilizados podem ser: somente água, água com areia ou água com cascalho fino, dependendo da aderência do material na parede da tubulação. Deve-se tomar cuidado com o processo de limpeza externa, e principalmente com a escolha do fluido de limpeza, para não danificar a estrutura do tubo.

Limpeza interna

A necessidade de limpeza interna do emissário é devido à diminuição parcial do diâmetro interno do tubo e aumento da perda de carga por atrito, por causa do depósito de sólidos sedimentáveis, crescimento bacteriano e da adesão de gordura, além, da entrada de sedimentos carreados na intrusão da cunha salina através dos orifícios com área fixa do sistema difusor.

Os métodos mais usuais de limpeza interna da tubulação são:

- Bomba com ejetor de ar: usado alternadamente com uma bomba de sucção da areia e silte; onde dificilmente consegue-se a remoção de depósitos mais pesados e firmemente aderidos.
- Jato d'água de alta pressão: adequado para a remoção de sólidos sedimentáveis pesados e firmemente aderidos; deve-se tomar cuidado com a pressão e velocidade do jato para não danificar a estrutura do tubo.
- Limpeza hidráulica: a carga hidráulica do volume de água armazenada em um tanque deve ter velocidade suficiente para remover: limo, lodo, encrustações e graxa, da parede, realizando o carreamento destes sólidos e purgando a cunha salina. Esta técnica pode ser realizada com uma periodicidade maior, mensalmente ou até mesmo semanalmente.

- Raspagem mecânica: geralmente utilizada em emissários antigos que possuem abertura no final da tubulação; a operação é limitada a emissários de até 100m de comprimento e que estejam localizados em áreas com condições amenas de corrente e maré. Deve-se tomar cuidado, pois o raspador pode danificar o revestimento interno da tubulação.
- Limpeza química: utilização de fungicidas e alvejantes; destacando-se que esta técnica não é rotineira, além de ser pouco utilizada.

Pigging

Uma outra técnica de limpeza para tubulações de emissários, e que vem sendo utilizada com sucesso e em larga escala para vários diâmetros e comprimentos, é o chamado *Pigging*.

O *pigging* é um processo que utiliza limpadores internos de tubos, chamados "*pigs*", construídos com espuma de poliuretano, flexível, com possibilidade de diversas camadas externas (lisa, áspera, granular, lisa revestida com degrau sobressalente, etc...) e têm a habilidade de passar por curvas, cotovelos, "tes", tubos de vários diâmetros e válvulas de orifício reduzido (Pipeline Pigging Products, 1998) (figura 2.31). A escolha do diâmetro do *pig* é função do diâmetro interno da tubulação, e a escolha da camada externa varia em função dos sólidos depositados na parede do tubo, onde, conforme o processo de limpeza avança, possivelmente será necessária a troca do *pig*, em relação a sua densidade e o tipo de camada externa. Para emissários submarinos, o *pig* pode adentrar na tubulação através de um encasamento em "T" invertido, e, bombeado ou guinchado, até sua saída pela flange cega, ou até mesmo pelos *risers* ou orifícios (caso a tubulação seja de pequeno diâmetro).

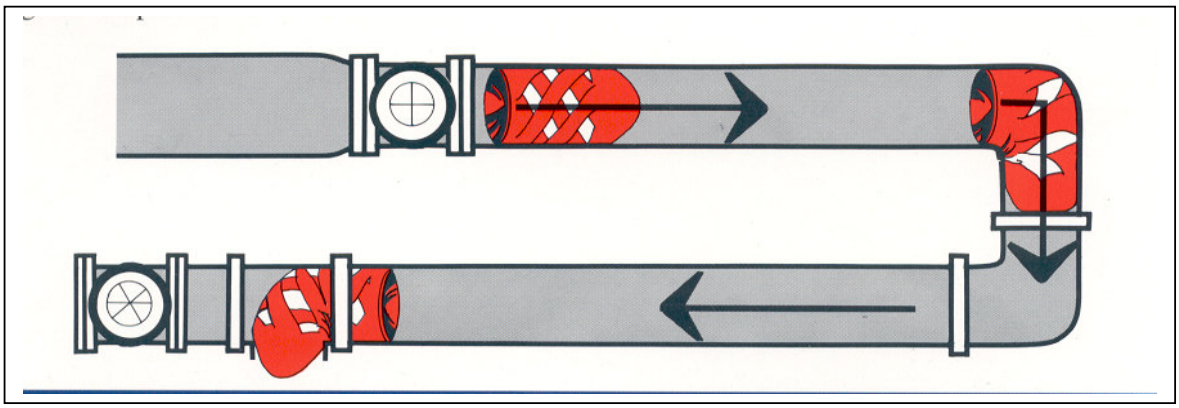


Figura 2.31: Esquema ilustrativo de limpeza interna de tubo por *pigging*.

Um caso interessante de aplicação desta técnica foi o programa de redução da poluição do Porto de Boston, que utilizou a operação de *pigging* para ampliar a capacidade hidráulica em 175% em relação ao estado anterior a limpeza. Os dois emissários submarinos possuem dimensões de 1,524m de diâmetro, com comprimento de 1,78km e 1,69km, respectivamente, e estão enterrados a uma profundidade entre 1m e 2m abaixo do leito de fundo do canal do estuário de Boston (FRENCH, 1995).

A operação de limpeza levou em conta dois aspectos importantes referentes ao impacto ambiental e a preservação estrutural da tubulação. Em primeiro lugar, havia a preocupação com o assoreamento decorrente do descarte do lodo a ser expelido pela tubulação, através dos domos existentes na seção final dos difusores, estimado em um volume total de 1.100 m^3; prevaleceu neste caso, como a melhor opção para a deposição do resíduo, o transporte advectivo de sedimentos em condições de maré alta. Em segundo lugar, havia a preocupação com a condição estrutural dos emissários de ferro fundido, construídos em 1904; neste caso foi necessário analisar a pressão de trabalho e o material de revestimento do *pig*, a serem utilizados, sendo que, testes com corantes Rhodamina WT confirmaram a não existência de rupturas, antes e depois da operação, não sendo detectado vazamentos. Da mesma maneira, através de corantes, também foi verificado a dispersão dos sólidos nas condições de maré alta em até 30 minutos após o pico de vazão.

CAPÍTULO III – MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA A MODELAGEM DA DISPERSÃO DA PLUMA DE EFLUENTES

3.1. PROCESSOS INTERVENIENTES NA DISPOSIÇÃO OCEÂNICA PARA O ESTABELECIMENTO DO CAMPO PRÓXIMO E DO CAMPO DISTANTE.

Quando um efluente é lançado em forma de jato submerso através dos difusores de um emissário submarino, o fluxo é elevado por uma força de empuxo, proporcional à diferença entre a sua densidade e a densidade do corpo d'água (água do mar). À medida que o jato eleva-se em direção à superfície, mistura-se com a água do mar e tanto a quantidade de movimento (força de lançamento) quanto o empuxo decrescem, enquanto que, a energia cinética e a energia potencial são transformadas pelas forças tangenciais (advecção). No caso de lançamentos verticais (orifício de descarga a 90° do leito de fundo), estas duas "forças" são perpendiculares, e com o mesmo sentido (de baixo para cima).

Este processo é denominado de diluição inicial e ocorre na região denominada de campo próximo, dependendo, basicamente, das condições ambientais (nível de turbulência das águas, velocidade de corrente e estratificação térmica) e das características geométricas do difusor (número de orifícios, diâmetro, ângulo de inclinação, alinhamento em relação a corrente, etc...). É consenso entre os especialistas que um sistema difusor eficiente deva alcançar diluições da ordem de 100 ($D_0 = C_0 / C$; sendo: D_0 = Diluição inicial, C_0 = Concentração inicial, C = Concentração final), no campo próximo.

Quando o jato atinge o nível de equilíbrio hidrostático na superfície ou abaixo desta (devido a estratificação do meio), a mistura "efluente-água do mar" sofre uma transição entre o fluxo vertical e o espalhamento horizontal. Nesta fase, inicia-se o chamado "campo de esgoto", ocorrendo a transição do campo próximo para o campo distante.

Conforme a pluma afasta-se do ponto de lançamento, a configuração geométrica do difusor diminui sua influência no processo de mistura, e uma segunda fase se inicia, na qual a advecção e a turbulência do ambiente irão controlar a trajetória e a taxa de diluição da pluma. Esta região é chamada de campo distante. Portanto, o decréscimo da concentração do efluente, a partir deste ponto, será proporcionado por dois processos naturais: o transporte advectivo e a difusão turbulenta (Occhipinti, 1970).

O processo advectivo caracteriza-se pelas variações locais de concentração da *propriedade* (substância, poluente, bactéria, etc...) por transporte de massa, o qual é realizado pelos sistemas regulares de circulação das águas, caracterizados por seu campo de velocidade. Pelo princípio de conservação da massa, desprezando-se o efeito da difusão e considerando-se o gradiente de densidade muito pequeno em relação ao gradiente de concentração, a equação do transporte advectivo de uma substância conservativa pode ser dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\left(u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + w\frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (27); \text{ onde:}$$

u, v e w: são respectivamente as velocidades de transporte da substância nas direções x, y e z.

Os processos difusivos caracterizam-se pelas variações locais de concentração da *propriedade* produzida por movimentos irregulares da água (em escala pequena) conhecidos por turbulência, e que ocorrem simultaneamente com a difusão molecular (em micro escala). Estes processos são caracterizados pela troca local da propriedade sem um transporte efetivo da água. O poder difusivo ou a capacidade difusora da "turbulência oceânica" é muito maior do que o da difusão molecular (Occhipinti, 1970).

A equação do transporte advectivo e difusivo é dada abaixo. Esta equação representa a variação local efetiva da concentração devida aos efeitos conjuntos da difusão e da advecção (ou convecção) para um fluído incompressível (a massa específica média dentro de um volume permanece constante, sendo, a massa específica definida como massa por unidade de volume, onde: $\rho = m/V$), e desprezando-se os efeitos devidos às reações químicas e biológicas, e às variações de densidade.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} + w\frac{\partial C}{\partial z} = D\nabla^2 C \quad (28);$$

onde:

u, *v* e *w*: são as componentes da velocidade média nas direções *x, y* e *z*, respectivamente.

De uma forma geral, podemos dizer que, a corrente local transporta a pluma do efluente para fora da área de lançamento e durante o transporte a turbulência do meio espalha o contaminante em torno do seu centro.

3.2. MODELO COMPUTACIONAL CORMIX[1]

3.2.1. INTRODUÇÃO

O Sistema Especialista CORMIX (Cornell Mixing Zone) é recomendado pela USEPA como um software de análise e prognóstico do lançamento e dispersão de efluentes domésticos e industriais em diversos tipos de corpos d'água, além de também permitir a verificação do atendimento dos parâmetros de qualidade da água em relação a legislação vigente.

O CORMIX é um modelo numérico baseado em métodos integrais, que utiliza as equações governantes de conservação de massa e quantidade de movimento, e outras variáveis (massa de poluente, densidade, temperatura, e salinidade), e que são solucionadas ao longo do eixo central da trajetória do jato.

Neste trabalho, foi utilizado o sub-sistema CORMIX 2, versão CORMIX GI 4.2 (licença acadêmica), idealizado para emissários submarinos utilizando sistemas difusores multiorifícios, o qual abrange cerca de 90% dos casos de descarga de efluentes em ambientes aquáticos.

O resultado do modelo computacional é baseado nas características geométricas do emissário e nas condições ambientais do corpo d'água, fornecendo o resultado de diluição inicial do poluente a ser analisado, o comportamento da pluma do efluente a grandes distâncias, além de verificar a ocorrência de recirculação e impacto bêntico nas circunvizinhanças do lançamento.

O Programa CORMIX exige que a seção transversal do corpo d'água deva ser descrita similarmente a um canal retangular, podendo as fronteiras (margens) estarem próximas, ou não (margens muito distantes), como é o caso de lançamentos de efluentes em oceanos. Além disso, o canal é assumido com leito uniforme a jusante do lançamento, com a possibilidade de que esta uniformidade do leito possua meandros que possam alterar o fluxo de escoamento. A este processo, dá-se o nome de *esquematização* da circunvizinhança do lançamento.

---

[1] Jirka, G.H.; Akar, P.J. 1991. Jirka, G.H.; Doneker, R.L.; Hinton, S.W. 1996.

3.2.2. GEOMETRIA DE SISTEMAS DIFUSORES MULTIORIFÍCIOS

Segundo JIRKA&AKAR (1991), a esquematização da configuração geométrica e do ambiente nas vizinhanças do lançamento pode ser descrita da seguinte maneira:

- a seção difusora possui um comprimento total L_D, que é a distância entre o primeiro orifício (que está conectado com o término da tubulação) ao último orifício, sendo que a parte central do sistema difusor está localizado a uma distância "*DIST B*" da margem mais próxima;
- *"n"* orifícios com espaçamento $s = L_D / (n-1)$ entre os orifícios adjacentes;
- cada orifício tem área de seção transversal circular $a_0 = \frac{\pi D^2}{4}$, onde: $D =$ diâmetro do orifício;
- elevação h_0 acima do leito de fundo em relação ao centro do orifício;
- ângulo vertical θ em relação ao leito de fundo (vista lateral da esquematização);
- ângulo σ orientado no sentido anti-horário em relação a direção do escoamento do fluxo do ambiente - u_a (coordenada x).
- a linha do sistema difusor possui um ângulo γ em relação ao fluxo transversal do ambiente - u_a;
- cada orifício possui um ângulo β de orientação em relação ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor.

Na figura 3.1, observa-se *WS* como sendo a largura do corpo d'água na vizinhança ao lançamento; e *H* a altura do corpo d'água nas proximidades do lançamento.

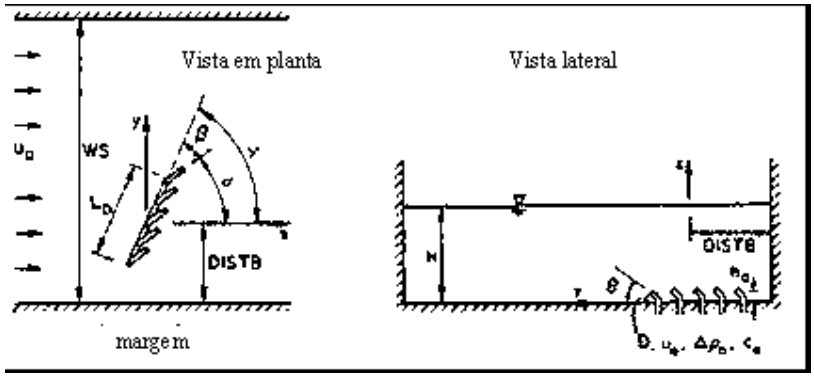


Figura 3.1: Esquematização das condições geométricas e do ambiente nas vizinhanças do lançamento.

As três principais configurações de sistemas difusores multiorifícios utilizadas atualmente na prática por projetistas, para obtenção de uma rápida e eficiente mistura do

efluente no corpo d'água, são os modelos: unidirecional, *staged* e alternado (ver figuras a seguir).

A configuração unidirecional (figura 3.2) apresenta o conjunto de orifícios alinhados horizontalmente em relação ao leito de fundo, $\theta \cong 0º$, e, mais ou menos perpendicular ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor, $\beta \cong 90º$.

Para a configuração do sistema difusor multiorifícios alternado (figura 3.3), os bocais são arranjados alternadamente, onde cada orifício aponta horizontalmente para o sentido oposto do seu par(es), resultando em orifícios com ângulos, mais ou menos perpendicular ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor ($\beta = +90º$ e $\beta = -90°$), e θ indefinido em relação ao leito de fundo horizontal.

Para a configuração *staged* (figura 3.4), os orifícios estão apontados, também, na direção horizontal em relação ao leito de fundo, $\theta \cong 0º$, e, mais ou menos paralelos ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor, $\beta \cong 0º$. Portanto, ambos os tipos de configuração, unidirecional e *staged*, possuem forte quantidade de movimento horizontal, com habilidade de induzir correntes e circulações no campo próximo. (JIRKA&AKAR, 1991; JIRKA et al, 1996).

As figuras a seguir foram geradas a partir do pré-processador CORSPY, disponível no pacote do *software*, que possibilita a visualização da configuração geométrica do sistema difusor.

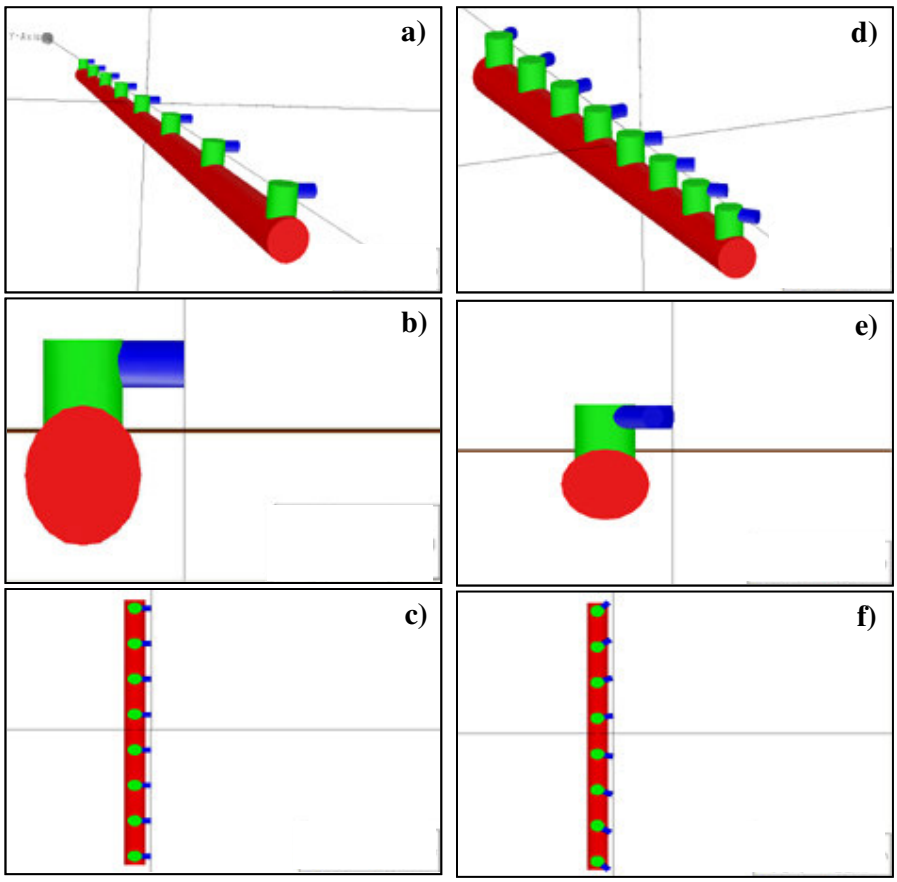


Figura 3.2: As imagens **a** (vista em 3D), **b** (vista lateral) e **c** (vista em planta), correspondem a configuração geométrica unidirecional com os orifícios perpendiculares ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor ($\beta = 90°$). As imagens **d** (vista em 3D), **e** (vista lateral) e **f** (vista em planta), correspondem a configuração geométrica unidirecional com os orifícios mais ou menos perpendiculares ao alinhamento da estrutura física do sistema difusor – em foram de leque ($\beta \cong 90º$).

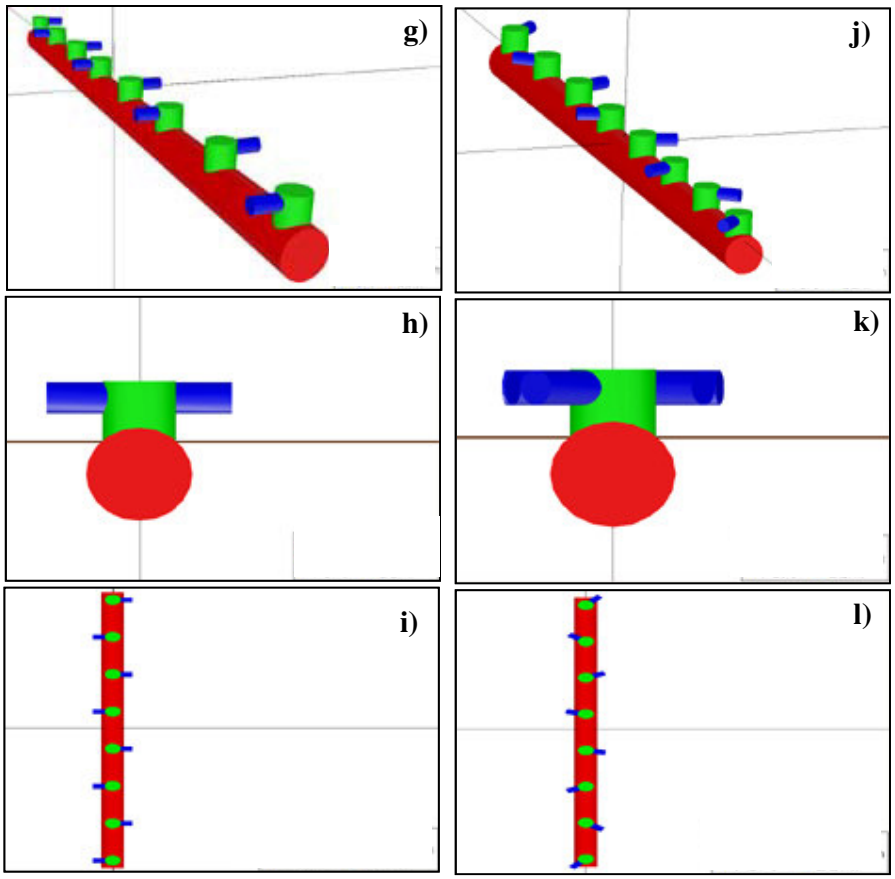


Figura 3.3: As imagens g (vista em 3D), h (vista lateral) e i (vista em planta), correspondem a configuração geométrica onde os orifícios apontam alternadamente e em sentidos opostos perpendicularmente em relação a estrutura física do sistema difusor ($\beta = \pm 90°$). As imagens j (vista em 3D), k (vista lateral) e l (vista em planta), correspondem a configuração geométrica onde os orifícios apontam alternadamente e em sentidos opostos, em ângulos que variam de $\beta = +90°$ a $\beta = -90°$.

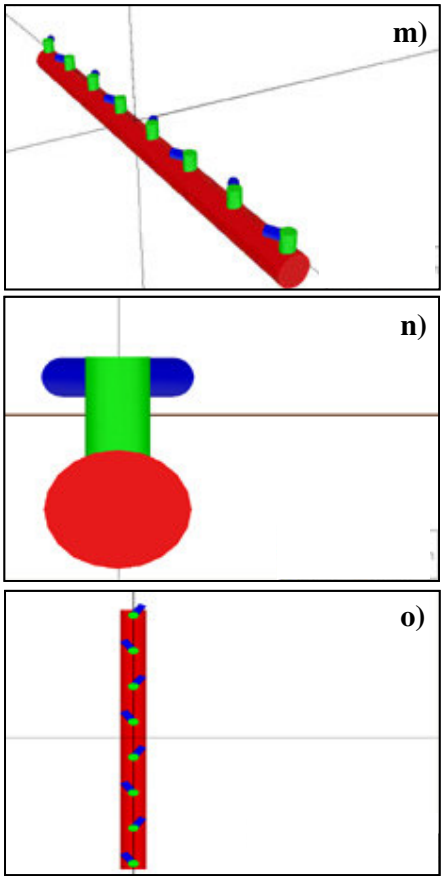


Figura 3.4: As imagens m (vista em 3D), n (vista lateral) e o (vista em planta), correspondem a configuração geométrica *staged*, onde os orifícios apontam na direção da estrutura física do sistema difusor ou com pequenos ângulos de abertura, formando um leque (β =30º).

Obviamente, existe uma grande variabilidade de configurações de sistemas difusores, em que um projetista pode determinar qual a mais adequada, em função das condições ambientais e taxas de mistura que o sistema necessita alcançar. Como exemplo, podemos citar, um sistema difusor multiorifício operando em águas costeiras profundas, estratificada termicamente, e com correntes marítimas fracas, onde a princípio, deve ocorrer o aprisionamento da pluma do efluente dentro de uma camada da coluna d'água e esta ficará a mercê de um forte espalhamento flutuante horizontal. Outro exemplo que podemos citar, é a operação de um sistema difusor multiorifícios em águas rasas, sob a ação de fortes correntes, que irá ocasionar inicialmente uma mistura vertical completa e posteriormente, pela ação da corrente, uma deflexão da pluma ocasionando uma mistura turbulenta com o ambiente.

3.2.3. DESCRIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO CORMIX 2

Escalas de comprimento

Na instalação de difusores convencionais, podem ser consideradas duas condições: a seção difusora é longa em relação a profundidade do ambiente (vizinhança da área de lançamento), considerando $\frac{L_D}{H}$>>1, onde em alguns casos essa relação pode assumir valores de até 100; e, a outra condição, é que o espaçamento médio entre os bocais é pequeno em relação à profundidade, $\frac{s}{H}$<<1. Essas duas condições levam ao conceito de difusor bidimensional equivalente. Tal conceito negligencia os detalhes dos jatos tridimensionais desde a saída de cada orifício, até a junção dos jatos. Considera-se que o jato plano bidimensional se mistura a partir de uma fenda de largura B = $\frac{A_{or}}{s}$.

Dentro de uma unidade de comprimento do elemento difusor bidimensional, as variáveis de fluxo local (por unidade de comprimento) são:

- Fluxo de quantidade de movimento: $m_0 = \frac{M_0}{L_D}$; (29)

sendo: $M_0 = v_j Q_O$
onde: v_j = velocidade do lançamento; Q_0 = Vazão do efluente

- Fluxo de empuxo: $j_0 = \frac{J_0}{L_D}$; (30)

sendo: $J_0 = g'_0 Q_0$

onde: $g'_0 = g(\frac{\rho_a - \rho_e}{\rho_e})$; ρ_a = densidade da água do mar, e ρ_e = densidade do efluente

- Fluxo de volume: $q_0 = \frac{Q_0}{L_D}$; (31)

sendo: $Q_0 = v_j a_0$
onde: a_0 = área do orifício de saída

As análise dimensionais dessas três quantidades de fluxo, associadas aos parâmetros ambientais: velocidade do ambiente – u_a, e gradiente de empuxo - $\in$, levam a seis definições de escala de comprimento:

- $L_Q = \frac{q_0^2}{m_0}$: escala de comprimento de descarga; (32)

- $l_M = \frac{m_0}{j^{2/3}}$: escala de comprimento de transição da fenda jato/pluma; (33)

- $l_m = \frac{m_0}{u_a^2}$: escala de comprimento da fenda jato/corrente; (34)

- $l'_m = \frac{m_0^{1/3}}{\in^{1/3}}$: escala de comprimento da fenda jato/estratificação; (35)

- $l'_b = \frac{j_0^{1/3}}{\in^{1/2}}$: escala de comprimento da fenda pluma/estratificação; (36)

- $l_a = \frac{u_a}{\in^{1/2}}$: escala de comprimento corrente/estratificação. (37)

Quando o espaçamento médio dos bocais for muito grande ($\frac{s}{H}$>>1), os jatos difusores individuais podem se comportar independentemente. Neste caso, a classificação de fluxo no campo próximo, para cada jato boiante, pode ser conduzida pelo procedimento usado em descargas através de emissários submarinos com orifício único (CORMIX 1)[2]. Para um valor de transição ($\frac{s}{H}$=1), é recomendável usar ambas as classificações (orifício único e multiorifícios) para comparar o provável comportamento do lançamento.

Classificação de fluxos no campo-próximo

A operação de um difusor multiorifício é caracterizada por um grande número de escalas de comprimento e variáveis geométricas. Para a aplicação do modelo computacional CORMIX 2, foram identificadas 32 classes de fluxos.

Através das 12 etapas, citadas a seguir, é possível determinar a classe de fluxo das três principais categorias de fluxo: fluxo afetado pela estratificação linear conduzindo ao confinamento interno (classes MS); fluxo com empuxo positivo em camada de ambiente uniforme (classes MU); e, fluxo com empuxo negativo em camada de ambiente uniforme (classes MNU):

- *Etapa 1:* Teste de estabilidade do perfil de densidade usando o critério do nº de Richardson. O nº de Richardson (Ri), para um fluxo estratificado linearmente com

[2] Jirka, G.H.; Doneker, R.L. 1991.

distribuição de velocidade logarítmica e sob condições de estabilidade marginal pode ser escrito como: Ri = $\frac{\in k^2 H^2}{u_*^2}$, onde: $\in$ = gradiente de empuxo, H_S = profundidade da camada, k = constante de von Karman, e u_* = velocidade de atrito, sendo $u_* = \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} u_a$, com f = fator de fricção de Darcy-Weisbach. Para valores críticos, onde Ri = 0,10 a 0,20, o valor crítico do gradiente de empuxo fica: $\in_r = cf\left(\frac{u_a}{H_S}\right)^2$, onde: c = $\frac{Rf}{(8k)^2} = 0{,}02$. Caso o gradiente especificado $\in < \in_r$, o fluxo estratificado será instável. A descarga tende a misturar rapidamente e ocorre um perfil de densidade verticalmente uniforme.

- *Etapa 2:* Se a estratificação do ambiente for tipo A ou D (sem salto de densidade), ir para a *Etapa4*.

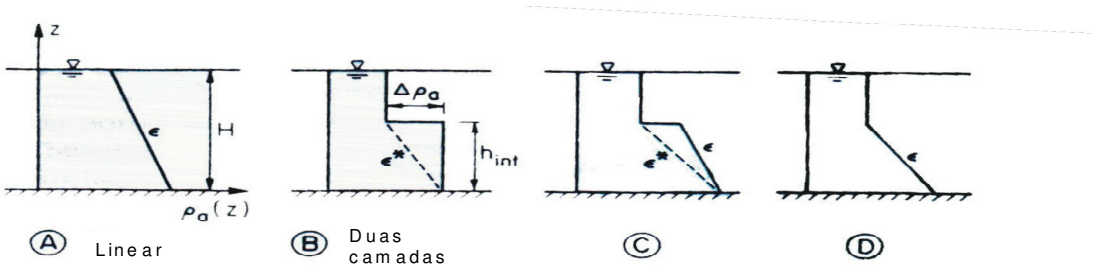


Figura 3.5: Perfis representativos de densidade estáveis no ambiente aquático.

- *Etapa 3:* Aproximar a distribuição de empuxo da camada inferior com um gradiente linear $\in^*$. Recalcular as escalas de comprimento l'_m e l'_b.

- *Etapa 4:* Checar possível confinamento do fluxo na camada linear estratificada de altura H_S (onde H_S = H se tipo A, $H_S = h_{int}$ se tipo B, C ou D). Se Zt + $h_0 \geq H_S$, onde Zt é a altura terminal ao nível da descarga, então a estratificação de densidade não irá confinar o fluxo. Assim, a estratificação do ambiente não é dinamicamente importante. Usar a densidade média e ir para a *Etapa 10* (com H_S = H).

- *Etapa 5:* A estratificação é importante, e o confinamento pode ocorrer. Se for tipo A ou D (sem salto de densidade), ir para a *Etapa 8.*

- *Etapa 6 :* Se o tipo é C, fazer um segundo teste de confinamento de fluxo usando l'_m e l'_b baseado no gradiente $\in$ real. Se ocorrer confinamento abaixo da picnoclina ($Zt + h_0 \leq H_S$), ir para a Etapa 8.

