

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DE RISCOS E DETERMINAÇÃO DE EFEITOS DE ACIDENTES
NO SISTEMA DE TRANSPORTE HIDROVIÁRIO DE CARGAS PERIGOSAS
PROVENIENTES DA REFAP

por

Mirela Garaventa

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Março de 2008

AVALIAÇÃO DE RISCOS E DETERMINAÇÃO DE EFEITOS DE ACIDENTES
NO SISTEMA DE TRANSPORTE HIDROVIÁRIO DE CARGAS PERIGOSAS
PROVENIENTES DA REFAP

por

Mirela Garaventa
Engenheira Ambiental

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte – Análise de Riscos Industriais

Orientador: Prof. Dr. César Antônio Leal

Aprovada por:

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Prof. Dr. Marco Túllio M. B. de Vilhena

Prof. Dr. Rubem da Cunha Reis

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 26 de março de 2008.

RESUMO

As atividades de transporte de cargas em hidrovias interiores são grandes impulsoras do desenvolvimento regional. A economia e eficiência representadas pelo modal aquaviário e o grande potencial de navegação da Laguna dos Patos, que fazem dela a principal hidrovia interior da região sul, reforçam a necessidade de aprofundar a discussão dos aspectos de segurança do transporte de cargas perigosas, principalmente.

Embora episódios de contaminação ambiental decorrentes do vazamento de produtos petrolíferos não sejam freqüentes, a magnitude e severidade das conseqüências de acidentes à população, à economia e aos recursos naturais fazem deles os mais visíveis e preocupantes para a opinião pública. Nesse contexto, a avaliação dos riscos e determinação de efeitos de acidentes no transporte hidroviário de cargas provenientes da Refinaria Alberto Pasqualini, usuária da hidrovia para o transporte dos óleos leve de reciclo, diesel e bunker, pode fornecer subsídios para o planejamento de ações de combate a emergências.

Para este fim, foi feita uma avaliação qualitativa dos riscos inerentes à atividade com a elaboração de uma Análise Histórica de Acidentes como ferramenta para a identificação de eventos iniciadores de acidentes e seus desdobramentos, resultando no estabelecimento de quatro cenários cujos efeitos foram determinados. A quantificação do comportamento do óleo após uma liberação acidental foi realizada através da simulação dos diferentes cenários selecionados utilizando modelos simplificados, desenvolvidos com o objetivo de prever os processos de espalhamento, transporte e evaporação de manchas oleosas em corpos hídricos interiores.

Os resultados obtidos fornecem informações acerca da extensão da área afetada e o tempo de deslocamento até a zona costeira, os quais indicam a formação de manchas oleosas que poderiam alcançar áreas de 0.3 quilômetros quadrados nas proximidades de regiões de grande sensibilidade ecológica e importância econômica em aproximadamente duas horas e meia. Esses dados podem servir de subsídio para a elaboração de um Plano de Contingências específico para as atividades desempenhadas, sendo os dados gerados a partir deste estudo relevantes para embasar a tomada de decisões na ocorrência de incidentes dessa natureza.

ABSTRACT

RISK ASSESSMENT AND ACCIDENT EFFECTS DETERMINATION IN THE WATERWAY TRANSPORT SYSTEM OF DANGEROUS GOODS PRODUCED BY REFAP

Cargo transport activities in inland waterways are great local development promoters. The economy and efficiency represented by waterway transportation, as well as the Laguna dos Patos major navigation potential has turned it into the main inland waterway of Brazilian south, reinforcing the need for further discussion on safety aspects of hazardous materials transportation, mainly.

Although environmental contamination episodes resulting from petroleum products leaks are not frequent, due to the magnitude and severity of the accident consequences on population and economic and natural resources those incidents become the most visible and concerning for public opinion. In this context, risk assessment and effects determination of accidents involving the transportation of Alberto Pasqualini Refinery's products, user of the waterway for diesel, bunker and light cycle oils transport, could provide information for action planning of emergency management. Aiming that, a qualitative evaluation of inherent risks of the activity involves the development of a Historical Analysis of Accidents technique as a tool for identifying initiating events of accidents and their consequences, resulting in four scenarios establishment whose effects were determined. Oil behavior quantification after an accidental spill was carried out by simulating the different selected scenarios using simplified models, developed to predict the processes spreading, transport and evaporation of oil pools formed on inland waterways.

The obtained results provide information about the extent of the affected area and the displacement time towards the coastal zone, indicating oil stain formation which may reach areas of 0.3 square kilometers nearby locations of great ecological sensitivity and economic importance, reaching them in about two and a half hours. Those information could provide data for the development of a specific Contingency Plan for the performed activities, therefore the results provided by this study are relevant to support decision making.

AVALIAÇÃO DE RISCOS E DETERMINAÇÃO DE EFEITOS DE ACIDENTES
NO SISTEMA DE TRANSPORTE HIDROVIÁRIO DE CARGAS PERIGOSAS
PROVENIENTES DA REFAP

ÍNDICE

	Pág.
INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	2
1.2. OBJETIVOS E ABRANGÊNCIA DO ESTUDO	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. LEGISLAÇÃO PERTINENTE	4
2.1.1. Convenções Internacionais	4
2.1.2. Legislação Federal	8
2.1.3. Aspectos Legais das Atividades de Navegação	14
2.2. PROPRIEDADES E PROCESSOS DE INTEMPERISMO DO ÓLEO	16
2.2.1. Densidade	18
2.2.2. Viscosidade	18
2.2.3. Solubilidade	19
2.2.4. Espalhamento	19
2.2.5. Evaporação	20
2.2.6. Dispersão	21
2.2.7. Emulsificação	22
2.2.8. Dissolução	23
2.2.9. Biodegradação	23
2.2.10. Oxidação Fotoquímica	24

2.2.11. Sedimentação	25
2.3. EFEITOS DE VAZAMENTOS	25
2.4. PREVENÇÃO E RESPOSTA A ACIDENTES	30
3. MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO ÓLEO EM ÁGUAS SUPERFICIAIS	37
3.1. MODELAGEM DO ESPALHAMENTO	38
3.2. MODELAGEM DA EVAPORAÇÃO	46
4. CARACTERIZAÇÃO DA LAGUNA DOS PATOS	51
4.1. CLIMATOLOGIA	52
4.2. OCUPAÇÃO DAS MARGENS	53
5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE	59
5.1. TERMINAIS AQUAVIÁRIOS	60
5.1.1. TENIT	60
5.1.2. TERIG	61
5.2. EMBARCAÇÕES	63
5.2.1. NT Guaratan	63
5.2.2. NT Guaíba	65
6. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS TRANSPORTADOS	66
6.1. CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DIESEL	66
6.2. CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO BUNKER	67
6.3. CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO LEVE DE RECICLO	67
7. ANÁLISE HISTÓRICA	69
7.1. CAUSAS DE ACIDENTES DURANTE O TRANSPORTE	69
7.2. TIPOLOGIA DOS ACIDENTES DURANTE O TRANSPORTE	71
7.3. ACIDENTES COM FERIDOS E FATALIDADES	73
7.4. VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ACIDENTES E DE MORTOS E FERIDOS AO LONGO DO TEMPO	74

8. IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS	75
8.1. METODOLOGIA	76
9. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	79
9.1. EVENTO INICIADOR 1: Liberação de produtos refinados de petróleo na zona superior da Laguna dos Patos	79
9.1.1. Cenário C-01: Liberação instantânea	79
9.1.2. Cenário C-02: Liberação contínua	83
9.2. EVENTO INICIADOR 2	86
9.2.1. Cenário C-03: Liberação instantânea	87
9.2.2. Cenário C-04	90
10. CONSIDERAÇÕES E PROPOSTAS PARA REDUÇÃO DOS RISCOS	93
11. CONCLUSÕES	95
12. BIBLIOGRAFIA	96
APÊNDICE I	105
APÊNDICE II	110
APÊNDICE III	117
APÊNDICE IV	122

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da poça	$[m^2]$
c^*	Concentração de fricção	$[kg.m^{-3}]$
c^+	Concentração fora da subcamada viscosa	$[kg.m^{-3}]$
C_S	Fração mássica de vapor de óleo saturado na camada turbulenta	$[-]$
C_∞	Fração mássica de vapor de óleo saturado acima da camada turbulenta	$[-]$
D	Difusividade molecular do óleo no ar	$[m^2.s^{-1}]$
Da	Número de Dalton	$\left[0.037Re_L^{-\frac{1}{5}}Sc^{-\frac{2}{3}}\right]$
Da^*	Número de Dalton local	$[-]$
F_g	Força gravitacional	$[N]$
g	Aceleração gravitacional	$[m.s^{-2}]$
H	Altura da poça formada	$[m]$
$H_{mín}$	Altura mínima de poça	$[m]$
J_o	Fluxo de transferência de massa	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$
k	Constante empírica para primeira fase	$[-]$
k_2	Constante empírica para segunda fase	$[-]$
k_{ev}	Fluxo de transferência de massa por evaporação	$[kg.s^{-1}.m^{-2}]$
L	Comprimento da placa plana	$[m]$
$L(x)$	Largura da pluma no ponto x ao longo da corrente	$[m]$
M	Massa molecular	$[kg.mol^{-1}]$
m_{ev}	Taxa de evaporação	$[kg.s^{-1}]$
P_v	Pressão de vapor	$[N.m^{-2}]$
R	Raio da poça formada	$[m]$
Re	Número de Reynolds	$\left[\frac{\rho UL}{\mu}\right]$
R_g	Constante dos gases	$[J.mol^{-1}.K^{-1}]$
Sc	Número de Schmidt	$\left[\frac{D\rho}{\mu}\right]$
T_{amb}	Temperatura ambiente	$[K]$
t	Tempo decorrido a partir da emissão	$[s]$

t_i	Tempo para transição à segunda fase	[s]
u^*	Velocidade de fricção	[m.s ⁻¹]
u^+	Velocidade da corrente fora da subcamada viscosa	[m.s ⁻¹]
U_c	Velocidade da corrente	[m.s ⁻¹]
U_S	Velocidade da corrente na camada turbulenta	[m.s ⁻¹]
U_t	Velocidade de transporte	[m.s ⁻¹]
U_v	Velocidade do vento	[m.s ⁻¹]
V_d	Volume de óleo liberado	[m ³]
W	Velocidade do vento a 10 m da superfície aquática	[m.s ⁻¹]
z^+	Parâmetro de rugosidade fora da subcamada viscosa	$\left[\frac{zu^*}{\nu_a} \right]$
z_o^+	Rugosidade local	[m]
α	Parâmetro de altura de onda	[m]
β	Constante dependente da geometria do escoamento	[-]
δ	Espessura da camada limite viscosa	[m]
δ^*	Espessura da subcamada viscosa	[m]
Δ	razão da diferença de densidades entre água e óleo	[-]
θ	ângulo formado entre as direções do vento e da corrente	[°]
κ^{-1}	Constante de Von Karman	[-]
μ_w	viscosidade da água	[N.s.m ⁻²]
ν_a	viscosidade cinemática do ar	[m ² .s ⁻¹]
ν_w	viscosidade cinemática da água	[m ² .s ⁻¹]
ρ_a	densidade do ar	[kg.m ⁻³]
ρ_l	Densidade do óleo	[kg.m ⁻³]
ρ_w	Densidade da água	[kg.m ⁻³]

LISTA DE FIGURAS

Fig.	Título	Pág.
2.2.1	Duração e intensidade dos processos de intemperização.	17
2.4.1	Barreiras flutuantes de contenção dispostas em “U”.	33
2.4.2	Ignição deliberada após derrame acidental de óleo combustível.	34
2.4.3	Limpeza de zona costeira utilizando a técnica do jateamento.	34
2.4.4	Escumadeira de discos giratórios.	35
3.1.1	Espalhamento axi-simétrico do óleo em experimentos laboratoriais.	39
4.1	Localização geográfica da região em estudo.	51
4.2.1	Imagem de satélite da região da Laguna dos Patos.	54
4.2.2	Região Estuarina, ao sul da Laguna dos Patos.	56
4.2.3	Parque Estadual de Itapuã.	57
4.2.4	Parque Nacional da Lagoa do Peixe.	57
5.1.1.1	Terminal Aquaviário de Niterói.	60
5.1.2.1	Terminal Aquaviário de Rio Grande.	62
5.2.1.1	Corte vertical longitudinal do NT Guaratan.	64
5.2.1.2	Plano de cargas do navio Guaratan.	64
5.2.1.3	Seção transversal, mostrando casco duplo do NT Guaratan.	65
7.1.1	Causas gerais dos acidentes com óleo diesel.	70
7.1.2	Causas gerais dos acidentes com bunker.	70
7.1.3	Causas gerais dos acidentes com LCO.	71
7.2.1	Tipologia dos acidentes com diesel.	72
7.2.2	Tipologia dos acidentes com bunker.	72
7.3.7.3.1	Percentual de mortos e feridos em acidentes no transporte de diesel, LCO e bunker.	73
8.1	Fontes dos principais acidentes industriais.	75
8.2	Fontes dos principais acidentes industriais (dados até 2005).	76
9.1.1.1	Desenvolvimento da mancha, a partir do lançamento, após 0.5 h, 2.5 h, 4.5 h e 6.5 h.	81
9.1.1.2	Posição da poça 1h após a liberação.	82
9.1.1.3	Posição da poça 3 h após a liberação.	82
9.1.1.4	Posição da poça 6.5 h após a liberação.	83
9.1.2.1	Dimensões da pluma 1 h, 3h e 5.5 h após o vazamento.	84

