



SAE/PR - Secretaria de Assuntos Estratégicos da
Presidência da República

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - CDTN

RELATÓRIO TÉCNICO

NÚMERO: RC-CT7-002/97
OBJETO: ESTUDO PARA A AMPLIAÇÃO DO SISTEMA DE DESCARTE DE
EFLUENTES LÍQUIDOS DO COMPLEXO DE GUAMARÉ - E&P RNCE
CLIENTE: PETROBRÁS - E&P-RNCE
DATA: Abril/1997
REF.: CONTRATO CDTN/FUNDEP/PETROBRÁS 2584 - POLO INDUSTRIAL

R. Prof. Mário Werneck, s/n°
Cidade Universitária - Pampulha
Caixa Postal 941
CEP: 30123-970 Belo Horizonte - MG

Telefone: (031) 499-3127
Fac-Simile: (031) 499-3249

CGC: 00.402.552/0012-81
Inscrição Estadual: ISENT0

ESTUDO PARA A AMPLIAÇÃO DO SISTEMA DE DESCARTE DE EFLUENTES LÍQUIDOS DO COMPLEXO DE GUAMARÉ - E&P RNCE

AUTORES

Rubens Martins Moreira

Jefferson Vianna Bandeira

EDIÇÃO

Jacinta Maria de Souza

Maurício Vieira de Carvalho

Belo Horizonte/MG

SUMÁRIO

PÁGINA

	PÁGINA
LISTA DE FIGURAS	
1. INTRODUÇÃO	5
2. BASES DO PROJETO	6
2.1 Parâmetros Ambientais	6
2.2 Características de Uso e Qualificação das Águas da Região	8
2.3 Características do Efluente	12
2.4 Alternativas do Projeto	14
3. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA DILUIÇÃO	16
3.1 Fatores de Diluição	16
3.2 Diluição no Campo Próximo da Descarga	17
3.3 Diluição no Campo Afastado da Descarga	19
3.4 Diluição Global	22
4. DEFINIÇÃO DA ALTERNATIVA DE DESCARTE	23
5. DEFINIÇÃO DOS FATORES DE DILUIÇÃO	25
6. CÁLCULO DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO	27
6.1 Diluição Primária	27
6.2 Características Básicas do Difusor	27
6.3 Estimativas da Diluição Primária	30
7. CÁLCULO DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO AFASTADO	34
7.1 Espessura da Camada de Efluentes no Campo Afastado	34
7.2 Estimativa da Diluição Secundária	34
8. DILUIÇÃO GLOBAL E ZONA DE MISTURAMENTO	40
8.1 Fatores de Diluição Global	40
8.2 Dimensões da Zona de Misturamento	42
9. CARACTERÍSTICAS DO EMISSÁRIO E DIFUSOR	44
9.1 Localização	44
9.2 Concepção do Sistema Difusor	44

	PÁGINA	
9.3	Posições dos Bocais	48
9.4	Características dos Bocais	51
9.5	Perda de Carga	51
10.	RESUMO DO DIMENSIONAMENTO	54
11.	MONITORAÇÃO	56
11.1	Parâmetros a Monitorar	56
11.2	Locais de Coleta	56
11.3	Frequência de Amostragem	57
11.4	Métodos Analíticos	57
12.	RECOMENDAÇÕES FINAIS	58
13.	REFERÊNCIAS	60

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA	
Figura 3.1	Diluição mínima na superfície, para um difusor linear descarregando sob corrente	18
Figura 8.1	Fatores de diluição global	41
Figura 9.1	Esquema da disposição em planta das derivações de mergulho - nível do <i>deck</i>	46
Figura 9.2	Esquema do trecho em mergulho das derivações	47

1. INTRODUÇÃO

Em 1987 o CDTN realizou para a PETROBRÁS uma série de estudos de campo visando fundamentar a avaliação da alternativa mais favorável para o descarte dos efluentes líquidos do Complexo de Guararé, através de lançamento dos mesmos no oceano via emissário submarino. Fizeram parte destes estudos testes com radiotraçadores (^{82}Br) e flutuadores, e medições hidráulicas (correntes, salinidade, temperatura), observações dos ventos e ondas, que complementadas com dados de marés e da batimetria, possibilitaram a definição das condições de transporte e dispersão/diluição dos efluentes. Estas medições complementaram informações obtidas pela análise e avaliação de dados já disponíveis sobre o local.

Foram ainda levantados parâmetros físico-químicos dos efluentes no separador água-óleo, no tanque de contenção e no oceano. Estas condições do ambiente marinho na região do descarte, conjugadas aos levantamentos físico-químicos efetuados pelo CDTN e pela PETROBRÁS, embasaram a modelagem do transporte e fatores de diluição do efluente do emissário, bem como a dimensão da região de misturamento, fora dos limites da qual a qualidade das águas marinhas obedecesse as normas legais brasileiras (Resolução CONAMA Nº 20, Águas Salinas de Classe 5).

Com base em todos estes levantamentos, o estudo foi fechado com a execução do projeto básico do emissário e difusor para o descarte. Este trabalho gerou o relatório "Estudo para o Descarte dos Efluentes da ETDI do Complexo de Guararé via Emissário Submarino - DERL.CN-008/87" [CDTN, 1987], que daqui em diante será designado por "Estudo de 1987".

Durante a realização dos trabalhos de campo e posteriormente a eles, foram detectados vários aspectos problemáticos relacionados com a dinâmica de transporte dos sedimentos na costa na região do emissário e vizinha a ela. O intenso transporte ali vigente, conduz a uma acentuada mobilidade das formações imersas e emersas (bancos, *spits*, etc.). Esta circunstância causa problemas para a integridade de estruturas tais como dutos lançados na região e foi posteriormente estudada extensivamente por ocasião de outros serviços solicitados ao CDTN pela PETROBRÁS [Bandeira *et.al.*, 1988, 1988a, 1990, 1993].

O emissário projetado neste primeiro estudo previa uma vazão máxima de 20.000 m³/d, para 1996. No entanto, a vazão atual de água a ser descartada corresponde a 47.000 m³/d (0,544 m³/s), i. é: 2,35 vezes a vazão máxima de projeto do emissário projetado em 1987.

Em 07 de junho de 1996 a E&P RNCE, através do Ofício E&P RNCE/GG-000039 solicitou ao CDTN/CNEN apresentação de uma proposta para execução de estudos que suprissem as novas necessidades de descarte geradas pelo aumento da produção do Polo no período decorrido desde o primeiro estudo.

O presente relatório apresenta uma descrição do estudo realizado pelo CDTN em atendimento a esta solicitação e define as especificações de uma nova linha de emissário que melhor atende as novas demandas de descarte.

2. BASES DO PROJETO

2.1 Parâmetros Ambientais

No Estudo de 1987 foram definidas as características geográficas e ambientais do corpo receptor e os usos da água no local. Estas permanecem as mesmas para o presente trabalho, posto que o descarte ampliado far-se-á na mesma região.

As condições hidrodinâmicas responsáveis pelos processos de advecção/dispersão/diluição e os parâmetros físico-químicos das águas receptoras são os mesmos determinados pelos estudos de campo efetuados em 1987. Assim, não houve necessidade de repetir-se as medições em campo e foi possível aplicar aos cálculos da diluição os mesmos valores dos parâmetros determinados naquela ocasião.

O relatório do Estudo de 1987 oferece uma descrição detalhada das características físicas prevaletentes no local. Algumas destas características condicionantes do projeto são a seguir sintetizadas.

A área do descarte situa-se numa região da plataforma continental caracterizada por baixas profundidades e mui suaves declividades (1:1360), na qual ocorrem diversos bancos submersos. Estas circunstâncias limitam a quantidade de água disponível para a diluição dos efluentes no caso de descargas pouco afastadas da costa e colocam a necessidade de alongar a linha do emissário por distâncias relativamente consideráveis, até serem atingidas espessuras adequadas da lâmina d'água. Em compensação, estas baixas profundidades, associadas à não ocorrência de drenagens fluviais de importância na região e aos baixos índices de precipitação pluvial, inibem a formação de estratificações de densidade estáveis na coluna d'água.

A temperatura média anual da água do mar é de 27,7 °C, com um desvio padrão sazonal de 0,9°C e grande homogeneidade espacial.

A salinidade também exhibe marcada homogeneidade espacial, tanto vertical como horizontalmente. As médias são de 36,32 ‰ no inverno e de 34,16 ‰ no verão, com extremos de 32,4 ‰ e 37,0 ‰.

As densidades correspondentemente não exibem picnóclinas e possuem um valor médio de 1023,8 kg/m³, com um desvio padrão sazonal de 0,9 kg/m³. As médias espaciais extremas são respectivamente 1021,4 kg/m³ (maio) e 1024,4 kg/m³ (julho).

As marés são semidiurnas, com amplitudes médias em sizígia e quadratura de 2,1 m e 1,2 m, respectivamente. As amplitudes extremas são da ordem de 1,0 m e 3,1 m.

Os ventos reinantes ao longo do ano são os de E, com intensidade de 7 a 12 nós e rondam para o setor N a NE durante o verão (janeiro a março). Os ventos dominantes são os dos setores N a NE, com intensidades variando de 10 a 15 nós. Os mais intensos ventos médios horários têm intensidades de 19 a 25 nós.

As ondas mais freqüentes, em ponto de profundidade de 12,2 m, indicaram os valores assinalados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Características das ondas

H_{max}	H_s	T_z	D
0,75 m (10,92 %)	0,45 m (18,47 %)	6 s (30,48%)	52,5° (42,45 %)
0,65 m (10,48 %)	0,55 m (15,20 %)	7 s (29,39 %)	7,5° (36,32 %)

sendo:

H_{max} = altura máxima de onda individual do registro

H_s = altura significativa (média do terço superior das ondas mais altas)

T_z = períodos correspondentes

D = direção de propagação em relação ao norte verdadeiro.

Os valores entre parênteses correspondem às respectivas freqüências de ocorrência. A altura significativa para um período de recorrência de 30 anos é de 2,29m.

As formações emersas e imersas indicam um transporte litorâneo de E para W. A mobilidade dos sedimentos de fundo é generalizada em toda a região até profundidades maiores que 13 m.

As correntes na região próxima à costa são governadas sobretudo pelos ventos e pelas marés. Em fase de maré enchente a corrente se dirige predominantemente para o quadrante SW (convergindo para a costa) e em vazante para o setor de W a NE (divergindo da costa). As intensidades variam na faixa de 0,02 m/s a 0,3 m/s.

O histograma de freqüências obtido por meio de medições na região do difusor, com correntógrafo a meia-profundidade, permitiram definir os seguintes valores representativos para fins de projeto:

Tabela 2.2 - Valores significativos das intensidades de corrente

Intensidade	Valor	Freqüência acumulada
mínima	0,09 m/s	4 %
média	0,18 m/s	50 %
máxima	0,32 m/s	99 %

Testes com radiotraçadores em situação de corrente convergente indicaram um limite máximo de excursão da pluma afastado de >1200 m da costa, dado que a inversão da maré reencaminhava a pluma para o largo. A dispersão no local (10^{-2} m²/s a 1 m²/s) é característica de regiões do oceano onde a turbulência sofre o efeito da barreira da costa, sendo os seus valores ligeiramente inferiores aos observados na costa leste e sul do Brasil.

Valores de parâmetros físico-químicos medidos no oceano pelo CDTN indicam:

pH = 7,5

Sólidos sedimentáveis: 0,02 ml/l < SS < 0,1 ml/l

Sulfetos: S²⁻ = 0,00 mg/l

Oxigênio dissolvido: OD = 100 % sat.

Transparência ao disco Secchi: 2,5 m < H_Z < 3,4 m

Densidade média na coluna d'água: $\rho = 1022,2$ kg/m³

2.2 Características de Uso e Qualificação das Águas da Região

A costa é recortada por braços de mar a leste e a oeste dos pontos de mergulhos do emissário e dutos, registrando-se a ocorrência de manguezais e a prática de criação intensiva de espécies marinhas destinadas à comercialização. Trata-se pois, de áreas contendo valiosos recursos naturais, cuja preservação deve ser meticulosamente observada. A pesca marinha é também praticada, mas sem dúvida a atividade de maior expressão econômica no local é a exploração do petróleo e gás.

Para os usos a que se destinam, estas águas classificam-se portanto como de classe 5 ou 6, conforme a Resolução No. 20 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A Tabela 2.3 lista os critérios de qualidade estipulados para esta categoria de águas naturais.

Observa-se nesta tabela que os teores de óleos e graxas (O&G), de substâncias que produzem odor ou turbidez e de substâncias que produzem depósitos objetáveis, são limitados pelo critério qualitativo de “virtualmente ausentes”; delegando o CONAMA a quantificação destes parâmetros aos órgãos de controle ambientais. Esta situação é importante para o problema aqui discutido, considerando-se a ubíqua presença de O&G em efluentes de instalações da indústria do petróleo.

Para balizar esta qualificação, foram feitas algumas considerações no Estudo de 1987, com base em especificações de normas estrangeiras. O critério adotado naquele estudo para a concentração máxima de O&G foi 0,5 mg/l, com base nestas considerações. Porém as normas consultadas têm caráter mais de recomendações e aplicam-se a corpos receptores de natureza distinta daquele aqui considerado.

Tabela 2.3 - Critérios de qualidade para águas salinas da Classe 5

Parâmetro	Critério
Óleos e graxas	virtualmente ausentes
Substâncias que produzam odor e turbidez	virtualmente ausentes
Substâncias que produzam depósitos objetáveis	virtualmente ausentes
DBO ₅ a 20°C	≤ 5 mg/l O ₂
OD	≥ 6 mg/l O ₂
pH	6,5 a 8,5
Alumínio	1,5 mg/l Al
Bário	1,0 mg/l Ba
Cádmio	0,005 mg/l Cd
Chumbo	0,01 mg/l Pb
Cobre	0,05 mg/l Cu
Cromo VI	0,05 mg/l Cr
Índice de fenóis	0,001 mg/l C ₆ H ₅ OH
Ferro	0,3 mg/l Fe
Manganês	0,1 mg/l Mn
Mercúrio	0,0001 mg/l Hg
Níquel	0,1 mg/l Ni
Amônia não ionizável	0,4 mg/l NH ₃
Nitrato	10,0 mg/l N
Nitrito	1,0 mg/l N
Sulfetos como H ₂ S	0,002 mg/l S
Zinco	0,17 mg/l Zn

Como ilustração da dificuldade, reportamo-nos ao critério estipulado pela US-EPA, uma agência que serve como referência mundial e que norteia a confecção das normas brasileiras [EPA, 1976]. A EPA também se refere à virtual ausência, mas para o caso de águas destinadas ao abastecimento doméstico. Para águas naturais, apenas requer a sua adequação à manutenção da vida aquática, restringindo os teores de O&G a 0,01 do LC₅₀ - 96 h (concentração na qual 50 % dos organismos morreriam após uma exposição de 96 h) para espécies marinhas de importância e de demonstrada susceptibilidade a óleos e produtos

petroquímicos. Isto coloca o complicador da execução de onerosos e nem sempre conclusivos bioensaios.