- *Etapa 7:* Confinamento ocorre na picnoclina (o salto de densidade é forte no tipo B ou C). Usar a densidade média na camada inferior e ir para a *Etapa 10* (com $H_S = h_{int}$).

- *Etapa 8:* Checar a interação com o fundo na estratificação linear. Isto pode ocorrer para empuxo negativo ou orientação para baixo. Se $Zt + h_0 \leq 0$; então o fluxo irá interar com o fundo. Usar a densidade média da camada inferior e ir para a *Etapa 12* (com $H_S = h_{int}$).

- *Etapa 9:* Completa a classificação de fluxo para difusores multibocais em camada estratificada linearmente H_S. Existem oito classes de fluxo MS.

- *Etapa 10:* Se a descarga tem empuxo negativo, ir para a *Etapa 12.*

- *Etapa 11:* Fazer a classificação de fluxo para difusores multibocais com empuxo positivo (ou neutro) em camada de densidade uniforme H_S. Existem dez classes de fluxo MU.

- *Etapa 12:* Fazer a classificação de fluxo para empuxo negativo, ou orientação para baixo, de difusores multibocais em camada de densidade uniforme H_S. Existem quatorze classes de fluxo MNU.

Todos os critérios de decisão, e as 32 classes de fluxo (MS, MU, MNU) podem ser encontrados na literatura referente (Jirka&Akar, 1991; Jirka et al, 1996.) . Neste presente trabalho, serão apresentadas somente as classes de fluxo que corresponderem aos resultados do estudo de caso.

3.3. MODELO COMPUTACIONAL FLUENT[3]

3.3.1. INTRODUÇÃO

A Dinâmica dos Fluidos Computacional – DFC (Computational Fluid Dynamics – CFD) é uma ciência de previsão e análise do escoamento de fluido, transferência de calor, transferência de massa e reações químicas, através de soluções das equações matemáticas que governam tais processos, utilizando algoritimos numéricos (ver a seguir, a descrição matemática das equações diferenciais parciais governantes do escoamento de um fluido, de turbulência e de reações químicas). Os resultados são de grande utilidade para: projetos de engenharia, desenvolvimento de produtos, readequações de sistemas e identificação de problemas.

Para a aplicação de DFC, é necessário desenhar a geometria de interesse e 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 do sistema.

As células podem variar de formato e tamanho. Geralmente são utilizadas as células triangulares ou quadrilaterais para sistemas bidimensionais (2D), no qual o escoamento depende apenas de duas coordenadas. Para sistemas tridimensionais (3D), onde o escoamento depende de três coordenadas, são utilizadas as células hexaédricas, tetraédricas, piramidais e prismáticas.

No passado, os códigos DFC aceitavam apenas o uso de células estruturadas, contendo um único tipo de célula para todo o sistema, como era o caso dos elementos hexaédricos com formato padrão em tijolo. Atualmente, os códigos permitem que as células estejam localizadas irregularmente e em formato não estruturado, fornecendo muito maior flexibilidade para a elaboração da geometria. A geometria pode ser criada através de softwares específicos como o AUTOCAD. Para este estudo foi utilizado o programa GAMBIT, que possibilita, além de desenhar a geometria do sistema (volume de controle), também discretizar este volume em células computacionais (geração de malha) em uma interface única, e exportar a malha para o programa FLUENT (versão acadêmica).

---

[3] FLUENT INC. (2003); FOX (1992); POTTER (1997); VERSTEEG&MALALASEKERA (1995).

Após a criação da malha, é necessário definir as condições de fronteira. Podemos especificar como entrada no sistema, variáveis como: pressão, velocidade, fluxo de massa e temperatura; 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. Os fluidos podem ser modelados como incompressível ou compressível. O fluido pode ser Newtoniano ou não-Newtoniano. As aplicações de transferências de massa ou calor, difusividade e propriedades térmicas também precisam ser definidas. As propriedades dos fluidos, como: densidade, viscosidade e capacidade térmica, podem ser selecionadas a partir de um banco de dados ou pré-definidas pelo usuário.

Utilizando-se o Método dos Volumes Finitos (MVF), através dos códigos disponíveis no *software* FLUENT, é possível solucionar apropriadamente, para todas as células do sistema, os processos governantes do escoamento do fluido, integrando as equações diferenciais parciais em um dado volume de controle – ver figura de exemplo de volume de controle da malha hexaédrica do Canal de São Sebastião, com 655.452 volumes. No caso em questão, também é computado o modelo de transporte de espécies químicas, que insere *N-1* equações de transporte difusivo-convectivo para *N* espécies químicas (água doce, água do mar, poluentes, combustíveis, etc...).

A solução numérica de equações diferenciais, para o Método dos Volumes FInitos é acompanhada da discretização do volume, em células bidimensionais (triangular ou quadrilateral) ou tridimensionais (tetraédrica, hexaédrica, prismática, piramidal). No caso em estudo, gerou-se uma malha estrutural hexaédrica uniforme com batimetria variável referente a área circunvizinha dos emissários submarinos do TEBAR.

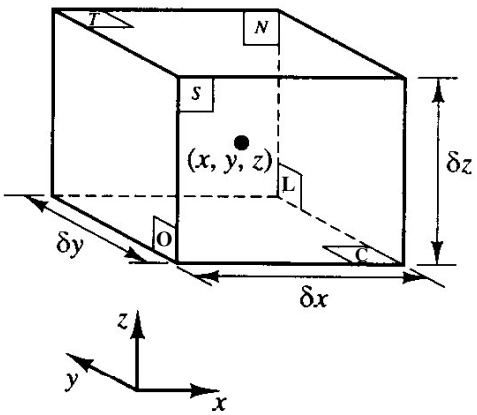


Figura 3.6: Exemplo de Volume de Controle, representado por uma célula hexaédrica quadrada, onde consideramos as faces N, S, L, O, T e C, como sendo: Norte, Sul, Leste, Oeste, Teto e Chão, respectivamente, em relação ao ponto central do volume na coordenada (x,y,z).

3.3.2. DESCRIÇÃO DO MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

3.3.2.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES DE ESCOAMENTO DE FLUÍDO

As equações que governam o escoamento dos fluidos e a transferência de massa são dadas a seguir:

- **Equação da conservação de massa:**

A equação da conservação de massa ou da continuidade representa o fluxo total de massa sobre um volume elementar, atendendo ao princípio da conservação de massa do fluído.

O balanço de massa conservativo de um fluido, em um dado volume de controle, pode ser escrito da seguinte maneira:

A taxa de crescimento da massa em um dado volume	=	A taxa de escoamento da massa através das faces do mesmo volume

A forma geral desta equação é dada por:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t}\right) = 0 \qquad (38)$$

O primeiro termo do lado esquerdo da equação acima é a taxa de mudança da densidade no tempo. O segundo termo do lado esquerdo descreve o fluxo líquido de massa através das suas fronteiras e é chamado de termo convectivo.

Para um fluido incompressível a densidade "ρ" é constante e a equação anterior passa a ser dada da seguinte forma:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (39)$$

- **Equação da quantidade de movimento:**

A segunda lei de Newton determina que a taxa de mudança da quantidade de movimento de uma partícula de fluído em um volume de controle é igual a soma das forças sobre esta partícula.

A taxa de aumento da quantidade de movimento de uma partícula de fluído	=	A soma das forças exercidas na partícula

A equação da quantidade de movimento da componente *x* é dada da seguinte forma:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\sigma_{xx}}{\partial_x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho g_x \quad (40); \text{ onde:}$$

$\frac{Du}{Dt}$: aceleração da partícula de fluido;

σ: tensão normal ao volume de controle;

τ: tensão de cisalhamento;

g_x: componente da gravidade.

Na equação 40, o termo do lado esquerdo representa a taxa de mudança de quantidade de movimento na direção *x* da partícula de um fluido, que será decorrente da soma dos termos do lado direito da equação, que é igual, a força total na direção *x* do elemento devido as forças de superfície (tensões superficiais).

Semelhantemente a equação na direção *x,* as equações na direção *y* e *z* são dadas da seguinte maneira:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\sigma_{yy}}{\partial_y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho g_y \quad (41)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{zz}}{\partial_z} + \rho g_z \quad (42)$$

- Equações de Navier-Stokes:

Para um fluido newtoniano (água, óleo e ar) a tensão viscosa é proporcional à taxa de deformação por cisalhamento. Num fluido newtoniano as tensões viscosas são proporcionais a taxa de deformação. A lei de viscosidade de Newton para escoamento compressível envolve

duas constantes de proporcionalidades: a primeira viscosidade é a viscosidade dinâmica ou absoluta, μ, que relaciona as tensões com a taxa de deformação linear, e a segunda viscosidade, λ, que relaciona as tensões com a taxa de deformação volumétrica.

De forma resumida, as equações de Navier-Stokes, para líquidos incompressíveis podem ser escritas da seguinte maneira:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=\rho g_x-\frac{\partial \rho}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (43)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=\rho g_y-\frac{\partial \rho}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (44)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=\rho g_w-\frac{\partial \rho}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (45)$$

- **Equação da energia:**

A equação da energia é derivada da primeira lei da termodinâmica, a qual estabelece que a taxa de mudança da energia de uma partícula de fluido é igual a taxa de calor adicionada a partícula de fluído mais a taxa de trabalho realizada pela partícula.

A taxa de aumento da energia em uma partícula de fluído	=	A taxa de calor adicionada a partícula de fluido	+	A taxa de trabalho realizada pela partícula

A expressão simplificada da taxa de calor adicionada a uma partícula de fluido devido a condução térmica através das fronteiras do volume de controle é dado pela seguinte equação:

$$K\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)-p\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)=\rho\frac{Du}{Dt} \quad (46)$$

onde:

K: condutividade térmica

- **Equações de Estado:**

As equações de estado são construídas assumindo um equilíbrio termodinâmico e relacionando as quatro variáveis termodinâmicas (ρ - densidade; p – pressão; i – energia interna; T - Temperatura) como variáveis de estado. Se utilizarmos ρ e T, como variáveis de estado, obteremos as equações de estado para p e i. As equações de estado são dadas da seguinte maneira:

$p = p\ (\rho, T)$; e,

$i = i\ (\rho, T)$.

- **Equações diferenciais parciais e integrais de transporte:**

Pela introdução de uma variável geral conservativa ϕ, comum a vários termos das equações, surge uma equação geral, chamada de equação de transporte para a propriedade ϕ.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + div(\rho\phi u) = div(\Gamma grad\phi) + S_\phi \qquad (47)$$

O primeiro termo da equação geral é referente a taxa de aumento de ϕ do elemento fluido, o segundo refere-se o fluxo líquido de ϕ através do elemento fluido (termo convectivo), o terceiro é a taxa de aumento de ϕ devido a difusão (termo difusivo - Γ é o coeficiente de difusão) e o último termo é a taxa de variação de ϕ devido ao termo fonte.

A equação geral acima, é utilizada como ponto de partida para o procedimento computacional no Método de Volumes Finitos (MVF), e no qual o *software* FLUENT se baseia para resolver o equacionamento do escoamento do fluido (água do mar e efluente) e a dispersão do poluente (em função das características físico-químicas do efluente do emissário submarino do TEBAR – parâmetro amônia). Substituindo ϕ por 1, u, v, w ou i (ou T-temperatura, h-entalpia) e selecionando valores apropriados para o coeficiente de difusão, Γ, e para os termos fontes chega-se a equação da conservação de massa, equação da quantidade de movimento e equação da energia (interna, temperatura, entalpia).

A partir desta equação 47, o Método dos Volumes Finitos integra as equações diferenciais parciais sobre o volume de controle, e assim, obtêm-se as equações algébricas e

determina-se a solução do problema em questão (Versteeg & Malalasekera, 1995 apud ORTIZ&BESSA, 2004).

$$\int_{VC} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{VC} div(\rho\phi u) dV = \int_{VC} div(\Gamma grad\phi) dV + \int_{VC} S_{\phi} dV \quad (48)$$

3.3.2.2. MODELO K/∈ DE TURBULÊNCIA

O modelo ***k/∈*** de turbulência padrão é um modelo semi-empírico baseado no modelo das equações de transporte para energia cinética de turbulência (*k*) e para a taxa de dissipação (∈). O modelo da equação de transporte para *k* é derivada de uma equação, enquanto que, o modelo da equação de transporte para ∈ é obtida através de análises físicas com semelhanças discretas com a equação para *k*.

Na derivação do modelo *k/∈* , é assumido que o fluxo é totalmente turbulento, e os efeitos da viscosidade molecular são negligenciáveis. Portanto o modelo *k/∈* de turbulência padrão é válido somente para fluxos totalmente turbulentos.

As equações de transporte para o Modelo *K/∈* de turbulência

As equações de transporte para a energia cinética de turbulência (*k*) e para a taxa de dissipação (∈), estão apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k + G_b - \rho e - Y_M + S_k \quad (49)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \in) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \in u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\in})\frac{\partial \in}{\partial x_j}] + C_{1\in}\frac{\in}{k}(G_k + C_{3\in}G_b) - C_{2\in}\rho\frac{\in^2}{k} + S_\in \quad (50)$$

Nas equações acima, G_k, representa a geração da turbulência da energia cinética devido ao gradientes de velocidade médias; G_b é a geração de turbulência da energia cinética devido a turbulência; Y_M representa a contribuição da dilatação flutuante em turbulência compressível para a taxa de dissipação; $C_1\in$ (1,44), $C_2\in$ (1,92) *e* $C_3\in$ são constantes; σ_k (1,0) e $\sigma_\in$ (1,3) são os números de turbulência de Prandtl para *k* e ∈, respectivamente; S_k e $S\in$, são termos definidos pelo usuário.

Modelagem da viscosidade turbulenta

A viscosidade turbulenta , μ_t, é calculada combinando k e $\in$, como a seguir:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\in}; \qquad (51)$$

onde: C_μ é uma constante com valor padrão igual a 0,09 .

3.3.2.3. MODELAGEM DE TRANSPORTE DE ESPÉCIES QUÍMICAS

FLUENT permite modelar a misturação e transporte de espécies químicas resolvendo as equações de conservação descrevendo os fenômenos de convecção, difusão e reação química para cada espécie introduzida no caso. Através deste modelo, também é possível realizar a modelagem de reações químicas múltiplas, simultaneamente, considerando reações volumétricas e/ou reações ocorrendo na parede ou superfície de uma partícula sólida e/ou região porosa. A modelagem de transporte de espécies químicas pode ser realizada, considerando ou não as reações químicas entre as espécies. Para o caso de não considerar as reações químicas, serão consideradas somente os fenômenos de convecção e difusão, podendo ser introduzido o modelo de turbulência mais adequado para o caso.

A partir da escolha da solução das equações de conservação através do transporte de espécies químicas, FLUENT introduz a fração em massa de cada espécie química, Y_i, para solucionar a equação de convecção-difusão para $i_{ésimas}$ espécies. Esta equação de conservação possui a seguinte forma geral:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + R_i + S_i \qquad (52)$$

Sendo, R_i, a taxa de produção de espécies i por reação química, e S_i, a taxa de criação por adição na fase dispersa. 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 $N_{ésima}$ fração em massa é determinada como um menos a soma das *N-1* frações em massa restantes. Com o intuito de minimizar erros, a $N_{ésima}$ 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 $N_{ésima}$ espécie, e que, existe em muito maior quantidade do qualquer outra espécie química dentro de um sistema aquático.

Para o presente estudo somente será considerado os fenômenos de convecção (ou advecção) e difusão. Considerou-se 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 (FUNDESPA, 2003a). Logo a equação (52), se reduzirá, podendo ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{V} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i \quad (53)$$

Difusão de massa em fluxo laminar

Na equação 53, $\overrightarrow{J_i}$ é o fluxo difusivo da espécie *i*, o qual surge devido a um gradiente de concentração. O FLUENT utiliza a diluição aproximada, na qual o fluxo difusivo pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\overrightarrow{J_i} = -\rho D_{i.m} \nabla Y_i \qquad (54)$$

onde, $D_{i,m}$ é o coeficiente de difusão para a espécie *i* na mistura.

Difusão de massa em fluxo turbulento

Para fluxos turbulentos, FLUENT computa a difusão em massa da seguinte maneira:

$$\overrightarrow{J_i} = -(\rho D_{i.m} + \frac{\mu_t}{S_{ct}})\nabla Y_i \qquad (55)$$

onde S_{ct} é o número de turbulência de Schmidt ($\frac{\mu_t}{\rho D_t}$, onde μ_t é a viscosidade turbulenta e D_t é a difusividade turbulenta). O número de turbulência de Schmidt padrão é S_{ct}=0,7. Nota-se que, a difusão turbulenta geralmente sobrepõe-se a difusão laminar, e portanto, a especificação da difusão laminar em fluxo turbulento normalmente não se faz necessária.

Tratamento do transporte de espécies químicas na equação de energia

Para vários fluxos de misturação com multicomponentes, o transporte da entalpia devido a difusão das espécies pode ter um efeito significativo no campo da entalpia e não deve ser negligenciado.

$$\nabla\left[\sum_{i=1}^{n} h_i \vec{J}_i\right] \qquad (56)$$

Isto ocorre, em particular, quando o número de Lewis para qualquer espécie é muito maior que uma unidade (>1), negligenciando-se este termo podem ocorrer erros significativos. FLUENT introduz este termo como padrão. Na equação abaixo, k é a condutividade térmica.

$$Le_i = \frac{k}{\rho c_p D_{i,m}} \qquad (57)$$

3.4. ANÁLISE DOS MODELOS MATEMÁTICOS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS PARA O ESTUDO DA DISPERSÃO DA PLUMA DE EFLUENTES: CORMIX E FLUENT.

É de grande importância conhecer com antecipação que tipos e magnitudes de impactos ambientais podem ocorrer em determinados locais em função do despejo de cargas poluidoras em ambientes aquáticos.

Dentro deste ponto de vista, a modelagem matemática computacional é uma importante ferramenta no gerenciamento dos recursos hídricos; na análise da qualidade da água através do comportamento hidrodinâmico e biogeoquímico do poluente; no processo de diluição de um efluente; e, no aperfeiçoamento do projeto de estações de tratamento.

A escolha do modelo computacional mais adequado pode advir de uma série de fatores ou conjunto destes, formando um critério de decisão que pode ser composto dos seguintes itens (adaptado de EPA, 1999):

- Tipo de fonte de poluição: é de extrema importância que a escolha do modelo satisfaça a forma de introdução da carga poluidora, cujo lançamento pode ser através de uma fonte pontual ou não pontual.
  - O emissário submarino multiorifícios (6 orifícios, sendo 3 em cada linha) do TEBAR é considerado uma fonte pontual de lançamento de efluente;
  - O CORMIX é um sistema especialista de análise do campo próximo, o qual permite inserir com detalhes, a configuração geométrica do sistema difusor de um emissário submarino;
  - O FLUENT, permite plotar os orifício(s) de descarga de efluentes ao desenhar a geometria do volume de controle e determinar os vetores de velocidade nas coordenadas necessárias. Também é possível inserir várias fontes pontuais de origem independente, dentro de um mesmo volume de controle, o qual com o CORMIX não se faz possível. Em relação a fontes difusas, a limitação do método dos volumes finitos recai quanto a elevação do custo computacional, devido a necessidade de um volume de controle de grandes dimensões, como por exemplo, referente a área de drenagem de uma bacia hidrográfica; tal problema pode ser minimizada, analisando-se em 2D;
- Processos dominantes do transporte de massa e de mistura: o tipo de corpo d'água irá ditar o processo dominante de transporte de massa e de mistura de um poluente. No caso de rios e canais, os processos dominantes de uma forma geral são a advecção e a dispersão; em

estuários, estes processos são influenciados pelo ciclo de maré. Além disso, o tamanho da área de interesse para análise, é fator chave na determinação de tais processos dominantes. A análise pode levar em conta a zona de mistura regulatória ou uma bacia hidrográfica em questão.

- O corpo d'água a ser analisado é um canal, de água marinha, com batimetria variável, e cuja área de interesse está limitada a área circunvizinha ao sistema difusor, para que possa satisfazer, a limitação de análise espacial (análise do campo próximo) pelo método integral de jatos (CORMIX) e a limitação de custo computacional decorrente do método de volumes finitos (FLUENT);
- Não serão considerados os efeitos de maré, devido a alta densidade do efluente causar uma pluma com densidade mais elevada do que a água do mar, portanto, não aflorando à superfície;

- Transformação e destino do poluente: o modelo deve ser escolhido em função da análise a ser realizada no poluente. Alguns modelos não levam em conta a transformação química ou a taxa de decaimento bacteriológico; outros analisam somente alguns mecanismos de transformação.
  - O poluente escolhido é a amônia (NH_3), e será analisado como um parâmetro conservativo. Outro fator que contribuiu para sua escolha, é por existir em concentração elevada no efluente do TEBAR, e devido a alta toxicidade às espécies aquáticas;
  - Apesar do *software* FLUENT permitir a introdução da taxa cinética de reações químicas através do modelo de transporte de espécies químicas, será considerado somente o transporte difusivo-advectivo de um poluente conservativo (amônia);
- Análise em tempo real como ferramenta de decisão: devem ser avaliados o tempo de processamento, a funcionalidade do pós-processamento e a habilidade de geração de dados através de representação gráfica ou tabular para interpretação dos resultados e ser capaz de prover uma tomada de decisão confiável;
  - O CORMIX gera resultados em tempo real, com limitações gráficas e tabular, informando somente a concentração do poluente no eixo da pluma e as dimensões da pluma ao longo do percurso; porém, tais informações satisfazem a análise do presente estudo, mas limita análises futuras, como por exemplo, referente a adsorção no sedimento devido ao impacto bêntico;
  - O FLUENT gera resultados em passos de tempo. No caso das simulações do TEBAR, simulou-se um escoamento da ordem de 17000s (4h40min) acarretando em

aproximadamente 7 dias de tempo computacional ininterruptos. As saídas gráficas e a geração de resultados é ampla, com a possibilidade de determinar a evolução de vários escalares (velocidade, concentração, pressão, etc...) ao longo do volume de controle, e analisar a dispersão conjunta e com específicas taxas cinéticas de reações químicas para várias espécies (amônia, hidrocarbonetos, etc...); porém requer conhecimento do fenômeno envolvido para se conseguir extrair as informações necessárias e relevantes;

- Interface gráfica amigável: o nível de experiência ou conhecimento sobre o assunto irá ditar a facilidade do uso de um determinado modelo. Alguns modelos mais complexos, exigem que o usuário tenha um treinamento especializado; para modelos mais simples, geralmente uma conceituação básica sobre o assunto permite a sua utilização;
  - Ambos necessitam de conhecimentos teóricos básicos de hidrodinâmica, mas o CORMIX apresenta uma interface gráfica de fácil utilização, além de não se fazer necessária a construção e a discretização da geometria do volume de controle em estudo; a qual é imprescindível para modelos de volumes finitos como o FLUENT;
- Requisitos de dados de entrada: também é uma função da complexidade do modelo, onde alguns dados podem não estar disponíveis e a sua aquisição requer o consumo de dispendiosos recursos (físico, financeiro e de tempo), e portanto, a aplicação destes modelos mais complexos deve ser muito objetiva, ou utilizar-se de simplificações plausíveis, para eliminar esforços extras e minimizar custos adicionais;
  - Os dados de entrada solicitados pelo CORMIX são básicos e de fácil aquisição, como: características ambientais (profundidade do corpo receptor na circunvizinhança do lançamento, profundidade do sistema difusor, velocidade preferencial da corrente, densidade / perfil de estratificação, velocidade do vento, etc...), características do efluente (vazão, concentração, densidade, etc..) e configuração geométrica do sistema difusor (n^{o} de orifícios, diâmetro, altura de descarga, alinhamento em relação a corrente, etc...);
  - O FLUENT demanda dados de entrada mais elaborados, e que em certos casos, precisam ser revistos no decorrer da simulação para garantir uma convergência do processo de equacionamento;
- Necessidade de calibração do modelo: os resultados da modelagem computacional devem ser plausíveis e coerentes. Um conhecimento básico prévio do fenômeno a ser analisado ajuda a interpretar e verificar a veracidade dos resultados.

- Para ambos modelos, é necessário ter a sensibilidade das vantagens e limitações de cada modelo em questão, para consequentemente, poder ser realizada uma análise crítica dos resultados.

A tabela abaixo foi elaborada, em função dos modelos empregados no estudo de caso, e refere-se aos itens expostos anteriormente.

Tabela 6: Critérios de decisão entre o *software* CORMIX e FLUENT.

	Tipo de fonte de poluição	**Processos dominantes do transporte de massa e de mistura**	**Transformação e destino do poluente**	**Análise em tempo real como ferramenta de decisão**	**Interface gráfica amigável**	**Requisitos de dados de entrada**	**Necessidade de calibração do modelo**
CORMIX	☆☆	☆	☆ ☆	☆☆☆	☆☆☆ ☆	☆☆☆	☆☆
FLUENT	☆☆	☆☆☆	☆ ☆	☆	**1/2**	☆☆	☆☆

Legenda: ☆☆☆ satisfatório ; ☆☆ regular; ☆ fraco.

CAPÍTULO IV – MATERIAL E METODOLOGIA

4.1. ESTUDO DE CASO: TERMINAL AQUAVIÁRIO DE SÃO SEBASTIÃO ALMIRANTE BARROSO – TEBAR

4.1.1. Descrição do empreendimento

O TEBAR - Terminal Almirante Barroso, está localizado no município de São Sebastião, litoral norte do Estado de São Paulo. Foi construído em 1967 pela empresa PETROBRÁS - Petróleo Brasileiro S.A., para recepção marítima, armazenamento e bombeamento de petróleo e derivados, sua inauguração ocorreu no dia 11 de abril de 1969. Em maio de 1992, com a reestruturação organizacional do Departamento de Transportes, os Terminais Petrolíferos do Estado de São Paulo e do Centro-Oeste foram fundidos num único órgão que passou a se chamar Dutos e Terminais do Centro-Oeste e São Paulo – DTCS, sendo criada a Gerência de São Sebastião – DTCS / GEBAST, responsável pela administração das atividades do Terminal de São Sebastião. Em 01 de maio de 2000, as áreas de Dutos e Terminais foram absorvidas pela TRANSPETRO, subsidiária da PETROBRÁS, tendo sido mantida a estrutura de gerência regional.

Por solicitação da CETESB, em 1986, foi iniciado o projeto de instalação do emissário submarino do TEBAR que, após aprovação do EIA/RIMA, exigida pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo – SMA, teve sua Licença de Instalação – LI, concedida em 29/11/1991.

Paralelamente, em 1990, foi iniciado o projeto de construção da ETE (Estação de Tratamento de Efluentes), com a LI concedida pela CETESB em 23/09/1994. A Licença de Operação – LO, foi concedida à execução do monitoramento ambiental dos efluentes do TEBAR e a realização do estudo de interrelação com os aspectos ambientais do Canal de São Sebastião. Em agosto de 1998, iniciou-se a operação da ETE e a operação em regime contínuo do emissário submarino do TEBAR.

O Terminal de São Sebastião é o maior terminal petrolífero da América Latina, ocupando uma área de aproximadamente 1.839.000m^2, contendo píer de atracação com ponte de acesso (ver figura 4.1) e parque de armazenamento com 41 tanques, representando no total uma capacidade de tancagem de 1.895.438m^3 para petróleo e derivados, destinados a abastecer quatros refinarias no Estado por oleodutos (Refinarias de Cubatão – RPBC; Capuava – RECAP; do Planalto Paulista – REPLAN; e do Vale do Paraíba - REVAP).

Figura 4.1: Disposição das 2 linhas do emissário submarino em relação ao píer de acesso e o pier sul. (Fundespa, 2003a).

O parque de armazenamento tem capacidade total correspondente a cerca de 10 dias de consumo nacional. Nos últimos anos, o terminal vem operando uma média diária de 715.000 barris de petróleo, correspondente à cerca de 55% do consumo nacional (FUNDESPA, 2003b).

No terminal aquaviário (píer de atracação), é possível operar simultaneamente quatro navios, movimentando principalmente petróleo para abastecimento das refinarias. O terminal é constituído de um oleoduto ligando duas plataformas situadas no meio do Canal de São Sebastião (a 1km da costa aproximadamente) aos tanques de armazenamento (na parte terrestre). As plataformas foram construídas 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 ton.).

Na ligação entre as plataformas (terminal aquaviário) e a parte terrestre (parque de armazenamento, estação de tratamento de efluentes, área administrativa e de contratadas, entre outras...) existe uma rede de canalizações, entre as quais podemos citar:

- Tubulações que escoam o petróleo e os produtos derivados até os tanques de armazenamento;

- Tubulação para escoamento da água de produção, separada do petróleo no próprio interior dos navios por diferença de densidade, para o tanque de água destinada à ETE;
- Dois emissários submarinos de efluente industrial situados perto da plataforma Pier Sul.

4.1.1.1. Emissários Submarinos do TEBAR

As duas tubulações dos emissários submarinos são identificadas como Linha Norte e Linha Sul. Ambas correm paralelas ao terminal aquaviário acompanhando seu contorno até o píer sul. A Linha Sul tem um comprimento aproximado de 1.600m e a Linha Norte de 1.400m. Na ponta de cada linha existe uma seção difusora com 3 "risers" (tubulações verticais) com aproximadamente 1,5m e diâmetro igual a 0,15m cada, voltados para a superfície. Segundo FUNDESPA (2003a), foram realizadas inspeções submarinas, registrando que, todo o sistema estava em funcionamento.

Os dois emissários do TEBAR são de PEAD – Polietileno de Alta Densidade, e estão assentados ao lado da plataforma Pier Sul (ver figura 4.2) fixados ao fundo por pesos de concreto. O sistema opera as 2 linhas com pressão de 6kgf/cm^2. O emissário da Linha Norte está situado a uma profundidade de 19,45m, quanto ao da Linha Sul, está a profundidade de 25,15m.

Tabela 7: Posicionamento dos emissários submarinos

Emissários	Coordenadas UTM (m)		Coordenadas Geográficas	
	S	E	Latitude	Longitude
I	7.367.238.514	460.602.262	45º23'12,36''W	23º48'20,28''S
II	7.367.149.439	460.604.271	45º23'12,30''W	23º48'23,17''S

Os Emissários Submarinos lançam no corpo receptor os efluentes provenientes dos sistemas Separadores de Água e Óleo (SAO I e IV) e da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), a partir de uma caixa da estação elevatória, que contêm 2 bombas centrífugas verticais, e que são operadas automaticamente de acordo com a vazão de recebimento.

Figura 4.2: Vista do Píer Sul onde o sistema difusor dos emissários submarinos estão assentados no leito de fundo.

4.1.1.2. Sistema de Tratamento de Efluentes

Os principais impactos ambientais do empreendimento são os lançamentos de efluente através dos emissários submarinos e os eventuais riscos de acidentes (derramamentos de óleo e riscos de explosão).

A grande maioria do efluente gerada é proveniente: da mistura de água e petróleo dos navios; das águas de drenagem dos tanques de armazenamento; das águas pluviais e de incêndios; e os vazamentos de tipo oleosos.