9.2.1.1	Dimensões da mancha, a partir do lançamento, após 0.5 h, 1h, 1.5 h, 2h e 2.5 h.	87
9.2.1.2	Posição da poça 1 h após a liberação.	88
9.2.1.3	Posição da poça 2 h após a liberação.	89
9.2.1.4	Posição da poça 2.5 h após a liberação.	89
9.2.2.1	Dimensões da pluma 1 h, 3 h e 4.5 após o vazamento.	90

LISTA DE QUADROS

Fig.	Título	Pág.
2.3.1	Caracterização dos derivados de petróleo em função do peso específico.	26
2.3.2	Caracterização dos derivados de petróleo em função da persistência no ambiente.	27
5.1.1.	Volume (m ³) de produtos movimentados no TENIT no ano de 2006.	61
5.1.2.1	Volume (m ³) de produtos movimentados no TENIT no ano de 2006.	62
6.1.1	Propriedades físico-químicas do óleo diesel.	66
6.2.1	Propriedades físico-químicas do bunker.	67
6.3.1	Propriedades físico-químicas do óleo leve de reciclo.	68
7.4.1	Variação do número de acidentes e de mortos e feridos entre 1994 e 2004.	74
8.1.1	Dados climatológicos adotados para a simulação.	78
8.1.2	Eventos iniciadores de acidentes e cenários correspondentes.	78

LISTA DE TABELAS

Fig.	Título	Pág.
2.3.1	Classificação dos derivados de petróleo quanto ao potencial de contaminação.	30
4.2.1	Usos da água com prioridade para a restituição.	55
5.1	Comparação entre investimentos de implantação.	59
5.2	Comparação entre custos de fretes, para cada tonelada transportada.	59
7.1.1	Causas gerais de acidentes durante o transporte aquaviário.	69
7.3.1	Número de mortos e feridos.	73

INTRODUÇÃO

Inaugurada em setembro de 1968, a Refinaria Alberto Pasqualini (Refap), localizada no município de Canoas, Estado do Rio Grande do Sul, foi a primeira unidade do sistema Petrobrás a operar na Região Sul, tendo iniciado suas operações no auge da expansão do projeto estatal do setor petrolífero. Em 2001, a Refap deixa de ser uma unidade de negócios para se tornar uma empresa integrante do sistema Petrobrás com participação dos grupos Downstream Participações S/A (subsidiária da estatal brasileira) com 70% e Repsol YPF do Brasil S/A (do grupo espanhol Repsol) com 30%. No mesmo ano, tiveram início obras para a ampliação da Refap, que aumentaram as capacidades de processamento de petróleo e produção de derivados de 20 mil para 30 mil metros cúbicos por dia e de 600 mil para 900 mil metros cúbicos por mês, respectivamente. A conclusão das obras, no segundo semestre de 2006, consolidou a Refap como a quinta maior refinaria do sistema Petrobrás, ocupando atualmente uma área de 580 hectares.

A distribuição dos produtos processados pela Refap é realizada utilizando os modais rodoviário, dutoviário e aquaviário, sendo este último o principal meio de escoamento da produção dos óleos diesel, bunker e leve de reciclo (Light Cycle Oil, LCO) no Estado. Os produtos oriundos da Refap são transportados até o município de Rio Grande pela Laguna dos Patos, mais precisamente no trecho compreendido entre o Terminal Aquaviário de Niterói (TENIT) e o Terminal Aquaviário de Rio Grande (TERIG).

Os aspectos de segurança no transporte aquaviário de cargas dessa natureza estão centrados na minimização da probabilidade de ocorrência de acidentes que resultem em perdas materiais ou pessoais, na degradação do ambiente e na deterioração da carga. Nesse contexto, uma avaliação de alguns dos aspectos relativos aos riscos envolvidos na atividade foi elaborada e seus resultados são apresentados neste trabalho.

A partir da elaboração de uma Análise Histórica de Acidentes, foram identificados e selecionados quatro diferentes cenários de acidentes. Para a quantificação da extensão dos efeitos dos cenários de acidentes envolvendo a liberação dos produtos na superfície do corpo hídrico, foram desenvolvidos dois modelos computacionais simplificados para a previsão do comportamento de manchas oleosas, baseados nos efeitos de espalhamento, evaporação e queima.

Os resultados contidos no presente estudo referem-se aos quatro cenários, selecionados de acordo com sua recorrência e severidade das conseqüências, identificadas através da Análise Histórica, para os quais calculou-se a extensão dos danos de um eventual incidente ocorrido durante

o percurso da embarcação. A metodologia empregada na análise foi adotada de acordo com ferramentas amplamente aplicadas no Brasil e no exterior, enquanto os cálculos para simulação dos cenários foram efetuados conforme modelos matemáticos descritos em literatura.

1.1. MOTIVAÇÃO

Devido aos grandes volumes de produtos envolvidos, a atividade de transporte de derivados refinados de petróleo desperta grande interesse quanto aos potenciais impactos ambientais e econômicos, motivando a elaboração de estudos visando à previsão do comportamento do óleo no ambiente aquático.

A associação de metodologias visando à análise dos riscos inerentes ao transporte de óleo e à modelagem das conseqüências de um acidente pode ser considerada uma ferramenta integradora, uma vez que o planejamento e gerenciamento das ações de combate a emergências dessa natureza são otimizados com a previsão do alcance dos efeitos danosos de uma liberação acidental de produtos petrolíferos. Contudo, a bibliografia referente à poluição das águas por óleo abrange em geral derrames em ambientes marinhos, carecendo de informações acerca de corpos hídricos interiores, nos quais as atividades de transporte são intensamente praticadas, e a avaliação dos perigos, de caráter preventivo, não costuma ser efetuada.

Dessa forma, as informações originadas pelo estudo da deriva de manchas de óleo em diferentes cenários poderão ser utilizadas no desenvolvimento e aprimoramento do Plano de Contingências para eventuais vazamentos de óleo provenientes das embarcações transportadoras de produtos da Refap, enquanto os riscos identificados e caracterizados podem nortear a adoção de medidas para sua mitigação.

1.2. OBJETIVOS E ABRANGÊNCIA DO ESTUDO

O objetivo geral deste estudo é a identificação de alguns dos riscos e a determinação da extensão dos efeitos potencialmente danosos aos ecossistemas associados à Laguna dos Patos, bem como à saúde pública e à economia da região, decorrentes das atividades de transporte aquaviário do diesel, bunker e LCO provenientes da Refap. O referido trecho foi escolhido para análise em função

da possibilidade de ocorrência de incidentes devido a fatores restritivos à navegação encontrados em determinados pontos desse trajeto, como iluminação precária e sinalização insuficiente, dificultando a travessia de canais, e ao assoreamento observado em alguns locais, inviabilizando o aproveitamento da capacidade máxima dos navios.