No presente estudo propomos um critério operacional: o limite mínimo de detecção com base nas metodologias analíticas oficialmente aceitas. O Standard Methods [APHA, 1985] recomenda o método de extração por solvente ($C_2Cl_3F_3$) e detecção por espectrofotometria ao infravermelho para teores < 10 mg/l. Segundo a mesma referência, este método possibilita detecções de teores até 0,2 mg/l de O&G com uma instrumentação adequada. Este é o valor que consideraremos para a concentração máxima permissível (CMP), correspondente a “virtualmente ausentes”, posto que teores inferiores não seriam passíveis de detecção.

A CMP de fenóis foi fixada em 0,03 mg/l no Estudo de 1987, dez vezes menor que o teor permitido para águas de abastecimento doméstico com tratamento convencional. No presente estudo reduziremos este limite para 0,02 mg/l, a ser atingido no jato da descarga. Este teor é dez vezes menor do que aquele abaixo do qual os fenóis não interferem com a vida aquática [EPA, 1976].

No Artigo 21 da Resolução No. 20 do CONAMA são estabelecidos os limites a serem observados no efluente descartado. Estes índices estão mostrados na Tabela 2.4 para os parâmetros de interesse no Polo de Guimarães. O Estudo de 1987 também fez algumas considerações sobre estes valores, com base em uma comparação com normas estrangeiras.

Tabela 2.4 - Especificação para efluentes, conforme o Artigo 21 da Resolução N°. 10 do CONAMA.

Parâmetro	Critério
Temperatura	< 40 °C
pH	entre 5 e 9
Materiais sedimentáveis	≤ 1 ml/l
O&G	≤ 20 mg/l
Materiais flutuantes	ausentes
Cádmio	0,2 mg/l Cd
Chumbo	0,5 mg/l Pb
Cobre	1,0 mg/l Cu
Cromo VI	0,5 mg/l Cr
Cromo III	2,0 mg/l Cr
Índice de fenóis	0,5 mg/l C ₆ H ₅ OH
Ferro solúvel	15,0 mg/l Fe
Níquel	2,0 mg/l Ni
Sulfetos	1,0 mg/l S
Zinco	5,0 mg/l Zn

2.3 Características do Efluente

O Estudo de 1987 abarcou uma extensa série de medições de parâmetros físico-químicos do efluente, efetuados no tanque de contenção e no separador água-óleo da Estação de Tratamento dos Rejeitos Industriais do Polo de Guimarães. Adicionalmente, a PETROBRÁS forneceu dados referentes a amostragens por ela efetuadas nesta estação. Com base nestas informações foram estabelecidos valores representativos que constituíram a base de valores de projeto para o emissário então projetado.

Os valores atuais foram fornecidos pela E&P-RNCE em reunião com o CDTN em 8/10/1996. Na realidade eles se referem a um levantamento realizado em 1993. Os valores de ambos os estudos, o de 1987 e o atual estão indicados nas Tabelas 2.5 e 2.6, para fins de comparação.

Tabela 2.5 - Características físico-químicas do efluente do Polo Industrial de Guimarães

Parâmetro	Teores no Estudo de 1987	Teores atuais
O&G	35 mg/l	30 mg/l
DBO ₅	245 mg/l	-
pH	6,5 - 8,5	7,4
Amônia	-	3,0 mg/l N
Fenóis	3 mg/l	1,2 mg/l
Sulfetos	0,4 mg/l	8,0 mg/l S
Sulfitos	-	0,9 mg/l SO ₃ ²⁻
CN ⁻	-	0,15 mg/l
F ⁻	-	3,3 mg/l
As total	-	0,1 mg/l
B	-	1,0 mg/l
Ba	-	1,5 mg/l

Os valores na terceira coluna destas tabelas (teores atuais) refletem os resultados de dosagens na saída do floteador, que de acordo com as informações repassadas representam o efluente final descartado para o mar. Por medida de segurança, foram considerados os valores máximos observados neste local. O pH e os teores de O&G e de sulfetos, foram repassados diretamente pela E&P-RNCE. Tratam-se sempre de índices conservativos.

Tabela 2.6 - Teores de metais pesados no efluente do Polo Industrial de Guamaré

Parâmetro	Teores no Estudo de 1987	Teores atuais
Cd	< 0,03 mg/l	0,1 mg/l
Pb	< 0,02 mg/l	0,22 mg/l
Cu	0,10 mg/l	0,03 mg/l
Cr ³⁺	-	0,1 mg/l
Cr ⁶⁺	-	0,01 mg/l
Cr total	0,11 mg/l	0,11 mg/l
Sn	-	0,40 mg/l
Fe	1,0 mg/l	0,7 mg/l
Mn	-	0,3 mg/l
Hg	< 0,0002 mg/l	0,0002 mg/l
Ni	< 0,2 mg/l	0,08 mg/l
Ag	-	0,08 mg/l
Se	-	0,1 mg/l
Zn	0,19 mg/l	0,05 mg/l

Durante o período transcorrido entre o Estudo de 1987 e a data do presente estudo a quantidade de águas produzidas aumentou, o que em princípio, resultaria em maior diluição e, conseqüentemente, em queda dos teores dos componentes do efluente. Comparando-se a segunda e a terceira colunas das tabelas conclui-se que efetivamente ocorreu uma redução para grande parte dos parâmetros (isto só não fica mais patente porque foram tomados os valores máximos na terceira coluna).

No entanto um parâmetro importante acusa expressivo aumento: o teor de sulfetos. Isto pode ser devido à maior contribuição de águas de produção de poços mais ricos em sulfetos, e deverá merecer especial atenção nos cálculos a seguir. Em compensação, outro componente crítico, os fenóis, possuem atualmente teores significativamente inferiores aos da época do Estudo de 1987.

2.4 Alternativas do Projeto

Para o presente estudo apresentaram-se basicamente duas alternativas:

- A) estabelecimento de um novo emissário paralelo e de mesma extensão que o atual emissário, i.é: com descarte à mesma profundidade (6,5 m) e distância da costa (5500 m);
- B) descarte do efluente na posição da plataforma PUB-02, i.é: descarte a 19 km da costa à lâmina d'água de 13 m.

O Estudo de 1987 definiu o descarte das águas, então previstas de serem produzidas, através de um emissário cujos parâmetros básicos são os seguintes:

comprimento do emissário: 5.500 m

posição do ponto de descarte: UTM N = 9.442.250; UTM E = 791.500

lâmina d'água no local de descarte: 6,5 m

diâmetro da tubulação: 20"

vazão do efluente (máxima de projeto): 20.000 m³/d (0,231 m³/s)

componentes críticos do efluente: fenóis (3 mg/l) e sulfetos (0,4 mg/l)

dimensão da região de misturamento: 2.100 m.

A "dimensão de misturamento" acima é a distância na qual o componente crítico atinge a concentração máxima permissível para águas com a qualidade da classificação da Resolução No. 20 do CONAMA na qual foi enquadrada, nas condições mais desfavoráveis de vazão, intensidade e direção das correntes.

Ocorre que existe um duto de 26 polegadas de diâmetro, atualmente utilizado como gasoduto, que interliga o Polo à plataforma de produção PUB-02, localizada a 19 km da costa (coordenadas UTM N = 9.454.512 e UTM Y = 795.021) à lâmina d'água de 13 m. Esta tubulação poderia perfeitamente ser utilizada para transportar o efluente a ser descartado, ou seja: ela constituiria o duto do emissário, à extremidade *offshore* do qual seria apensado um sistema difusor.

Na alternativa A este duto seria seccionado a uma distância da costa correspondente ao comprimento desejado. Como explicado no Estudo de 1987 este comprimento é fundamentalmente condicionado pelo relevo submarino e dinâmica dos sedimentos de fundo

na região de Guamaré; é tal que permite atingir um local com profundidade ainda moderada, mas minimamente suficiente para garantir o misturamento dos efluentes no jato do difusor.

Este local, cujas coordenadas UTM foram acima assinaladas, corresponde a uma depressão com profundidade > 6m, situada numa calha existente entre a Restinga do Minhoto e a costa. Como o referido gasoduto atravessa esta depressão, o seu aproveitamento para o novo emissário implicaria seccioná-lo no ponto correspondente ao comprimento desejado. Desta maneira o descarte alternativo dar-se-ia a 250 m a leste do difusor do atual emissário.

Na alternativa B, à extremidade *offshore* do gasoduto de 26" na Plataforma PUB-02 seria adaptada uma seção de tubulação que a conectaria com o difusor a ser implantado no local. Neste caso as coordenadas UTM do ponto de descarte seriam as mesmas da plataforma (UTM N = 9.454.512 e UTM E = 795.021).

Considerando a maior distância da costa (19 km) e a profundidade mais de duas vezes maior (13 m), a alternativa B é indubitavelmente muito mais vantajosa do ponto de vista da preservação ambiental. As razões são múltiplas:

- disponibilidade de muito maior volume d'água para o misturamento no jato, i.é: maior diluição no campo próximo da descarga,
- ídem, no caso de correntes convergentes para a costa, i.é: maior diluição no campo afastado da descarga,
- maior renovação das águas de diluição em locais mais afastados da costa e com maiores profundidades,
- menor interferência da ação amortecedora da costa sobre os agentes hidrodinâmicos responsáveis pela dispersão dos efluentes.

Esta última circunstância implica a possibilidade da pluma expandir-se a uma maior taxa à medida que se afasta do ponto de descarte. Considerações teóricas e semi-empíricas prevêm leis que governam este fenômeno com as seguintes expressões [Grace,1978]:

$$\text{pequenas distâncias da costa:} \quad D = A L$$

$$\text{grandes distâncias da costa:} \quad D = A L^{4/3}$$

onde D é o coeficiente de dispersão, A uma constante e L a dimensão representativa da pluma. Ou seja, em condições de oceano aberto a pluma expande-se, e conseqüentemente dilui-se, muito mais rapidamente.

A existência do duto com este comprimento evita os maiores custos de implantação nos quais se incorreria caso fosse lançado um novo emissário. Por outro lado, os custos operacionais (manutenção e bombeamento) seriam superiores na situação da alternativa B.

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA DILUIÇÃO

3.1 Fatores de Diluição

A função básica de um emissário submarino é a de descartar no oceano efluentes com algum grau de tratamento prévio, de uma maneira tal que seja minimizado o impacto ambiental. Este impacto está relacionado com a introdução de materiais que sejam estranhos ou que, embora presentes no oceano, não ocorram nele na mesma proporção (concentrações, intensidades, etc.) em que estão presentes no efluente.

Isto é obtido jogando-se fundamentalmente com duas possibilidades:

- afastando da costa o ponto de descarte,
- promovendo uma eficiente mistura entre o efluente e a água do mar logo à saída da descarga.

A segunda possibilidade acima está em parte ligada à primeira, pois quanto maior o afastamento da costa, maiores profundidades estarão disponíveis para uma diluição eficiente já no jato da descarga e mais propícias serão as condições de renovação das águas que efetuam a diluição.

No entanto, mesmo para iguais condições geométricas e hidrodinâmicas no ponto de descarga, a eficiência da diluição pode ser incrementada por técnicas de engenharia que consistem no projeto de um adequado difusor. Este apêndice do sistema cria artificialmente uma turbulência adicional no(s) jato(s) efluente(s) que, em conjunção com os efeitos gravimétricos devidos à diferença de densidade entre o efluente e o oceano, eleva o grau inicial da diluição de duas ordens de grandeza em relação ao efeito da simples turbulência natural.

A diluição requerida para se conformar as concentrações efluentes aos padrões legais previstos pelas normas ambientais é medida pelo fator de diluição, S , definido pela relação:

$$S = \frac{c_0}{c_N} \quad (3.1)$$

onde c_0 designa a concentração de um determinado componente no efluente e c_N é a concentração máxima deste mesmo componente prevista pela norma aplicável.

Tal como definido na Equação (3.1), S representa um fator de diluição global, ou seja incorpora a diluição obtida tanto no campo próximo como no campo afastado da descarga, as quais envolvem mecanismos bastante distintos.

3.2 Diluição no Campo Próximo da Descarga

O campo próximo da descarga compreende aquela parte do volume do oceano atingido pelos efluentes na qual os mecanismos de transporte induzidos pelo emissário/difusor prevalecem na diluição obtida. Estes mecanismos de transporte induzidos pelo emissário são devidos ao fluxo de volume por êle descarregado, que possui quantidade de movimento (*momentum*) e densidade diferentes das do corpo receptor. A diferença de densidade entre o efluente e as águas oceânicas introduz um efeito de “boiância”, que pode ser positivo ou negativo dependendo de ser a densidade do efluente menor ou maior, respectivamente do que a da água do mar.

O *momentum* do jato emergente introduz agudos gradientes de velocidade à superfície limite entre o jato e a água ambiente, os quais provocam instabilidades hidrodinâmicas que criam torvelinhos (*eddies*) e assim a água é progressivamente introduzida no núcleo do jato, diluindo-o. Este efeito é restrito às proximidades da descarga, pois a turbulência criada é tão intensa que com a rápida diluição o fluxo de *momentum* (razão entre o *momentum* e a área da secção transversal do jato) decresce rapidamente.

Contudo, quando isto se dá, o diferencial de densidades ainda permanece suficientemente significativo de modo que o jato de efluente se desloca em relação à água do mar sob a influência da gravidade. Isto mantém os gradientes de velocidade nos limites jato/ambiente e a diluição é reproduzida.

Um outro parâmetro importante no campo próximo é a intensidade das correntes oceânicas, que interagem com o jato, assim proporcionando uma contribuição adicional para a diluição nesta fase.