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

- Efluente Líquido da Linha 1: são os gerados na drenagem dos fundos dos tanques e dos navios atracados no terminal aquaviário;

- Efluente Líquido da Linha 2: são as águas pluviais e industriais contaminadas com óleo (águas de incêndio, vazamento de válvulas, etc).

O tratamento dos efluentes é baseado em técnicas muito simples de separação de misturas e processos físico-químicos, sendo:

- Os efluentes da Linha 1 são tratados na ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) com a capacidade de tratar 250 m^3/h de efluentes líquidos. A montante desta linha, encontra-se um tanque de alta capacidade de armazenamento - tanque TQ 3213 - onde são estocadas todas as águas de produção. As etapas de tratamento de efluentes da Linha 1, são as seguintes:

A) o efluente acumulado neste tanque é transferido continuamente para a ETE, por bombeamento, até o flotador, que retira o óleo livre e emulsionado presente com o auxílio da adição de uma solução de polieletrólito junto ao misturador estático, situado na entrada do flotador;

B) a oxidação de sulfeto ocorre mediante a dosagem de peróxido de hidrogênio na tubulação de entrada dos tanques, através de bombas dosadoras. A dosagem depende da concentração de sulfeto e é feita automaticamente através de sensores instalados em linha, que comandam as bombas dosadoras, ou manualmente, onde deve-se manter um excesso de peróxido de cerca de 20%, utilizando para isso teste colorimétrico. A mistura do peróxido ocorre com auxílio de misturadores instalados nos tanques;

C) após a oxidação do sulfeto, ocorre a acidificação, que é feita através da injeção de ácido sulfúrico através das bombas dosadoras. A dosagem é feita automaticamente mediante o recebimento do sinal de pH transmitido pelos sensores instalados antes e após o tanque de acidificação. No tanque existe um misturador para promover a mistura. Esta etapa é preparatória para a oxidação do fenol que requer um pH entre 3,5 e 4,0.

D) o efluente acidificado segue por gravidade para os tanques de oxidação do fenol. A oxidação é feita com peróxido de hidrogênio, que é injetado na linha de entrada dos tanques, cuja vazão de dosagem depende da concentração de fenol determinado na análise laboratorial.

E) a última etapa do processo é a neutralização do efluente, ou seja, a correção do pH para próximo de 7,0. A montante e a jusante do tanque de neutralização existem analisadores em linha que fazem o ajuste automático do pH, atuando nas bombas dosadoras de soda cáustica. Este tanque também possui misturador para a homogeneização do seu conteúdo.

A partir deste ponto, o efluente é encaminhado para o poço de bombeamento dos emissários submarinos, onde o efluente da ETE é misturado com o efluente das SAO`s (os efluentes da Linha 2).

- Os efluentes da Linha 2 (águas pluviais, vazamentos, incêndios, etc...) são tratados

em dois sistemas de Separação de Águas Oleosas - SAO:

- SAO I: constituídos de 6 células
- SAO IV: constituídos de 2 células.

Trata-se de uma etapa de decantação, onde a matéria oleosa fica acima da fase aquosa, assim a água é coletada pelo fundo. Quanto aos óleos sobrenadantes, estes são enviados aos tanques de petróleo destinados às refinarias. A água desses separadores é analisada na saída para verificar se estão em conformidade com a legislação, caso não atendam os padrões de emissão, a água é enviada para o sistema da ETE. Em caso de chuva, as águas pluviais são derivadas desse sistema de tratamento e vão diretamente para os emissários submarinos, aliviando a carga de efluente a tratar.

Segundo CETESB (2001), cada um destes sistemas tem capacidade de tratar 250m^3/h de despejos. Portanto, a vazão máxima total de efluentes no sistema de tratamento do TEBAR é de 750m^3/h (0,208m^3/s).

4.1.2. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS E HIDROLÓGICAS DO CANAL DE SÃO SEBASTIÃO

O Canal de São Sebastião (CSS) é localizado entre o Município de São Sebastião (continente) e o Município de Ilhabela (ou Ilha de São Sebastião). Ele possui uma extensão de cerca de 25km, orientando-se mais ou menos na direção SW-NE, 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.

O CSS e a região costeira adjacente estão localizados na parte central da Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE). Ao largo dessa região encontra-se a Corrente do Brasil que transporta, ao longo do talude continental, massas de água de origens distintas: Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS). O CSS está, em geral, situado na plataforma interna, sendo preenchido principalmente pela Água Costeira (AC). As características hidrográficas dessa última massa de água apresentam grandes variações sazonais, sendo influenciadas pela descarga fluvial e tendendo a ser verticalmente homogêneas devido aos processos de mistura causados pelo vento e pelo cisalhamento das correntes.

As massas de água da Plataforma Interna (AC) e Plataforma Média (ACAS) são separadas por uma Frente Térmica Profunda (FTP)(Castro, 1996). A posição dessa frente varia sazonalmente, estando mais próxima da costa (10-20km) durante o verão e à distância maior no inverno (40-50km). A FTP é mais pronunciada no verão quando, através dela, há uma variação de temperatura de aproximadamente 10ºC (Castro&Miranda, 1998). As águas da Plataforma Média apresentam uma estrutura em duas camadas, especialmente no verão, quando se estabelece uma termoclina sazonal relativamente rasa relacionada à FTP. Nessa situação, as camadas mais profundas são predominantemente ocupadas pela ACAS, contribuindo com um volume superior a 50% da água da plataforma continental. Para a formação das massas de água que ocupam a região leste da Ilha de São Sebastião indicaram que correntes fluindo para NE através da entrada sul, estão associadas a intrusões de massas de água com propriedades que indicam influências da ACAS.

A influência advectiva, citada acima, ocasiona a formação de termoclinas e haloclinas nas camadas mais profundas do canal, que contrastam com as condições hidrográficas quase homogêneas observadas no inverno. Os valores mais intensos da componente longitudinal da corrente ocorreram na seção transversal mais estreita do canal, com intensidades de 0,90m/s (para o norte) e –0,65m/s (para o sul) em janeiro de 1995 e março de 1994, respectivamente (Silva et al, 2001).

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). A circulação mostrou-se essencialmente barotrópica (as temperaturas são uniformes não variando com a altura) e com movimento unidirecional predominantemente para NE durante o outono, inverno e primavera. No verão, ocorreram movimentos com natureza baroclínica (a temperatura varia em função das camadas de densidade) em duas camadas, onde os fluxos baroclínicos estariam associados à tensão de

cisalhamento do vento para SW na camada superficial, e à penetração da ACAS pela extremidade sul do canal para NE na camada profunda.

Segundo SILVA et al (2001) o volume estimado de água do CSS é aproximadamente $24{,}4x10^8$ m^3. O transporte de volume observado era quase contínuo ao longo do canal em março de 1994 (para o Sul) e em julho do mesmo ano (para o Norte), com valores médios de $-1{,}8x10^4 m^3/s$ e $0{,}6x10^4 m^3/s$, respectivamente. A razão entre o volume do canal e cada um dos transportes médios propiciou uma estimativa do intervalo de tempo para a renovação do volume de água do CSS, da ordem de 1,6 a 4,7 dias, respectivamente, representando, em primeira aproximação, o tempo de permanência de uma substância conservativa uniformemente distribuída no canal, supondo-se não ocorrer alteração da circulação no transcorrer desse período.

4.1.3. ANÁLISE DO PARÂMETRO AMÔNIA NA QUALIDADE DO EFLUENTE

A Petrobrás contratou a empresa Cascardi Saneamento Básico Ltda., para executar coletas mensais e realizar os ensaios químicos, físicos e biológicos do efluente industrial tratado do poço de bombas do sistema de emissários submarinos, durante abril de 2000 a março de 2002, perfazendo um total de vinte e duas campanhas (CASCARDI, 2002).

A escolha do parâmetro amônia para a análise da dispersão do efluente industrial dos emissários submarinos do TEBAR, foi devido aos altos valores de concentração desta substância que ultrapassou várias vezes o padrão de emissão (5,0mg NH_3/L – Res. CONAMA 20/86). Neste período, a concentração média de amônia no efluente foi de 76,7 mg/L, sendo o máximo atingido igual a 125,5 mg/L em abril 2001 (ver figura abaixo). Esses valores são superiores ao limite de 5,0 mg/L estabelecidos no Artigo 21 da Resolução CONAMA 20/86 (legislação vigente na época), podendo causar um impacto ambiental significativo na qualidade das águas. Além deste fator, também considerou-se a amônia como um parâmetro conservativo, o que é viável, a partir do momento em que o estudo abrangeu uma área circunvizinha ao lançamento onde tal substância possivelmente ainda mantêm-se com esta característica.

Ressaltam-se ainda, na 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 27,3ºC. Tal faixa de valores exprime uma densidade do efluente da ordem de 1037 kg/m^3.

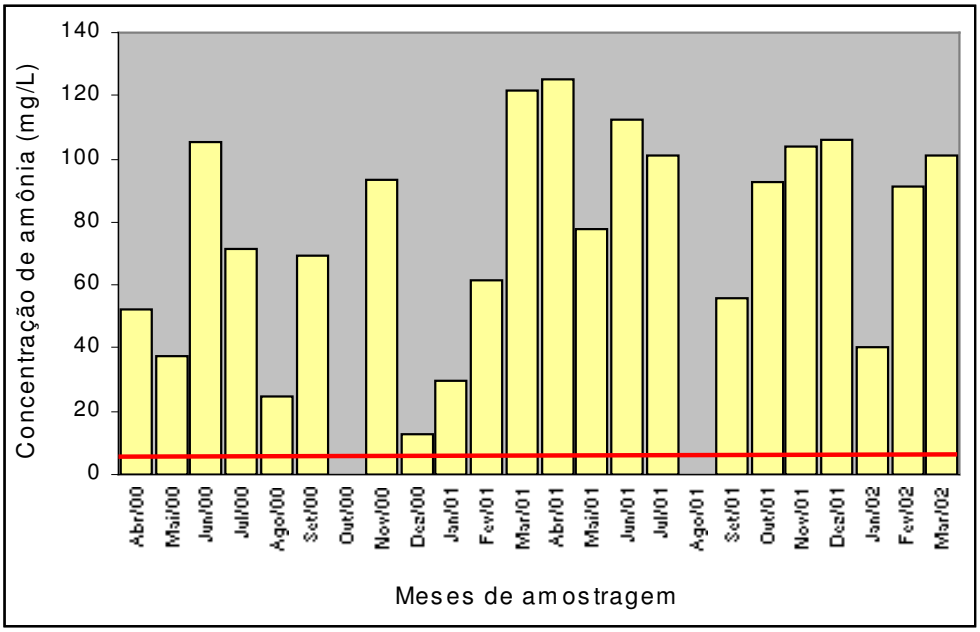


Figura 4.3: Resultados do parâmetro amônia das amostras coletadas no efluente tratado do TEBAR durante o período de abril de 2000 a março de 2002.

O elevado teor de amônia nas águas de produção de petróleo do TEBAR está associado à presença de compostos nitrogenados na formação petrolífera, oriundos da formação geológica e da permeação de águas meteóricas, além da possível ação das bactérias redutoras de nitrato, no decorrer do tempo de transporte entre a extração petrolífera e o terminal marítimo.

O nitrogênio amoniacal, nas suas duas formas (ácida e básica) apresenta riscos ambientais: a amônia não ionizada NH_3 apresenta toxicidade elevada, enquanto que o seu câtion amônio NH^{4+}, é responsável pelo consumo de oxigênio e a eutrofização do meio aquático. As proporções destas formas dependem do pH, da temperatura e da salinidade; geralmente, para um pH entre 6,5 e 8,5 a maior parte do nitrogênio amoniacal está na forma ionizada (NH^{4+}).

A partir de maio 2002, não foram apresentadas análises do efluente para o parâmetro amônia, por parte da Petrobrás, na forma dos relatórios analisados.

Tabela 8: Comparativo dos padrões de emissão com os resultados das análises físico-químicas do efluente do Tebar.

Parâmetros Físico Químicos	Resolução CONAMA 20/86[a]	Resolução CONAMA 357/05[b]	CETESB[c]	CASCARDI Petrobrás[d]
Amônia (mg/L)	5,0	-	análise sem resultados*	Média = 76,7 Máx = 125,5**
NAT (mg/L)	-	20,0	-	-

[a] Artigo 21.
[b] Artigo 34 para padrões de lançamento de efluentes.
[c] Média de 3 análises ao longo do dia, realizadas durante campanha de Janeiro de 2001.
[d] Média das análises trimestrais durante o período de abril de 2000 a março de 2002.
* Não foi possível medir devido a interferentes.
** Concentração máxima de amônia encontrada durante o período das análises.

4.1.4. ANÁLISE DO PARÂMETRO AMÔNIA NA QUALIDADE DA ÁGUA DO CANAL DE SÃO SEBASTIÃO

A amostragem e a análise de água marinha no Canal de São Sebastião também foi realizada pela Cascardi (contratada da Petrobrás) e se deu através de campanhas trimestrais durante o período de maio de 2000 a fevereiro de 2002, da seguinte maneira:

- 8 campanhas com frequência trimestral em 11 estações ao longo do canal de São Sebastião (figura 4.4), na superfície e no fundo;
- 8 campanhas com frequência trimestral em 4 estações nas posições cardinais em relação a estação 7 (eqüidistantes a 200 metros), caracterizando a área de dispersão do emissário submarino, com amostragens também na superfície e no fundo (profundidade aproximada de 25-35 metros) - figura 4.5.

Durante o período de julho de 2002 a janeiro de 2004, foram realizadas outras campanhas de amostragem e análises químicas e ecotoxicológicas dos mesmos pontos citados acima, porém, não foram divulgados valores do parâmetro amônia ou qualquer outra forma nitrogenada, com a justificativa de que tal parâmetro se apresentava em processo de revisão durante a concepção da Resolução CONAMA 357/05, que revoga a CONAMA 20/86.

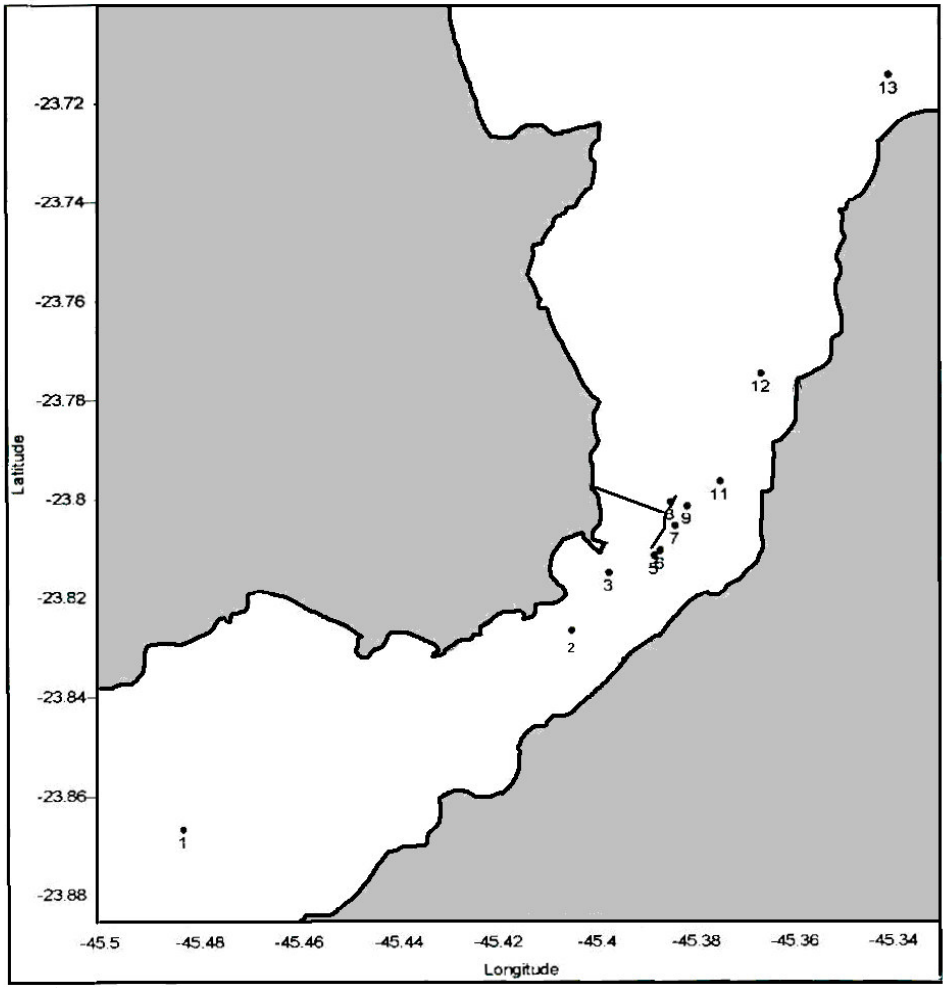


Figura 4.4: Posicionamento das estações oceanográficas no canal de São Sebastião e localização do Terminal TEBAR.

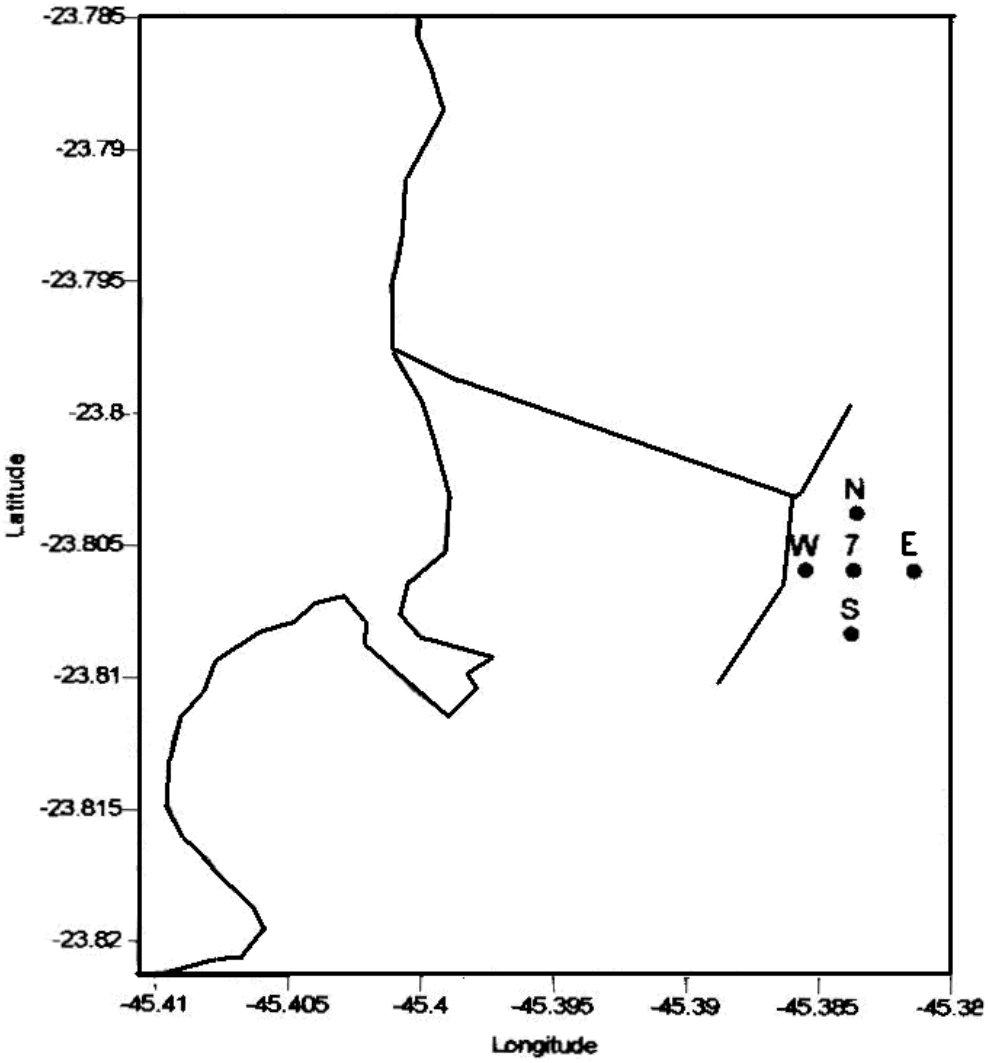


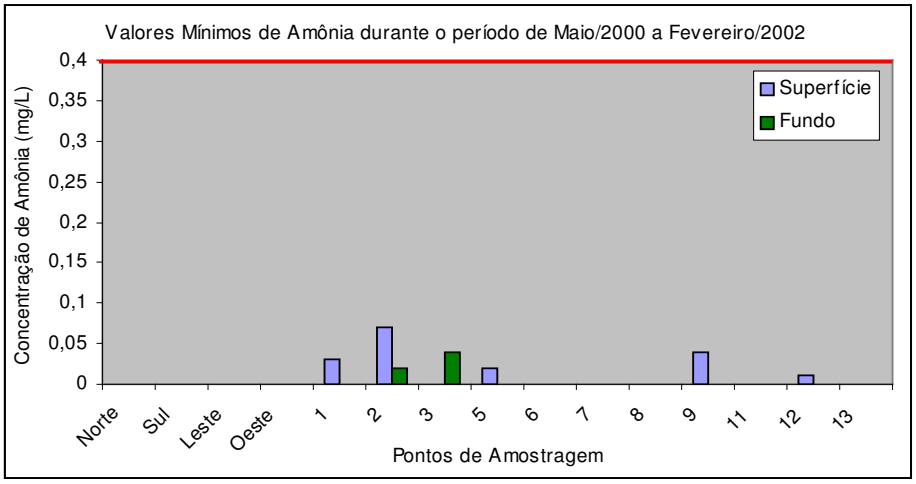
Figura 4.5: Posicionamento das estações oceanográficas amostradas trimestralmente na área de dispersão do emissário submarino.

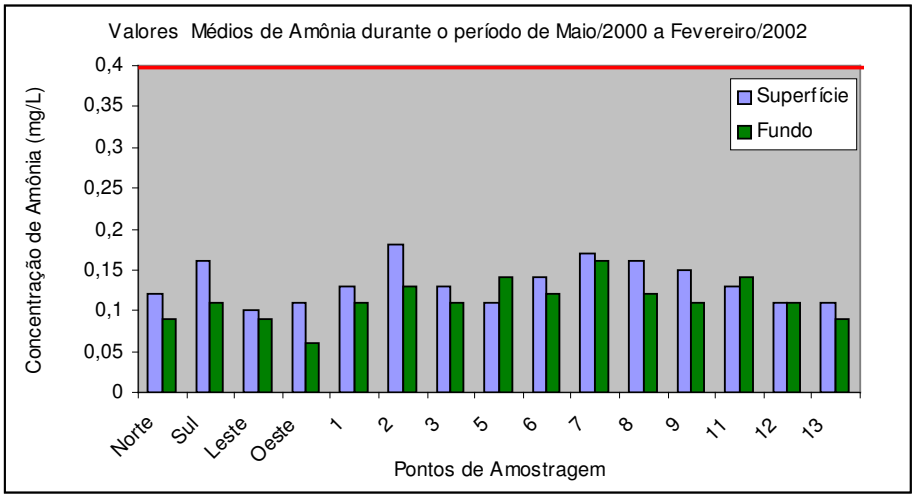
Os dados de monitoramento de maio de 2000 à fevereiro de 2002 indicam que o parâmetro amônia não ultrapassou o padrão de qualidade das águas (0,4mg/L NH_3) estabelecido no Artigo 21 da Resolução CONAMA 20/86.

Apesar de não ter sido detectado valores acima do padrão de qualidade (0,4mg/L) para a amônia, em nenhum dos pontos de amostragem (figuras 4.4 e 4.5), encontrou-se, nos pontos N, 2, 5, 7, 8, 9 e 11, concentrações igual ou superiores a 0,3 mg/L, atingindo 0,36 mg/L na estação 7 (novembro de 2000) e 0,37 mg/L nas estações 9 (novembro de 2000) e 11 (agosto

de 2000). Os pontos 2 e 11, possivelmente, sofrem a influência dos emissários submarinos de esgoto doméstico do Saco do Araçá e do Saco da Capela, respectivamente.

Abaixo, são apresentados os gráficos com valores mínimos, médios e máximos para a amônia, na superfície e fundo, na área de dispersão e influência do TEBAR. A faixa vermelha, representa o valor limite da Resolução CONAMA 20/86.





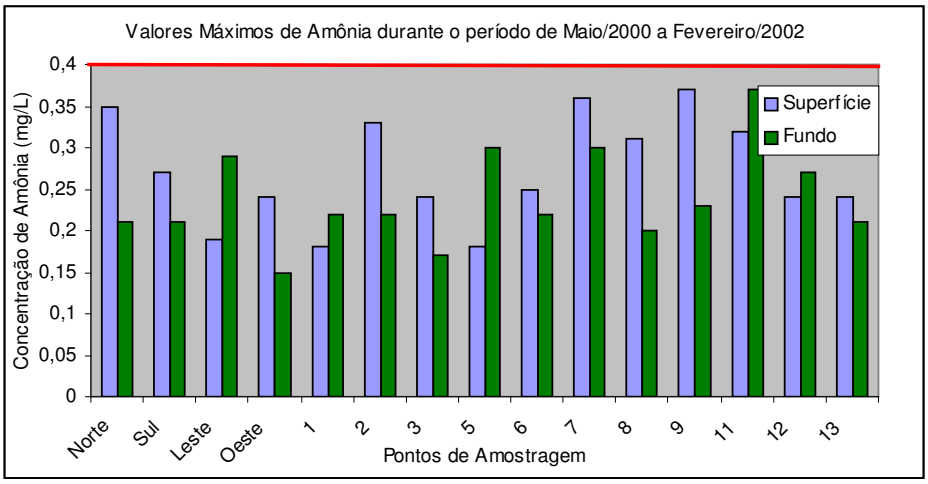


Figura 4.6: Concentrações máximas, médias e mínimas, de amônia, determinadas nos pontos apresentados nas figuras 4.4 e 4.5.

CAPÍTULO V – RESULTADOS

5.1. CÁLCULO DA HIDRÁULICA INTERNA DE DIFUSORES DOS EMISSÁRIOS SUBMARINOS DO TEBAR

5.1.1. RESULTADOS ANALÍTICOS

A utilização da metodologia de cálculo da hidráulica interna de difusores orifício-por-orifício (item 2.1.3.2 – pág. 30) tem a intenção de verificar a perda de carga ao longo dos orifícios da seção difusora para as duas linhas de emissários submarinos do TEBAR (Linha Sul e Linha Norte).

Tendo-se:

Q_{TOTAL} = 750 m^3/h = 0,208 m^3/s; dividindo-se a vazão total por 2 (2 emissários submarinos que operam simultaneamente), tem-se:

Q_{LINHA} = (750 m^3/h) / 2 = 375 m^3/h = 0,104 m^3/s

$D_{TUBULAÇÃO}$ = 25mm = 0,255m

$A_{TUBULAÇÃO} = \frac{\pi(0,255)^2}{4} = 0,051m^2$

$V_{TUBULAÇÃO} = Q_{LINHA} / A_{TUBULAÇÃO}$ = 0,104 / 0,051 = 2,0392 m/s

$D_{RISER} = D_{ORIFICIO}$ = 7,5mm =0,075m

$A_{ORIFICIO} = \frac{\pi(0,075)^2}{4} = 0,004417m^2$

g = 9,8 m/s^2

$P_{TUBULAÇÃO}$ = 6 kgf / cm^2

γ_a (peso específico da água do mar) = 1022 kgf/m^3

γ_e (peso específico do efluente) = 1037 kgf/m^3

Z_S (cota de profundidade): $Z_{S\ Linha\ Sul}$ =25,15m; $Z_{S\ Linha\ Norte}$ =25,15m

s = 30m (espaçamento entre orifícios/*risers*)

L_{RISER} = 1,5m (comprimento do *riser*)

- Cálculo hidráulico do Emissário Submarino da Linha Sul:

Utilizando-se a equação 2 (pág. 31), obtêm-se para o emissário submarino - Linha Sul os seguintes valores:

$$H_{\text{Linha Sul}} = \frac{(2{,}0392)^2}{2x9{,}8} + \frac{6x10^5}{1037x9{,}8} - \left(\frac{1022}{1037}\right)x19{,}45 = 38{,}9m$$

Com a equação 5 (pág. 32), calcula-se o coeficiente de descarga para *riser*:

$$Cd_{\text{Linha Sul}} = 0{,}88\left(1 - \frac{0{,}5x(2{,}0392)^2}{2x9{,}8x38{,}9}\right) = 0{,}87m$$

Admitindo-se que a vazão total por linha será distribuída uniformemente para todos os 3 orifícios (*risers*), tem-se que: $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_{LINHA} / 3 = 0{,}0347m^3/s$;

Considerando-se para o orifício nº1, uma vazão $0{,}95Q_1$ e a partir da equação 8 (pág.33), se terá:

$$H_1 = \frac{\left(\frac{0{,}0329}{0{,}87x0{,}004417}\right)^2}{2x9{,}8} = 3{,}75m$$

A velocidade no orifício mais afastado da margem (nº1), utilizando-se a equação 9 (pág.33), será:

V_1 = 7,45 m/s;

A perda de carga distribuída entre o 2º orifício e o 1º orifício, pode ser calculado com a utilização da equação 10 (pág. 33), onde:

$f \equiv (Re; \frac{e}{D})$, onde, para tubos de PEAD:

$e = k_s = 0{,}0015mm = 1{,}5x10^{-6}m$

$\frac{\mu}{\rho} = \upsilon =$ viscosidade cinemática do esgoto = 1,007x10^{-6}m^2/s

Com a utilização do Diagrama de Moody, obtem-se, um fator de atrito aproximadamente igual a 0,021, para a tubulação principal.

Logo:

$$h_{dT1} = 0{,}0210\left(\frac{30}{0{,}255}\right)x\left(\frac{2{,}0392}{2x9{,}8}\right)^2 = 0{,}524m$$

Da mesma maneira, calcula-se a perda de carga distribuída no trecho da tubulação *riser*, obtendo-se um fator de atrito aproximadamente igual a 0,0205.

Logo:

$$h_{dR1} = 0{,}0205\left(\frac{1{,}5}{0{,}075}\right)x\left(\frac{7{,}45}{2x9{,}8}\right)^2 = 1{,}1603m$$

A perda de carga localizada, no ponto de junção do *riser* com a tubulação principal, é calculado a partir da fórmula geral: $h_{L1}=k\frac{V^2}{2g}$; adotando-se k=0,5 para coeficiente de perda de carga com quina viva.

Logo:

h_{L1} = 0,106m;

Através da equação 7 (pág.32), obtêm-se a carga total na saída do orifício 2, tendo-se:

$$H_2 = H_n = H_1 + \sum_{i=1}^{i-n} h_i + \beta_d\left(z_{s1} - z_{sn}\right) = 3{,}75 + (0{,}524 + 1{,}1603 + 0{,}106) + (\frac{1022}{1037})x(19{,}45\text{-}17{,}55)$$

$H_2 = 7{,}4103m$

A partir deste ponto, o procedimento de cálculo para os demais orifícios (mais próximos a margem, orifícios nº 2 e nº 3) se torna idêntico e repetitivo, considerando-se a carga e as perdas de carga dos orifícios subsequentes.