Para estes fins foram estabelecidos objetivos específicos, considerando a adoção de metodologias amplamente utilizadas nacional e internacionalmente e descritas em literatura. Os objetivos específicos consistem na elaboração de uma Análise Histórica de Acidentes envolvendo o transporte aquaviário dos produtos de interesse visando fundamentar a identificação e seleção de cenários de acidentes e a simulação destes utilizando modelos simplificados, desenvolvidos neste estudo, para a quantificação dos efeitos de cada um desses cenários. Além disso, buscou-se apresentar algumas técnicas de descontaminação e sugerir medidas de prevenção e resposta a acidentes, com a finalidade de prover informações pertinentes ao planejamento estratégico de contingências.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em nove capítulos, reunidos em um único volume.

O primeiro capítulo contém os objetivos do estudo, sua motivação e estrutura. O Capítulo 2 traz uma revisão da literatura, incluindo uma coletânea da legislação ambiental vigente aplicável ao tema abordado, a descrição de algumas propriedades físico-químicas dos derivados de petróleo, seu comportamento no ambiente aquático e medidas de combate a emergências. A formulação a partir da qual os modelos computacionais foram desenvolvidos é descrita no Capítulo 3. No quarto capítulo encontra-se a caracterização da região, onde são apresentados dados climatológicos e sócio-ambientais, enquanto as descrições do sistema de transporte e dos produtos de interesse constituem os Capítulos 5 e 6. O capítulo seguinte contém uma análise histórica dos acidentes ocorridos em atividades de mesma natureza e no Capítulo 8 são identificados os perigos potenciais através selecionados para a avaliação de seus efeitos. As simulações visando à determinação de efeitos de derrames acidentais dos produtos petrolíferos transportados e seus resultados são apresentados no Capítulo 9. O décimo capítulo contém as considerações e propostas para minimização dos riscos, enquanto as conclusões constam no Capítulo 11.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. LEGISLAÇÃO PERTINENTE

A preocupação com a preservação ambiental reflete-se no desenvolvimento de regulamentações específicas. Visando a prevenção e controle da contaminação dos recursos hídricos por atividades de transporte aquaviário, a agência internacional da Organização das Nações Unidas (ONU) para assuntos marítimos (International Maritime Organization, IMO) aprovou em 1954 a primeira Convenção Internacional tratando da prevenção da poluição por óleo.

Com o propósito de prevenir acidentes e minimizar suas conseqüências, uma serie de normas vem sendo criadas pela IMO. A implantação de tais procedimentos padronizados envolvendo projeto, construção e operação de embarcações, bem como daqueles relacionados à poluição de corpos hídricos, garantem maior segurança nas atividades de navegação.

No âmbito nacional, questões relativas à segurança da navegação e preservação do ambiente aquático seguem as convenções e resoluções internacionais propostas pela IMO e a legislação brasileira específica. A introdução de regulamentações nesse sentido inicia em 1967, com a promulgação de legislação dispendo acerca do lançamento de óleo e resíduos em águas interiores.

Tendo em vista a necessidade de manutenção dos padrões de qualidade devido à característica de multiplicidade dos usos da água na Laguna dos Patos, destinadas ao abastecimento doméstico, à proteção dos sistemas estuarinos e zonas costeiras, à recreação, à irrigação e à pesca e criação de espécies destinadas à alimentação, é de grande importância a observação desses instrumentos regulatórios, descritos a seguir.

2.1.1. Convenções Internacionais

Os acordos internacionais referentes à contaminação marinha por óleo proveniente de embarcações apresentam notadamente três abordagens distintas. São elas a prevenção da contaminação, a compensação por danos causados por descargas acidentais ou operacionais e o combate à poluição.

Dentre as convenções de caráter preventivo, destacam-se:

- Convenção Internacional para Prevenção da Poluição do Mar por Óleo, de 1954 (Oil Pollution Convention, OILPOL 1954)

Primeira convenção internacional sobre a prevenção da poluição do mar por óleo proveniente de navios-tanque, proíbe a descarga, em áreas determinadas, de óleo ou efluentes oleosos contendo mais de 100 ppm de óleo. Faixas costeiras, de todos os mares, com largura de cinquenta milhas náuticas eram consideradas zonas proibidas.

A partir da inclusão de emendas, em 1962, a Convenção reconhece em seu texto a necessidade de: (i) cooperação internacional para que a prevenção da poluição seja efetiva; (ii) implantação de sistemas para recebimento de resíduos provenientes de navios; (iii) instalação de separadores água-óleo em embarcações; (iv) confecção e distribuição de manual de boas práticas na transferência de óleo; (v) pesquisas, coordenadas pela IMO, sobre prevenção da contaminação por óleo; e (vi) criação de comitês nacionais sobre poluição por óleo.

Novas emendas, adotadas em 1969 e 1971, determinam requisitos mais rigorosos para descargas operacionais e novos padrões de construção dos navios-tanque, que incluíam a disposição e limitação de tamanho dos tanques individuais.

- Convenção Internacional relacionada à Intervenção em Alto Mar em Incidentes de Poluição por Óleo, de 1969 (International Convention Relating to Intervention on the High Seas in Cases of Oil Pollution Casualties, INTERVENTION 69)

Estabelece que Estados costeiros têm direito à tomada de decisões além dos limites de seus mares territoriais, de modo a prevenir, mitigar ou eliminar perigos decorrentes de incidentes marítimos que possam resultar em conseqüências danosas para suas áreas costeiras. O direito de intervenção pode ser exercido após consultas aos interessados (Estados cujas bandeiras são utilizadas pelos navios envolvidos, proprietários dos navios e cargas e especialistas independentes). Eventuais danos causados pelas medidas adotadas são passíveis de indenização por parte do Estado costeiro, caso as consultas mencionadas não sejam realizadas previamente.

A adoção de protocolo, datado de 1973, amplia a abrangência da Convenção a diversas substâncias nocivas ao ambiente marinho, além do óleo. Emendas de 1991, 1996 e 2002 revisam e atualizam as listas de substâncias consideradas.

- Convenção para a Prevenção da Poluição proveniente de Navios, de 1973, modificada pelo Protocolo de 1978 (MARPOL 73/78)

Datada de 1973, é considerada a principal Convenção relacionada à prevenção da poluição marítima por navios, seja ela de causas operacionais ou acidentais. O Protocolo adotado em Londres, em 1978, absorve a Convenção concluída, uma vez que esta não vigorava quando da sua realização. Seu objetivo é prevenir a contaminação marinha pela descarga operacional de óleo e outras substâncias nocivas e minimizar sua descarga acidental. O texto da Convenção reconhece e adota grande parte dos critérios impostos para descargas operacionais pela OILPOL 1954.

A partir de 1984 são estabelecidas novas exigências para prevenir o descarte de efluentes oleosos em áreas especiais e novos padrões de construção para navios-tanque são determinados. Também determina os requisitos para instalação e operação de separadores água-óleo, bem como para o monitoramento contínuo de descarga de águas oleosas, e a implantação em portos e terminais de instalações para recebimento e tratamento de água de lastro contaminada e resíduos oleosos. Novas emendas, adotadas em 2003, exigem que os novos navios-tanque sejam construídos com casco duplo e estabelecem o ano de 2010 como novo prazo para que os petroleiros de casco simples sejam retirados de operação.