A avaliação da magnitude da diluição no campo próximo sob efeito das correntes é hoje universalmente baseada no trabalho de Roberts. Este pesquisador desenvolveu um modelo com fundamento na análise dimensional do fenômeno e em calibração em modelos reduzidos [Roberts, 1979]. Os grupos adimensionais que regem o fenômeno são:

- a) um número de Froude (razão entre os efeitos da inércia e da gravidade), reduzido (i.é: que leva em conta o diferencial entre as densidades do jato e do ambiente):

$$F = \frac{u_a^3 L_d}{\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) g Q} = \frac{u_a^3}{g'_0 q} \quad (3.2)$$

onde:

u_a = intensidade da corrente

L_d = comprimento do difusor

$\Delta\rho$ = diferença de densidade entre o efluente e a água do mar

ρ_0 = densidade inicial do efluente

g = aceleração da gravidade

$g'_0 = (\Delta\rho/\rho_0) g$ = gravidade reduzida, na descarga

Q = vazão total do efluente

$q = Q/L_d$ = vazão do efluente por unidade de comprimento do difusor.

b) a razão entre a vazão total do efluente e a vazão da água do mar transitando sobre o difusor:

$$\frac{u_a H L_d}{Q} = \frac{u_a H}{q} \quad (3.3)$$

onde H é a espessura da lâmina d'água sobre o difusor.

c) o ângulo θ entre a linha do difusor e a direção das correntes.

A análise de Roberts definiu uma forma para a função;

$$\frac{S_m q}{u_a H} = f(F, \theta) \quad (3.4)$$

onde S_m é a diluição mínima (que ocorre no eixo do jato), quando este atinge a superfície. Os resultados da calibração em modelo reduzido estão mostrados na Figura 3.1.

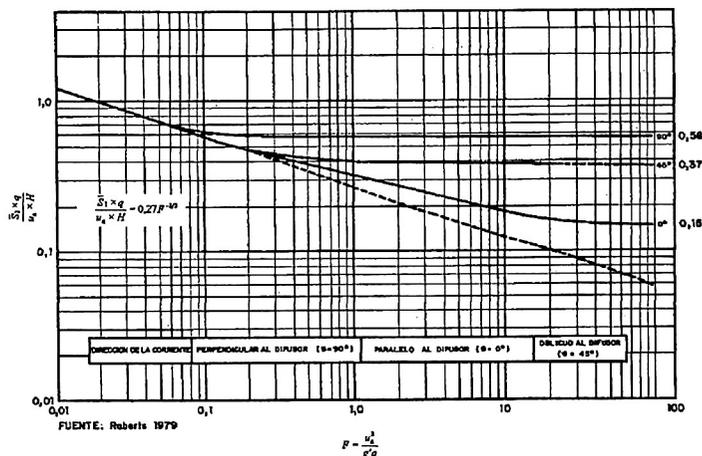


Fig. 3.1 - Diluição mínima na superfície, para um difusor linear descarregando sob corrente

A diluição média na secção transversal do jato, \bar{S}_1 , está relacionada com a diluição mínima através da expressão [Fischer, *et.al.*,1979]:

$$\bar{S}_1 = \sqrt{2} S_m \quad (3.5)$$

que supõe uma distribuição de forma gaussiana para as concentrações dos componentes no eixo do jato aflorando à superfície.

Em situação de calmarias a análise acima obviamente não se aplica. Esta seria a situação mais desfavorável e é pouco provável que ocorra na costa de Guamaré, visto sempre haver uma componente de corrente para W, devido à ação do vento e das ondas.

O cálculo da diluição nestas circunstâncias é bem mais acurado, posto que baseado em uma série de estudos e medições muito mais extensos. O valor da diluição é então dado pela expressão [Fischer, *et.al.*,1979]:

$$S_m = 0,34 \left(g'_0 q \right)^{1/3} \frac{0,7 H}{q} \quad (3.6)$$

À diluição obtida no campo próximo da descarga se dá o nome de diluição primária. A sua magnitude é aquela que pode ser controlada pelas técnicas de engenharia, ou especificamente pelo projeto do emissário e do difusor. Esta diluição primária é proeminente: cerca de 90% da diluição total obtida se dá no campo próximo.

Após aflorar, o jato passa a ser governado pelos agentes hidrodinâmicos ambientais. O campo de efluentes boiantes ocupa então uma camada na superfície do oceano com espessura h_a , dada pela expressão [Fischer, *et.al.*,1979]:

$$h_a = (1 - 0,67) H \quad (3.7)$$

Esta expressão, obtida empiricamente, declara que a camada da pluma de efluente ocupa 1/3 da coluna d'água. Neste ponto, a pluma já adentra o campo afastado da descarga.

3.3 Diluição no Campo Afastado da Descarga

Ao atingir a superfície do mar o jato emergente do emissário encontra uma barreira que interrompe sua propagação sob o efeito do diferencial de densidades. A partir daí ele passa a

estar sujeito unicamente aos agentes hidráulicos ambientais: ventos, ondas e correntes. É a interação destes agentes, com destaque especial para as correntes, que se encarrega do subsequente transporte da pluma, ou seja: de seu espalhamento e diluição no que se convencionou denominar campo afastado da descarga.

A diluição obtida no campo afastado é denominada diluição secundária. Os agentes hidráulicos naturais acima nomeados concorrem para compor os dois mecanismos responsáveis pelo transporte no campo afastado: a) a turbulência natural do oceano e os efeitos cizalhantes devidos aos gradientes verticais das correntes compõem o efeito da dispersão; b) as correntes ao afastarem a pluma do ponto de descarga efetuam o efeito da advecção.

A equação de balanço de massa que descreve o transporte dos efluentes sob a influência composta da dispersão e da advecção, para a situação de uma descarga contínua e de condições homogêneas do oceano, é:

$$u_a \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \frac{\lambda c}{h_a} \quad (3.8)$$

onde:

c = concentração do efluente

u_a = velocidade da corrente, atuando na direção x

D = coeficiente de dispersão na direção y , transversal à da corrente

λ = taxa de decaimento de um constituinte não conservativo do efluente (desaparecendo segundo uma cinética de primeira ordem).

h_a = dimensão vertical do campo de efluentes.

Ocorre que o coeficiente de dispersão não é uma grandeza constante; na realidade a dispersão aumenta à medida que a pluma se expande e passa a abranger em seu interior vórtices da turbulência oceânica cada vez maiores. Efetivamente, o coeficiente de dispersão corresponde à taxa de crescimento do espalhamento da pluma; espalhamento este que é medido pela variância da distribuição de concentrações na pluma. Ou seja:

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2}{dt} = \frac{1}{2} u_a \frac{d\sigma^2}{dx} \quad (3.9)$$

onde o coeficiente $\frac{1}{2}$ dá conta do fato de que embora a dispersão se dê em ambos os sentidos da advecção (para montante e para jusante), somente o avanço para jusante contribui para a diluição e decorrente variação da concentração c .

Por outro lado, considerações teóricas a respeito dos mecanismos de turbulência oceânica e um grande número de medições experimentais em campo [Yudelson,1967], determinaram que o coeficiente de dispersão é dado por uma expressão do tipo:

$$D = A \sigma^n \quad (3.10)$$

onde A e n são dois coeficientes cujos valores dependem das condições oceânicas locais e que carecem ser determinados experimentalmente.

Combinando as Equações (3.9) e (3.10), obtém-se uma equação diferencial cuja solução, supondo a condição inicial correspondente a um desvio padrão σ_0 da pluma no início do processo, é:

$$\sigma = \left[(2-n) \frac{A}{u_a} x + \sigma_0^{2-n} \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (3.11)$$

Deste modo, a solução da equação da advecção-dispersão, Equação (3.8), com D dado pela Equação (3.10) e σ pela Equação (3.11), é:

$$c = c_0 \frac{\sigma_0}{\sigma} \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma^2} - \frac{\lambda x}{u_a h_a} \right] \quad (3.12)$$

onde c_0 é a concentração no início do campo afastado.

A concentração máxima na pluma, c_{max} , após um determinado afastamento x do ponto de descarga, é obtida no seu eixo, i.é: em $y = 0$. Portanto, de acordo com a Equação (3.12), seu valor é:

$$c_{max} = \frac{c_0 \sigma_0}{\sigma} \exp \left(-\frac{\lambda x}{u_a h_a} \right) \quad (3.13)$$

Sendo a concentração média na secção transversal da pluma: $\bar{c} = c_{max} / \sqrt{2}$, pode-se escrever para a diluição média, \bar{S} , à distância x do ponto de descarga:

$$\bar{S}_2 = \frac{c_0}{\bar{c}} = \frac{\sqrt{2} c_0}{c_{max}} = \sqrt{2} \frac{\sigma}{\sigma_0} \exp\left(\frac{\lambda x}{u_a h_a}\right) \quad (3.14)$$

No entanto, o valor c_{max} assim estimado corresponde a uma das muitas possibilidades de realização do movimento turbulento no oceano. Isto porque a pluma real não exibe um eixo retilíneo paralelo ao sentido da advecção. Ela sofre um constante meandramento gerado pela turbulência do ambiente (tal como se vê nos penachos de chaminés). Deste modo \bar{c} é uma medida muito mais realista em termos do impacto dos efluentes.

O desvio padrão inicial, σ_0 , pode ser estimado usando-se a fórmula [Fischer *et.al.*, 1979; Harleman, 1977]:

$$\sigma_0 = \frac{B}{2\sqrt{3}} = \frac{1,2}{\sqrt{12}} (g' q)^{1/3} \frac{L_d}{u_a} \quad (3.15)$$

onde B é a largura inicial da pluma no campo afastado e L_d é o comprimento do difusor. O fator $2\sqrt{3}$ resulta da transformação de uma distribuição constante de concentrações em uma gaussiana.

3.4 Diluição Global

A diluição total, S_T , que sofrerão os constituintes do efluente é o resultado da ação superposta das diluições no campo próximo e no campo afastado:

$$S_T = \bar{S}_1 \cdot \bar{S}_2 \quad (3.16)$$

Ela é portanto obtida combinando as Equações (3.5), (3.14) e (3.15):

$$S_T = \frac{u_a H}{q} f(F, \theta) \cdot \left[5,774 (g' q)^{-1/3} \frac{u_a}{L_d} \right] \sigma \exp\left(\frac{\lambda x}{u_a h_a}\right) \quad (3.17)$$

Os parâmetros que aparecem na expressão acima são determinados com os dados de campo obtidos no local.

4. DEFINIÇÃO DA ALTERNATIVA DE DESCARTE

Conforme comentado no Capítulo 2, duas alternativas de projeto se apresentam:

- A) estabelecimento de um novo emissário paralelo e de mesma extensão que o atual emissário;
- B) descarte do efluente na posição da plataforma PUB-02.

Trabalhando com o gráfico da Figura 3.1, pode-se comparar a eficácia, em termos de diluição primária, de dois emissários com mesma vazão e comprimento de difusor, mesmas condições hidráulicas (intensidade e direção das correntes, diferencial de densidades), mas diferentes espessuras da lâmina d'água.

Os valores dos parâmetros usados nesta comparação são aqueles determinados pelo Estudo de 1987, com exceção da vazão de descarga, para a qual se emprega o valor atual de projeto. Estes valores são:

$$Q = 47.000 \text{ m}^3/\text{d} = 0,5440 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$u_a = 0,18 \text{ m/s}$$

$$L_d = 49 \text{ m}$$

$$\rho_{mar} = 1022,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_0 = 1000,0 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,8067 \text{ m/s}^2$$

Os parâmetros derivados são portanto:

$$q = Q/L_d = 0,5440/49 = 0,0111 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$g_0' = (\Delta\rho/\rho)g = [(1022,2-1000)/1000] \times 9,8067 = 0,218 \text{ m/s}^2$$

$$F = u_a^3 L_d / (g_0' Q) = [(0,18)^3 \times 49] \div [0,218 \times 0,5440] = 2,41$$

Para a situação em que $\theta = 90^\circ$ e $F = 2,41$, a linha correspondente na Figura 3.1 fornece a relação:

$$\frac{S_m q}{u_a H} \approx 0,58 \quad (4.1)$$

Deste modo:

$$\bar{S}_1 = \sqrt{2} S_m \approx 0,82 \frac{u_a H}{q} = \frac{0,82 \times 0,18}{0,0111} H = 13,3 H$$

Os valores de H nas duas alternativas são:

Alternativa A: H = 6,5 m

Alternativa B: H = 13 m

O que conduz às seguintes diluições primárias:

Alternativa	H	\bar{S}_1
A	6,5 m	86 x
B	13 m	173 x

Mas a comparação não deve parar aí pois o afastamento em relação à costa ainda beneficiará a alternativa B. No caso (muito improvável) de uma corrente permanentemente convergente para a costa, a pluma teria uma distância três vezes e meia maior (19 km / 5,5 km) para a diluição secundária. Este fator está embutido na variável σ da Equação (3.17) de uma forma complexa e o seu efeito será avaliado mais à frente.

A comparação acima, supondo valores médios para a intensidade da corrente e da vazão, é válida para quaisquer outros valores destas variáveis, uma vez que $\bar{S}_1 = 0,82 (u_a/q) H$.

Com base nestes resultados, e levando em conta já existir um duto ligando a PUB-02 à costa (o que reduz os custos de implantação), definimos que:

O esquema a ser adotado para o descarte é a Alternativa B - descarte na plataforma PUB-02

5. DEFINIÇÃO DOS FATORES DE DILUIÇÃO

No Capítulo 2 estão definidos os parâmetros do efluente e do corpo receptor. Para se calcular os valores dos fatores de diluição, S, requeridos, basta comparar as Tabelas 2.4 a 2.6. Isto é feito a seguir:

Tabela 5.1 - Cálculo dos fatores de diluição com base na resolução No. 20 do CONAMA ⁽¹⁾

Parâmetro	Artigo 21	Classe 5	Efluente	S
O&G	20	0,2 ⁽²⁾	30	150
DBO ₅	-	5	245 ⁽³⁾	49
pH	5 a 9	6,5 a 8,5	7,4	-
Amônia	5,0	0,4	3,0	7,5
Bário	5,0	1,0	1,5	1,5
Cádmio	0,2	0,005	0,1	20
Chumbo	0,5	0,01	0,22	22
Cobre	1,0	0,05	0,03	0
Cromo VI	0,5	0,05	0,01	0
Índice de fenóis	0,5	0,001	1,2	1200
Ferro	15,0	0,3	0,7	2,3
Fluoretos	10,0	1,4	3,3	2,4
Manganês	1,0	0,1	0,3	3
Mercúrio	0,01	0,0001	0,0002	2
Níquel	2,0	0,1	0,08	0
Sulfetos	1,0	0,002	8,0	4000
Zinco	5,0	0,17	0,12	0

(1) - unidade de concentração: mg/l

(2) - critério adotado para "virtualmente ausentes", cf. arrazoado da Seção 2.2.