Abaixo, tem-se de foram sucinta os valores de carga total do sistema, carga por orifício e as perdas de carga em cada trecho da tubulação.

Seção	Carga (m)	Perda de Carga distribuída na tubulação principal entre os *risers* (m)	Perda de Carga distribuída no *risers* (m)	Perda de carga localizada (m)
Total	38,9	-	-	-
orifício nº1 (mais afastado)	3,75	0,524	1,1603	0,106
orifício nº2	7,41	0,524	3,515	0,106
orifício nº3 (mais próximo)	13,43	-	-	-

- Cálculo hidráulico do Emissário Submarino da Linha Norte:

A metodologia de cálculo e os valores obtidos para a carga total e as perdas de carga distribuída e localizada, serão os mesmos determinados para a linha Sul, devido as mesmas condições de operação e dimensões.

5.2. MODELO COMPUTACIONAL CORMIX

5.2.1. CENÁRIOS

Para as simulações hidrodinâmicas da descarga do efluente, foi utilizada a versão CORMIX GI – 4.2 (licença acadêmica).

Abaixo, estão discriminados os principais parâmetros de entrada da simulação para: as condições ambientais, do efluente e da geometria do sistema difusor.

⇒ Dados do Ambiente:

- Largura média do canal = 2 km. Para o modelo, será considerado, um ambiente sem fronteiras na vizinhança do sistema difusor;
- Profundidade máxima do canal nas vizinhanças do lançamento = 25m;
- Profundidade média do emissário submarino = 22,3m (1° difusor a 19,45m e último difusor a 25,15m);
- Sentido da corrente unidirecional, a NE;
- Velocidades da corrente:
  - Dados de medições realizadas na vizinhança do sistema difusor (leito de fundo), durante campanhas oceanográficas nas épocas de inverno (sem estratificação) e verão (estratificação) (FUNDESPA, 2003a);
  - velocidade média igual a 0,5m/s (FONTES, 1995)
- Condições de estratificação (FUNDESPA, 2003):
  - Estratificação forte linear de verão = 1022 a 1026 kg/m^3
  - Estratificação média linear de verão = 1022 a 1025 kg/m^3
  - Sem estratificação – inverno = 1022 kg/m^3

⇒ Características do Efluente:

- Parâmetro conservativo: Amônia
- Concentração = 125,5 mg/L; máxima concentração medida em abril de 2001 (Cascardi, 2002)
- Vazão máxima de projeto = 0,208m^3/s (CETESB, 2001);
- Vazão máxima medida em campanha = 0,128m^3/s (FUNDESPA, 2003a);
- Massa específica = 1036,7 kg/m3 (T = 27,8ºC; Salinidade = 53,8 $^o/_{oo}$); valores médios (Cascardi, 2002).

⇒ Características geométricas do emissário submarino

- 2 linhas paralelas de emissários, com 1400 m e 1600m; porém, por limitação do programa será considerada uma linha única, com 1600m, a 45º em relação ao sentido predominante da corrente – NE (figura 5.2.1);
- Sistema difusor:
  - Nº de risers = 6, com um único orifício de saída por riser, direcionados para a vertical;
  - Altura do riser, H = 1,5m,
  - Diâmetro do riser, D = 0,15m;
  - Espaçamento entre risers, S = 30m.

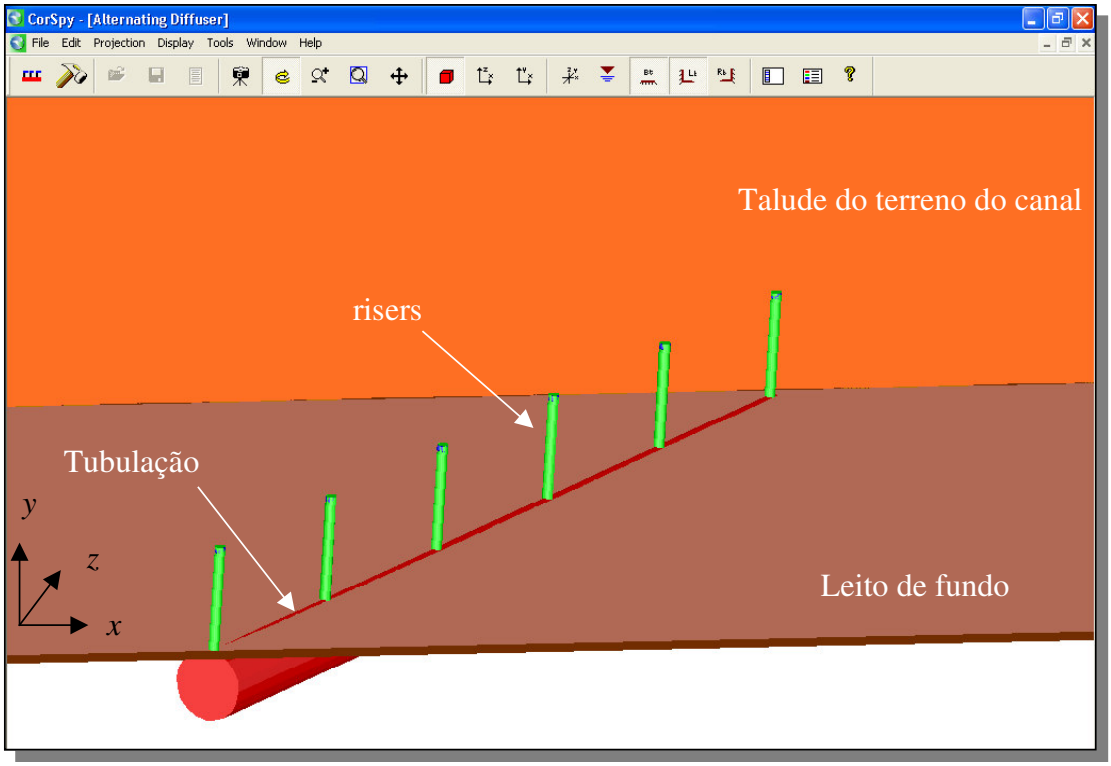


Figura 5.2.1: Esquematização retangular da área circunvizinha ao sistema difusor do Emissário Submarino do TEBAR. Observa-se que o modelo exige uma simplificação, não possibilitando representar a batimetria do Canal de São Sebastião.

Os cenários considerados para as simulações perfizeram um total de 10 casos, sendo:

- C1: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 19,16cm/s; condição de verão; estratificação forte linear (1022 a 1026 kg/m^3).

- C2: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 10,56cm/s; condição de verão; estratificação forte linear (1022 a 1026 kg/m^3).
- C3: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 9,7cm/s; condição de verão; estratificação forte linear (1022 a 1026 kg/m^3).
- C4: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 14,3cm/s; condição de verão; estratificação média linear (1022 a 1025 kg/m^3).
- C5: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 2,8cm/s; condição de verão; estratificação média linear (1022 a 1025 kg/m^3).
- C6: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 6,7cm/s; condição de verão; estratificação média linear (1022 a 1025 kg/m^3).
- C7: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 17cm/s; condição de inverno; sem estratificação; densidade uniforme (1022 kg/m^3).
- C8: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 95cm/s; condição de inverno; sem estratificação; densidade uniforme (1022 kg/m^3).
- C9: C=125,5 mg/L; Q = 0,208m^3/s; Va = 50cm/s; condição de verão; estratificação forte linear (1022 a 1026 kg/m^3).
- C10: C=125,5 mg/L; Q = 0,128m^3/s; Va = 50cm/s; condição de verão; estratificação forte linear (1022 a 1026 kg/m^3).

Tabela 9: Resumo das principais variáveis selecionadas para os cenários simulados no CORMIX.

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

5.2.2. RESULTADOS

Para todas as simulações realizadas, devido o efluente possuir alta densidade, ρ = 1036,7 kg/m^3, o modelo apresentou um único modelo de classificação de fluxo, do tipo MNU2 (figura 5.2.2), sendo uma descarga hidrodinamicamente estável. 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. Ressalta-se que para este tipo de descarga, não ocorrem zonas de recirculação.

Devido à elevada densidade do efluente (maior que a do meio aquático), o efluente apresenta um forte empuxo negativo, submergindo após o lançamento vertical através dos orifícios de saída do sistema difusor, sendo arrastado nas camadas próximas do leito de fundo. Paralelamente, o comprimento vertical do fluxo , será limitado, em uma camada superior pela forte estratificação do meio (condição de verão).

As seguintes zonas de diluição existem no campo próximo (figura 5.2.3):

- A descarga é do tipo jato, prevalecendo a intensidade do fluxo de saída (quantidade de movimento), sofrendo ascenção em direção a camada limite devido a estratificação térmica;
- Após, poucos metros, o jato se transforma em pluma (formada na camada limite estratificada ou devido ao empuxo negativo), sofrendo advecção horizontal e movimento descendente em direção ao leito de fundo, devido a alta densidade do efluente;
- Impacto bêntico do jato/pluma submerso.

As seguintes zonas de diluição existem no campo distante (figura 5.2.4):

- Espalhamento horizontal e lateral na camada próxima ao leito de fundo, por advecção decorrente da velocidade da corrente. A espessura da pluma irá diminuir durante esta fase. A taxa de mistura é baixa em relação as etapas anteriores. Provavelmente, nesta etapa, a pluma irá atingir a margem mais próxima do lançamento.Nesta última etapa, a turbulência do ambiente irá se tornar o principal mecanismo de mistura, através do efeito de cisalhamento entre partículas. A pluma irá aumentar de largura e espessura através do efeito do espalhamento passivo.

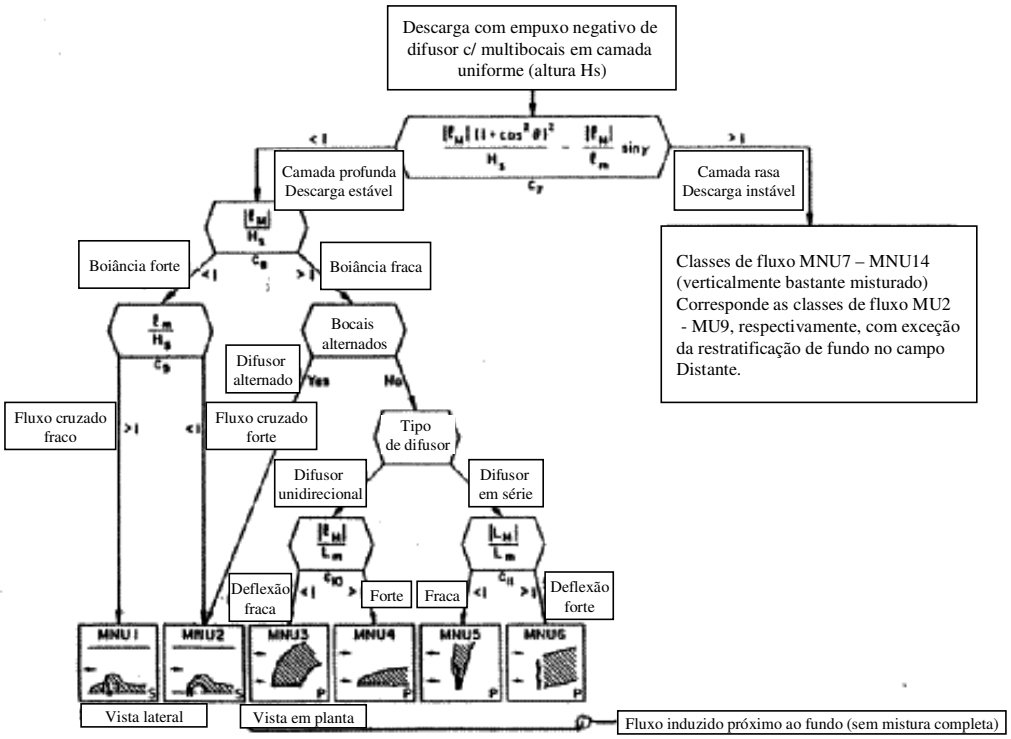


Figura 5.2.2: Fluxograma de classificação de fluxo com empuxo negativo em camada de ambiente uniforme (classes MNU). O tipo MNU2 é a classe de fluxo determinada em todos os cenários apresentados.

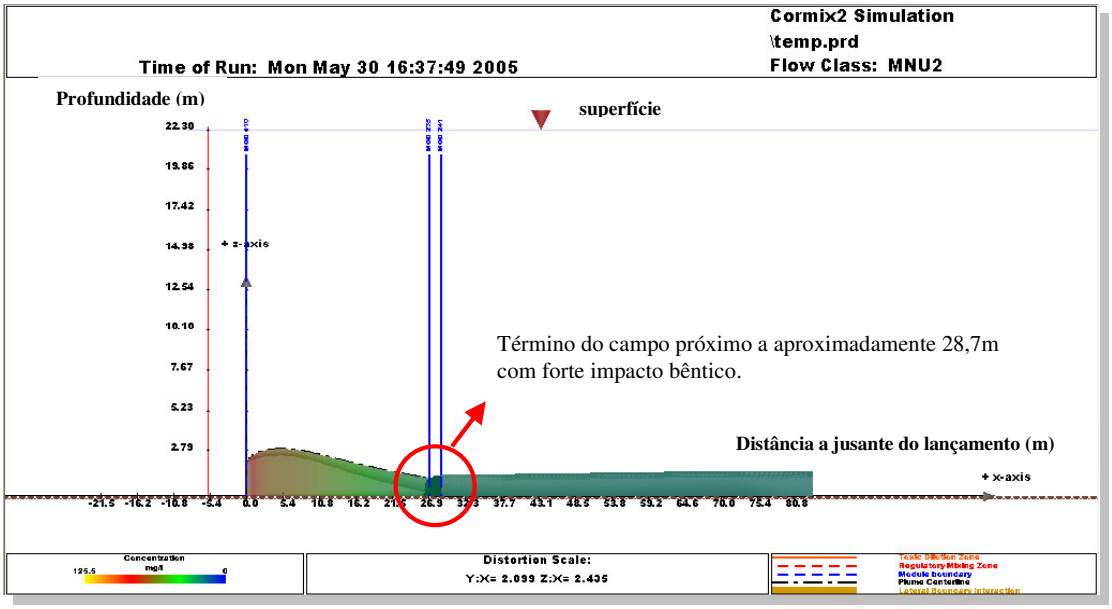


Figura 5.2.3: Vista lateral da pluma no campo próximo referente ao Cenário C9.

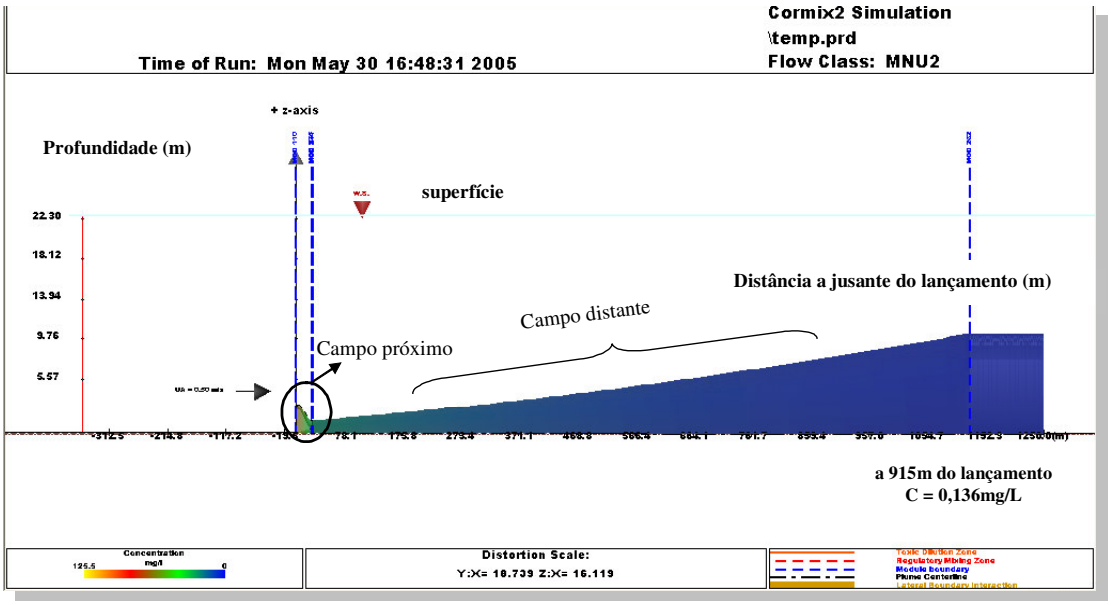


Figura 5.2.4: Vista lateral em planta no campo distante referente ao Cenário C9.

Na tabela abaixo estão expressos os resultados dos 10 cenários simulados no CORMIX 2, apresentando os valores de concentração e diluição no término do campo próximo e no campo distante (a 915m do lançamento).

Tabela 10: Resultados dos cenários simulados, no campo próximo e distante.

Cenários	Campo próximo			Campo distante		
	X (m)[a]	C (mg/L)[b]	D (C_0/C)[b]	X (m)	C (mg/L)[c]	D (C_0/C)[c]
C1	11,67	2,3	54,6	915	0,68	184,56
C2	6,92	3,49	36	915	1,66	75,6
C3	6,34	3,84	32,7	915	1,87	67,11
C4	8,51	2,81	44,7	915	1,14	110,1
C5	1,96	9,11	13,8	915	4,48	28,01
C6	3,95	6,25	20,1	915	3,24	38,7
C7	8,21	2,82	44,5	915	0,992	126,51
C8	36,02	1,32	94,9	915	0,704	178,27
C9	28,7	1,76	71,31	915	0,136	922,8
C10	22,60	2,0	62,6	915	0,232	539,9

[a] comprimento a jusante do lançamento onde termina o campo próximo.
[b] Concentração e diluição no eixo da pluma no término do campo próximo.
[c] Concentração e diluição no eixo da pluma no campo distante (a 915m do lançamento).

Com os gráficos plotados, analisou-se o campo próximo (figuras 5.2.5 e 5.2.6) e o campo distante (figura 5.2.7). Para o caso da análise do campo distante, esta se faz necessária, principalmente, para poder visualizar a extensão percorrida pela pluma até atingir o padrão de qualidade das águas.

- Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo próximo, para os cenários C1 a C10 (Figuras 5.2.5 e 5.2.6):

Observa-se 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, inclusive impacto bêntico, devido a maior concentração local do poluente, favorecido pela fraca ação advectiva do ambiente que poderia favorecer o processo de dispersão. Para a simulação com Va = 2,8 cm/s, este impacto será a menos de 1 metro do lançamento com C = 12,8 mg/L NH_3.

Para a simulação com vazão máxima de projeto igual a 0,208m^3/s (Cenário 9), observa-se o mesmo perfil de diluição inicial para os demais casos, porém, devido a um volume maior de poluente, esta diluição se dará de maneira mais lenta. A velocidade igual a 0,5m/s (intensidade média no canal) propicia um arraste da pluma, 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 em razão de qualquer outra característica ambiental. 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.

- Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo distante (até 915m), para os cenários C1 a C10 (Figura 5.2.7):

Através deste gráfico, buscou-se representar os efeitos de diluição no campo distante. Após a transição do campo próximo para o campo distante, as simulações realizadas apresentaram um comportamento de diluição uniforme. Destaca-se a acentuada diluição sofrida, nesta transição, principalmente para as velocidades média e máxima de corrente (Va = 95 cm/s), devido ao efeito da difusão advectiva.

Para o caso da velocidade média (0,5m/s), o padrão de qualidades das águas (0,4mg/L NH_3) é atingido a cerca de 420m do lançamento. No final do campo distante (estabelecido limite de 915m) a concentração do poluente é de aproximadamente 0,136mg/L NH_3.

A seguir descrevemos as principais características dimensionais da pluma do efluente no campo distante:

- A 915m do emissário, a espessura da pluma é da ordem de 0,5 a 2,5m acima do leito de fundo, elevando-se suavemente quanto mais afastada estiver do ponto de lançamento;
- O mesmo ocorre para a largura da pluma, destacando-se que, para a velocidade mínima de corrente (Va = 2,8cm/s) a pluma atinge larguras da ordem de 10 vezes maior ($\cong$ 1120m) que para uma situação com velocidade máxima do ambiente (Va = 95 cm/s). Isto, possivelmente se deve, a um maior efeito do espalhamento boiante em ambientes lênticos, enquanto que, para ambientes lóticos, o efeito de cisalhamento entre partículas é mais intenso, devido a turbulência do meio, acarretando em uma maior taxa de diluição.

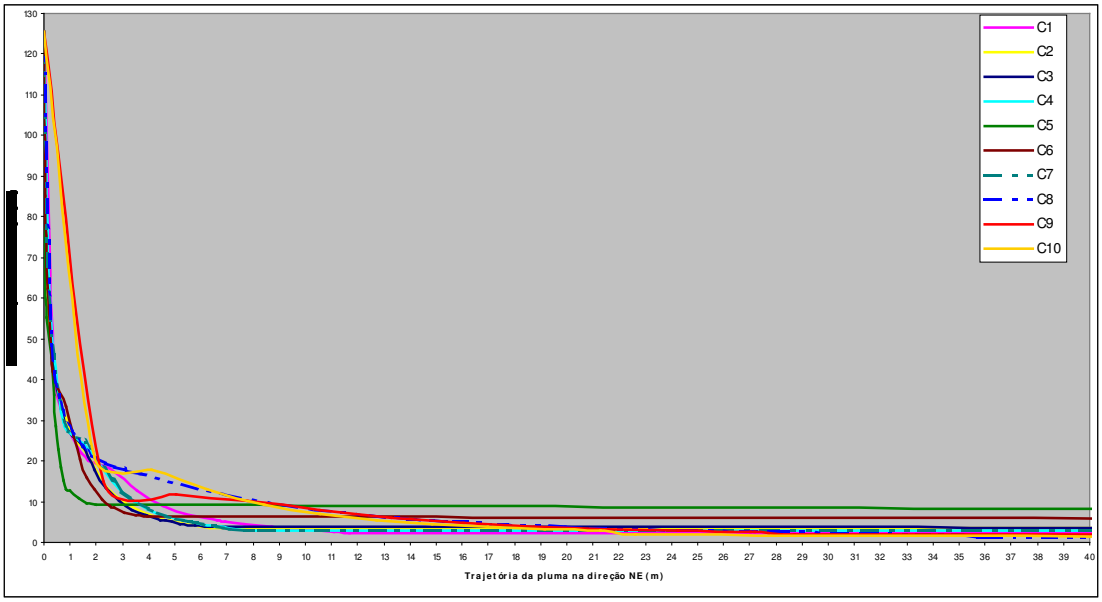


Figura 5.2.5: Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo próximo, para os cenários C1 a C10.

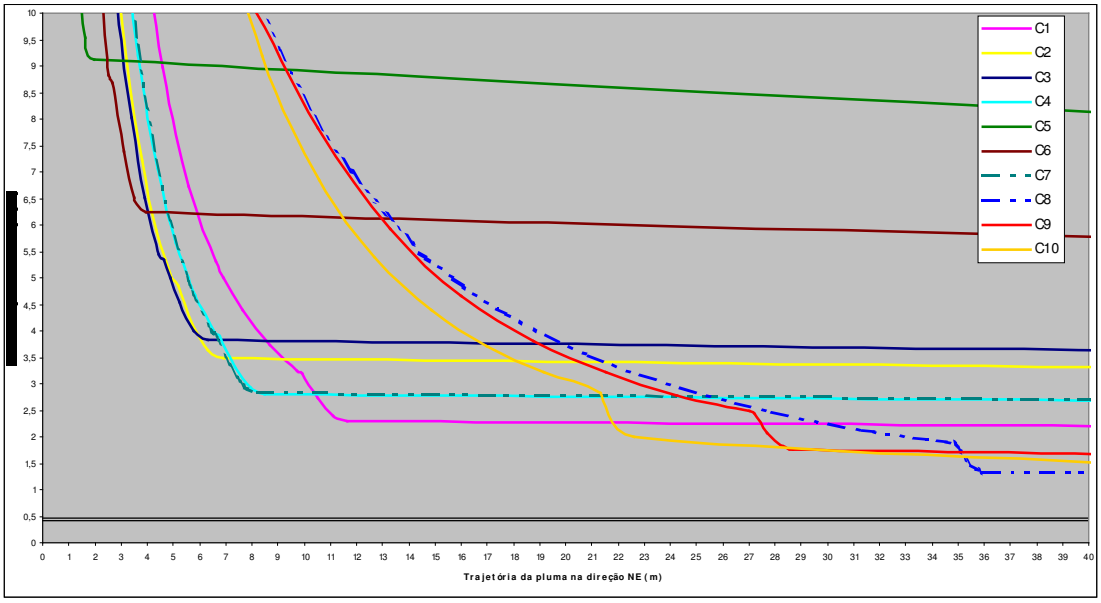


Figura 5.2.6: Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo próximo, para os cenários C1 a C10, com o limite (linha preta, C = 0,4mg/L) estabelecido pela Resolução CONAMA 20/86 (para amônia) e Resolução CONAMA 357/05 (para NAT).

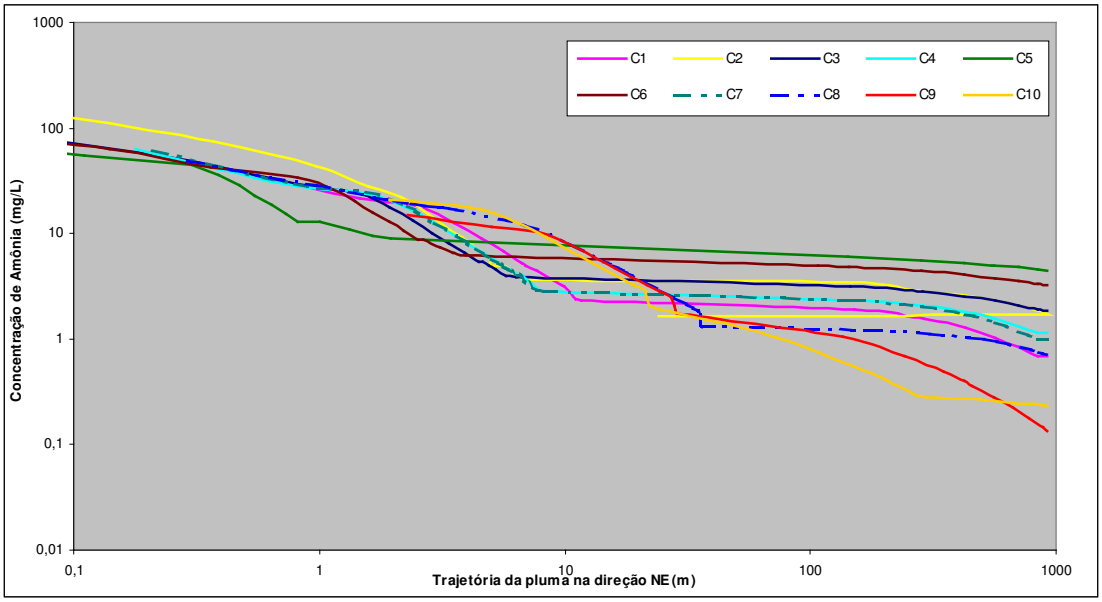


Figura 5.2.7: Concentração de amônia a jusante do lançamento, no campo distante (até 915m), para os cenários C1 a C10.

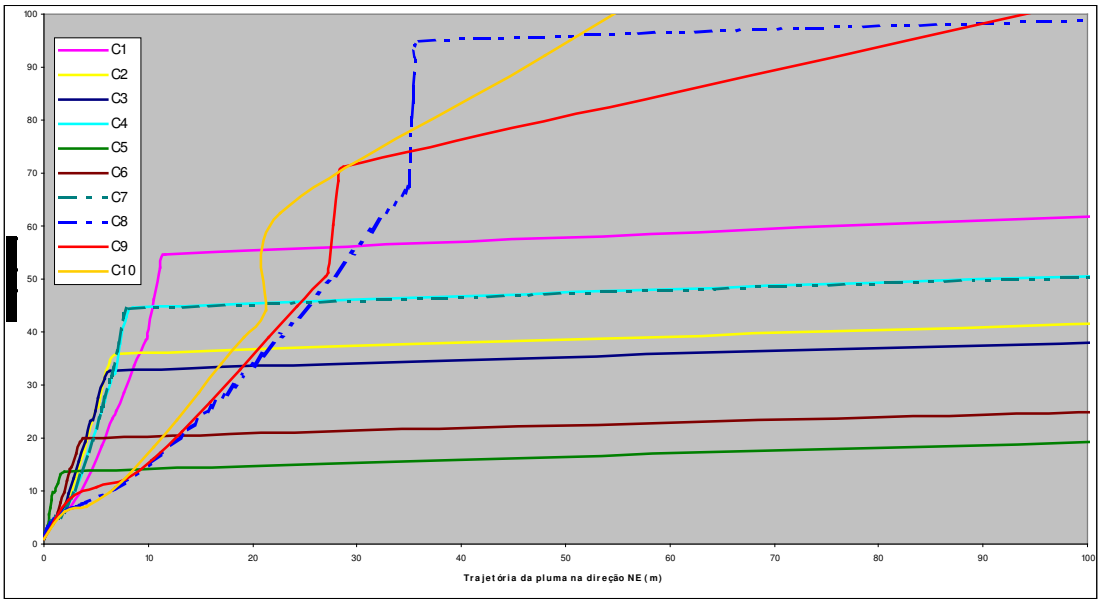


Figura 5.2.8: Diluição da amônia a jusante do lançamento, no campo próximo (até 100m), para os cenários C1 a C10.

5.3. MODELO COMPUTACIONAL FLUENT

5.3.1. CONSTRUÇÃO E DISCRETIZAÇÃO DA GEOMETRIA DO CANAL DE SÃO SEBASTIÃO (BATIMETRIA) – *SOFTWARE* GAMBIT

Construiu-se a geometria e a discretização de duas malhas da área circunvizinha ao sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR localizado no Canal de São Sebastião (CSS) – ver figura 5.3.1, utilizando-se o software *Gambit* .