Acordos internacionais tratando da compensação por danos materiais e ambientais decorrentes de incidentes no transporte aquaviário são elaborados a partir do final da década de 1960. A crescente ocorrência de incidentes envolvendo derrames de óleo desencadeou o processo de aprovação de convenções internacionais que estabelecessem responsabilidade objetiva para proprietários de navios e a criação de um fundo, financiado por indústrias petroleiras, para fornecer compensações por danos.

- Convenção Internacional sobre Responsabilidade Civil em Danos Causados por Poluição por Óleo, de 1969 (International Convention on Civil Liability for Oil Pollution Damage, CLC 69)

Assegura a compensação adequada a pessoas, físicas ou jurídicas, que sofram danos resultantes de incidentes marítimos envolvendo navios transportadores de óleo. É atribuída responsabilidade objetiva ao proprietário do navio do qual o óleo tenha escapado ou sido despejado, isto é, independente da existência de culpa, cabendo ao proprietário o ônus da prova. Se o

proprietário provar que o dano por poluição resultou, total ou parcialmente, de ação ou omissão com intenção de causar danos pela pessoa que os sofreu, ou de negligência da mesma, o proprietário pode ser desobrigado em todo ou em parte de sua responsabilidade.

A Convenção não cobre derramamentos por água de lastro ou por óleos combustíveis consumidos na movimentação de navio não cargueiro, mas prevê cobertura para derramamentos de óleos combustíveis consumidos na movimentação de navios utilizados para transporte de óleo como carga. Os óleos considerados passíveis de compensação por danos causados são os óleos crus, combustível, diesel pesado e lubrificante, que apresentam dissipação lenta quando derramados no mar e podem estar mais sujeitos a espalhamento, exigindo ações de limpeza. Danos causados por derramamentos de óleos minerais não-persistentes, como gasolina, diesel leve e querosene, não são compensados pela convenção, devido à tendência de rápida evaporação.

- Convenção Internacional para o Estabelecimento de um Fundo Internacional para a Compensação de Danos provenientes de Poluição por Óleo (International Convention on the Establishment of an International Fund for Compensation for Oil Pollution Damage, FUND 71)

Adotada para enquadrar casos de poluição envolvendo grandes navios-tanque, visto que as limitações de responsabilidade presentes na CLC 69 poderiam ser inadequadas para tais situações. A compensação adicional tem a intenção de garantir que as vítimas de poluição sejam compensadas apropriadamente e fornecer compensação quando não houver responsabilidade segundo a CLC 69, ou o proprietário seja incapaz de arcar com suas obrigações.

Determina a contribuição dos proprietários da carga, de forma a evitar custos adicionais aos proprietários de navios. O FUND 71 oferece compensação às vítimas quando estas forem incapazes de obtê-la do proprietário do navio ou esta for insuficiente para cobrir os danos, ressarcir ações tomadas pelos Estados Conveniados fora de seus territórios e pode fornecer assistência aos Estados Conveniados ameaçados ou afetados por poluição.

No que se refere à regulamentação internacional quanto aos procedimentos de combate à poluição, destaca-se a convenção adotada em conferência de 1990. Esta considera as necessidades dos países em desenvolvimento, buscando promover a cooperação internacional e aperfeiçoar a capacidade de preparo e resposta à contaminação por óleo.

- Convenção Internacional sobre Preparo, Resposta e Cooperação em Caso de Poluição por Óleo, de 1990 (International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation, OPRC 90)

Aplicável aos incidentes de poluição marinha por óleo originados em navios, plataformas oceânicas, portos marítimos e instalações de operação com petróleo. Incentiva o estabelecimento de planos de emergência e de contingência nacionais e regionais e enfatiza a importância da preparação do Estado e das indústrias petrolíferas e de transporte marítimo no combate aos episódios de poluição.

Quanto à comunicação de incidentes, exige que comandantes de navios e encarregados das plataformas oceânicas notifiquem imediatamente todo evento ocorrido que envolva um provável vazamento, bem como todo evento observado no mar que envolva a presença de óleo. As informações sobre o incidente devem ser repassadas imediatamente aos Estados que possam ter interesses afetados, detalhando a avaliação e ações pretendidas, até que o combate ao incidente tenha sido concluído ou que seja implementada uma ação conjunta. Em incidentes graves, as informações devem ser fornecidas diretamente à IMO.

2.1.2. Legislação Federal

As leis, decretos, resoluções e portarias federais, bem como as normas específicas que regulamentam a navegação comercial, são apresentadas a seguir, de forma a constituir um breve histórico da evolução da legislação brasileira com relação ao tratamento das questões referentes à poluição por óleo.

- Decreto 3.334, de 5 de julho de 1899

Precursor da legislação atual que trata da poluição das águas, torna as Capitânicas dos Portos responsáveis por exercer as tarefas de polícia marítima, administração e conservação dos portos e rios navegáveis. Proíbe o lançamento de resíduos ao mar ou rio, de quaisquer embarcações, e designa local para lançamento de efluentes em ilhas situadas a sotavento dos ventos reinantes nos portos, com previsão de multas por seu descumprimento.

- Lei 5.357, de 17 de novembro de 1967

Conhecida como Lei do Óleo, trata da poluição ambiental por lançamento de detritos ou óleo, provenientes de embarcações e terminais, em corpos hídricos interiores e nomeia a Diretoria de Portos e Costas, da Marinha do Brasil, como fiscalizadora de seu cumprimento, com previsão de multas.

- Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981

Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, estabelecendo sanções que variam desde multa até a suspensão da atividade para o não cumprimento de medidas necessárias à preservação ou correção de danos ambientais. Mantém a Marinha do Brasil como responsável pela fiscalização de lançamentos de detritos ou óleo em águas brasileiras.

- Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998

Conhecida como Lei de Crimes Ambientais, amplia o número de possíveis fiscalizadores ao determinar que os funcionários de órgãos ambientais, bem como os agentes das Capitânicas dos Portos, são autoridades competentes para lavrar auto de infração ambiental e instaurar processo administrativo. Não altera o previsto na Lei do Óleo, citada anteriormente.

- Decreto 2.870, de 10 de dezembro de 1998

Promulga a OPRC 90, que (i) exige que os navios levem a bordo um Plano de Emergência para poluição por óleo; (ii) estabelece procedimentos para que os comandantes de navios e encarregados das plataformas oceânicas notifiquem, imediatamente, todo evento de provável vazamento de óleo; e (iii) determina a criação de Sistemas Nacionais e Regionais de Preparo e Resposta e de um Plano Nacional de Contingência.