(3) - dado do Estudo de 1987

O fator de diluição $S = c_0/c_{\text{classe } 5}$, designa a magnitude da diluição total a ser obtida para se enquadrar os efluentes nas águas de Classe 5. É obtido dividindo-se os valores da quarta coluna pelos da terceira coluna.

Algumas observações são cabíveis com relação à tabela acima:

- $S = 0$ denota que o efluente já é descartado com um teor inferior ao permitido pela norma.
- Os teores de O&G, fenóis e sulfetos no efluente bruto estão superiores aos previstos no Artigo 21. Contudo, reiteramos que os valores na quarta coluna são os valores máximos observados; o problema não se pronunciando com os teores médios.
- De uma maneira geral os fatores de diluição são modestos em relação aos níveis usualmente alcançáveis nos emissários submarinos. Particularmente os teores de metais pesados não colocam maiores preocupações.
- Os maiores fatores de diluição são os necessários para O&G, fenóis e sulfetos, especialmente para os dois últimos.
- Deve-se ter em conta que os três constituintes acima são degradáveis, embora em graus diferentes (uma avaliação da degradação dos fenóis foi feita no Estudo de 1987).
- Os dois efluentes críticos na presente situação são, em ordem de importância, os sulfetos e os fenóis.

6. CÁLCULO DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO PRÓXIMO

Tendo sido adotado o esquema de descarte na plataforma PUB-02, e com base na metodologia descrita no Capítulo 3, passamos a seguir a expor os valores das diluições esperadas no campo próximo da descarga.

6.1 Diluição Primária

A diluição primária média no campo próximo, quantificada pelo fator de diluição \bar{S}_1 , é aquela obtida no jato da descarga do difusor, ou seja:

$$\bar{S}_1 = \frac{c_0}{\bar{c}_{CP}} \quad (6.1)$$

onde:

c_0 = concentração dos efluentes na saída do difusor

\bar{c}_{CP} = concentração média na secção transversal do jato quando este aflora na superfície.

O valor de \bar{S}_1 é obtido do gráfico da Figura 3.1. Para trabalhar com este gráfico é necessário dispor-se do valor da vazão por metro linear: $q = Q/L_d$. Para tanto é preciso fixar o comprimento L_d do difusor.

6.2 Características Básicas do Difusor

O valor de L_d corresponde à distância entre os bocais de descarga extremos. Sua definição está condicionada a três critérios.

1º critério:

Exige que os bocais tenham um espaçamento entre si de tal grandeza que evite a interpenetração dos jatos ascendentes, pois deste modo o misturamento destes com a água do mar fica maximizado. Uma aproximação das dimensões laterais de um jato governado pelo diferencial de densidades (na fase ascendente em que os efeitos do *momentum* de descarga já foram superados) é dada pela expressão [Fischer *et.al.*, 1979]:

$$b_w = 0,25 \frac{z}{\sqrt{2\pi}} \quad (6.2)$$

onde:

b_w = medida da meia-largura da pluma ascendente (distância do eixo à qual a concentração cai de um fator $e^{-1} = 1/2,72 = 0,37$ em relação à concentração máxima).

z = distância do ponto de descarga em que é atingida a meia-largura b_w .

No presente contexto interessa a largura total, i.é: duas vezes a estimativa acima. Além disto, sendo a distribuição das concentrações na pluma ascendente de forma gaussiana, verifica-se que b_w , tal como definido acima, é equivalente a um desvio-padrão, e contém apenas 68 % da massa dos efluentes. Uma definição mais realista da largura deveria ser de pelo menos três desvios-padrão, pois assim se inclui 95 % da massa e atinge-se uma distância do eixo à qual a concentração reduz-se a 0,005 em relação à concentração máxima. Deste modo, b_w dado pela Equação (6.2) deve ser multiplicado por um fator $2 \times 3 = 6$.

Como nos interessa a distância z correspondente ao final do percurso ascendente, e sabendo que a espessura do campo de efluentes na superfície é dado pela Equação (3.7), podemos transformar (6.2) em:

$$b_w = 2 \times 3 \times \frac{0,25}{\sqrt{2\pi}} [H - (1 - 0,67) H] = 0,4 H \quad (6.3)$$

Deste modo, o espaçamento calculado por este critério é:

$$b_w = 0,4 \times 13 = 5,2 \text{ m}$$

Embora o critério seja conceitualmente correto, a Equação (6.2) não representa acuradamente a situação enfocada, posto que foi derivada para águas calmas. Sendo assim, considera-se que este primeiro critério estabelece um mínimo para o espaçamento entre bocais.

2º. critério:

Exige a obtenção de um fator de diluição compatível com as exigências da norma ambiental aplicável. Da Equação (4.1) tem-se:

$$\bar{S}_1 = \sqrt{2} S_m \approx 0,82 \frac{u_a H}{q} = 0,82 \frac{u_a H L_d}{Q} = 0,82 \frac{u_a H n b_w}{Q} \quad (6.4)$$

onde n é o número de bocais de descarga. Fazendo-se $n = 3$, por razões que serão explicadas mais adiante, pode-se reorganizar (6.4) para a forma:

$$b_w = 0,41 \frac{\bar{S}_1 Q}{u_a H} \quad (6.5)$$

No presente caso, com vistas a obter-se uma diluição primária $\bar{S}_1 \geq 150$, de forma tal que todos os parâmetros à exceção dos sulfetos e fenóis já se enquadrem nas exigências da classe 5 ainda no campo próximo, e usando-se os valores definidos no Capítulo 4 obtém-se:

$$b_w = \frac{0,41 \times 150 \times 0,544}{0,18 \times 13} = 14,3 \text{ m}$$

que é um valor superior ao do 1º. critério, suposto como limiar inferior.

3º. critério:

Checa a validade dos resultados obtidos com os dois critérios anteriores[Hernandez Muñoz, 1992]. Êle verifica se a diluição primária \bar{S}_1 por êles calculada não excede a máxima diluição fisicamente possível na proximidade da saída, ou seja: a diluição que só seria alcançada no caso em que as correntes renovassem incessantemente a água no entorno da descarga, evitando um misturamento do jato efluente com águas já contaminadas. Uma tal diluição máxima, na situação de corrente perpendicular ao alinhamento do difusor, corresponde a:

$$\bar{S}_{1,max} = \frac{u_a L_d H}{Q} = \frac{u_a H}{q} \quad (6.6)$$

Para se alcançá-la é imprescindível que a espessura da lâmina d'água seja compatível com a diluição desejada. Na situação contemplada no presente estudo, em que se tem três jatos não emergentes a Equação (6.6) pode ser transformada em:

$$\bar{S}_{1,max} = \frac{u_a n b_w H}{Q} \quad (6.7)$$

Fazendo-se a verificação com os valores pertinentes:

$$\bar{S}_{1,max} = \frac{0,18 \times 3 \times 14,3 \times 13}{0,544} = 184,5 > 150$$

Sendo $\bar{S}_1 < \bar{S}_{1,max}$, fica então assegurado que se disporá de suficiente água não contaminada para alcançar a diluição pretendida.

Com estes três critérios pode-se fixar o comprimento do difusor, tal que $L_d > n.b_w$. Levando em conta a eventualidade de correntes não alinhadas com a normal ao difusor, é aconselhável adotar-se um coeficiente de segurança para L_d . Deste modo fixaremos:

número de bocais de descarga: $n = 3$

comprimento total do difusor: $L_d = 60$ m

espaçamento entre os bocais: $b_w = 60 \div (3 - 1) = 30$ m

Com este valor de L_d e estabelecendo um coeficiente de segurança de 2/3 que leva em conta as correntes não normais ao alinhamento do difusor, a diluição primária máxima possível é:

$$\bar{S}_{1,max} = \frac{2}{3} \times \frac{60 \times 13 \times u_a}{0,544} = 956 u_a \quad (6.8)$$

As considerações acima já correspondem a parte do dimensionamento do difusor, a qual será complementada adiante.

6.3 Estimativas da Diluição Primária

De acordo com a Equação (3.4), a diluição primária \bar{S}_1 é função da intensidade e direção das correntes, ou seja de F e de θ . Dados Q , L_d e H , o gráfico da Figura (3.1) fornece:

$$S_m = \frac{u_a H L_d}{Q} f\left(\frac{u_a^3 L_d}{g'_0 Q}, \theta\right) \quad (6.9)$$

que, com os valores anteriormente definidos para:

$$Q = 0,544 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L_d = 60 \text{ m}$$

$$H = 13 \text{ m}$$

$$g'_0 = 0,218 \text{ m/s}^2,$$

e considerando que $\bar{S}_1 = \sqrt{2} S_m$, transforma-se em:

$$\bar{S}_1 = 2028 u_a f(506 u_a^3, \theta) \quad (6.10)$$

Na Seção 2.1 foram assinalados os seguintes valores representativos das intensidades de corrente para fins de projeto:

$$u_{a,\min} = 0,09 \text{ m/s}$$

$$u_{a,\text{med}} = 0,18 \text{ m/s}$$

$$u_{a,\max} = 0,32 \text{ m/s}$$

Assim, entrando no gráfico da Figura 3.1, obtém-se os resultados da diluição primária indicados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Valores do fator de diluição primária

u_a	θ	\bar{S}_1
0,09 m/s	0°	76
	45°	77
	90°	86 (*)
0,18 m/s	0°	95
	45°	132
	90°	172 (*)
0,32 m/s	0°	110
	45°	236
	90°	306 (*)

(*) - o valor calculado excedeu $\bar{S}_{1,max}$ determinado pela Equação (6.7).

Verifica-se destes resultados que, mesmo por ocasião de uma corrente a 45° com o alinhamento do difusor (o qual estará normal à direção mais freqüente das correntes), ainda se obterá fatores de diluição primária superiores a 100 vezes com as intensidades mais habituais ($u_a \approx 0,18$ m/s).

Verifica-se também que o valor do fator de diluição primária mais freqüente, $\bar{S}_1 = 150$, garante que o teor de fenol ao final do campo próximo já tenha caído para:

$$1,2 \div 172 = 0,007 \text{ mg/l} < 0,02 \text{ mg/l}$$

obedecendo-se assim o critério estabelecido na Seção 2.2.

No caso de ocorrer calmaria ($u_a = 0$), a diluição no eixo do jato é calculada pela Equação (3.6):

$$\begin{aligned} S_m &= 0,34 \left(g'_0 \frac{Q}{L_d} \right)^{1/3} \frac{0,7 H L_d}{Q} = \\ &= \frac{0,34 \times 0,7 \times 13 \times 60}{0,544} \left(\frac{0,218 \times 0,544}{60} \right)^{1/3} = 42,8 \end{aligned}$$

que corresponde à diluição média no jato:

$$\bar{S}_1 = \sqrt{2} S = 42,8 \sqrt{2} = 60,5$$

Esta seria a menor diluição média na superfície do jato aflorante (ao final do campo próximo) obtida nas condições de Guimarães:

$$\bar{S}_{1,min} = 60$$

Disto pode-se concluir que a diluição primária no emissário proposto terá as seguintes magnitudes:

$$\text{valor mais freqüente: } \bar{S}_1 = 172$$

$$\text{faixa limite: } 60 \leq \bar{S}_1 \leq 306$$

7. CÁLCULO DO FATOR DE DILUIÇÃO NO CAMPO AFASTADO

Usando a metodologia também descrita no Capítulo 3, serão em seguida calculados os fatores das diluições esperadas no campo afastado da descarga para o descarte na plataforma PUB-02.

A diluição secundária média no campo afastado é aquela obtida na pluma que se forma na camada superior do oceano após o jato ter sido interceptado pela superfície do mesmo. Ela é quantificada pelo fator \bar{S}_2 , definido como:

$$\bar{S}_2 = \frac{\bar{c}_{CP}}{\bar{c}_{CA}} \quad (7.1)$$

onde \bar{c}_{CA} é a diluição média na secção transversal da pluma de efluentes no campo afastado. Para calculá-lo é antes de mais nada necessário conhecer a espessura vertical da pluma.

7.1 Espessura da Camada de Efluentes no Campo Afastado

A dimensão vertical da pluma de efluentes no campo afastado é calculada por meio da Equação (3.7)

$$h_a = (1 - 0,67)H = 4,3 m$$

A espessura acima corresponde ao terço superior da lâmina d'água no local do descarte. Sendo esta dimensão muito menor do que as dimensões horizontais da pluma, os modelos bidimensionais supõem, com relativa precisão, que a pluma é homogênea na vertical.

7.2 Estimativa da Diluição Secundária

O cálculo de \bar{S}_2 é obtido com o emprego da formulação apresentada no Capítulo 3. Neste capítulo foi visto que a dispersão no campo afastado é governada pelo coeficiente de dispersão que tem a forma: $D = A \sigma^n$. As constantes empíricas A e n foram determinadas pelos testes com traçadores no Estudo de 1987. No entanto, o afastamento da descarga em relação à costa proposto no presente estudo, situa o descarte em região de oceano aberto, para a qual vale $n = 4/3$ [Yudelson, 1967]. Desta maneira consideraremos:

$$A = 0,0075 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1} \text{ (valores médios do Estudo de 1987)}$$

$$n = 4/3 = 1,333$$

A Equação (3.14) fornece a expressão para a diluição média na secção transversal da pluma a uma distância x do início do campo afastado. A variância no campo afastado, σ_0 , que figura nesta expressão é dada pela Equação (3.11). Combinando-se as duas equações, tem-se:

$$\bar{S}_2 = \frac{\sqrt{2}}{\sigma_0} \left[(2-n) \frac{A}{u_a} x + \sigma_0^{2-n} \right]^{\frac{1}{2-n}} \exp\left(\frac{\lambda x}{u_a h_a}\right) \quad (7.2)$$

A variância no início do campo afastado, σ_0 , é dada pela Equação (3.15), que é aqui reescrita da seguinte forma:

$$\sigma_0 = \frac{1,2}{\sqrt{12}} \left(g'_0 \frac{q}{\text{sen } \theta} \right)^{1/3} \frac{L_d \text{sen } \theta}{u_a} \quad (7.3)$$

onde o fator $\text{sen } \theta$ foi inserido para levar em conta o efeito de correntes não perpendiculares ao difusor. Como sempre se tem um desvio padrão inicial, deve-se comparar σ_0 calculado acima com $2 b_w$, conforme definido na Seção 6.1, 1º. critério. Quando o primeiro for inferior é porque se atingiu a situação de correntes aproximadamente paralelas ao difusor. Nestes casos σ_0 é estimado pela Equação (3.15), suprimindo-se o coeficiente de conformação $2\sqrt{3} = \sqrt{12}$.