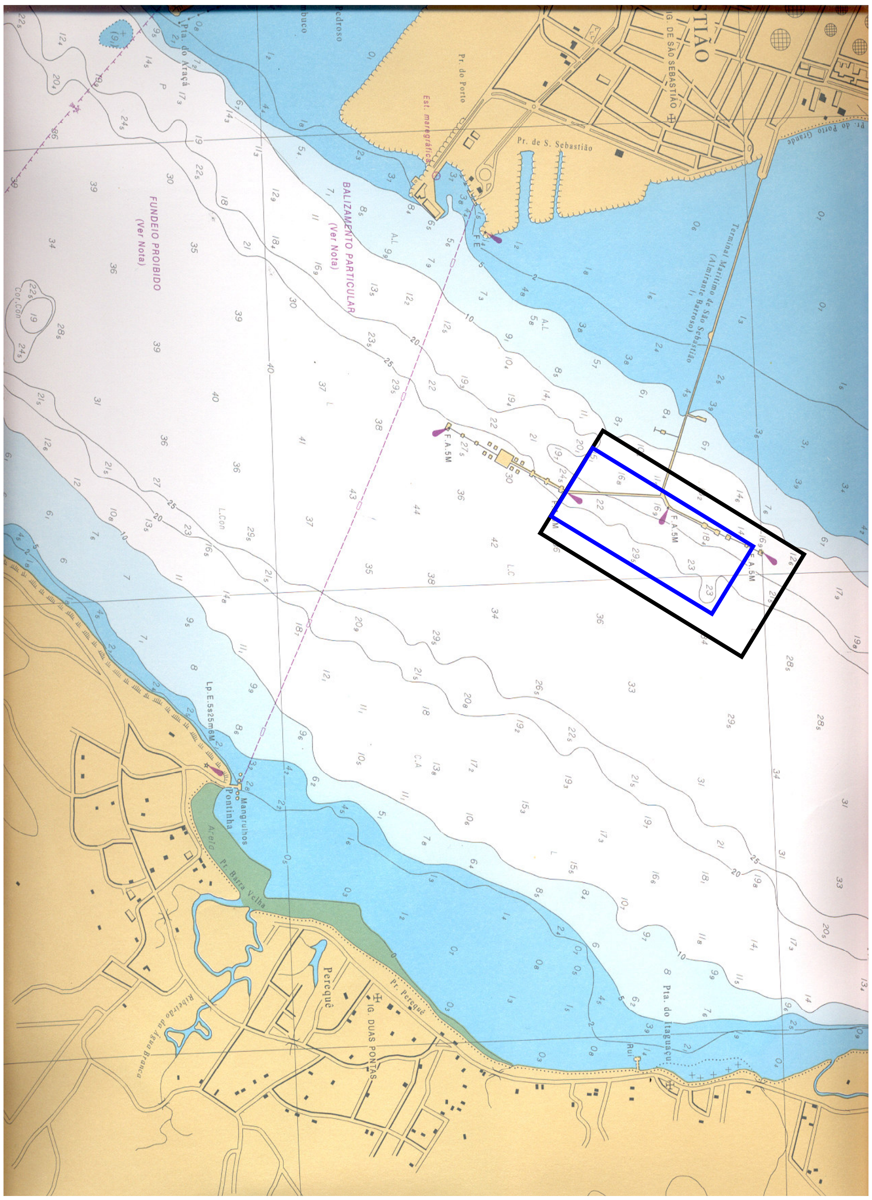


Figura 5.3.1: Carta Náutica n° 1643 – Canal de São Sebastião (parte Norte), com perímetros dos dois volumes de controle (Linha preta – Malha 1; Linha azul – Malha 2), criados no *software* GAMBIT.

As principais ferramentas para construção e discretização do volume de controle disponíveis pelo *software* GAMBIT são descritas a seguir, de acordo com a seqüência das iniciais apresentadas na figura abaixo:

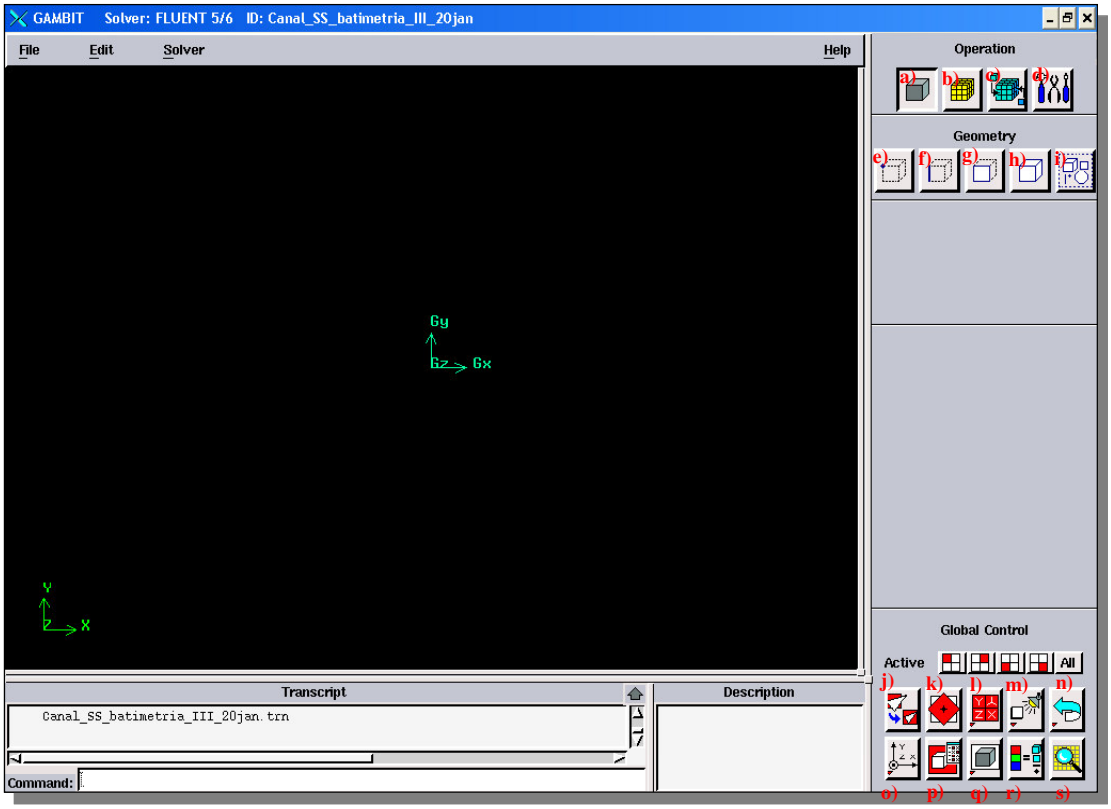


Figura 5.3.2: Tela principal do *software* GAMBIT.

a) Comando que disponibiliza subbotões (letras e, f, g, h, i) para a construção e modificação da geometria, em 2D ou 3D;

b) Comando que permite criar e modificar a malha a partir da geometria criada. A discretização pode ser feita a partir de uma linha, face ou volume, com espaçamento/refinamento variável (ver figuras 5.3.7, 5.3.8 e 5.3.9 com a discretização de uma parte do volume da área de estudo do Canal de São Sebastião, com refinamento uniforme, para as duas malhas criadas).

c) Comando que permite especificar as fronteiras do volume de controle (ver figura 5.3.10, com as condições de fronteiras criadas para o estudo de caso);

d) Comando que permite alterar as coordenadas do sistema geométrico;

e) Comando para operações de plotagem de vértices em função da coordenada especificada;

f) Comando para construção das linhas a partir dos vértices criados;

g) Comando para criação das faces (surgimento de uma figura 2D), a partir das linhas criadas;
h) Comando para criação de um volume, a partir de formas primitivas pré-existentes (tijolo, cilindro, prisma, pirâmide, etc...), ou a partir das faces criadas e que possam vir a formar um volume;
i) Comando que permite a operação com um conjunto de topologias;
j) Permite enquadrar a geometria completa do desenho no quadrante preto (tela) disponível pela ferramenta;
k) Especificar o ponto pivô em que a geometria irá rotacionar;
l) Permite visualizar através de quadrantes, a posição da geometria a partir de vista em planta 2D, vista em planta em 3D, e vista lateral dos lados opostos;
m) Modificar a coloração da fonte (vértices, bordas, faces, volumes, etc...) para melhor visualização da geometria;
n) Refaz a última operação realizada;
o) Posiciona a geometria em função da coordenada geométrica escolhida;
p) Disponibiliza atributos de visualização das várias entidades criadas (vértices, bordas, faces, volumes, malhas, etc...), como por exemplo a visibilidade;
q) Especifica a visibilidade da entidade, como: sólida, vazada, traços externos, etc...
r) Possibilita verificar se o grupo de uma mesma entidade possui todos a mesma cor, verificando se a geometria está corretamente criada;
s) Verificação da malha.

A partir da Carta Náutica n°1643 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 preta e azul - figura 5.3.1), que diferem em suas dimensões e no refinamento da malha criada

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

O limite superior dos volumes de controle inicia-se na isolinha de –10m de profundidade, e portanto, será considerada a altura a partir do leito de fundo até esta cota. Ou seja, descartou-se, todo o volume referente da superfície até a cota de –10m. Esta simplificação, acarretará na otimização do custo computacional e a possibilidade de 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 *software* GAMBIT, do canal com os 6 orifícios está representado nas figuras 5.3.3 e 5.3.4 para o volume de controle de maior dimensão e menor refinamento da malha (Malha 1), enquanto que as figuras 5.3.5 e 5.3.6 referem-se ao volume de controle com menores dimensões e maior refinamento da malha (Malha 2). Para todas as figuras as coordenadas foram definidas da seguinte maneira:

- eixo Gx: o sentido da corrente;
- eixo Gz: a largura do canal; e,
- eixo Gy: a profundidade do canal.

Ressalta-se novamente que, a geometria está representada a partir da cota –10m de profundidade. Esta simplificação nas dimensões do canal, puderam ser realizadas, inicialmente, devido à alta densidade do efluente ($\approx 1036{,}7\,kg/m^3$), e em um segundo momento, através das saídas matemáticas das simulações realizadas com o software CORMIX, que concluíram preliminarmente, que o efluente, além de não aflorar a superfície, tem um máximo de elevação a poucos metros acima dos risers.

Os orifícios de saída foram plotados na Carta Náutica, a partir de coordenadas geográficas de projeto, e posteriormente foram medidas as distâncias em relação as linhas perimetrais representadas na figura 5.3.1. Os orifícios plotados são quadrangulares, com área equivalente ao orifício circular com diâmetro de 0,15m. Não se faz necessário representar a tubulação do emissário, o que, somente traria uma maior complexidade geométrica e maiores requisitos computacionais sem maiores alterações dos fenômenos hidrodinâmicos do processo de mistura.

As dimensões geométricas, dos dois volumes de controle, da área circunvizinha ao sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR, são dados na tabela abaixo:

Tabela 11: Dimensões dos volumes 1 e 2 criados para as simulações computacionais do FLUENT.

Dados	Malha 1 (linha preta)*	Malha 2 (linha azul)*
Comprimento	915m	630m
Largura	525m	280m
Profundidade máxima	-36m	-20,51m
nº de células hexaédricas	655.452	761.320

* ver perímetro na figura 5.3.1.

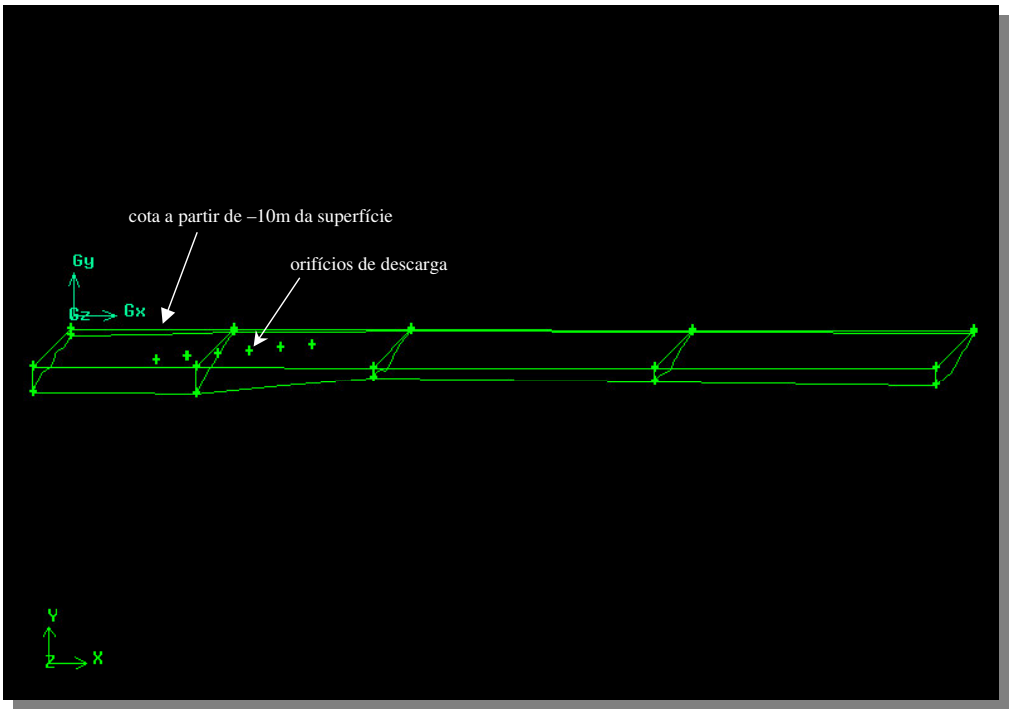


Figura 5.3.3: Vista lateral da geometria do CSS (Malha 1) a partir da cota –10m de profundidade, com os 6 orifícios de saída plotados. Geometria realizada no *software* GAMBIT.

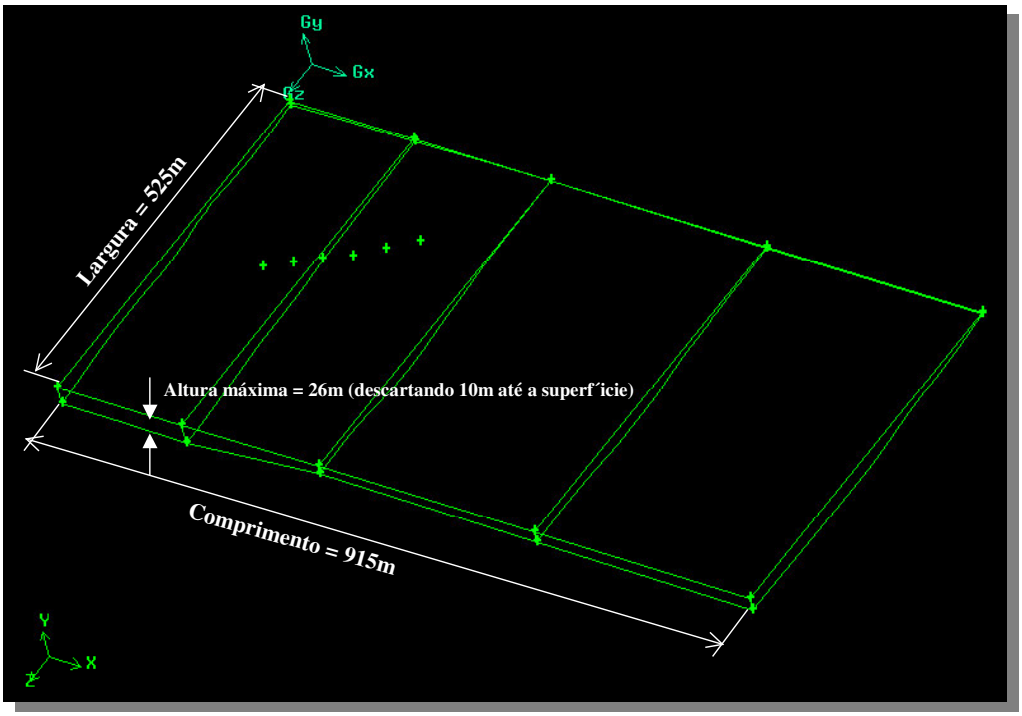


Figura 5.3.4: Vista em planta da geometria do CSS (Malha 1) a partir da cota –10m de profundidade, com os 6 orifícios de saída plotados. Geometria realizada no *software* GAMBIT.

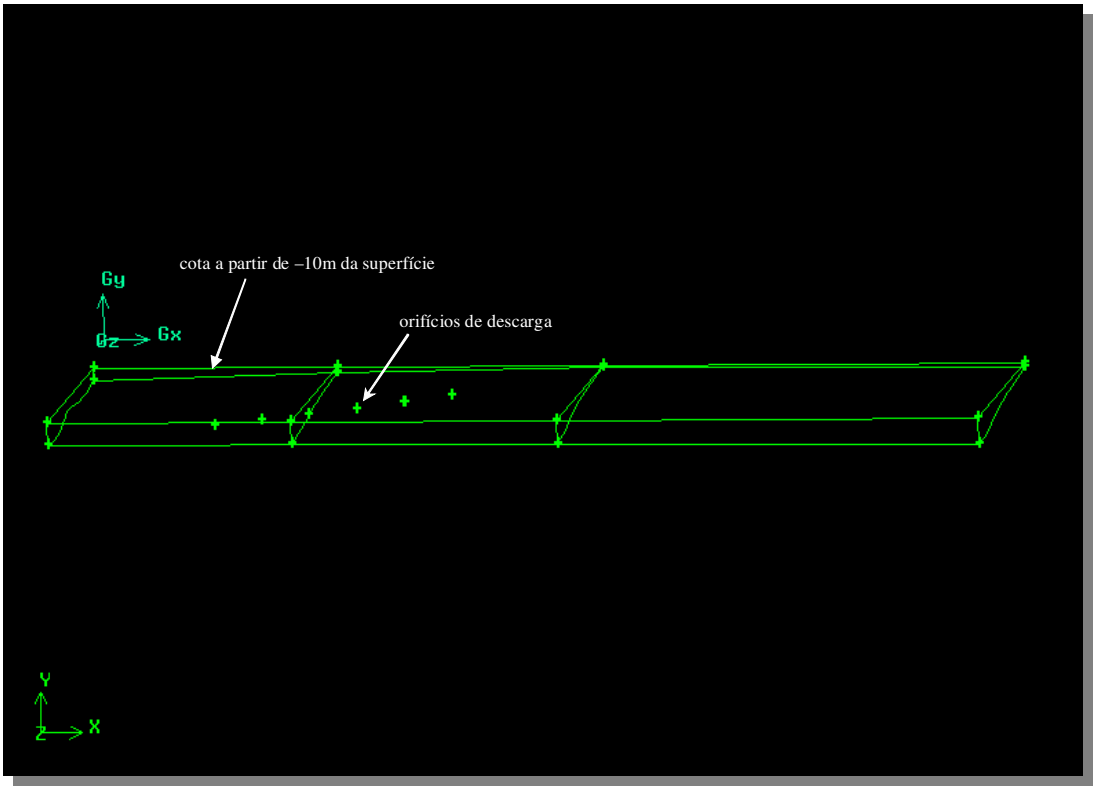


Figura 5.3.5: Vista lateral da geometria do CSS (Malha 2) a partir da cota –10m de profundidade, com os 6 orifícios de saída plotados. Geometria realizada no *software* GAMBIT.

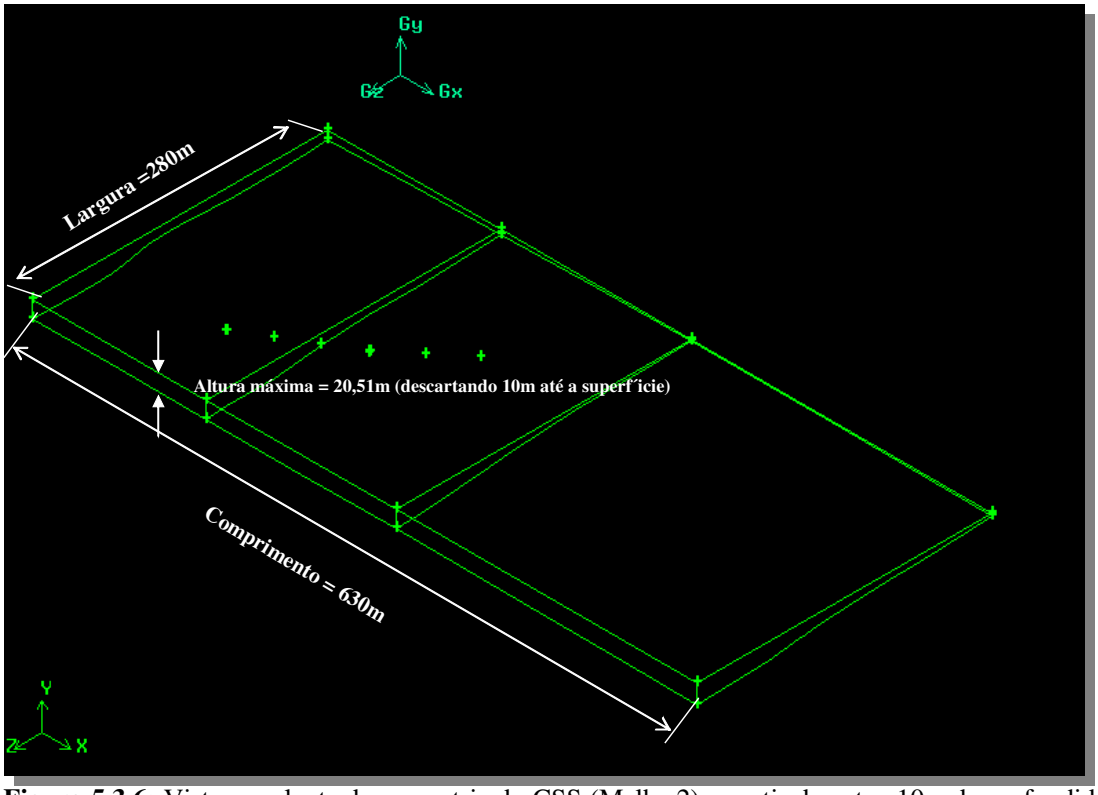


Figura 5.3.6: Vista em planta da geometria do CSS (Malha 2) a partir da cota –10m de profundidade, com os 6 orifícios de saída plotados. Geometria realizada no *software* GAMBIT.

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.

O total de volumes da Malha 1 e utilizada nas simulações para as simulações computacionais FA - 1 e FB - 1, é formada por um total de 655.452 volumes com refinamento uniforme. Cada célula tem as seguintes características: comprimento (Gx) e largura (Gz) de aproximadamente 2m e altura (Gy) de 4,33m. A figura 5.3.7 mostra em detalhe a discretização de uma seção da geometria do Canal de São Sebastião.

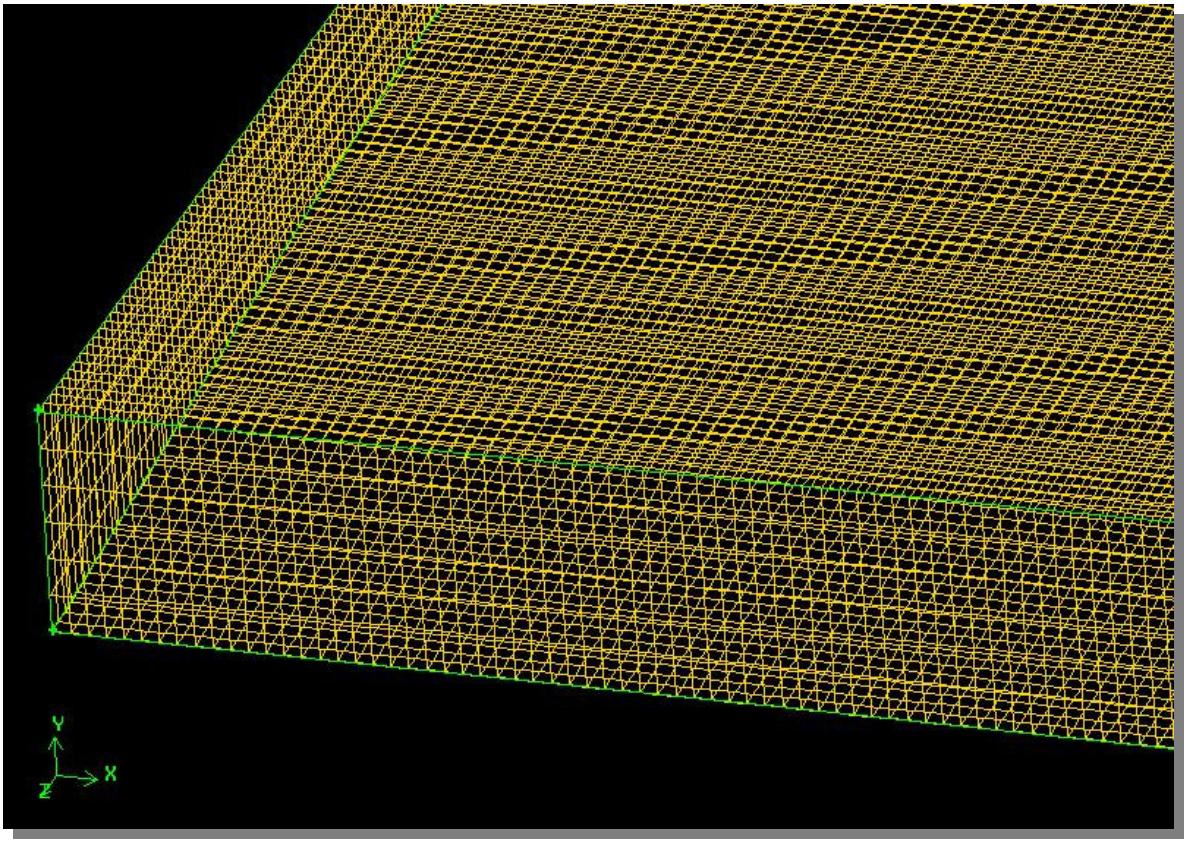


Figura 5.3.7: Detalhamento da malha estruturada hexaédrica Malha 1, de uma parte da geometria do CSS, realizada no *software* GAMBIT.

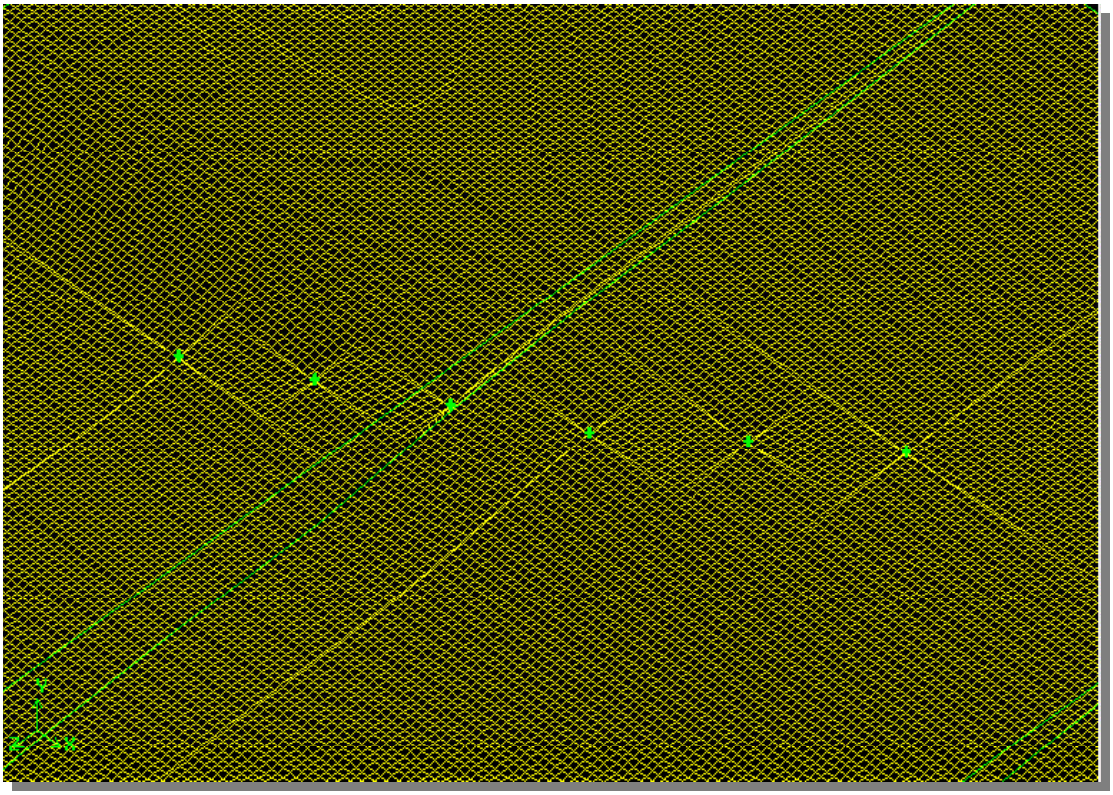


Figura 5.3.8: Detalhamento da malha estruturada hexaédrica da Malha 1 na região próxima aos seis difusores do Emissário Submarino do TEBAR, realizada no *software* GAMBIT.

O mesmo procedimento da Malha 1, foi utilizado para a construção da geometria e discretização da Malha 2.

O total de volumes da Malha 2 e utilizada para a simulação FA-2, é formada por um total de 761.320 volumes com refinamento uniforme. Cada célula tem as seguintes características: comprimento (Gx) e largura (Gz) de aproximadamente 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. A figura 5.3.9 mostra em detalhe a discretização de uma seção da geometria do Canal de São Sebastião da Malha 2.

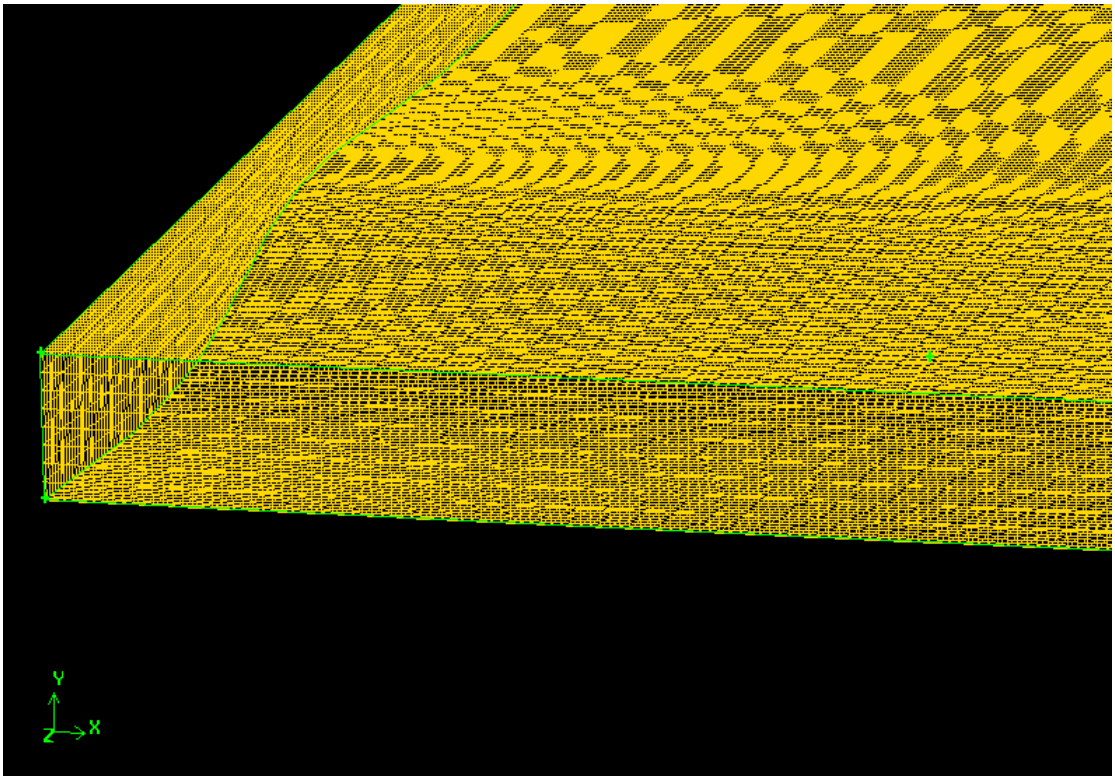


Figura 5.3.9: Detalhamento da malha estruturada hexaédrica da Malha 2, de uma parte da geometria do CSS, realizada no *software* GAMBIT.