- Resolução CONAMA 265, de 27 de janeiro de 2000

Determina a avaliação pelo IBAMA e Órgãos Estaduais de Meio Ambiente das ações de controle e prevenção e do processo de licenciamento ambiental de todas as instalações industriais de petróleo e derivados localizadas no território nacional. Exige a todas as empresas com atividades na

área de petróleo e derivados que apresentem ao Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) programa e cronograma de realização de auditorias ambientais independentes em todas as suas instalações industriais localizadas em território nacional e às autoridades competentes que elaborem o Plano Nacional de Contingência e os Planos de Emergência regionais, estaduais e locais.

- Lei 9.966, de 29 de abril de 2000

Dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamentos de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional. Amplamente baseada na MARPOL 73/78, estabelece (i) que os portos organizados, instalações portuárias e plataformas devem dispor de meios adequados para recebimento e tratamento de resíduos e para combate à poluição; (ii) que as entidades exploradoras das instalações devem elaborar manual para gerenciamento dos riscos, gestão de resíduos e planos de emergência individuais; (iii) limites de fiscalização de autoridades competentes; e (iv) realização de auditorias ambientais bienais.

Determina que todo incidente ocorrido em portos, instalações portuárias, dutos, navios, plataformas e instalações de apoio, que possa provocar poluição das águas sob jurisdição nacional, seja imediatamente comunicado ao órgão ambiental competente (federal, estadual ou municipal), à Capitania dos Portos e à Agência Nacional de Petróleo (ANP) e prevê que os responsáveis pela descarga de material poluente são obrigados a ressarcir os órgãos competentes pelas despesas por eles efetuadas para o controle ou minimização da poluição causada, independentemente de pagamento de multa.

- Resolução CONAMA 269, de 14 de setembro de 2000

Condiciona a produção, comercialização e uso de dispersantes químicos ao prévio registro do produto junto ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e determina critérios para sua utilização, permitida em condições de risco iminente de incêndio com perigo para a vida humana, situações em que outras técnicas de resposta não sejam eficientes e quando a mancha de óleo estiver se deslocando para áreas ambientalmente sensíveis. Para os demais casos possíveis, está prevista a autorização para aplicação a ser concedida pelo órgão ambiental competente.

- Resolução CONAMA 293, de 12 de dezembro de 2001

Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual (PEI) para incidentes de poluição por óleo em portos, instalações portuárias, terminais, dutos, plataformas e instalações de apoio. Estabelece que o plano deve ser apresentado quando do licenciamento ambiental e que deve ser garantida a capacidade da instalação de executar as ações de resposta aos incidentes de poluição por óleo com recursos próprios e, por intermédio de acordos previamente firmados, com recursos de terceiros. Constam, ainda, determinações para elaboração, reavaliação e alteração dos planos.

- Decreto 4.136, de 20 de fevereiro de 2002

Regulamenta as sanções previstas na Lei 9.966/2000. Introduce a possibilidade de comunicação, por qualquer pessoa, às autoridades competentes (Marinha do Brasil, órgãos ambientais e ANP) de fato que possa se caracterizar como possível infração tratada pelo Decreto.

- Decreto 4.871, de 6 de novembro de 2003

Institui os Planos de Área (PA) para o combate a incidentes de contaminação por óleo em águas sob jurisdição nacional. Os PAs devem conter as informações, medidas e ações referentes a uma área de concentração de atividades potencialmente poluidoras, que visem integrar os diversos Planos de Emergência Individuais da área, bem como facilitar e ampliar a capacidade de resposta conjunta, além de orientar as ações necessárias para combate a incidentes de poluição por óleo de origem desconhecida.

Estabelece que a elaboração do PA é de responsabilidade das instalações, cabendo ao órgão ambiental competente a coordenação, a identificação das áreas abrangidas e a convocação das instalações.

- Decreto 5.098, de 3 de junho de 2004

Cria o Plano Nacional de Prevenção, Preparação e Resposta Rápida a Emergências Ambientais com Produtos Químicos Perigosos (P2R2), que prevê a criação de comissões estaduais, nacional e distrital para formular e supervisionar sua execução, bem como a articulação e proposição de parcerias com órgãos públicos e entidades privadas. O plano deve prever desenvolvimento e implementação de sistemas de gerenciamento de informações, integrando as ações de controle e de

atendimento a emergências com as atividades de produção, armazenamento, transporte e manipulação de óleo e demais produtos químicos perigosos.

- Portaria ANP 170, de 27 de novembro de 1998

Alterada pela Resolução ANP 38, de 24 de novembro de 2004, que regulamenta a construção, ampliação e operação de transporte ou transferência de petróleo e seus derivados, gás natural, biodiesel e misturas de óleo diesel/biodiesel. Estabelece que a empresa autorizada a realizar estas operações comunicará à ANP qualquer evento, decorrente de suas atividades, que possa acarretar riscos à saúde pública, à segurança de terceiros e ao meio ambiente, indicando as causas de sua origem e as medidas tomadas para sanar ou reduzir o seu impacto.

- Portaria ANP 3, de 20 de janeiro 2003

Estabelece exigência de comunicação imediata de incidentes de derramamento de óleo e substâncias nocivas ou perigosas, de instalações próprias ou de terceiros. É adotado o formulário de comunicação apresentado no Decreto 4.136/2002. Determina, ainda, o prazo de 48 horas para apresentação à ANP, pelo concessionário ou empresa autorizada, de relatório de incidentes provenientes de instalações ou unidades próprias.

As normas complementares são estabelecidas através de Portarias da Diretoria de Portos e Costas (DPC), conhecidas como Normas da Autoridade Marítima (NORMAM):

- NORMAM-02/DPC/2005

Estabelece as normas da autoridade marítima para embarcações destinadas a navegação interior. Aplicam-se as definições do Artigo 2º da Lei 9537, de 11 de dezembro de 1997 (Lei de Segurança do Tráfego Aquaviário, LESTA), e as penalidades nela previstas em caso de infrações a esta norma.

Fixa a tripulação mínima de segurança das embarcações e os critérios para seu cadastramento, registro e classificação das mesmas, bem como para a aprovação de nomes e cores. No que se refere à padronização de projetos, construções e alterações de embarcações, a norma exige a aplicação das convenções e códigos internacionais. Os aspectos de segurança visando a minimização dos riscos de acidentes e o provimento da salvaguarda da vida humana são abordados

através da determinação dos requisitos de compartimentagem e dotação de dispositivos, equipamentos e materiais para esse fim. Com relação a redução de perigos ao ambiente, são estabelecidos os requisitos técnicos e operacionais para o transporte de cargas perigosas, as convenções internacionais aplicáveis e as diretrizes para a elaboração do Plano de Emergências das embarcações.

Dentre os anexos, encontram-se as orientações referentes ao projeto e operação referentes ao transporte de petróleo e seus derivados na Bacia do Sudeste.

- NORMAM-05/DPC/2003

Estabelece normas, requisitos de fabricação, testes de avaliação e procedimentos para homologação de materiais e embalagens para transporte de produtos perigosos, em atendimento à Lei 9537/97, e informa o conteúdo do Catálogo de Material Homologado: (i) tipo de material; (ii) número do Certificado de Homologação; (iii) data de validade do Certificado de Homologação; (iv) relação de estações de manutenção autorizadas e (v) relação dos fabricantes.