Deste modo, para $\theta \geq 45^\circ$:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{1,2}{\sqrt{12}} (g'_0 q)^{1/3} \frac{L_d \text{sen}^{2/3} \theta}{u_a} = \\ &= \frac{1,2}{\sqrt{12}} \left(0,218 \times \frac{0,544}{60} \right)^{1/3} \times \frac{60 \text{sen}^{2/3} \theta}{u_a} = 2,6 \frac{\text{sen}^{2/3} \theta}{u_a} \end{aligned}$$

que, substituída em (7.2) juntamente com os valores dos demais parâmetros que nela intervêm, fornece:

$$\bar{S}_2 = 0,54 \frac{u_a}{\text{sen}^{2/3} \theta} \left[0,005 \frac{x}{u_a} + 1,89 \left(\frac{\text{sen}^{2/3} \theta}{u_a} \right)^{2/3} \right]^{1,5} \exp\left(\frac{\lambda x}{4,3 u_a}\right) \quad (7.4)$$

E quando se tem $\theta = 0$:

$$\sigma_0 = 1,2 (g' q)^{1/3} \frac{2 b_w}{u_a} = \frac{2,81}{u_a} \quad (7.5)$$

$$\bar{S}_2 = 0,5 u_a \left[0,005 \frac{x}{u_a} + \frac{1,99}{u_a^{2/3}} \right]^{1,5} \exp\left(\frac{\lambda x}{4,3 u_a}\right) \quad (7.6)$$

Para constituintes conservativos do efluente, $\lambda = 0$ e o termo exponencial no lado direito das Equações (7.4) e (7.6) acima desaparece. Os dois constituintes críticos, sulfetos e fenóis, não são conservativos no ambiente marinho. Porém, como se desconhece o valor da taxa de desaparecimento, λ , válida para estes constituintes nas condições do local, os cálculos serão feitos supondo-os não degradáveis. Isto obviamente confere um caráter conservativo aos resultados.

Os resultados obtidos fazendo-se os cálculos acima indicados são mostrados nas Tabelas 7.1 a 7.3.

Tabela 7.1 - Valores do fator de diluição secundária - correntes mais freqüentes ($u_a = 0,18$ m/s)

θ	x (m)	\bar{S}_2
90°	10	1,50
	50	1,92
	100	2,5
	200	3,8
	500	8,6
	750	13,5
	1000	19,0
	2000	46,9
45°	10	1,52
	50	2,02
	100	2,7
	200	4,2
	500	10,1
	750	16,2
	1000	23,1
	2000	57,8
0°	10	1,49
	50	1,90
	100	2,4
	200	3,7
	500	8,1
	750	12,7
	1000	17,9
	2000	43,7

Tabela 7.2 - Valores do fator de diluição secundária - correntes mais fracas ($u_a = 0,09$ m/s)

θ	x (m)	\bar{S}_2
90°	10	1,53
	50	2,07
	100	2,8
	200	4,5
	500	11,0
	750	17,7
	1000	25,4
	2000	64,3
45°	10	1,55
	50	2,19
	100	3,1
	200	5,1
	500	13,1
	750	21,5
	1000	31,1
	2000	79,7
0°	10	1,52
	50	2,03
	100	2,7
	200	4,3
	500	10,4
	750	16,7
	1000	23,8
	2000	59,9

Tabela 7.3 - Valores do fator de diluição secundária - correntes mais intensas ($u_a = 0,32$ m/s)

θ	x (m)	\bar{S}_2
90°	10	1,49
	50	1,83
	100	2,3
	200	3,3
	500	7,0
	750	10,8
	1000	15,1
	2000	36,2
45°	10	1,50
	50	1,90
	100	2,4
	200	3,7
	500	8,2
	750	12,9
	1000	18,2
	2000	44,5
0°	10	1,48
	50	1,81
	100	2,2
	200	3,2
	500	6,7
	750	10,2
	1000	14,2
	2000	33,9

8. DILUIÇÃO GLOBAL E ZONA DE MISTURAMENTO

8.1 Fatores de Diluição Global

A diluição global a uma dada distância do difusor é a composição das diluições no campo próximo e no campo afastado da descarga: $S_T = \bar{S}_1 \cdot \bar{S}_2$. Os resultados numéricos de S_T são obtidos usando-se os valores das Tabelas 6.1, 7.1, 7.2 e 7.3.

Os valores obtidos nestes cálculos são sintetizados na Tabela 8.1 e podem ser visualizados na Figura 8.1.

Tabela 8.1 - Valores do fator de diluição global S_T

u_a (m/s)	0,18			0,09			0,32		
	90°	45°	0°	90°	45°	0°	90°	45°	0°
x (m)									
10	258	201	142	132	119	116	456	354	163
50	330	267	181	178	169	154	560	448	199
100	430	356	232	242	237	208	701	578	246
200	650	561	347	389	396	330	1013	868	353
500	1476	1336	772	948	1012	791	2157	1945	738
750	2315	2133	1205	1526	1654	1267	3308	3040	1123
1000	3271	3045	1697	2189	2392	1812	4611	4286	1560
2000	8060	7634	4154	5530	6135	4553	11086	10509	3732

As tendências não são perfeitamente uniformes. Estes comportamentos se devem a que a diluição primária sempre fica limitada abaixo do valor teórico pela quantidade de água não contaminada disponível, quando $\theta = 90^\circ$, conforme assinalado na Tabela 6.1.

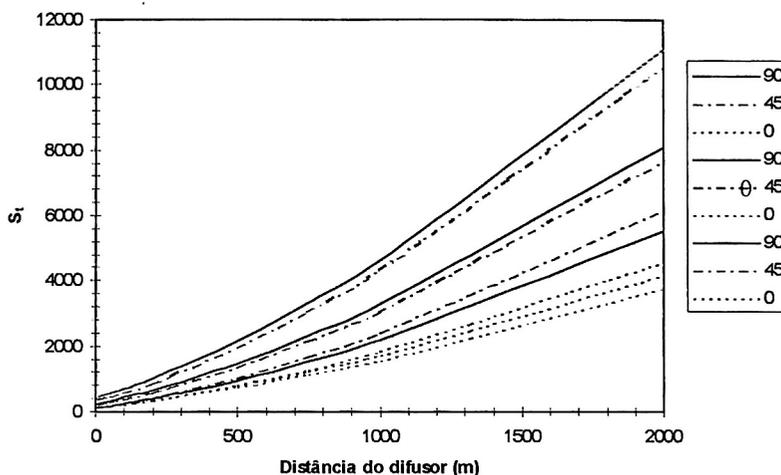


Fig 8.1 - Fatores de diluição global

Observa-se também uma inversão da tendência para a situação de correntes paralelas ao difusor ($\theta = 0$). Nestas circunstâncias as correntes mais intensas contribuem menos para a diluição secundária do que as correntes fracas, com o resultado que a diluição global devida às primeiras fica inferiorizada a partir de uma certa distância (ca. 400 m no presente caso). Ou seja: as correntes mais intensas transportam mais rapidamente o efluente para maiores distâncias, dando menos tempo à ação da dispersão para operar seu trabalho de diluição.

Conhecendo o valor apropriado de S_T o valor da concentração de cada constituinte à distância x , na situação de uma corrente de intensidade u_a e direção fazendo um ângulo θ com o alinhamento do difusor, i.e': $c_0(x, u_a, \theta)$, pode ser estimado, a partir da sua concentração c_0 no efluente descartado, pela fórmula:

$$c(x, u_a, \theta) = \frac{c_0}{S_T} \quad (8.1)$$

Com esta simples conta é possível calcular a extensão da contaminação em função do seu grau nas imediações da descarga.

8.2 Dimensões da Zona de Misturamento

A zona de misturamento é definida como aquela região onde os teores dos efluentes críticos ainda estão acima dos limites permitidos pela norma aplicável.

As concentrações do efluente no ponto em que este é descarregado no oceano obviamente ainda estão acima das concentrações máximas permissíveis. É justamente função do difusor e do próprio oceano diluir o efluente através do misturamento no jato e pela turbulência natural, respectivamente. Ora, isto demanda um volume do corpo receptor no qual ainda se tem, inevitavelmente, $c > c_{norma}$. Esta região do corpo receptor constitui a zona de misturamento, sendo a função do sistema emissário/difusor reduzi-la ao máximo.

Importa portanto verificar quais são estas dimensões e a sua magnitude relativamente à do corpo receptor, uma vez o sistema tenha sido otimizado como foi feito acima.

Como foi definido no Capítulo 5, são dois os efluentes críticos: sulfetos e fenóis. Os fatores de diluição global necessários para enquadrá-los nas exigências da águas de Classe 5 são, respectivamente: $S_T = 4000$ e $S_T = 1200$.

Utilizando as formulações do Capítulo 7 ou a Figura 8.1 encontram-se os valores mostrados na Tabela 8.2.

Designando Z.M. por zona de misturamento, nesta tabela tem-se:

L_x = comprimento da Z.M. para corrente perpendicular ao difusor (quando $\theta = 90^\circ$)

L_y = comprimento da Z.M. para corrente paralela ao difusor (quando $\theta = 0^\circ$).

Tabela 8.2 - Dimensões da zona de misturamento (Z.M.)

u_a (m/s)	constituente	L_x (m)	L_y (m)
0,18	fenóis	480	160
	sulfetos	1170	1950
0,09	fenóis	700	820
	sulfetos	1580	1820
0,32	fenóis	310	910
	sulfetos	890	2110

No caso mais freqüente ($u_a = 0,18$ m/s, $\theta = 90^\circ$) a qualidade da água fica enquadrada na Classe 5 à distância de 1170 m do difusor. A partir daí mesmo a concentração do constituinte mais crítico, os sulfetos, já estará abaixo da C.M.P.

A zona de misturamento tem a forma de um leque, i.é: ela é o segmento inicial da pluma de efluente prolongando-se até a distância em que $c = C.M.P.$ Ao rondarem as correntes, a Z.M. varre a superfície de uma elipse com o semi-eixo mais alongado, L_y , na direção do alinhamento do difusor.

Esta elipse teria semi-eixos de comprimentos 1170 m e 1950 m circunscrevendo uma área $A = \pi L_x L_y = (\pi \times 1170 \times 1950) \div 10000 = 720$ ha. (Baseando-se nos fenôis estas dimensões cairiam para 480m, 160m, e 130 ha, respectivamente).

Considerando-se a micro-região como cobrindo um quadrado de comprimento 13 km (comprimento do emissário) e base coincidindo com a linha da costa, sua área seria de 16900 ha. Portanto a Z.M. ocuparia apenas 4,3% da micro-região.

9. CARACTERÍSTICAS DO EMISSÁRIO E DIFUSOR

9.1 Localização

A tubulação do emissário será o duto de 26 polegadas existente entre o Polo de Guimarães e a plataforma PUB-02. A extremidade *offshore* deste duto está sobre o *deck* da PUB-02, onde se recupera o raspador. Deste ponto deve-se repartir o duto; as ramificações mergulhando verticalmente no oceano em pontos definidos do *deck*. Ao atingir o fundo, os dutos ramificados sofrerão uma inflexão de modo a descarregar o jato horizontalmente. Este arranjo constituirá a estrutura do difusor, ou seja: o sistema final cuja missão é dividir e espaçar a descarga com o objetivo de otimizar a diluição primária.

9.2 Concepção do Sistema Difusor

Para facilitar:

1. a instalação,
2. a manutenção,
3. e em especial a limpeza interna por meio de raspadores,

será evitada a concepção clássica de difusor, que consiste em um *manifold*.

O difusor proposto consiste de ramificações do emissário em tubulações distintas, que repartirão e encaminharão o fluxo do efluente para a posição dos bocais de descarga. Esta concepção do descarte reproduzirá o mesmo efeito que teria, em termos da diluição primária do jato efluente, um *manifold*.

9.2.1 Número de bocais de descarga

O número de ramificações deve ser pequeno, de maneira a facilitar a construção, manutenção e limpeza. Esta dar-se-ia pela introdução, na PUB-02, de raspadores de menor de diâmetro em cada uma das ramificações. O diâmetro das ramificações não pode portanto ser muito inferior ao do emissário.

Por estas razões definiu-se o número de derivações (e bocais) como sendo:

$$\text{número de bocais} = 3$$

9.2.2 Critério para a distância entre bocais

Conforme foi determinado no Capítulo 6, as posições dos bocais de descarga devem se situar a uma distância entre si de:

distância recomendável entre bocais = 30 m

9.2.3 Alinhamento dos bocais

Também de conformidade com o determinado no Capítulo 6, as posições dos bocais devem estar alinhadas sobre uma reta normal à direção mais freqüente das correntes. Ou seja, as posições dos bocais devem observar:

alinhamento dos bocais : WNW - ESE

Este alinhamento forma um ângulo de $112,5^\circ$ com o Norte verdadeiro (NV), no sentido horário.

9.2.4 Disposição do sistema difusor

A concepção proposta está esboçada nas Figuras 9.1 e 9.2. Supõe que, partindo da posição do ponto onde se recupera o raspador do duto de 26 polegadas, três dutos (derivações) correm sobre o *deck* da plataforma de modo a mergulharem verticalmente no oceano em posições determinadas. Ao alcançarem o fundo do oceano, os tubos verticais infletem para a horizontal, formando um “cachimbo”. Deste modo os jatos efluentes estarão inicialmente direcionados na horizontal.

A figura 9.1 indica a disposição das derivações em planta, ao nível do *deck* da plataforma. Nesta figura o ponto *P* designa a posição aproximada do ponto de recuperação do raspador da linha de 26 polegadas. O vetor *u* indica a direção predominante das correntes; sua normal forma o ângulo de $112,5^\circ$ com o NV. Os três bocais de descarga deveriam estar alinhados nesta direção; por exemplo: sobre a linha *FGA*, ou uma paralela a ela.

Contudo, seria muito mais difícil instalar uma tubulação de descarga sob a plataforma, por exemplo: no ponto *G*, equidistante de *A* e *F*.

Deste modo concebeu-se situar os bocais nos pontos *A*, *E* e *F*. A posição do ponto *E* foi determinada tirando-se a perpendicular a *AF* que passa pelo ponto *G* e determinando a sua interseção com a linha *BC*. (Obviamente os bocais estão no fundo do mar, sob os pontos *A*, *E* e *F*).

Sendo assim, ao aproximar-se da plataforma, a corrente diluidora dos efluentes “enxerga” os bocais como projetados num plano perpendicular a ela, nas posições *A*, *G* e *F*. O maior espaçamento real entre os bocais é inclusive vantajoso, pois permite uma folga para os casos em que a corrente não estiver alinhada na direção *u*.