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

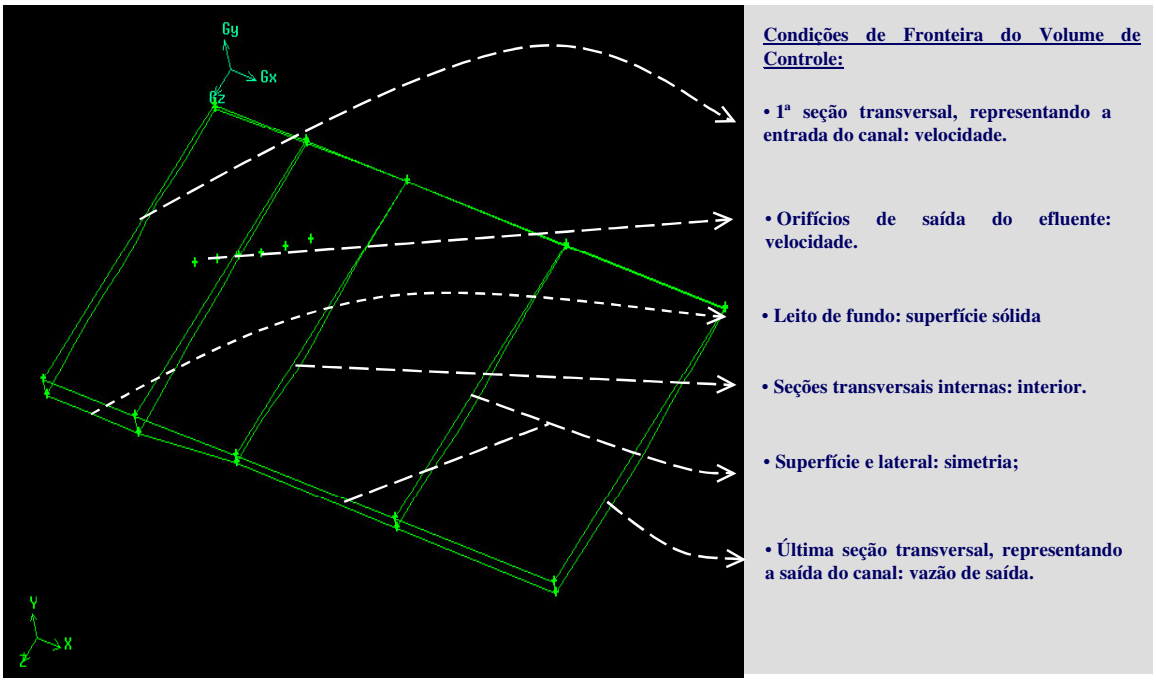


Figura 5.3.10: Condições de fronteira estabelecidas na geometria do CSS, realizada no *software* GAMBIT.

Após desenhar a geometria do volume de controle, discretizar e definir as condições de fronteira do sistema, o GAMBIT gera um arquivo com extensão .msh, que será exportado para o FLUENT.

5.3.2. 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, realizou-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 0,208m^3/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 (células com menores dimensões) no processo de diluição da pluma do efluente.

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

No *software* FLUENT, trabalhou-se com a modelagem de transporte de espécies químicas (ver descrição matemática no item referente) 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 1,0GB de memória RAM.

O tempo de escoamento da pluma do efluente (*Flow Time*) para cada uma das 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, de t=0s a t=9.000s, foi o tempo necessário para a estabilização do comportamento hidrodinâmico da pluma, frente a ação dos fenômenos intervenientes ao processo de dispersão.

Para atingir o tempo de escoamento (t=17.000s), foi necessário um tempo computacional em torno de 7 dias de processamento ininterruptos. 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 *software*.

A seguir, apresentam-se os dois cenários utilizados nas três simuladções no FLUENT:

- **Cenários FA-1 e FA-2:**
  - geometria e discretização da área circunvizinha do sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR - Canal de São Sebastião com batimetria variável (conforme Carta Náutica n° 1643 da Marinha do Brasil) criada pelo *software* GAMBIT;
    - Simulação FA-1 sob as condições da Malha 1;
    - Simulação FA-2 sob as condições da Malha 2;
  - Velocidade média no eixo longitudinal do CSS igual a 0,5m/s com sentido preferencial a NE (FONTES, 1995);
  - Vazão máxima de descarga do efluente para os emissários submarinos igual a 0,208m^3/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 (CASCARDI, 2002);Parâmetro conservativo amônia;
  - Fração em massa do elemento (amônia) no efluente igual a 0,0001205, equivalente a uma concentração máxima igual a 125,5mg/L (CASCARDI, 2002).
  - Descarga horizontal através de 6 orifícios de seção quadrangular (área equivalente ao orifício circular com diâmetro de 0,15m);

- **Cenário FB - 1:**
  - Geometria e discretização da área circunvizinha do sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR – Canal de São Sebastião com batimetria variável (conforme Carta Náutica nº 1643 da Marinha do Brasil) criada pelo *software* GAMBIT
    - Simulação FB sob as condições da Malha 1;
  - Vazão operacional média de descarga do efluente para os emissários submarinos igual a 0,128m^3/s (FUNDESPA, 2003);
  - Os itens restantes são idênticos ao Cenário (FA-1).

Tabela 12: Resumo das condições de contorno das simulações computacionais do FLUENT.

Cenário	FA-1	FA-2	FB - 1
Malha	1	2	1
Vazão do efluente	0,208 m^3/s (nominal)		0,128 m^3/s (operacional)
Velocidade da corrente	0,5 m/s no sentido preferencial NE		
Densidade do efluente	1037 kg/m^3		
Parâmetro	Amônia		
Concentração	125,5,mg/L (fração em massa do elemento amônia = 0,0001205)		

5.3.3. RESULTADOS

- **Resultados no Campo Próximo – Comportamento Físico Hidrodinâmico**

As figuras apresentadas a seguir, referem-se ao comportamento hidrodinâmico da pluma no campo próximo, onde a coloração vermelha da pluma do efluente significa uma concentração de amônia igual ou superior a 0,4 mg/L NH_3 (CONAMA 20/86).

Nas figuras 5.3.11 a 5.3.16 estão inseridas a legenda da faixa de valores de 0 (zero igual a somente água do mar) a 4.00e-1 (0,4 mg NH_3/L) limite estabelecido para o padrão de qualidade das águas. Também é apresentado nas figuras, o eixo *x* referente ao sentido da corrente; o eixo *z* a largura do canal; e, o eixo *y* a profundidade do canal.

As figuras 5.3.11 a 5.3.16 referem-se ao Cenário FA-1. 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.

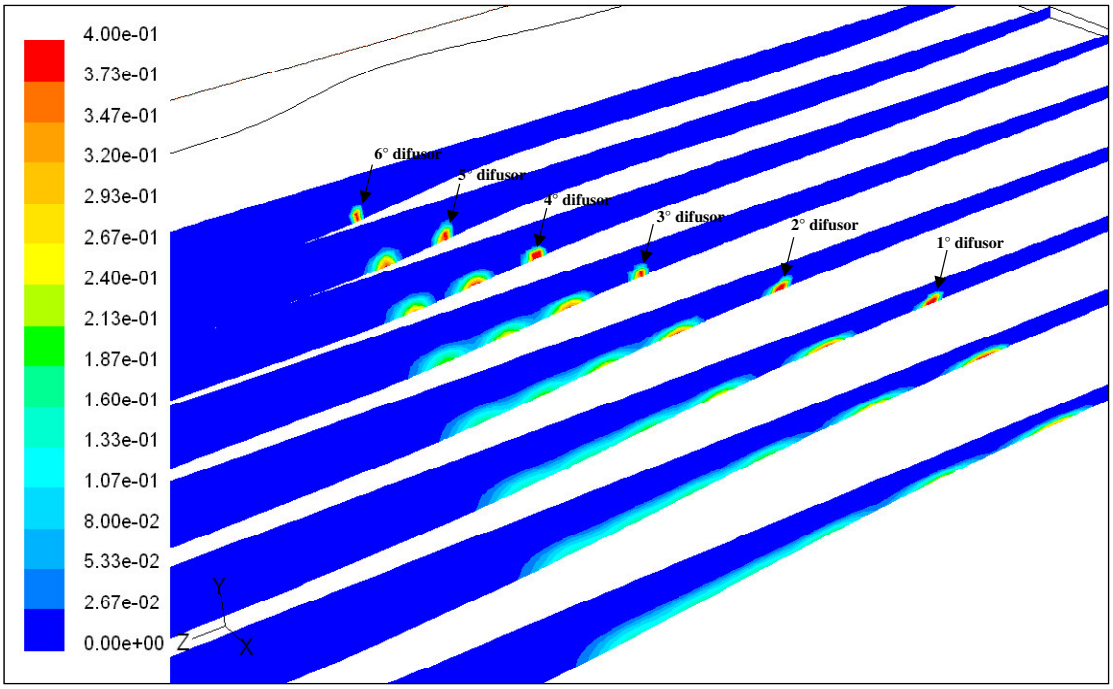


Figura 5.3.11: Perfil transversal do escoamento da pluma do efluente. As 6 primeiras seções transversais estão coincidentes aos 6 orifícios de descarga (difusores) do emissário submarino.

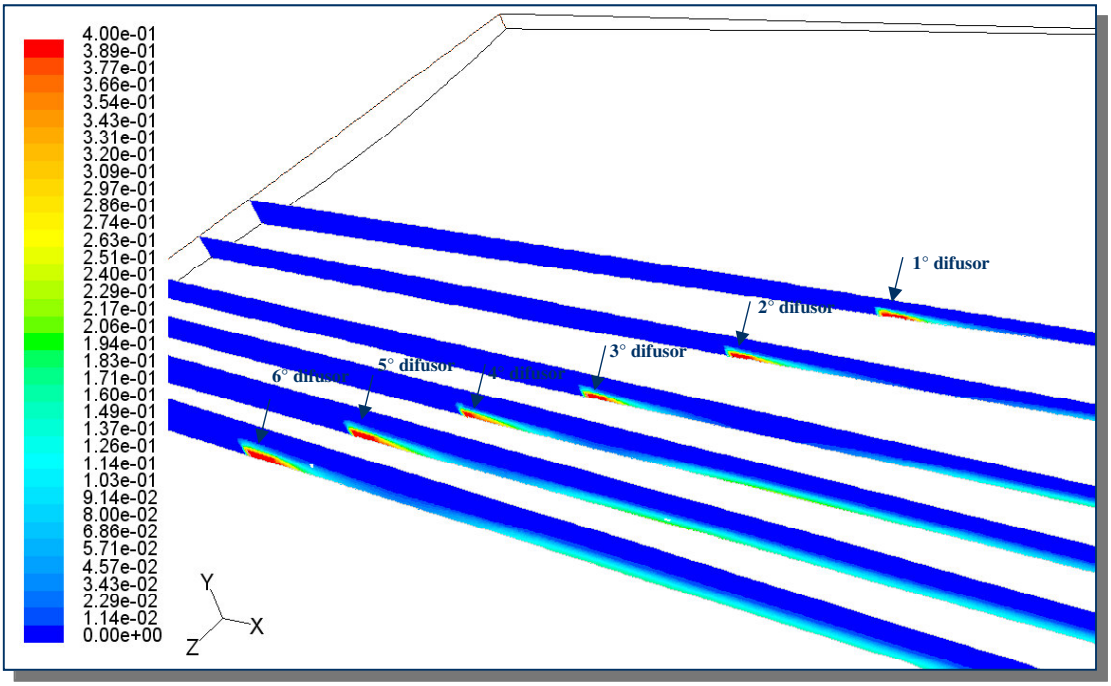


Figura 5.3.12: Perfil longitudinal do escoamento da pluma do efluente coincidente aos 6 orifícios de descarga do emissário submarino do TEBAR.

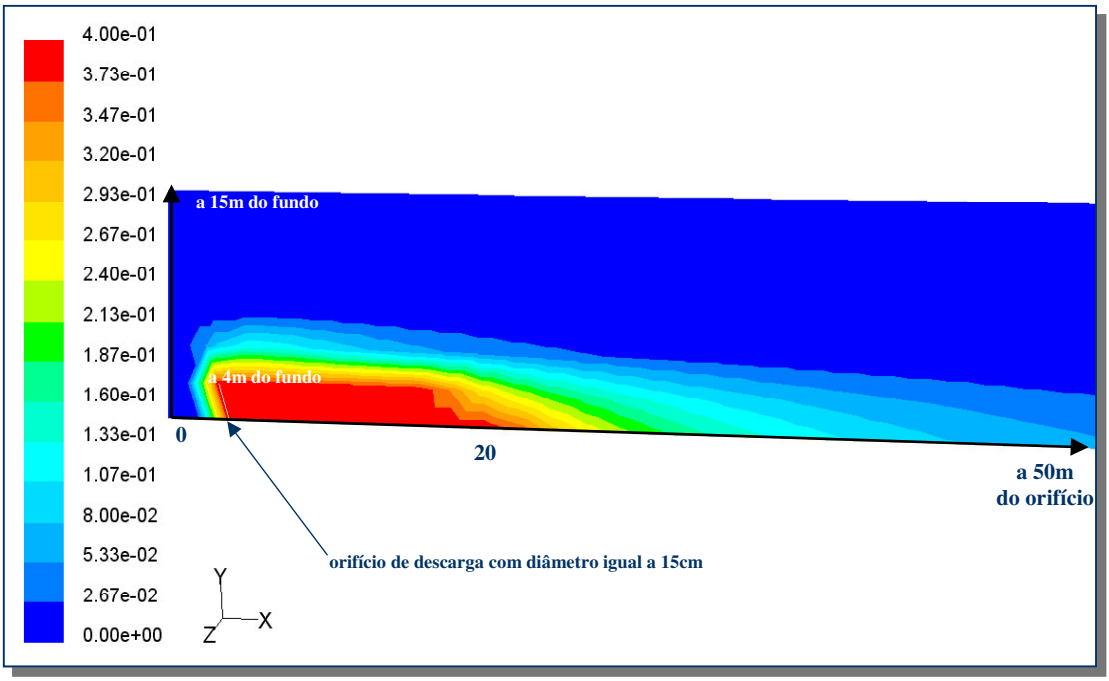


Figura 5.3.13: Perfil longitudinal do escoamento da pluma do efluente coincidente ao ponto central do sistema difusor no campo próximo (impacto bêntico).

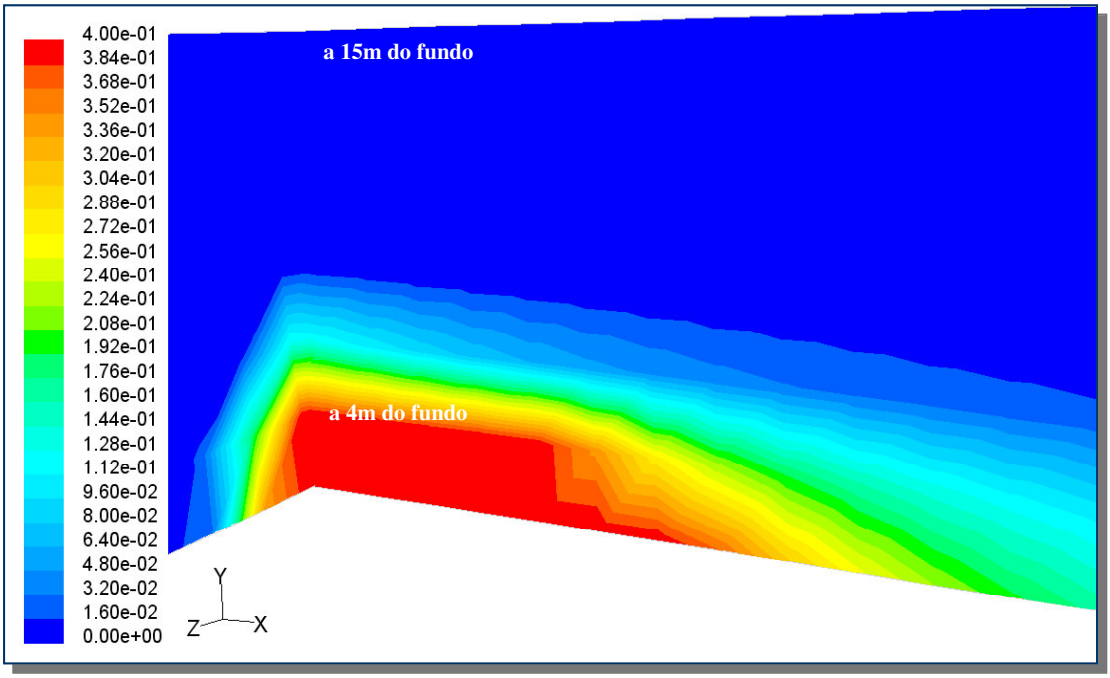


Figura 5.3.14: Imagem em 3D do escoamento da pluma do efluente coincidente ao ponto central do sistema difusor no campo próximo (impacto bêntico).

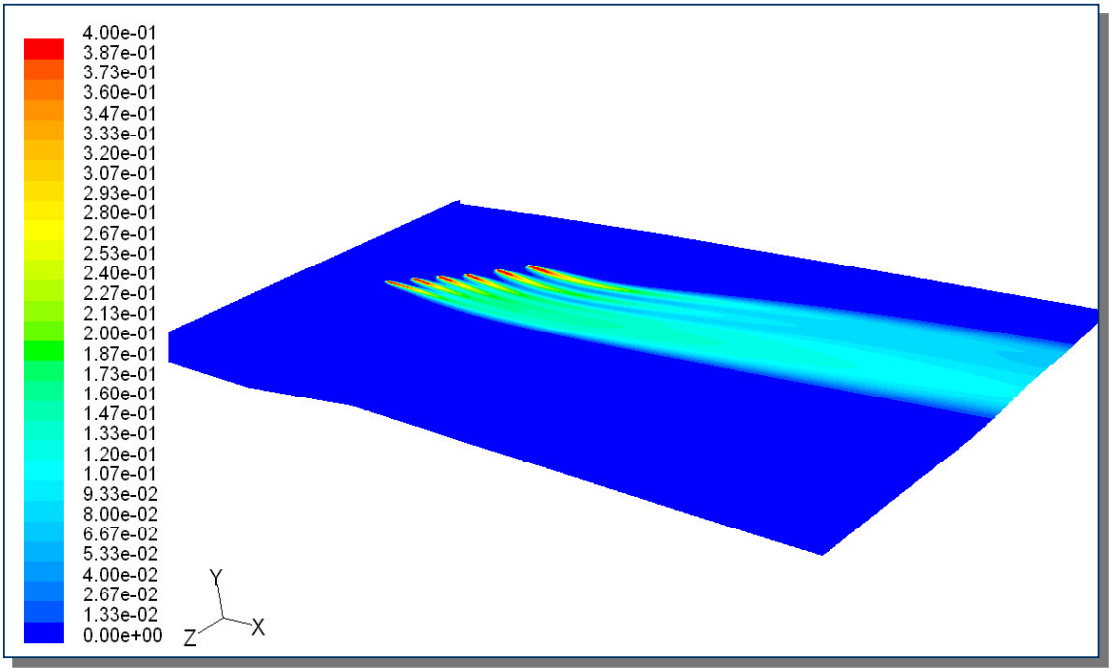


Figura 5.3.15: Imagem 3D do escoamento da pluma do efluente rente ao leito de fundo do Canal.

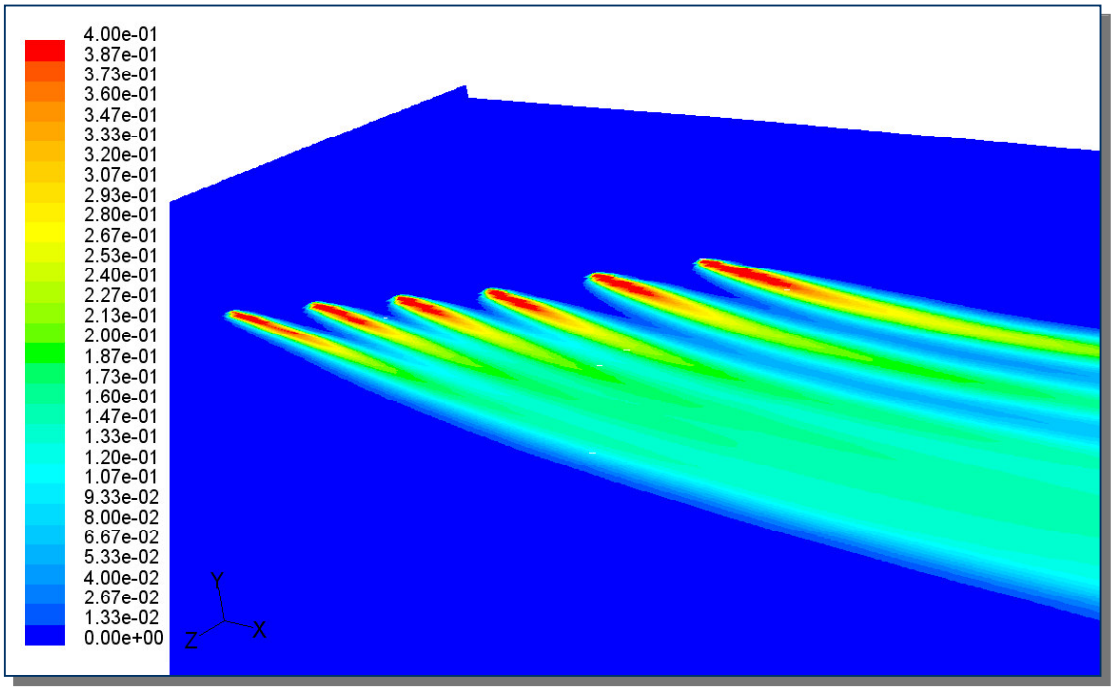


Figura 5.3.16: Detalhamento da vista em planta do escoamento da pluma do efluente rente ao leito de fundo do Canal.

- **Resultados no Campo Próximo –Concentração da Pluma do Efluente**

Nas figuras 5.3.17 a 5.3.19, apresenta-se a concentração da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR para as simulações FA-1, FA-2 e FB -1, respectivamente.

Para a obtenção dos valores a jusante do ponto central do sistema difusor, traçou-se uma linha paralela ao leito de fundo logo na altura dos orifícios de descarga.

Comparando-se as figuras 5.3.17 e 5.3.18 (simulações FA-1 e FA-2) que referem-se as simulações com malhas de menor e maior refinamento, respectivamente, verifica-se uma ligeira 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 em valores mais conservativos. Acredita-se que, em trabalhos futuros, caso for estudada, a região de impacto bêntico (camada limite próxima ao leito de fundo) o refinamento deve ser elevado e consequentemente, diminuir o volume total, para satisfazer o custo computacional.

O padrão de qualidade das águas para o parâmetro amônia (0,4mg/L NH_3 – CONAMA 20/86) é atingido a cerca de 10 a 20m a jusante do ponto central do sistema difusor.

Na figura 5.3.19, as curvas de concentração foram similares aos casos anteriores, porém como a simulação FB - 1 refere-se a uma vazão de efluente menor que as demais, a curva esta deslocada ligeiramente para a esquerda, o que significa que o padrão de qualidade é atingido mais rapidamente.

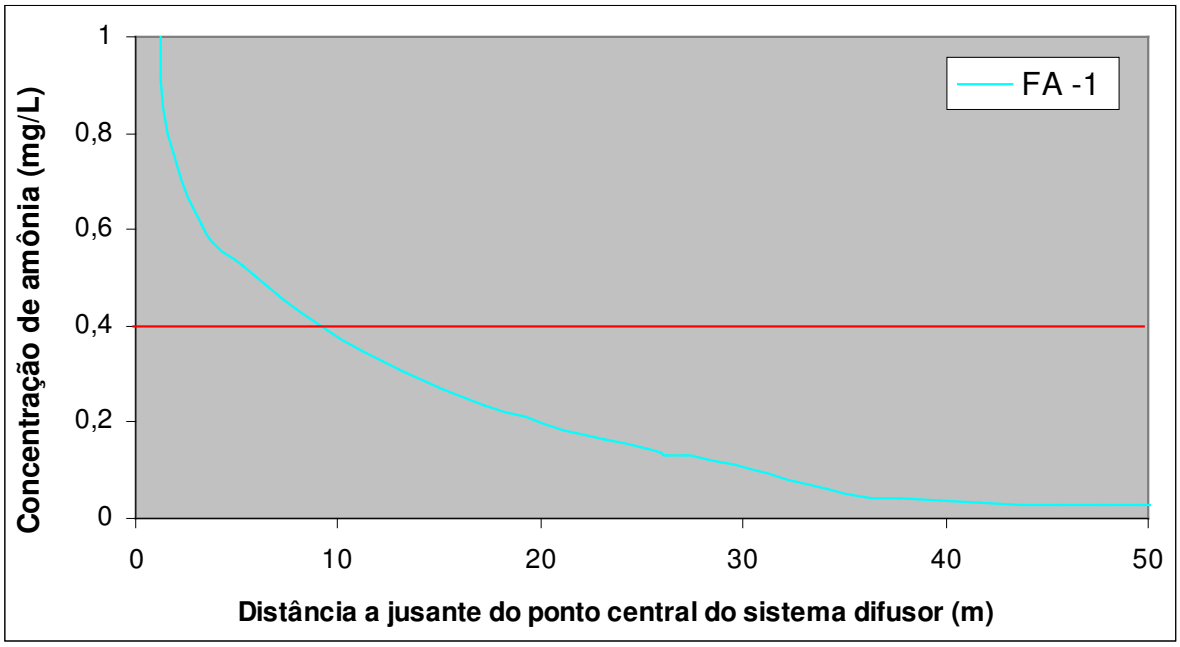


Figura 5.3.17: Gráfico da concentração de amônia a jusante do lançamento até o término do campo próximo, para o Cenário FA-1. A linha vermelha representa o limite de 0,4mg NH_3/L estabelecido pela CONAMA 20/86.

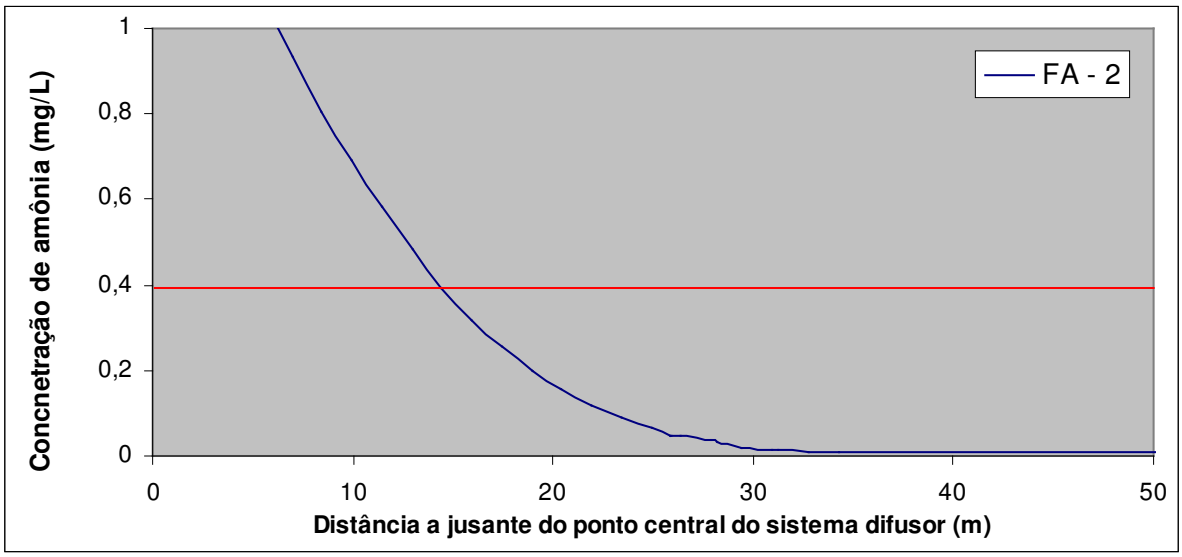


Figura 5.3.18: Gráfico da concentração de amônia a jusante do lançamento até o término do campo próximo, para o Cenário FA-2. A linha vermelha representa o limite de 0,4mg NH_3/L estabelecido pela CONAMA 20/86.

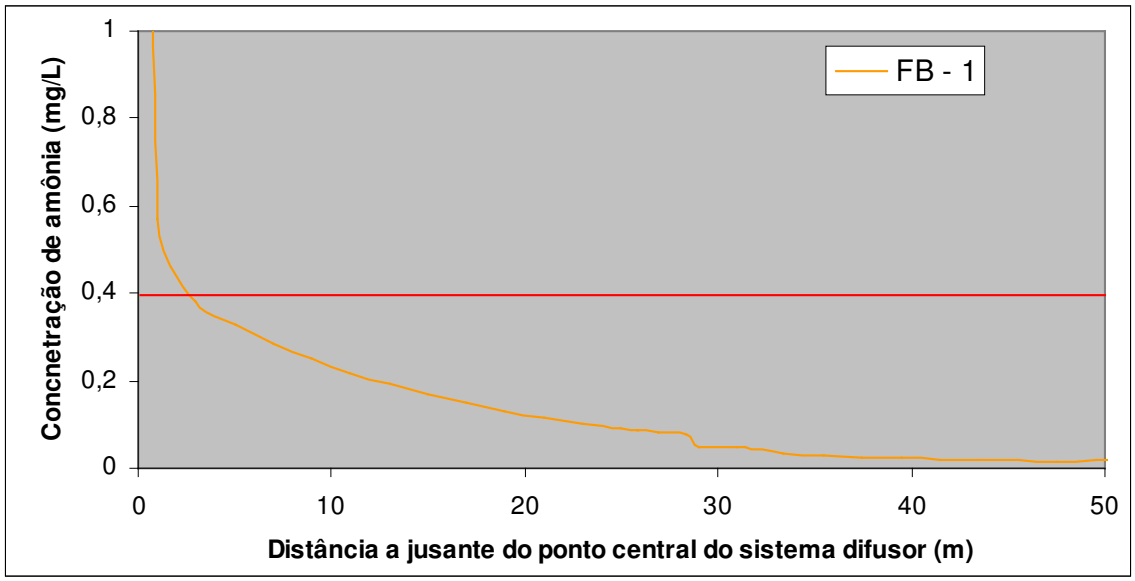


Figura 5.3.19: Gráfico da concentração de amônia a jusante do lançamento até o término do campo próximo, para o Cenário FB - 1. A linha vermelha representa o limite de 0,4mg NH_3/L estabelecido pela CONAMA 20/86.

- **Resultados no Campo Distante – Comportamento Físico Hidrodinâmico**

Nas figuras 5.3.20 a 5.3.22 estão inseridas a legenda da faixa de valores de 0 (zero igual a água do mar) a 4.00e-1 (0,4 mg NH_3/L) limite estabelecido para o padrão de qualidade das águas de amônia. Também é apresentado nas figuras, o eixo *x* referente ao sentido da corrente; o eixo *z* a largura do canal; e, o eixo *y* a profundidade do canal.

Observa-se, claramente, que o padrão de qualidade das águas é atendido rapidamente, e portanto a pluma do efluente no campo distante apresenta coloração mais clara que o vermelho.

As figuras 5.3.20 a 5.3.22 referem-se ao Cenário FA-1. 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.