Indica a legislação referente ao transporte de produtos perigosos a ser seguida e determina os critérios para sua classificação, os requisitos técnicos para embalagens e tanques e os testes aos quais estes devem ser submetidos para homologação.

- NORMAM-06/DPC/2003

Nessa norma são especificados os requisitos e procedimentos para o reconhecimento de sociedades classificadoras que atuarão na regularização, controle e certificação de embarcações, complementando os dispositivos legais em vigor, especialmente a LESTA.

Estabelece que o reconhecimento para atuar em nome da Autoridade Marítima Brasileira refere-se à realização de testes, medições, cálculos, vistorias, inspeções, auditorias em empresas de navegação, embarcações e estruturas marítimas e emissão e renovação dos certificados, licenças e outros documentos previstos nas convenções e códigos internacionais e demais normas aplicáveis. Determina o escopo das auditorias para fiscalização e controle e as condições para emissão dos documentos para construção, alteração e reclassificação de embarcações.

- NORMAM-07/DPC/2003

Trata das normas e procedimentos a serem observados para a padronização das inspeções navais, atividade de cunho administrativo que consiste na fiscalização do cumprimento da Lei 9537/97, de normas e regulamentações e das convenções internacionais ratificadas pelo Brasil. As ações de inspeção naval na fiscalização da segurança do tráfego aquaviário nas águas jurisdicionais brasileiras visam: (i) a segurança da navegação; (ii) a salvaguarda da vida humana e (iii) a prevenção da poluição ambiental por embarcações, plataformas e instalações de apoio.

Determina a aplicação de penalidades por infrações e as normas e procedimentos específicos para infrações previstas na Lei 9966/00, em caso de lançamento de óleo e outras substâncias perigosas em águas sob jurisdição nacional.

- NORMAM-14/DPC/2003

Estabelece normas para o cadastramento de empresas de navegação junto à Capitania dos Portos, Delegacias e Agências. Aplica-se às empresas brasileiras de navegação, constituídas segundo a legislação federal e com sede no país, cujo objetivo seja o transporte aquaviário.

- NORMAM-16/DPC/2003

Determina condições e requisitos para delegação aos órgãos federais, estaduais e municipais e para concessão a empresas privadas das atividades de assistência e salvamento de embarcação, coisa ou bem em perigo no mar, nos portos e vias navegáveis interiores.

Indica a legislação pertinente a ser observada e especifica as competências dos Representantes da Autoridade Marítima no que se refere à segurança da navegação e do meio ambiente e ao socorro e salvamento, bem como os requisitos para o exercício das atividades de auxílio e salvatagem. O Anexo 3-A traz o modelo de ficha cadastral a ser preenchida por pessoas jurídicas interessadas em realizar as atividades de assistência e salvamento.

2.1.3. Aspectos Legais das Atividades de Navegação

As discussões internacionais visando nortear as medidas preventivas e corretivas com relação aos efeitos nocivos do óleo no ambiente marinho são consideradas recentes, sendo a primeira convenção internacional reconhecida datada de 1954. A OILPOL 54 trata dos aspectos preventivos da contaminação pelo óleo transportado por embarcações marítimas em áreas de extrema sensibilidade. A convenção posterior passou a vigorar apenas em 1965, e abordava outros temas de grande importância para a navegação comercial, como a segurança da navegação, o transporte de cargas a granel, o transporte de substâncias perigosas e os navios nucleares.

Contudo, a convenção internacional de maior interesse no âmbito do transporte marítimo de petróleo e seus derivados é a MARPOL73/78, que introduz regras específicas para a prevenção da poluição do mar por hidrocarbonetos. Seu aspecto mais destacado é a regulamentação de equipamentos e dispositivos, em especial a exigência de cascos duplos nas embarcações petroleiras, e das vistorias visando avaliar as condições de manutenção dos navios, intensificadas a partir da sua aprovação.

Visto que até então a legislação referente ao transporte de óleo dispunha exclusivamente sobre o transporte marítimo de cargas perigosas, em 2005 a Diretoria de Portos e Costas da Marinha do Brasil, com o propósito de contribuir para a orientação e controle da navegação comercial em águas interiores e para a prevenção da poluição por embarcações, instituiu a NORMAM 02. Nela são abordados aspectos de segurança e regulamentados dispositivos, equipamentos e materiais obrigatórios a bordo, adaptados da legislação internacional.

A redução dos riscos e o controle efetivo das conseqüências de eventuais acidentes também requerem o estudo e cumprimento da legislação vigente, através da adoção de ações preventivas permanentes, cujos custos são significativamente inferiores aos de combate à poluição. Portanto, a verificação do quadro legal vigente no que se refere à certificação das embarcações e à padronização dos materiais e procedimentos de combate a acidentes é parte essencial de planos de gerenciamento de riscos. Assim, além da adoção de medidas de prevenção e atendimento a situações de emergência baseadas nas simulações propostas neste trabalho, o planejamento e execução de inspeções e monitoramento do cumprimento das regulamentações citadas anteriormente constituem subsídios essenciais para o desenvolvimento de sistemas de preparo e resposta.

2.2. PROPRIEDADES E PROCESSOS DE INTEMPERISMO DO ÓLEO

Por se tratar de uma mistura complexa de milhares de componentes, não é possível precisar a constituição do petróleo [Gomes, 2004]. Além dos hidrocarbonetos, que representam cerca de 75% da composição de alguns óleos [Silva, 2005], outros componentes como enxofre, nitrogênio e oxigênio estão presentes em menor quantidade. Soto, 2004, destaca a importância das quantidades de enxofre presentes em um petróleo bruto, uma vez que sua liberação no ambiente causa prejuízos adicionais à saúde e segurança, com emissão de níveis perigosos de dióxido de enxofre (SO₂) em caso de queima [Costa, 1999].

A quantidade de cada constituinte de um produto refinado é dependente do tipo de petróleo e do processo de refino a que este foi submetido, e espera-se que seja alterada após sua liberação para o ambiente [Dehaini, 2001]. Embora sejam produzidos e transportados diversos óleos distintos, suas características são amplamente estudadas, com propriedades definidas e interações conhecidas com o ambiente que definem seu comportamento.

Após um derrame, o óleo sofre vários processos mecânicos, químicos e biológicos chamados de processos de intemperismo [International Tankers Owners Pollution Federation Limited, ITOPF, 2001], que podem levar tanto ao seu desaparecimento da superfície da água (evaporação, dispersão, degradação, etc.) quanto à sua persistência (espalhamento, emulsificação). As transformações sofridas pelo petróleo e seus derivados após liberados ao meio ambiente são regidas por processos que podem ser divididos em dois grupos [Frota Nacional de Petroleiros, FRONAPE, 2002]:

- Evolução primária: afeta principalmente as características físicas do produto (densidade, viscosidade, solubilidade), sem alteração das características químicas dos componentes. Compreende os processos de espalhamento e evaporação dos componentes leves do produto liberado, a dissolução das frações solúveis, a emulsificação decorrente da hidrodinâmica e a sedimentação por aderência às partículas suspensas na coluna d'água.
- Evolução secundária: engloba processos mais lentos, que podem se estender de meses a anos, atuando sobre o produto já envelhecido. Nesta fase, os processos atuantes sobre as moléculas são a oxidação fotoquímica e a degradação microbiana.