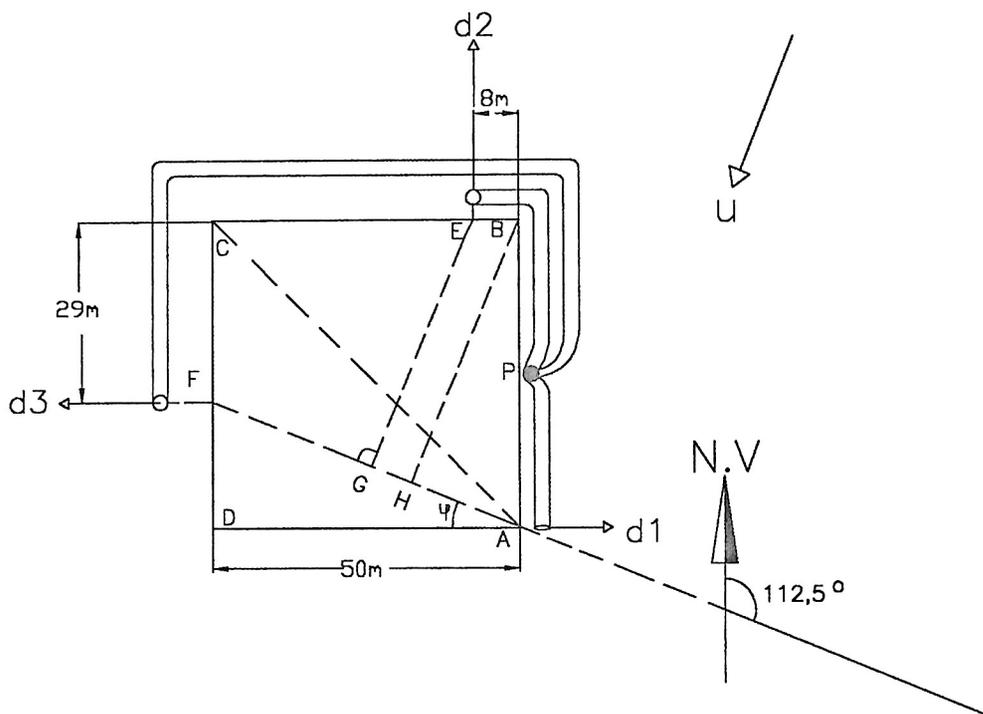


Fig. 9.1 – Esquema da disposição em planta das derivações de mergulho – nível do "deck"

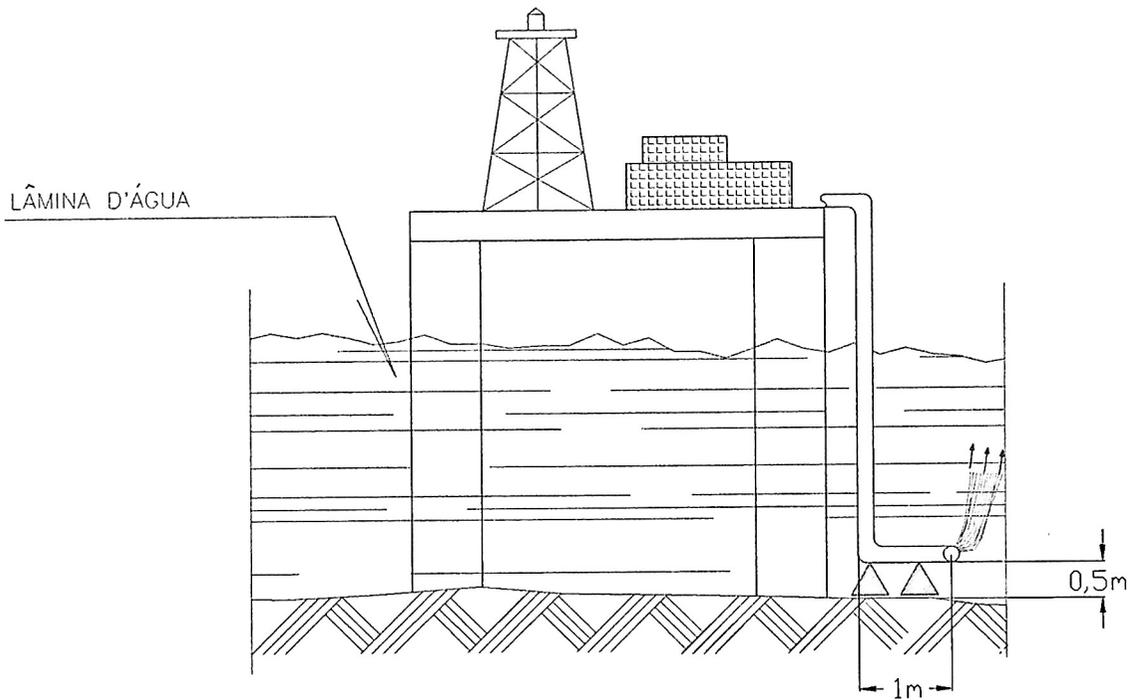


Fig. 9.2 – Esquema do trecho em mergulho das derivações

Referindo ainda à Figura 9.1, as três derivações d_1 , d_2 e d_3 partem do mencionado ponto P e encaminham-se para os pontos A , E e F , respectivamente, ao nível do *deck*. Neste pontos cada uma delas inflete para a vertical até alcançar ao fundo do mar, onde descarregam o efluente.

A determinação dos comprimentos propostos para os segmentos BE e CF será demonstrada adiante. O percurso da derivação d_3 pode ser ao longo de $PADF$, mas as posições de descarga A , E e F , não devem ser alteradas.

A Figura 9.2 esquematiza o trecho vertical de uma das três derivações. Partindo do nível do *deck* ela prossegue até a proximidade do fundo do mar, onde inflete para a horizontal.

Sendo descarregado na direção horizontal, a diluição inicial é mais eficiente, posto que se tira proveito da capacidade diluidora: a) da quantidade de movimento do jato nas proximidades imediatas da descarga; b) da diferença de densidade entre efluente e água do mar assim que a quantidade de movimento horizontal é dissipada (i.é: da “boiância” no percurso ascendente da pluma).

9.3 Posições dos Bocais

Como esboçado na Figuras 9.1, as três derivações d_1 , d_2 e d_3 percorrem o *deck* nos trechos PA , PE e PF , respectivamente.

9.3.1 Comprimento dos trechos horizontais das derivações

O *deck* da plataforma é um quadrado de lado $AD = 50$ m.

Referindo à Figura 9.1, verifica-se que o comprimento do trecho horizontal da derivação d_1 fica automaticamente determinado pela posição de P . Da mesma maneira fica determinado o comprimento PB .

O comprimento do trecho BE da derivação d_2 é determinado pelos cálculos:

$$\varphi = 112,5^\circ - 90^\circ = 22,5^\circ$$

$$AF = \frac{AD}{\cos \varphi} = \frac{50}{\cos 22,5^\circ} = 54,1 \text{ m} \quad (9.1)$$

$$BE = GH = AG - AH = \frac{AF}{2} - AB \operatorname{sen} \varphi = \frac{54,1}{2} - 50 \operatorname{sen} 22,5^\circ = 7,9 \quad (9.2)$$

$$\therefore BE \approx 8 \text{ m}$$

O comprimento do trecho CF da derivação d_3 é determinado pelo cálculo:

$$CF = CD - DF = CD - AD \tan \varphi = 50 - 50 \tan 22,5^\circ = 29,3 \quad (9.3)$$

$$\therefore CF = 29 \text{ m}$$

9.3.2 Distância entre os bocais

Os valores acima fixam as posições dos pontos A , E e F das inflexões verticais das derivações d_1 , d_2 e d_3 , e portanto dos respectivos bocais. A localização das descargas nestas posições garantirá que a distância entre os bocais obedecerá o critério fixado na Seção 9.2.2. Isto porque as suas projeções em uma linha perpendicular à direção das correntes estarão distanciadas entre si de:

$$AG = FG = \frac{1}{2} \times \frac{AD}{\cos \varphi} = \frac{0,5 \times 50}{\cos 22,5^\circ} = 27 \text{ m} \quad (9.4)$$

Mas as distâncias reais entre os bocais serão efetivamente:

$$AE = \sqrt{AG^2 + EG^2} = \sqrt{AG^2 + (AB \cos \varphi - BE \operatorname{sen} \varphi)^2} = 51 \text{ m} \quad (9.5)$$

$$EF = AE = 51 \text{ m}$$

$$AF = 54 \text{ m}$$

Estas distâncias reais superiores ao critério exigido propiciarão um melhor desempenho da ação diluidora do difusor, mesmo quando as correntes marítimas não fluírem na direção mais freqüente ($\perp 112,5^\circ$ com o NV). Nestas ocorrências, se o distanciamento entre os bocais fosse de 30 m poderia haver interpenetração das plumas ascendentes dos jatos e conseqüente redução do fator de diluição; o que será minimizado com a folga introduzida.

9.3.3 Diâmetro das derivações:

A vazão de projeto é $Q = 47000 \text{ m}^3/\text{d} = 0,544 \text{ m/s}$. A ela corresponderá uma velocidade interna no duto de 26 polegadas:

$$v = \frac{Q}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{4 \times 0,544}{\pi \times (0,635)^2} = 1,7 \text{ m/s} \quad (9.6)$$

(A estimativa acima supôs um tubo API com 0,5" de espessura; outras especificações resultarão em pequenas diferenças na velocidade, que não afetarão as conclusões a seguir).

Verifica-se que o valor acima está de acordo com as recomendações para evitar a deposição de materiais sólidos no interior da tubulação (limite inferior) e a incipiência de erosão [Hernandez Muñoz, 1992]:

$$0,9 \text{ m/s} \leq v \leq 3 \text{ m/s}$$

É interessante conferir *momentum* ao fluxo efluente afim de incrementar o entranhamento de água de diluição na fase inicial do jato, embora isto não seja crítico pois após uma curta distância os efeitos gravitacionais passam a prevalecer. Sendo a velocidade ótima para fluxo turbulento em tubulação de aço: $v \approx 1,8 \text{ m/s}$ [Simpson, 1968], é interessante manter esta velocidade nas derivações. Por conseguinte, o diâmetro das tubulações das derivações deve ser da ordem de:

$$d_i = \sqrt{\frac{4(Q \div 3)}{\pi v}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,544}{3 \times \pi \times 1,8}} = 0,358 \text{ m} \quad (9.7)$$

Poderiam então ser usados tubos API de 14" e espessura de 0,5" para as derivações. O diâmetro interno destes tubos é 330,2 mm e a velocidade ficaria em 1,5 m/s.

9.4 Características dos Bocais

A descarga deve ser feita horizontalmente para aproveitar o efeito de diluição do *momentum* do jato emergente. Sendo assim os trechos verticais das ramificações devem infletir para a horizontal ao alcançarem a proximidade do fundo do mar. Os bocais serão simplesmente as extremidades abertas das três ramificações.

Para evitar a entrada de sedimentos no interior das tubulações é importante que suas extremidades estejam a uma altura de pelo menos 0,5 m em relação ao fundo. No entanto esta altura não deve ultrapassar 1 m, para não se perder em espessura de lâmina d'água disponível para a diluição primária (Figura 9.2).

Isto significa que uma estrutura de suporte deve ser construída para posicionar a extremidade das derivações na altura indicada.

Os trechos horizontais das ramificações no fundo do mar (a ponta dos “cachimbos”) devem ter um comprimento de aproximadamente 1 m para garantir o direcionamento horizontal dos jatos emergentes (Figura 9.2).

É recomendável que os bocais fiquem apontados na direção e sentido para os quais se dirigem as correntes predominantes (vetor u na Figura 9.1).

Desta maneira, “dando as costas para as corrente”, os bocais ficarão protegidos, minimizando o risco da intrusão de sedimentos no interior dos tubos quando estes não estiverem operando.

9.5 Perda de Carga

A perda de carga máxima ocorrerá na derivação d_3 por ser a mais longa e a que apresenta maior número de inflexões. Portanto os cálculos serão a ela restritos, pois se houver pressão hidrostática suficiente para vencê-la, com mais razão também haverá nas demais.

Os cálculos a seguir devem ser considerados como uma primeira aproximação da ordem de grandeza das perdas de carga. Pequenas diferenças, em função de indefinições no exato comprimento das derivações, serão precisadas pelo projeto detalhado.

9.5.1 Perda de carga na descarga

Supondo a descarga se efetuando por um bocal que consiste simplesmente numa secção aberta da tubulação:

$$h_d = \frac{v_d^2}{2g} \quad (9.8)$$

Usando os valores definidos na Seção 9.3.3:

$$h_d = \frac{(1,5)^2}{2 \times 9,81} = 0,11 \text{ mCA}$$

9.5.2 Perda de carga nas curvas

Conforme deduz-se das Figuras 9.1 e 9.2, a derivação d_3 faz quatro curvas em 90° (nos pontos B, C, F , no nível do *deck*, e no fundo do mar). Supondo curvaturas suavizadas do duto nas suas inflexões:

$$h_c = 4 \times K_c \frac{v^2}{2g} \quad (9.9)$$

O coeficiente K_c depende da relação r/d entre o raio de curvatura e do ângulo α da inflexão. Supondo $r = 2d$, tem-se para $r/d = 2$ e $\alpha = 90^\circ$ [Quintela, 1981], $K_c = 0,14$. Deste modo:

$$h_c = \frac{4 \times 0,14 \times (1,7)^2}{2 \times 9,81} = 0,08 \text{ mCA}$$

9.5.3 Perda de carga por atrito

Utilizando a expressão usual:

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (9.10)$$

De acordo com as Figuras 9.1 e 9.2, o comprimento total L de d_3 da ordem de:

$$L = 40 + 50 + 29 + 30 + 13 = 162 \text{ m}$$

Estimando a rugosidade relativa como 0,0005 e assim determinando $f = 0,018$ no ábaco de Moody, vem:

$$h_f = \frac{0,018 \times 162 \times (1,7)^2}{0,33 \times 2 \times 9,81} = 1,30 \text{ mCA}$$

9.5.4 Perda de carga total

Somando-se as perdas de carga parciais obtidas nos itens anteriores, obtém-se a perda total h_T :

$$h_T = h_d + h_c + h_f = 0,11 + 0,08 + 1,30 = 1,50 \text{ mCA} \quad (9.11)$$

Ora, a carga h necessária para vencer as perdas e descarregar o efluente à vazão de projeto é [Charlton, 1985]:

$$h = h_T + H \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \quad (9.12)$$

onde H é a profundidade no local. A espessura da lâmina d'água se torna máxima na situação de marés mais altas e sob o efeito das ondas. Do Capítulo 2, os valores destas duas últimas são 1,55 m e 0,55 m, respectivamente. Desta maneira:

$$h = 1,50 + (13 + 1,55 + 0,55) \left(\frac{1022,2 - 1000}{1000} \right) = 1,84 \text{ mCA}$$

Constata-se assim que o efluente, sendo vertido do *deck* da PUB-02, possui carga mais do que suficiente para que o descarte se efetue sob o efeito da gravidade.