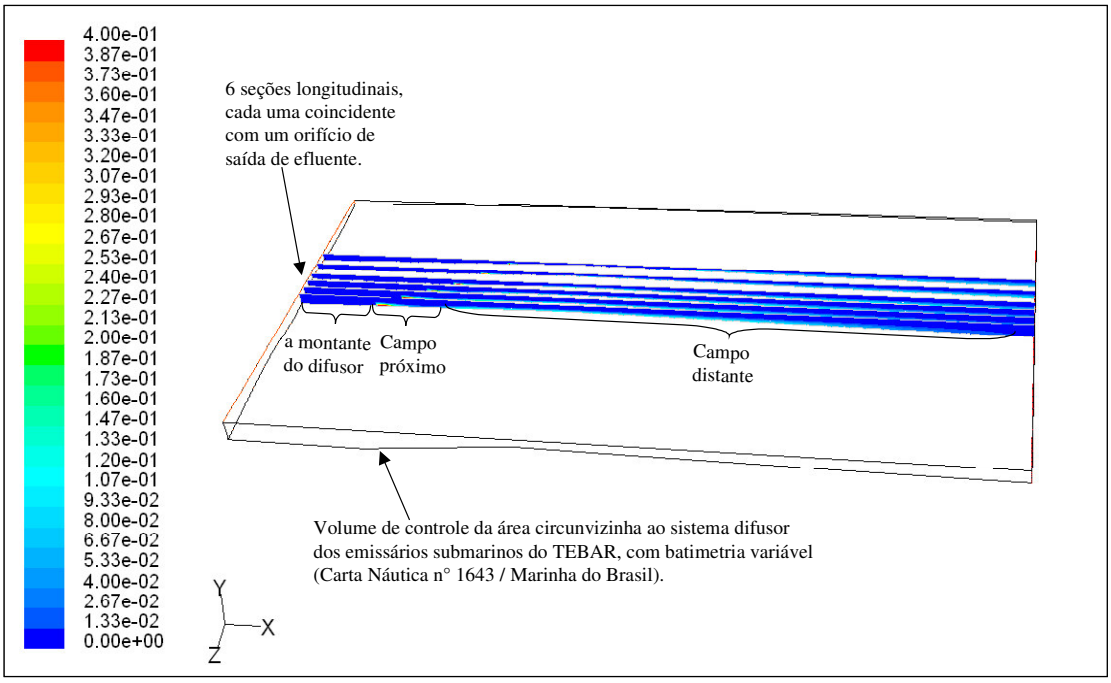


Figura 5.3.20: Vista geral da geometria do canal (contorno em linhas cinzas) com as 6 seções longitudinais coincidentes aos 6 orifícios de descarga do emissário submarino do TEBAR.

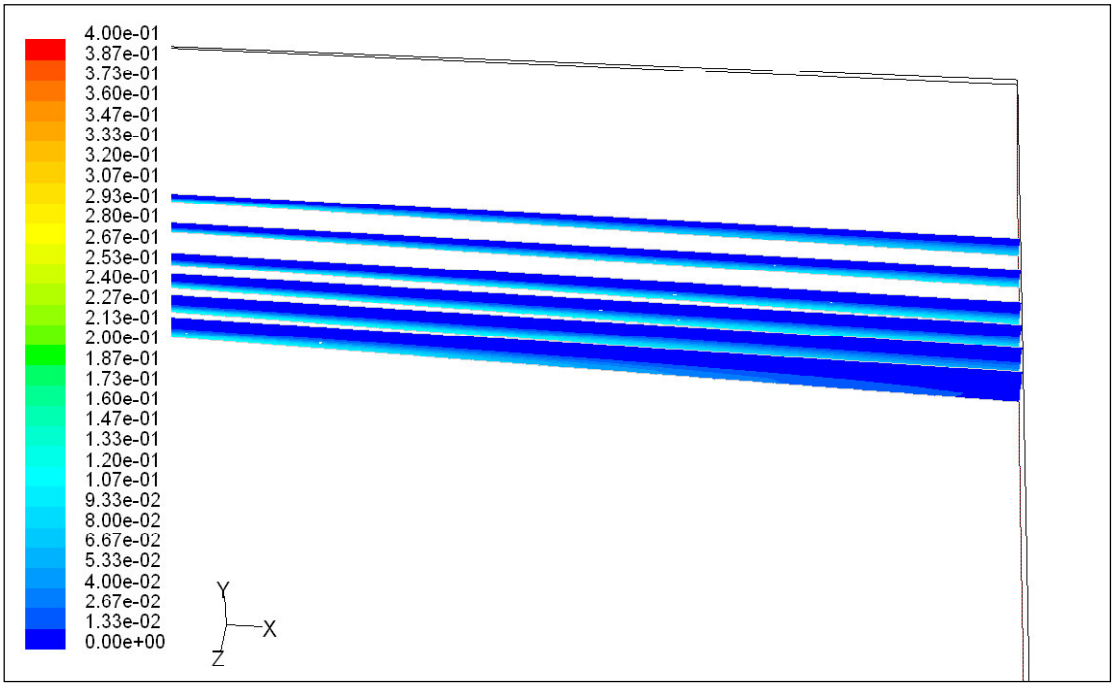


Figura 5.3.21: Perfil longitudinal do escoamento da pluma do efluente coincidente aos 6 orifícios de descarga do emissário submarino do TEBAR, a partir de cerca de 250m dos orifícios.

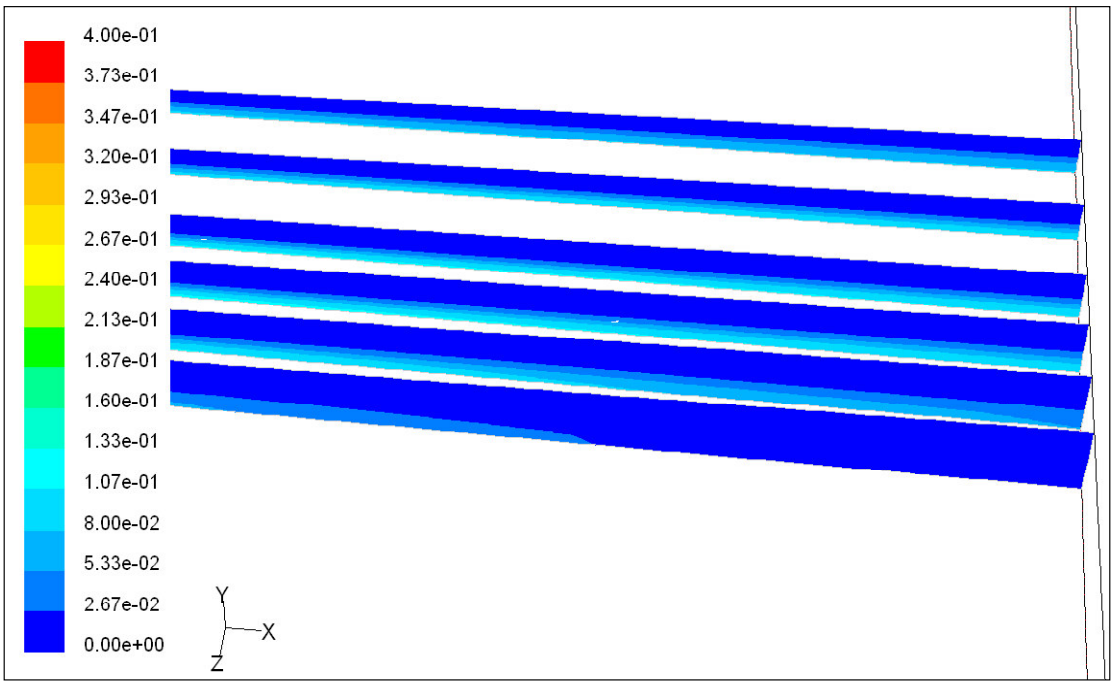


Figura 5.3.22: Perfil longitudinal do escoamento da pluma do efluente coincidente aos 6 orifícios de descarga do emissário submarino do TEBAR, a cerca de 450m do 1° orifício (mais próximo a margem) e de 600m do 6° orifício (mais afastado da margem).

As figuras abaixo, de 5.3.23 a 5.3.30, referem-se a seqüência de escoamento da pluma do efluente do TEBAR (sem escala de concentração da pluma), para vários instantes, de 0 a 100s. Representa-se o escoamento ao longo da seção longitudinal coincidente ao ponto central do sistema difusor. A cor azul refere-se a água do mar, e a cor branca refere-se a uma concentração igual a 0,04mg/L NH_3. Ressalta-se que em tais figuras, a cor vermelha não refere-se ao padrão de qualidade das águas.

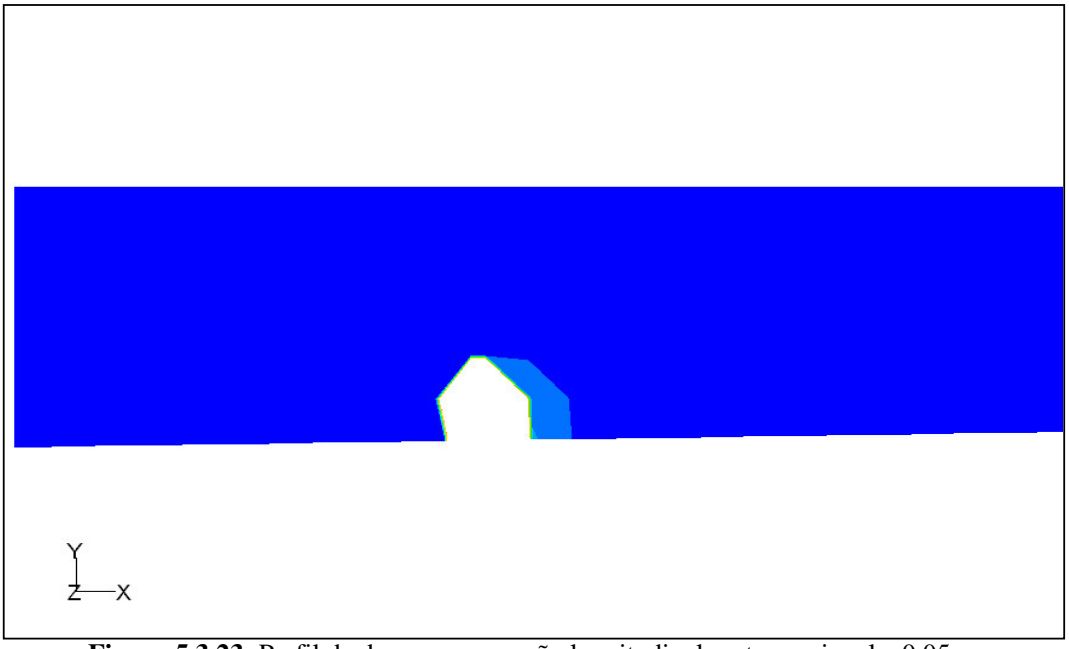


Figura 5.3.23: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 0,05s.

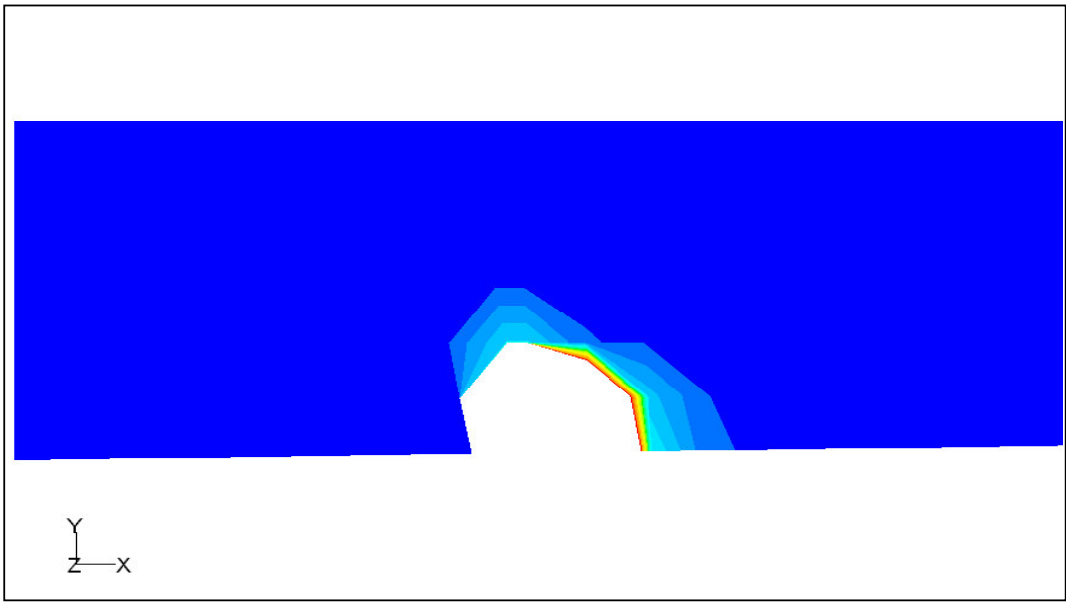


Figura 5.3.24: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 0,5s.

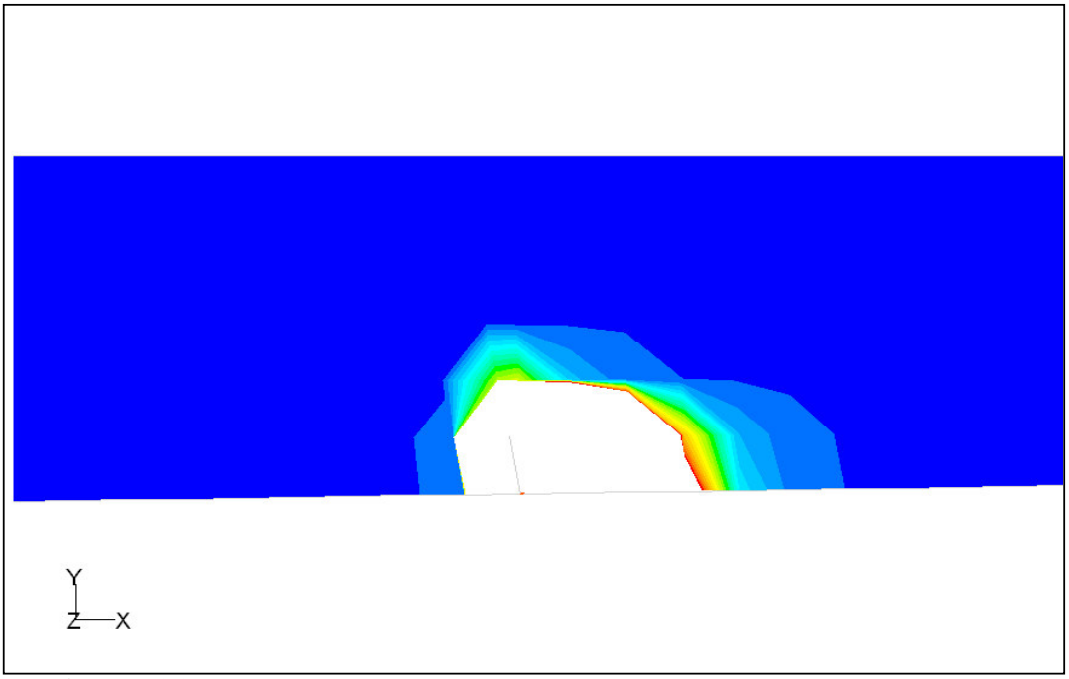


Figura 5.3.25: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 2,5s .

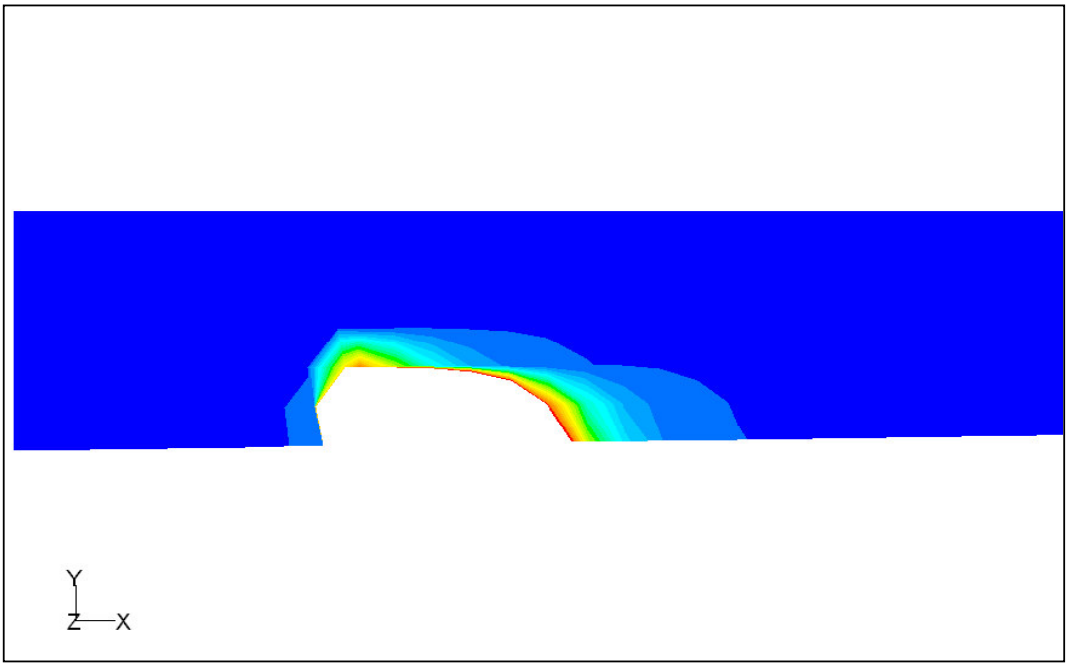


Figura 5.3.26: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 7,5s.

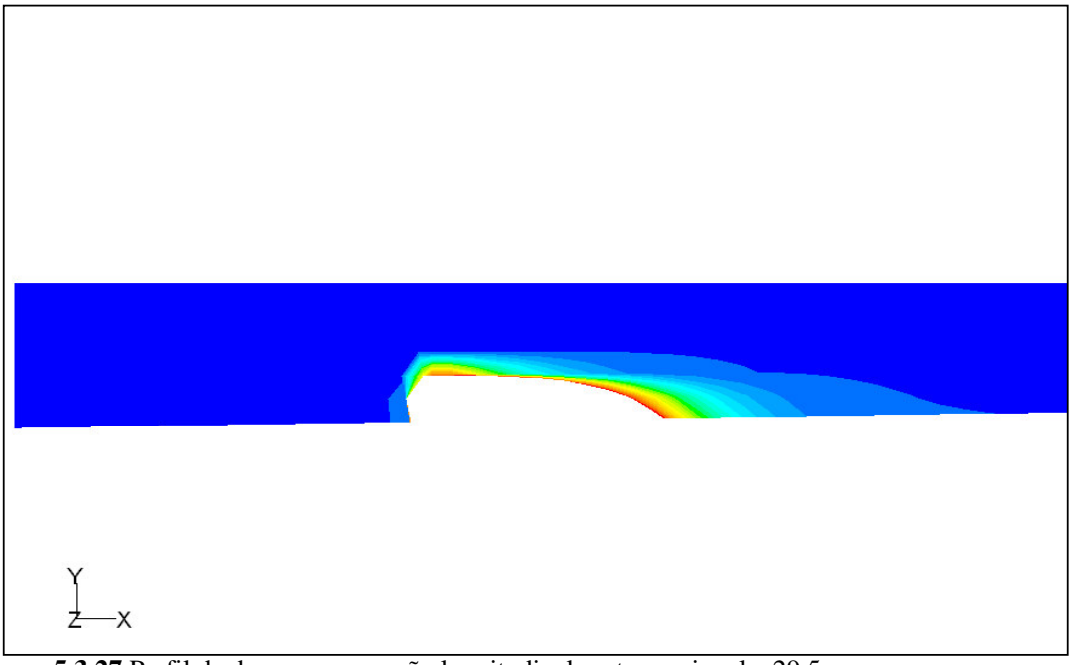


Figura 5.3.27 Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 29,5s .

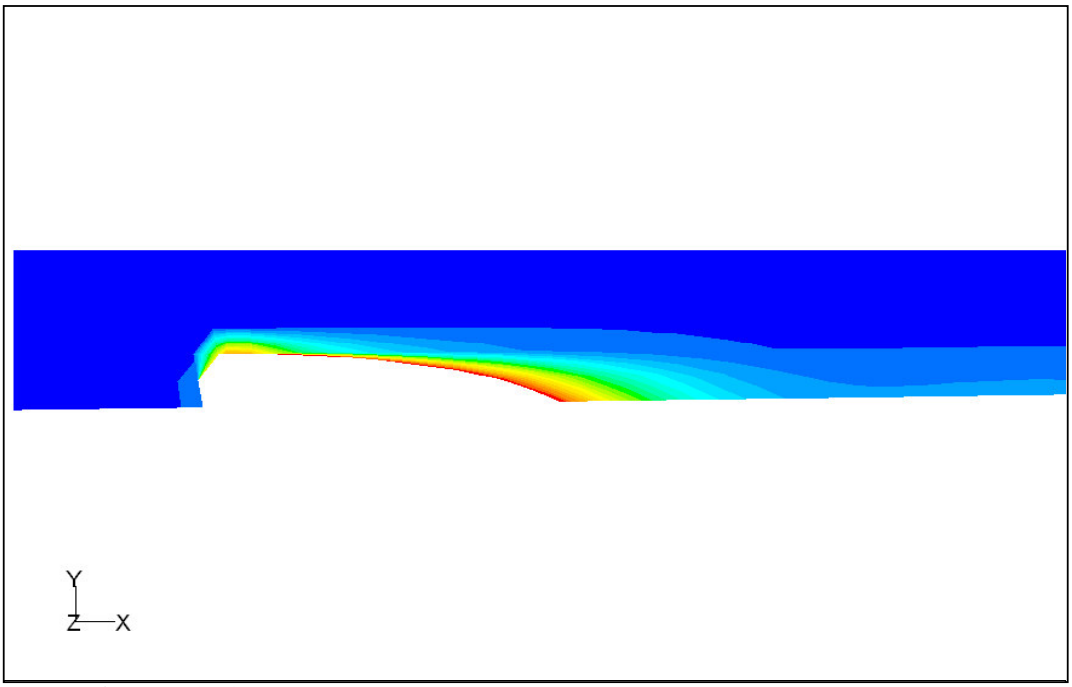


Figura 5.3.28: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 53,5s .

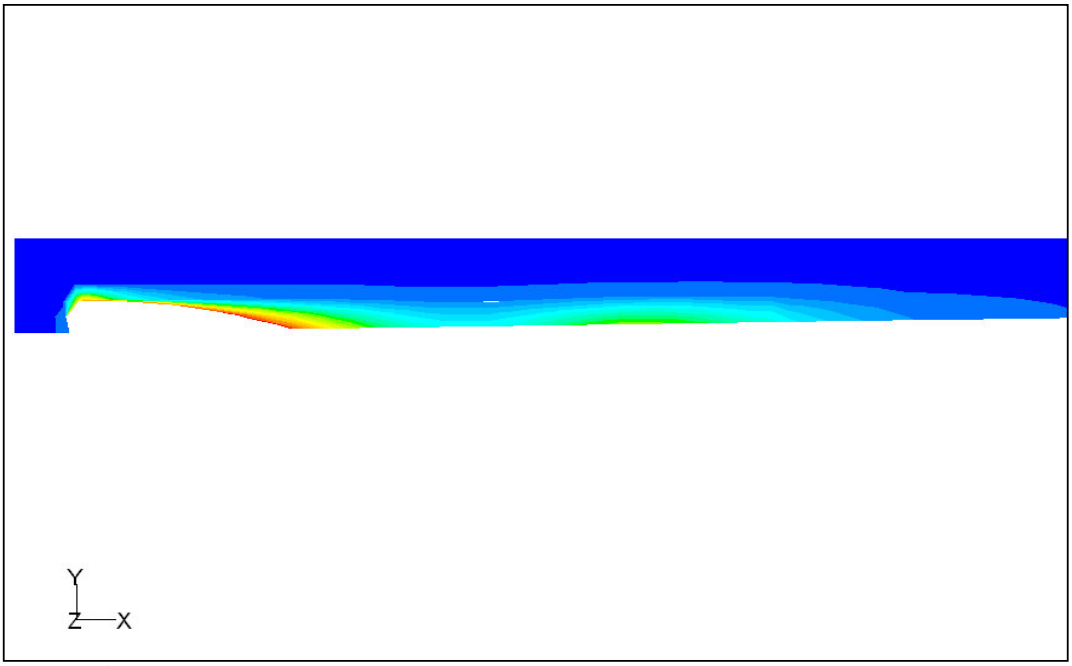


Figura 5.3.29: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 81,5s .

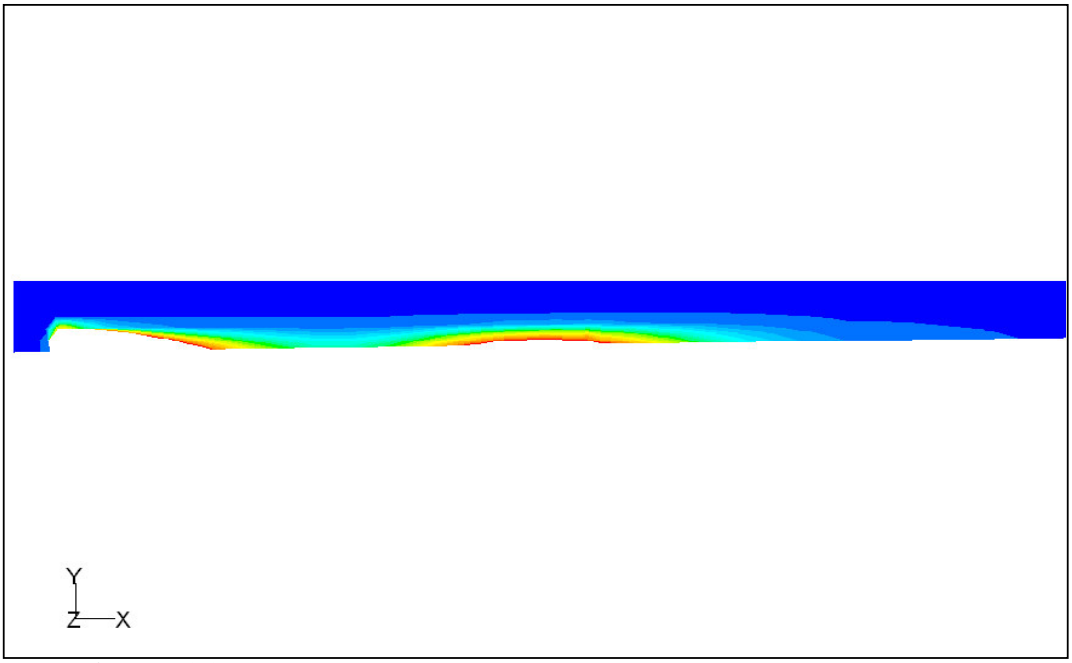


Figura 5.3.30: Perfil da descarga em seção longitudinal no tempo igual a 105,5s .

- **Resultados no Campo Distante –Concentração da Pluma do Efluente**

Verifica-se, através das figuras 5.3.23 a 5.3.30, que a pluma do efluente submerge rapidamente acarretando em forte impacto bêntico, subindo novamente até a alguns metros acima do leito de fundo (aproximadamente 4m).

Tal fenômeno apontado acima, pode ser observado através do gráfico abaixo, com os "altos" e "baixos" da concentração da pluma do efluente na altura dos orifícios de descarga.

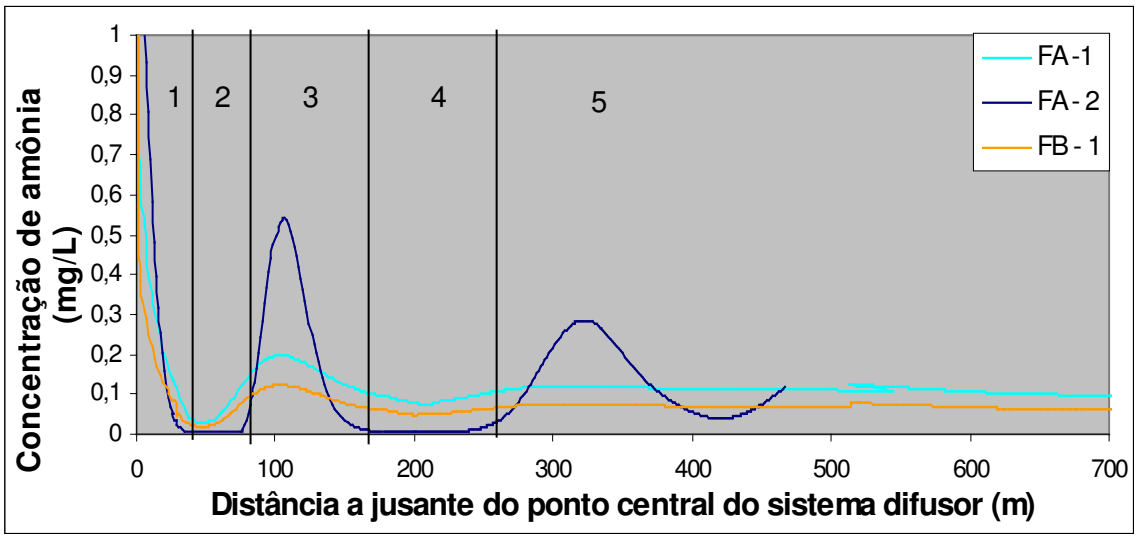


Figura 5.3.31: Concentração da pluma do efluente do TEBAR, a 1,5m acima do leito de fundo, simulados no FLUENT (cenários FA-1, FA-2 e FB - 1).

Os resultados acima apresentados referem-se as 3 simulações (FA-1, FA-2 e FB) realizadas no FLUENT. O ponto inicial (x = 0m), coincide com o ponto central do comprimento central do sistema difusor dos emissários submarinos do TEBAR.

Os seguintes fenômenos que ocorrem no processo de dispersão da pluma são comentados a seguir:

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 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 da pluma 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 a 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 5.3.30). 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 da análise 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 13: Valores de concentração e diluição da pluma dos emissários submarinos do TEBAR no final do campo distante (a 915m do lançamento), e a 1,5m do leito de fundo (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 anterior), onde ocorre o revolvimento da pluma após o impacto bêntico, ultrapassar 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.

5.4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL E ESTUDO DE DISPERSÃO COM TRAÇADOR FLUORIMÉTRICO.

Neste ítem será feita uma comparação entre os resultados de diluição obtidos através da modelagem computacional (CORMIX e FLUENT) com um estudo de dispersão da pluma do efluente do TEBAR envolvendo a utilização de traçadores (substâncias fluorescentes) realizado pela FUNDESPA (2003a).

O estudo de dispersão com traçador foi realizado com a aplicação da RODAMINA WT como 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 μ g/L. Os pontos de amostragem do perfil de fluorescência realizados em duas campanhas durante o mês de janeiro de 2003 estão apresentados nas figuras 5.4.1 e 5.4.2. Observa-se que, através de 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, 2003a).

Para efeito de estudo comparativo com os modelos computacionais, adotar-se-á que os pontos de amostragem estão alinhados ao eixo x que passa pelo ponto central do sistema difusor, para efeito de comparação entre os valores da taxa de diluição obtidos pelos dois modelos computacionais e o estudo de dispersão com traçador.

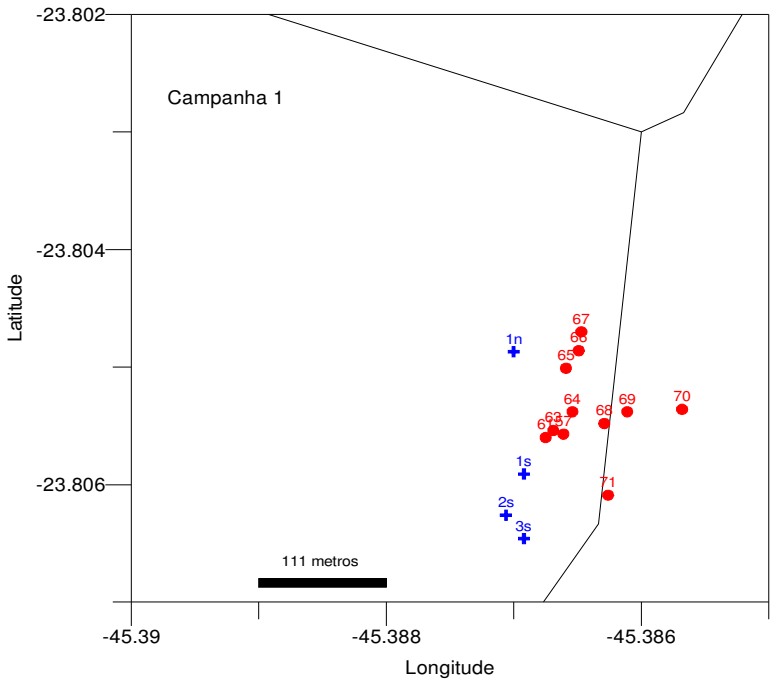


Figura 5.4.1.: Posição dos pontos de amostragem dos perfis hidrográficos (temperatura, salinidade, densidade e fluorescência) em vermelho e a posição dos "*risers*" em azul (1s, 2s e 3s – linha sul , 1n – linha norte), para a Campanha 1.

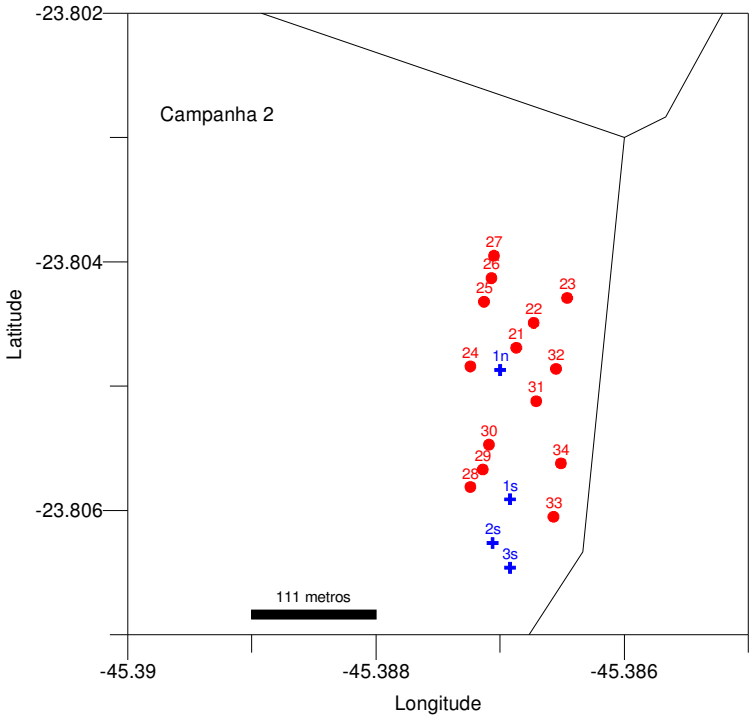


Figura 5.4.2.: Posição dos pontos de amostragem dos perfis hidrográficos (temperatura, salinidade, densidade e fluorescência) em vermelho e a posição dos "*risers*" em azul (1s, 2s e 3s – linha sul , 1n – linha norte), para a Campanha 2

Na tabela abaixo, estão apresentados o valor máximo de concentração e a respectiva diluição na coluna d'água medidos em cada ponto de amostragem. Durante a campanha realizada pela FUNDESPA (2003a) não foi tomada nenhuma medida em profundidade menor que 2,0m a partir da superfície, devido a extensão vertical do próprio aparelho.

Observa-se que os máximos valores de concentração estão localizados nas camadas mais profundas do corpo d'água, apresentando um perfil quase-discreto vinculado, possivelmente, a alta densidade do efluente.

Tabela 14: Resultado dos perfis fluorimétricos.

Pontos de Coleta	Profundidade média local (m)	Distância média entre estações e difusores (m)	Valor máximo de concentração (mic g/L)	Profundidade do valor máximo (m)	Fator de diluição média
Campanha 1					
57	22	43,7	1,3408	17,5	799
61	22,5	33,0	0,48065	19,5	2228
63	22,5	34,3	1,4233	18,5	752
64	22,5	46,7	1,11885	17,5	957
65	21	58,9	0,45762	15,5	2340
66	21	78,7	0,6766	15	1582
67	20,5	94,0	1,3325	14,5	804
68	23	75,1	0,33445	16	3201
69	24	94,5	0,2973	17,5	3601
70	26	142,3	0,2832	15,5	3781
71	25,5	110,0	0,30582	17	3501
Campanha 2					
21	16,5	78,4	1,886	10,5	287
22	17,5	103,2	3,1486	11,5	172
23	18,5	134,3	2,249	11,5	241
24	14,5	68,6	0,33543	10	1615
25	14,5	120,4	0,14793	8,5	3661
26	15	140,5	0,0653	12,5	8293
27	15	160,3	0,12668	10	4275
28	20	56,1	0,09139	14,5	5926
29	19,5	37,0	0,5877	11	921
30	19	17,0	1,5044	11	360
31	21,5	40,9	1,2432	12	436
32	21	74,5	1,137	11,5	476
33	24,5	85,2	0,17774	19	3047
34	22,5	56,2	0,3855	14,5	1405
Média	20,4	79,4	0,8455	14,08	2186

De acordo com a figura abaixo, observa-se que as curvas de diluição referentes as simulações no FLUENT (FA – 1, FA – 2 e FB -1) seguem o mesmo comportamento apresentado anteriormente, descrevendo o comportamento hidrodinâmico da pluma do efluente (gráfico de concentração - figura 5.3.31), com altos e baixos (em relação a cota da altura dos orifícios de descarga), devido a uma possível oscilação da pluma decorrente do forte impacto bêntico e posterior revolvimento. As taxas de diluição obtidas pela análise fluorimétrica (FUNDESPA, 2003a) estão representadas pontualmente no gráfico abaixo, onde, considerou-se todos os pontos alinhados longitudinalmente com o ponto central do sistema difusor.

Comparando 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 ordem de grandeza bem próximos, sendo que os resultados de diluição do traçador, em determinados pontos foram superiores ao da modelagem computacional.

A diferença entre os resultados pode ter ocorrido decorrente do FLUENT referir-se a diluição obtida na altura dos orifícios de descarga (a aproximadamente 1,5m do leito de fundo), e os valores fluorimétricos foram obtidos em alturas mais distantes do leito de fundo (tabela 13), ou seja, a altura onde foi determinado o máximo de concentração (e a respectiva diluição mínima) pela fluorimetria, talvez esteja um pouco afastada da massa central da pluma, que provavelmente se localiza rente ao leito de fundo. Para tanto, a modelagem computacional permite orientar o redimensionamento dos pontos de monitoramento de uma campanha de medição.

Em relação aos resultados obtidos pelo CORMIX, o modelo apresentou para este estudo em questão, valores baixos de diluição (valores conservativos), em relação, tanto ao FLUENT quanto a dispersão do corante.

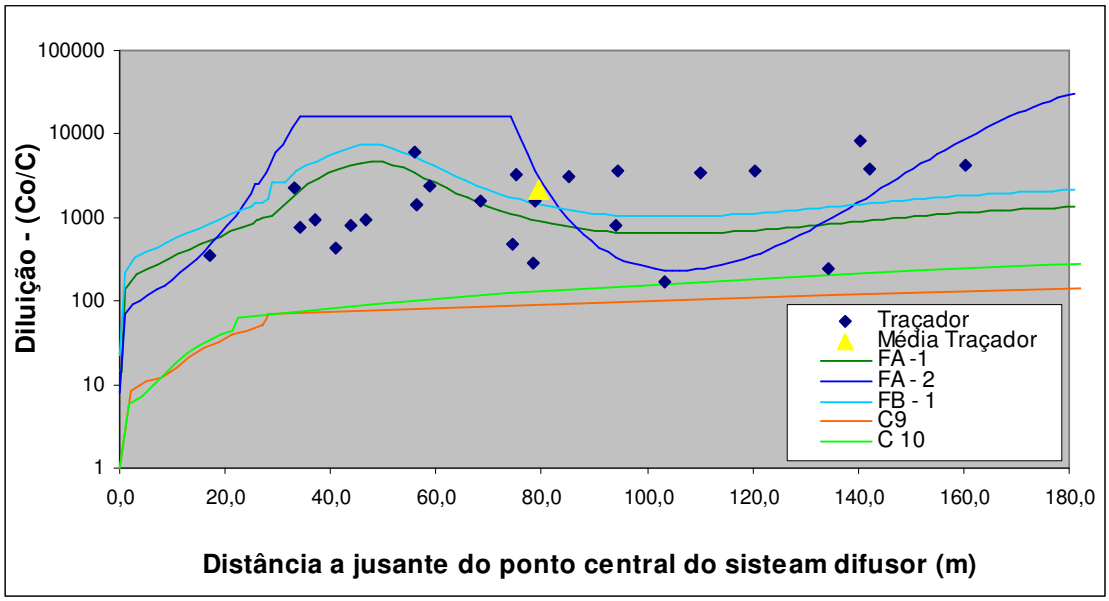


Figura 5.4.3: Análise comparativa da taxa de diluição entre o *software FLUENT* e *CORMIX* e estudo de dispersão com traçador fluorescente.

CAPITULO VI - CONCLUSÕES

Ressalta-se que a seleção do tipo de material a ser utilizado na construção da tubulação do emissário é de extrema importância, pois é impossível a determinação da extensão e severidade de quebra e danos em um sistema de emissários submarinos. Outro fator da escolha do material é a técnica de instalação a ser utilizada, onde, deve-se evitar sistemas altamente dispendiosos devido há uma intrínseca necessidade de reparos e os riscos de danos estruturais durante o processo de instalação. Outros dois importantes fatores são a batimetria do leito de fundo e a familiaridade do corpo técnico em lidar com o material (FORTIS&ORTIZ, 2004).

Os emissários submarinos do TEBAR são de PEAD (polietileno de alta densidade) e apresentam vantagens quando comparados com outros emissários de materiais tradicionais como o concreto e o aço, pois não requerem equipamentos pesados para a instalação, assentam com conformidade na batimetria variável do leito de fundo do Canal de São Sebastião, além de serem resistentes ao ataque de substâncias químicas existentes na composição do efluente industrial. Porém, é necessária a utilização de pesos de lastro para a estabilização devido ao seu leve peso e a ação de forças hidrodinâmicas severas.

Qualquer que for a técnica de instalação, recomenda-se a exploração da rota submarina, e esta deve ser conduzida por experientes mergulhadores com o intuito de encontrar o melhor

local para o assentamento da tubulação e realizar inspeções periódicas da condição estrutural e da necessidade de manutenção ao longo da vida útil do sistema..

A técnica utilizada na instalação dos emissários submarinos do TEBAR foi a float-and-sink, cuja metodologia foi desenvolvida especificamente para a instalação de tubulações de PEAD. Este método se faz viável na maioria dos casos de emissários submarinos, resultando em uma operação mais ágil, segura e barata, principalmente se a tubulação for produzida em território nacional.

Em relação a análise da dispersão da pluma do efluente dos emissários submarinos do TEBAR e o seu comportamento hidrodinâmico, que foi o principal objetivo deste estudo, os dois modelos computacionais, CORMIX e FLUENT, apresentaram serem viáveis na sua utilização, com diferentes níveis de informação, porém de total importância para o caminhamento de uma análise mais aprofundada.

Inicialmente, o CORMIX, apresentou uma classificação de fluxo da pluma do efluente com empuxo negativo, que condiz com as características físico-químicas do efluente do TEBAR.

Este resultado foi imprescindível para iniciar a modelagem computacional no FLUENT com maior grau de precisão, possibilitando a criação de um volume de controle menor, onde pode ser descartado todo o volume referente a superfície até 10m de profundidade, acarretando em um significativo ganho computacional.

Apesar dos resultados da concentração de amônia fornecidos pelo CORMIX, no campo próximo, serem elevados, se comparados com resultados de monitoramento da qualidade das águas, fisicamente, o término do campo próximo resultou em valores bem próximos com os apresentados pelo FLUENT, onde a pluma do efluente interage fortemente com o leito de fundo, a cerca de 20 a 30m do lançamento, acarretando em um forte impacto bêntico.

Os resultados apresentados pelo FLUENT foram mais condizentes com estudos de monitoramento de qualidade das águas e com estudo de dispersão de traçador fluorimétrico (RODAMINA WT), conforme apresentado na figura 5.4.3.

A figura 6.1. apresenta as curvas de concentração de amônia a jusante dos orifícios de descarga, com sentido NE, no campo próximo. O FLUENT mostra que o padrão de qualidade das águas é atingido a poucos metros do lançamento, enquanto que o CORMIX foi bem mais conservador, possivelmente, devido a recirculação da pluma na camada bêntica, onde o modelo computou somente a advecção exercida pela corrente do meio, acarretando em uma menor taxa de diluição.

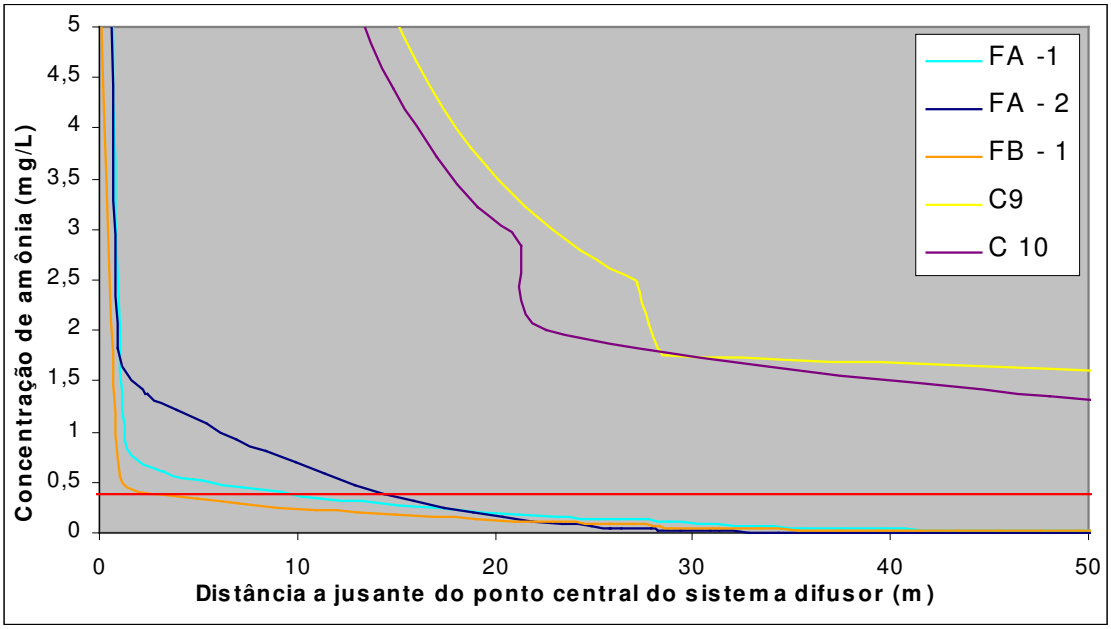


Figura 6.1: Comparação dos resultados entre o CORMIX e FLUENT, no campo próximo.

A figura 6.2, apresenta as curvas de concentração de amônia a jusante dos orifícios de descarga, com sentido NE, no campo próximo e distante.

Destaca-se o cenário FA-2, realizado no FLUENT, onde, utilizou-se uma malha com refinamento maior em todo o volume de controle (área circunvizinha aos emissários submarinos do TEBAR) e que, torna possível analisar com maiores detalhes, o comportamento hidrodinâmico da pluma do efluente. Os altos e baixos da concentração de amônia, analisados a mesma altura dos orifícios de descarga (1,5m do leito de fundo), é devido a alta densidade do efluente com conseqüente recirculação na camada bêntica e oscilação da pluma até sua estabilização e carregamento pelas correntes mais profundas.

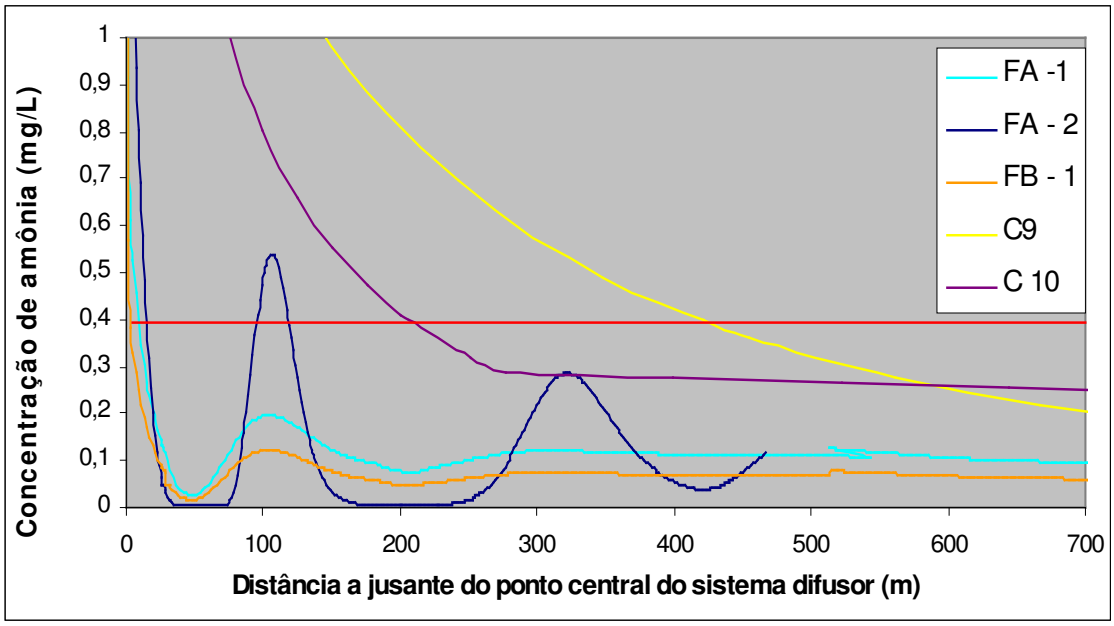


Figura 6.2: Comparação dos resultados entre o CORMIX e FLUENT, no campo distante.

Finalmente, 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;
- as 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 muito próxima ao sedimento do canal, percorrendo grandes distâncias nessa situação. Esse resultado indica que o maior efeito dessa descarga se dá principalmente nas camadas mais profundas desse corpo d'água.

Como sugestão para futuros trabalhos, ressalta-se a necessidade da continuidade da calibração dos modelos computacionais com um maior número de resultados de qualidade da água e dos sedimentos nas proximidades do lançamento. Também, sugere-se que, para um ganho computacional, pelo método dos volumes finitos, seja descartado um volume maior a

partir da superfície até a aproximadamente 5m acima dos orifícios de descarga, o que possibilitaria em um refinamento acentuado em camadas próximas ao leito de fundo, podendo-se inclusive analisar por métodos computacionais a adsorção desta pluma no sedimento do canal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, C.M.. Uso e ocupação do solo na zona costeira do Estado de São Paulo, uma análise ambiental. FAPESP, 1999.

ALVAREZ, C.; REVILLA, J.A.; MEDINA, R.; JUANES, J.A. Proposal for protection and stabilization of outfalls in high wave regime seas. The experience in Spain. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Istanbul, Turkey. 2002.

ARASAKI, E. Sistemas predominantes de tratamento de esgoto na costa paulista – metodologia para a tomada de decisão. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado. São Paulo, 2004.

AVANZINI, C.; MARCHETTI, G. Case histories of large diameter / high depth hdpe (high density polyethylene) outfall installation. In: International Conference Marine Waste Disposal. Istanbul, Turkey, 1994.

AVANZINI, C.; QUIRICI, P. Design and construction problems of a “big inch” outfall. In: International Conference Marine Waste Disposal. Istanbul, Turkey, 1994a.

AVANZINI, C.; QUIRICI, P. The use of flexible connections to overcome profile problems in the bottom pull of outfalls. In: International Conference Marine Waste Disposal. Istanbul, Turkey, 1994b.

AVANZINI, C. Pipes and techniques for outfall construction: is there something new? In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Genova, Italy, 2000.

AVANZINI, C.; QUIRICI, P. Bottom pull of a large diameter steel outfall double jointing and long ramp arrangement. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Istanbul, Turkey, 2002.

BJORKLUND, I.; KUIVALAINEN, P.; LOFMARK, O.; ROMAN, J. General design aspects on PE outfalls. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Istanbul, Turkey, 2002.

BLENNINGER, T. Internal diffuser hydraulics. In: Workshop de Emissários Submarinos: Projeto, Avaliação de Impacto Ambiental e Monitoramento. São Paulo, Brasil, 2003.

BLENINGER, T.; LIPARI, G.; JIRKA, G.H. Design and optimization program for internal diffuser hydraulics. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD Istanbul, Turkey, 2002.

BLOMSTER, T.J. Advantages and experiences of the use of long, continuously extruded pe pipes for outfalls construction. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Istanbul, Turkey, 2002.

BROOKS, N.H. Conceptual design of submarine outfalls – II: hydraulic design of diffusers. California Institute of Technology, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources. Technical Memorandum, 1970.

CASCARDI. Monitoramento Ambiental do Emissário do Terminal Aquaviário de São Sebastião Relatório Técnico Final. São Paulo, 2002.

CASTRO, B.M.. Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo. *Tese de Livre-Docência*, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 248 p. 1996.

CASTRO, B.M.; MIRANDA, L.B..Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4ºN and 34ºS. In: Robinson. A.R. & Brink, K.H. eds. The Sea. Oxford, John Wiley & Sons. P.209-251. 1998.

CHAO, J.L. MOTTA PACHECO L.A. Disposição de Esgotos por emissários submarinos, gerenciamento do controle de poluição e proteção da qualidade das águas costeiras. Revista DAEE (122), p. 98-124, 1979.

CEPIS – Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences. Small diameter (HDPE) submarine outfalls. 2002.

CETESB. Relatório de Qualidade das Águas Litorâneas do Estado de São Paulo – Balneabilidade das Praias. 2004.

CETESB. "Caracterização qualitativa dos despejos líquidos do Terminal Marítimo Almirante Barroso- TEBAR da Petróleo Brasileiro S.A. Petrobrás". Relatório técnico nº 010/01/EEAL São Paulo. 2001.

CORMIX. Cornell Mixing Zone Model. Disponível em <www.cormix.info>.

DALE, J.R. Subsea pipeline inspections. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Istanbul, Turkey. 2002.

DAVIES, P.A. Saline intrusion – Short Course. In: XXX IAHR Congress: Design and Construction of Sea Outfalls. Thessaloniki, Greece. 2003.

DIPRA – DUCTILE IRON PIPE RESEARCH ASSOCIATION. Ductile iron pipe subaqueous crossing. 2001.

DUER, M.J. ; SALAS, H.J. Use of duckbill valves to maintain marine outfall diffuser efficiency, 1995.

DUER, M.J. Use of elastomeric duckbill valves for long-term hydraulic and dilution efficiency of marine diffusers. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Genova, Italy. 2000.

DUER, M.J. New developments in "duckbill" check valves and elastomeric components for marine outfalls. International Conference on Marine Waste Water Discharges – MWWD 2002, Istanbul, Turkey, sept. 16 – 20, 2002.

EPA. Review of potential modeling tools and approaches to support the Beach program. 1999.

EVR – Elasto Valve Rubber Products. General products catalogue. 2003.

EDRA. Fabricação de tubulação em plástico reforçado com fibra de vidro. Disponível em <www.edra.com.br> Acesso em: 14 jul 2004.

FISCHER, H.B.; LIST, E.J.; KOH, R.C.Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N.H. Mixing in inland and coastal waters. Academy Press INC. San Diego, California, 1979.

FLUENT INC. Tutorial. Version 6.1.22. 2003.

FONTES, R.F.C. 1995. As correntes no Canal de São SEBASTIÃO. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 159p. 1995.

FORTIS, R.M.; ORTIZ, J.P.. Técnicas construtivas de emissários submarinos utilizando sistemas difusores com orifício de área variável. In: XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, SP, Brasil. 2004.

FOX, R.W.; McDonald, A.T. Introdução a mecânica dos fluidos. 5ª edição. Rio de Janeiro, 2001.

FRENCH, J.A. Pigging submarine outfalls. Journal of Environmental Engineering, Volume 121 (5), p. 396-401, 1995.

FUNDESPA. Estudo das condições de dispersão dos efluentes do sistema de emissários submarinos do Terminal Aquaviário de São Sebastião – PETROBRÁS/TRANSPETRO. 2003a.

FUNDESPA. Síntese e integração multidisciplinar dos dados ambientais pretéritos do Canal de São Sebastião. 2003b.

GRACE, R.A. Marine outfall systems: planning, design, and construction. Department of Civil Engineering. University of Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii. Prentice Hall. 1978.

HAANS, J.L.M.; LEUVEN, R.S.E.W.; RAGAS, A.M.J. Immission assessment procedures for discharge permitting. New concepts for sustainable management of river basins, p 179 – 189. The Netherlands, 1998.

IfH – Institute of Hydromechanics. Outfalls: database and information exchange University of Karlsruhe, 2002. Disponível em <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/outfalls/> Acesso: 13 mai 2003.

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, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York. 1996.

KEMP, G.V. JONES, D.W. HUSSELBEE, B.W. Outfall inspection and rehabilitation. In: Pipelines, 04-07, USA, Cleveland, Ohio. 2002.

KOMEX. Britannia outfall replacement: comparison of alternative sites. Vancouver, Canada. 2002.

KWH PIPE. Sclairpipe Marine Pipeline Installation Brochure. 2002.

LEE, J.H.W.; KUANG, C.P.; CHANG, H.C. Experiments of a duckbill valve (dbv) jet in coflow. In: 15° ASCE Engineering Mechanics Conference. Columbia University, New York, NY. 2002.

LEE, J.H.W. WILKINSON, D.L. WOOD I.R. On the head-discharge of a duckbill elastomer check valve. Journal of Hydraulic Research, Volume 39 (6), p. 619-627. 2001.

LINGURI, M. LISSONI, M. New technologies for site production of spiral steel pipe with corrosion and concrete weight coatings for medium - large diameter outfalls. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD, Genova, Italy. 2000.

LOUBSER, P. WEGENER, R. The design, installation and repair of deep water large diameter hdpe outfall pipelines - a contractor's perspective. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD, Genova, Italy. 2000.

MATSUSHITA, A. Tecnologia diversificada em tubulação de concreto, aço e plástico. Revista O Empreiteiro (136), p. 44-47. 1979.

McJUNKIN, F.E.; PINEO, C.H.S. The role of plastic pipe in community water supplies in developing countries. Agency for International Development. 1969.

MOUSSELLI, A.H. Design criteria for offshore lines in unstable soils can cut risks. Oil & Gas Journal, February. 1979.

NRCC – National Resource Council Comittee. Improving the safety of marine pipelines. Committee on the Safety of Marine Pipelines, Marine Board. 1994.

OCCHIPINTI, A.G. Estudos preliminares necessários à disposição oceânica de esgotos. Tese de Doutoramento à Escola de Engenharia de São Carlos. 1970.

ORTIZ, J.P.; BESSA, K.L.. Modelagem computacional de descarga de efluente em canal com análise dos campos próximo e distante. In: IAHR. São Pedro, SP, Brasil, 2004.

OZEL, T.; JOHANSEN, O.; LARSEN, I.; LANGAARD, T. The installation of an hdpe outfall in Antalya, Turkey. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Istanbul, Turkey, 2002.

PÁLSSON, G. Off-bottom tow, an attractive method for laying grp pipelines in rough waters. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Istanbul, Turkey, 2002.

PPI – Polyethylene Pipe Insitute. Handbook of marine installations, 2003. Disponível em: <http://www.plasticpipe.org/pdf/pubs/handbook/hvacapps.pdf> Acesso: 20 abr. 2004.

PIPELINE PIGGING PRODUCTS Catalog, 1998.

POTTER, M.C.; WIGGERT, D.C.. Mecânica dos fluidos. Ed. Pioneira Thomson Learning. São Paulo, 2004.

RAGAS, A.M.J.; VAN DE LAAR, B.J.; VAN SCHIJNDEL, A.M.J.; KLAPWIJK, S.P. Application of the water quality-based approach in water pollution control: possibilities and restrictions. New concepts for sustainable management of river basins, p. 191 – 209. The Netherlands, 1998.

REDVALVE COMPANY. Tideflex Effluent Diffusers Valves Brochure. 1998.

REDVALVE COMPANY. Tideflex Effluent Diffusers. CD ROM. 2004.

SALAS, H.J.. Emisarios submarines: alternativa viable para la disposición de aguas negras de ciudades costeras en América Latina y el Caribe. 2000.

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, SO. 47 (31p.). 2001.

SONDOTECNICA. Sistema de abastecimento de água potável a navios e sistema de tratamento de efluentes contaminados por óleo, com emprego de disposição oceânica. RIMA. 1990

SPYROPOULOS, K.S.; ANDRIANIS, E.G. Long underwater effluent discharge pipelines experience gained from the thessaloniki outfall. In: XXX IAHR Congress. Thessaloniki, Greece. 2003.

TSUTIYA, M.T.; SOBRINHO, P.A. Coleta e transporte de esgoto sanitário. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Ed.: EDUSP, 2000.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W.. An introduction to computational fluid dynamics – The finite volume method. Prentice Hall, 1995.

VICARI, M. Mechanical and environmental testing on bituminous mattresses for the stabilization of pipelines. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Genova, Italy. 2000.

VICARI, M. BRANZANTI, M. Bituminous mattresses and xlpe coated gabions for the protection and ballasting of sealines and outfall: case histories and applications. In: International Conference Marine Waste Water Discharge – MWWD. Istanbul, Turkey. 2002.

WILKINSON, D.L. Avoidance of sweater intrusion into ports of ocean outfalls. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 114 (2). p. 218-228. 1988.

WILKINSON, D.L.; WAREHAM, D.G.. Optimization criteria for design of coastal city wastewater disposal systems. In: Proclamation Clean Sea 96. Toyohashi, Japan. 1996.

WILKINSON, D.L. Purging and flooding of pipeline sewage outfalls. Journal of Hydraulic Engineering. Volume 123 (1). p. 65-72. 1997.

WOOD, I.R.; BELL, R.G.; WILKINSON, D.L. Ocean disposal of wastewater. World Scientific, Singapore, 1993.

Wrc - Design Guide for marine treatment schemes. Water Research Centre. Swindon, UK, 1990.