10. RESUMO DO DIMENSIONAMENTO

- Conceção do sistema difusor

Para facilitar a instalação, limpeza e manutenção foi proposto um arranjo com três derivações, partindo diretamente do ponto P de recepção do raspador do duto de 26" no lado leste da plataforma e caminhando sobre ela até atingir os pontos de mergulho (Figura 9.1), donde descarregam por trechos verticais com uma inflexão para a horizontal de 1 m de comprimento, a cerca de 0,5 m do fundo (Figura 9.2).

- Posição do sistema difusor

Os terminos das derivações do sistema difusor devem ficar posicionados de maneira tal que os bocais ejetores fiquem projetados sobre uma reta alinhada na direção:

WNW-ESE,

ou seja: formando um ângulo de $112,5^\circ$ com o NV, contado no sentido horário.

As posições efetivas das descargas estão sob os pontos A , E e F , indicados na Figura 9.1.

Os bocais ejetores devem apontar na direção para a qual apontam as correntes mais freqüentes, indicadas pelo vetor u na Figura 9.1. Esta direção faz um ângulo de $202,5^\circ$ com o NV.

- Espaçamento entre os bocais ejetores

O espaçamento entre os bocais ejetores fica determinado pelas posições acima definidas. Seus valores são dados no item 9.3.2.

- Diâmetros e espessuras das tubulações

Devem ser fixadas pelo projeto detalhado, em função das conveniências técnicas. Devem ser de tal magnitude que mantenham uma velocidade de escoamento superior a *ca.* 1m/s, para se evitar deposições ou se obter a ressuspensão de partículas sólidas. Alguns valores indicativos foram sugeridos (não compulsoriamente) na Seção 9.3.3.

- Natureza e inclinação dos bocais ejetores

Os bocais ejetores serão simplesmente a secção final das derivações. Devem estar suportadas por estruturas apropriadas a uma altura entre 0,5 m e 1 m, para evitar intrusão de sedimentos de fundo.

Os bocais ejetores devem apontar o jato efluente para a horizontal.

11. MONITORAÇÃO

O objetivo precípua de um emissário submarino projetado dentro de adequados padrões técnicos, é tomar partido da capacidade que possui o oceano em absorver (diluir e inativar) constituintes que lhe são estranhos ou são nele descarregados em concentrações acima das naturais.

Importa pois confirmar que um tal sistema esteja alcançando o desempenho previsto no projeto, tanto para fins de qualificação como para garantir a conservação do ambiente.

Neste sentido deve ser implementado um programa de amostragens e análises periódicas dos parâmetros mais significativos da qualidade da água, em pontos representativos do corpo receptor. Deve-se prestar especial atenção aos parâmetros críticos do efluente. Um programa básico de monitoração é a seguir proposto.

Tendo em vista a localização do descarte e as características boiantes do efluente, recomendam-se coletas de amostras da água do mar e de sedimentos de fundo.

11.1 Parâmetros a Monitorar

Nas amostras de água:

sulfetos

fenóis

DQO (*)

O&G

* - A determinação da DQO é recomendada em substituição à da DBO, em função das interferências de componentes da água do mar sobre esta última.

Nas amostras de sedimentos de fundo:

Metais pesados: Cd, Pb, Hg

11.2 Locais de Coleta

Em função da extensão do corpo receptor propõe-se a seguinte rede de pontos de coleta:

Amostras de água:

Nos pontos acima dos três bocais ejetores (borbulhão), a 1 m sob a superfície. Numa linha perpendicular à costa: três pontos, respectivamente: a 500 m, 1000 m e 2000 m do borbulhão do bocal ejetor central, a 0,5 m sob a superfície.

Na costa: no ponto de mergulho do emissário, em Guimarães e na Ponta do Tubarão.

Sedimentos de fundo:

Em frente aos três bocais ejetores.

11.3 Freqüência de Amostragem

Campanha pré-operacional:

Coleta de água e sedimentos em todos os pontos respectivamente contemplados na Seção 11.2. Deve ser conduzida, de preferência, antes da construção do sistema difusor, para evitar as interferências deste no micro-ambiente próximo.

Após a entrada em operação:

Amostragem da água: campanhas semestrais no primeiro ano de operação, a primeira de preferência 1 mês após o início da operação. Nos anos seguintes, campanhas anuais nos meses de mar mais calmo (*).

Amostragem de sedimentos: campanhas anuais (**).

* - correspondem às condições mais desfavoráveis para a dispersão.

** - como exigirão o concurso de um mergulhador podem coincidir com as campanhas de inspeção sugeridas no Capítulo 11.

Por ocasião das coletas, devem ser anotados a data e horário, bem como as condições do oceano e da atmosfera (mar calmo ou agitado, ondas, insolação, chuvas, etc.).

11.4 Métodos Analíticos

Os parâmetros listados na Seção 11.1 devem ser quantificados pelos métodos previstos na edição mais atualizada do "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation).

Devem também ser observados os cuidados e métodos para preservação de amostras recomendados por esta publicação.

12. RECOMENDAÇÕES FINAIS

- Se não for disponível, deve ser feita uma sondagem ou avaliação do solo do fundo, principalmente na região em que se situarão os bocais ejetores, já que estes deverão ser montados sobre estacas.
- O caminhamento da parte horizontal do sistema difusor deve levar em conta a batimetria do local, para se evitar trechos com inversão de declividade (elevações ou depressões), que ensejariam formação de bolsões de ar ou deposição de partículas sólidas, com as conseqüentes e indesejáveis perdas de carga e/ou alterações da flutuabilidade.
- Providências técnicas devem ser observadas para garantir a ancoragem e imobilidade do sistema difusor no fundo.
- Os bocais ejetores devem ser tamponados durante períodos prolongados de inatividade.
- Ocorrendo tais interrupções, o sistema deve ser purgado imediatamente antes da parada e da retomada da operação, se possível a uma vazão superior à de projeto, com o objetivo de remover depósitos de materiais sólidos.
- Deve ser previsto um sistema de limpezas periódicas, por meio de raspador. Recomenda-se que esta operação seja também executada após interrupções prolongadas. A concepção do sistema difusor justamente procurou atender esta preocupação.
- O sistema deve ser periodicamente inspecionado por mergulhadores. Inspeções extraordinárias são recomendáveis após episódios de mar muito tempestuoso. A inspeção das condições dos bocais ejetores é particularmente imperiosa. Devem ser verificadas variações da cota do fundo no local devido à possibilidade de transporte de material sólido que ocorre generalizadamente na região. Nestas inspeções por mergulhadores pode ser feita uma medição a prumo da distância entre o fundo e os bocais. Se ocorrerem reduções, deve ser verificado, por comparação com batimetrias, se são devidas ao assoreamento ou ao afundamento dos suportes. Caso se torne necessário, deverão ser tomadas providências para impedir o enterramento do difusor.
- Devem ser tomados cuidados para evitar o lançamento ou arraste de âncoras, lastros, poitas ou para evitar a interferência de quaisquer outros equipamentos com os quais se trabalha na plataforma.
- Devem ser efetuados levantamentos batimétricos para efeitos de verificação de variações no fundo, numa área se estendendo para 1000 m de cada lado da PUB-02. A frequência destes levantamentos poderá ser definida com base nas inspeções pelos mergulhadores. Recomenda-se uma frequência semestral no primeiro ano de funcionamento do sistema difusor e no mínimo anual no período posterior. A época mais apropriada para estes levantamentos batimétricos é após o período de inverno (i.é: outubro ou novembro).

- Uma monitoração simples e prática do funcionamento do sistema emissário-difusor consiste na observação de um registro da perda de carga *versus* vazão, caso isto seja factível. Tendências não debitáveis a alterações nos parâmetros operacionais podem indicar possíveis disfunções das condições hidráulicas ou estruturais do sistema. Estas informações são de grande utilidade para detectar com antecedência possibilidades de problemas, conquanto não dispensem as demais precauções acima recomendadas.

13. REFERÊNCIAS

- APHA - "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - 16th edition", APHA, AWWA, WPCF, Washington, DC, 1985.
- Bandeira, J.V., "Observações sobre o descalçamento de oleoduto e gasoduto dos campos de produção de Ubarana e Agulha, na região de praia, em Guimarães-RN e sugestões de medidas corretivas", Relatório DERL.CN-008/88 para a PETROBRÁS/RPNS/DIREN, CDTN/NUCLEBRÁS, Belo Horizonte, 1988.
- Bandeira, J.V., "Nota sobre aspectos a serem observados após o fechamento de trecho do canal de acesso na região de praia, onde se encontram os dutos do polo de Guimarães-RN", Nota Técnica para a PETROBRÁS/RPNS/DIREN, 1988a.
- Bandeira, J.V., Araújo, L.C. e Valle, A.B., "Emergency situation in the shoreline reach of an offshore oilfield pipeline and remedial measures", 22nd. International Conference on Coastal Engineering - ICCE, Delft, Holanda, 2-6 julho, 1990.
- Bandeira, J.V., "A influência do transporte litorâneo em instalações e obras costeiras relacionadas com a produção de petróleo e gás natural do Estado do Rio Grande do Norte - Brasil", X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul - ABRH, Gramado, RS., 7-12 de novembro, 1993.
- CDTN - "Estudo para o descarte dos efluentes da ETDI do Complexo de Guimarães via emissário submarino - DERL.CN-008/87", CDTN/NUCLEBRÁS, Belo Horizonte, 1987.
- Charlton, J. A., "Sea outfalls", *in* Novak, P. (Ed.), "Developments in hydraulic engineering - 3", Elsevier, London, 1985.
- EPA - "Quality criteria for water", U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1976.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H., "Mixing in inland and coastal waters", Academic Press, N.York, 1979.
- Grace, R.A., "Marine outfall systems - Planning, design, and construction". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1978.
- Harleman, D.R.F., "Transport processes in water quality control", Course Notes in 1.77, Dept. of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass., 1977.
- Hernandez Muñoz, A., "Saneamiento y alcantarillado", Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid (U.P.M.), Madrid, 1992.

Quintela, A.C., "Hidráulica", Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1981.

Roberts, P.J.W., "Line plume and ocean outfall dispersion", *J. of Hydraulics Div. - ASCE*, 105 (HY4): 313-331, 1979.

Simpson, L.L., "Sizing piping for process plants", *Chem. Engng.*, June 17, 1968.

Williamson, J.V. e Rhone, T.J., "Dividing flow in branches and wyes", *J. of Hydraulics Div. - ASCE*, 99 (HY5): 747-769, 1973.

Yudelson, J.M., "A survey of ocean diffusion studies and data", Tech. Memo. 67-2, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, Calif., 1967.

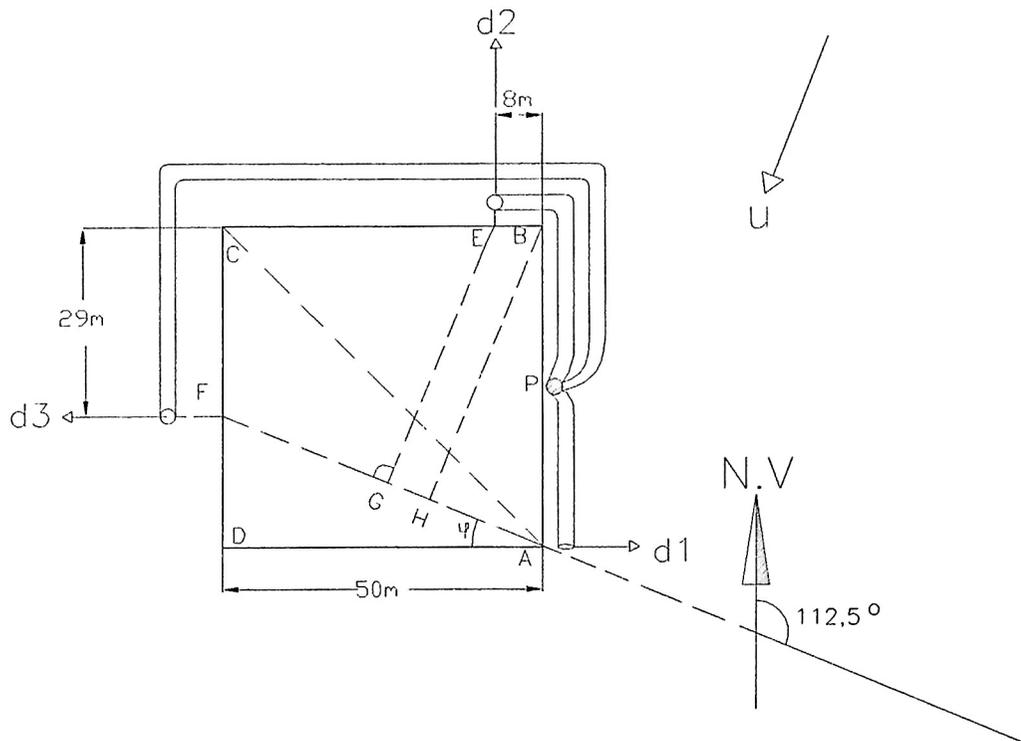


Fig. 9.1 – Esquema da disposição em planta das derivações de mergulho – nível do "deck"

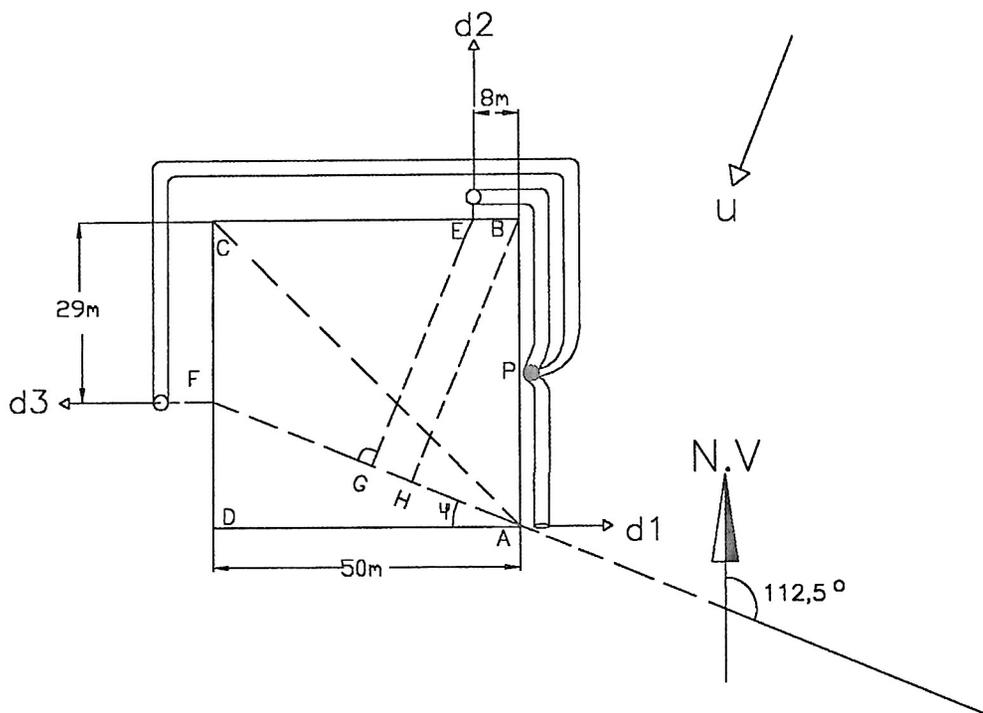


Fig. 9.1 – Esquema da disposição em planta das derivações de mergulho – nível do "deck"

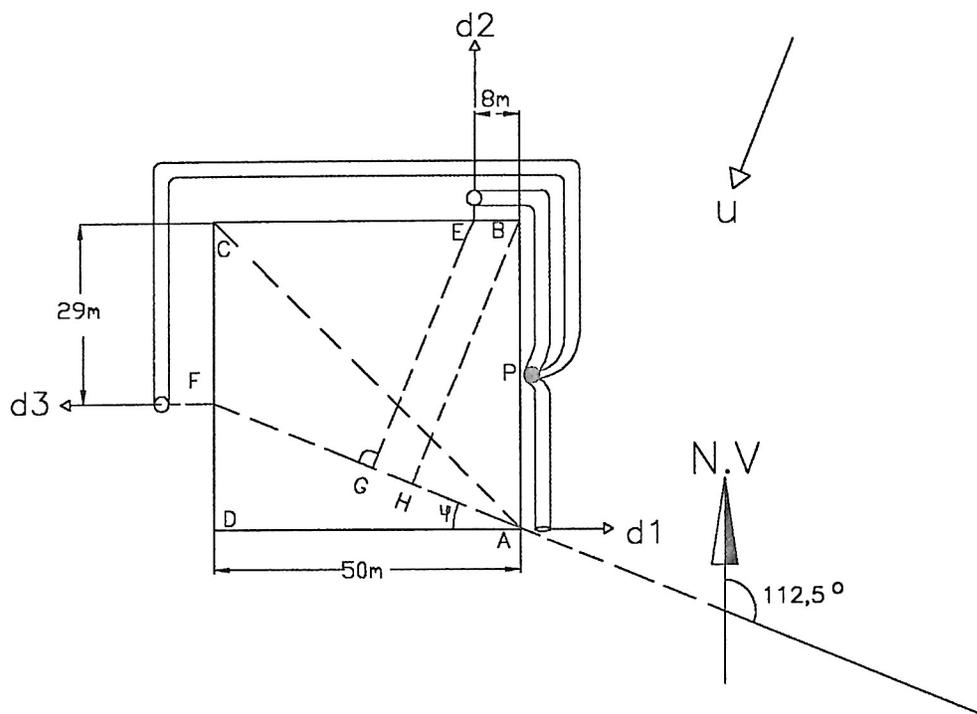


Fig. 9.1 – Esquema da disposição em planta das derivações de mergulho – nível do "deck"

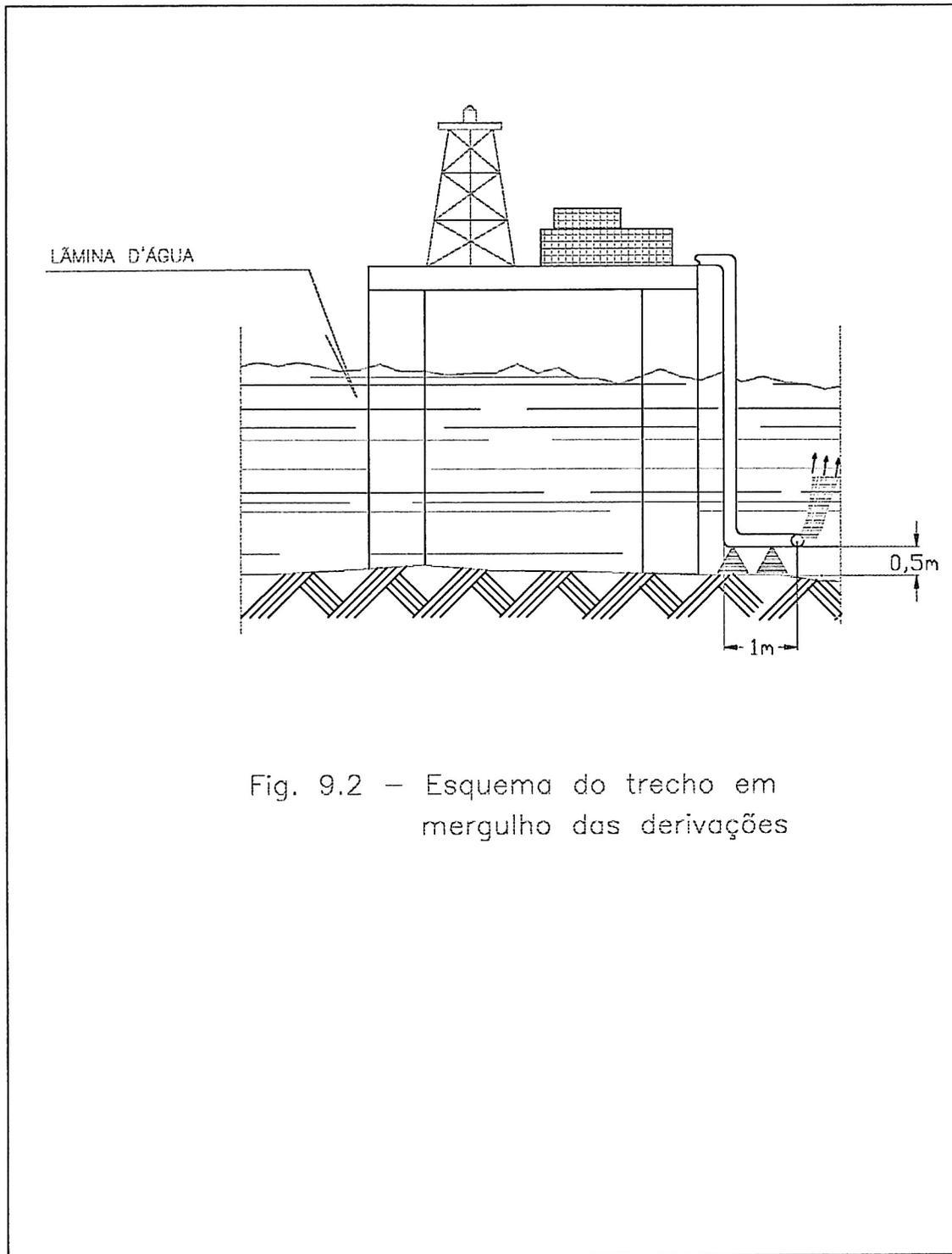


Fig. 9.2 – Esquema do trecho em mergulho das derivações

LÂMINA D'ÁGUA

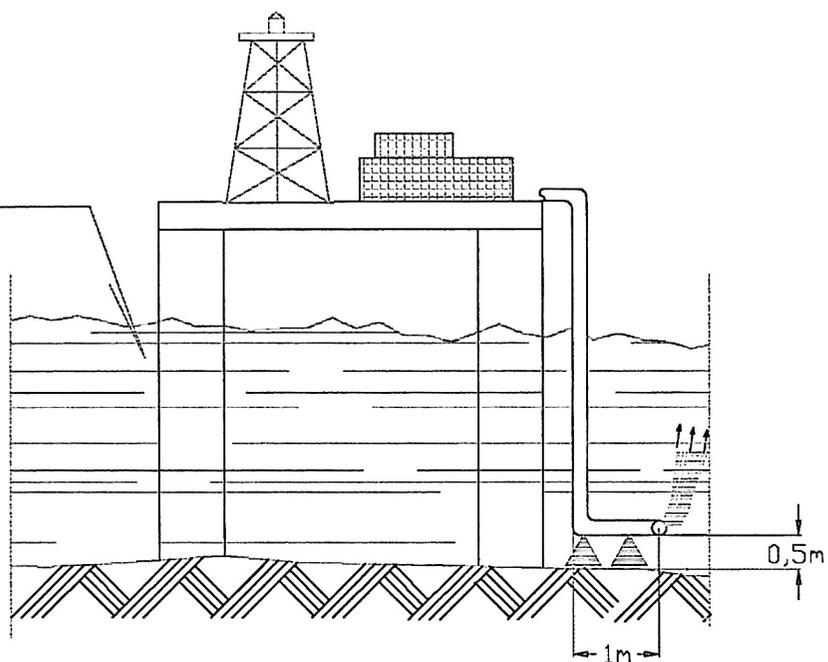


Fig. 9.2 – Esquema do trecho em mergulho das derivações

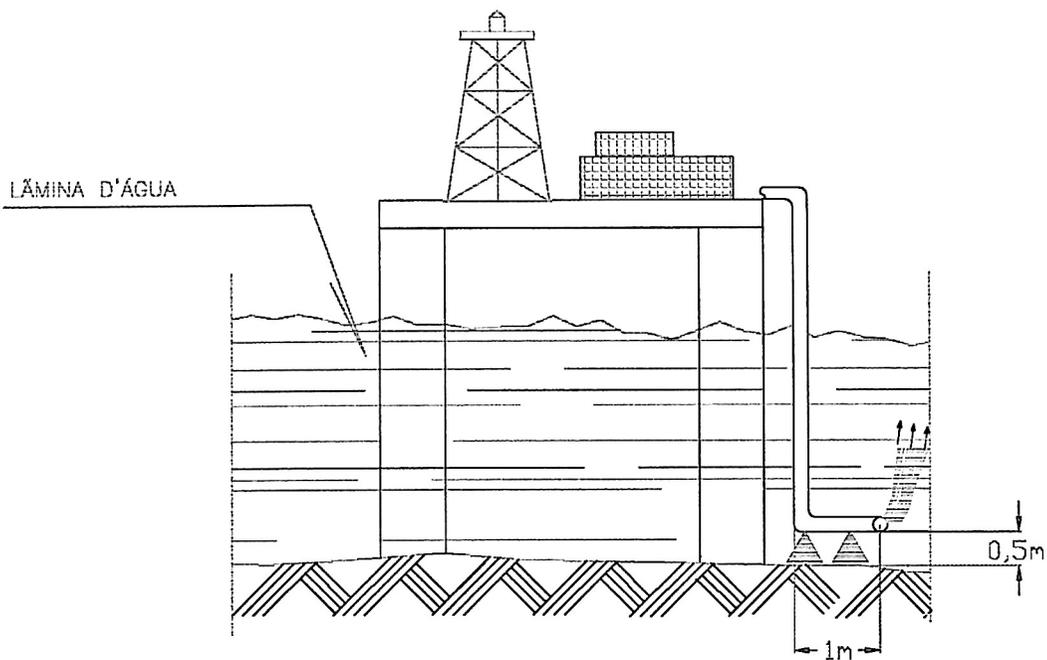


Fig. 9.2 — Esquema do trecho em mergulho das derivações

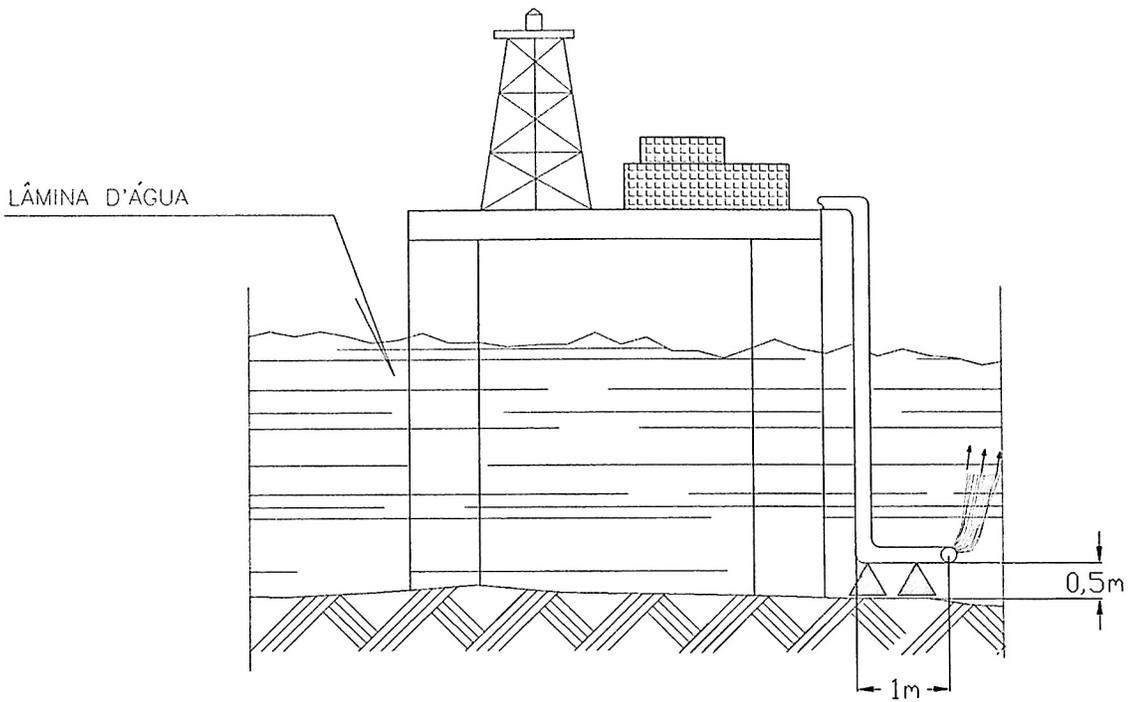


Fig. 9.2 - Esquema do trecho em mergulho das derivações