Segundo Ferrão, 2005, a ocorrência de alguns desses fenômenos é mais efetiva nos primeiros momentos posteriores à liberação, influenciada pelas condições climatológicas e hidrológicas. Mais especificamente, os processos de espalhamento, evaporação, dispersão e emulsificação são os mais significativos durante os instantes iniciais de um derrame, enquanto os processos de oxidação, sedimentação e biodegradação tornam-se dominantes em estágios posteriores [CETESB, 2007], resultando na alteração de propriedades do produto derramado como densidade, viscosidade e toxicidade. A intensidade de cada um desses processos varia ao longo do tempo [CLARK *apud* BENTO, 2005], conforme mostrado na Figura 2.2.1.

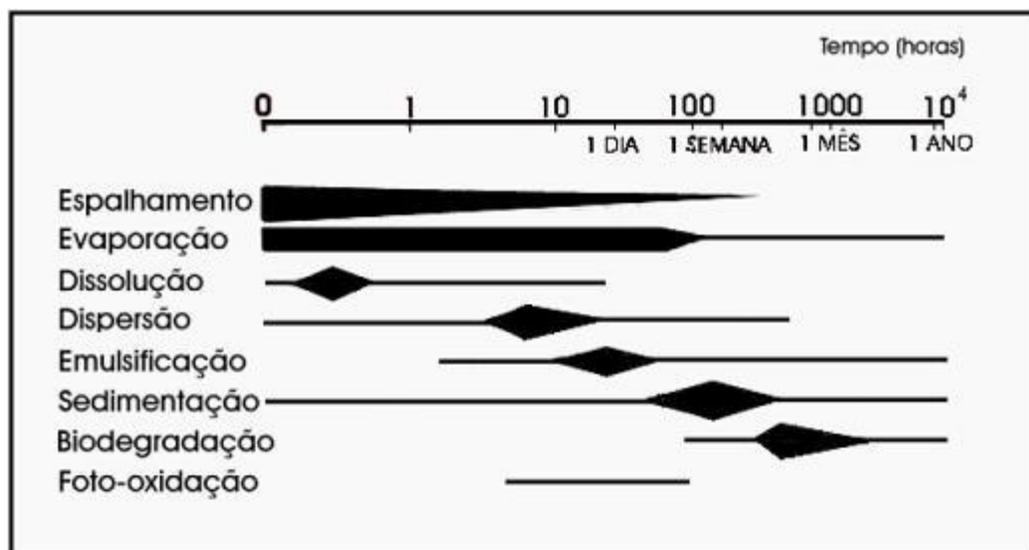


Figura 2.2.1: Duração e intensidade dos processos de intemperização.
Fonte: Adaptado de Bento, 2005.

O comportamento preciso de um óleo vai depender das suas propriedades, das condições ambientais em que ocorre o vazamento e dos processos de intemperismo sofridos [ITOPF, 2002]. Neste capítulo são descritas as propriedades e os processos de intemperismo mais relevantes para a determinação do destino provável dos produtos refinados provenientes da Refap em caso de acidentes durante o seu transporte.

2.2.1. Densidade

Caso possua densidade inferior à densidade da água, um óleo flutuará em sua superfície, ao contrário de alguns óleos crus e combustíveis residuais que apresentam densidades superiores a 1000 kg.m^{-3} , cujo comportamento ficará condicionado à salinidade e temperatura da água. Conforme Soto, 2004, as manchas de óleo que inicialmente flutuam tendem a permanecer na superfície, com exceção de casos em que ocorra uma forte mistura do óleo com sedimentos ou a combustão do produto, formando resíduos altamente densos. Os produtos refinados oriundos da Refap considerados neste estudo são menos densos que a água, o que ocasionaria sua flutuação na superfície após um derrame acidental.

Além da dependência da temperatura do óleo, a densidade se altera após a liberação devido à temperatura da água e à evaporação das frações mais voláteis. Dessa forma, o óleo torna-se menos flutuante (aumento da densidade) ao longo do tempo, originando emulsões água-em-óleo após longos períodos de evaporação em que o residual se torne tão denso que termine por afundar na coluna de água.

Com o objetivo de determinar a persistência de um óleo no ambiente a ITOPF, em sua Publicação Técnica N° 02/2002, adota como critério de classificação a densidade relativa (razão entre a densidade do óleo e a densidade da água pura a uma dada temperatura), usada para agrupar óleos conforme sua persistência no meio: óleos com densidade relativa menor que 0.8 pertencem ao grupo I; o grupo II se refere a densidades relativa entre 0.8 e 0.85; ao grupo III pertencem os óleos com densidade relativa entre 0.85 e 0.95 e no grupo IV encontram-se aqueles com densidade relativa superior a 0.95. Espera-se que os produtos com menor densidade específica sejam os menos persistentes no ambiente aquático.

2.2.2. Viscosidade

A medida da resistência do fluido ao movimento é a viscosidade, de forma que os óleos menos viscosos tendem a escoar com maior facilidade. Trata-se de uma propriedade fortemente dependente da composição química, pois de uma forma geral as frações mais pesadas possuem viscosidades mais elevadas, enquanto as mais leves possuem viscosidades mais baixas.

Assim, enquanto a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, o processo de evaporação torna o óleo mais viscoso, fazendo desta uma propriedade determinante da intensidade dos processos de intemperismo como o espalhamento, a evaporação e a emulsificação, que por sua vez também exercem sua influência sobre a própria viscosidade. A dispersão vertical de uma substância oleosa na coluna de água também é fortemente influenciada pela viscosidade, já que as dimensões das partículas formadas neste processo são definidas por ela. Por isso, o conhecimento da viscosidade é de grande importância na escolha dos métodos de limpeza, pois técnicas que utilizem dispersantes químicos e equipamentos desenvolvidos para a remoção de óleos pouco viscosos serão ineficazes.

2.2.3. Solubilidade

Alguns dos hidrocarbonetos presentes nos derivados refinados de petróleo dissolvem-se na água. Sua solubilidade ocasiona a dissolução das substâncias oleosas liberadas, especialmente na presença de ondulações. Por outro lado, os compostos mais solúveis são também os que apresentam pontos de ebulição mais baixos, assim também é possível contabilizar sua remoção através do processo de evaporação.

No processo de dissolução, os compostos mais solúveis passam para a coluna de água. Normalmente, apenas uma pequena fração dos componentes do óleo se dissolve a uma taxa muito baixa, de forma que a quantidade de produto dissolvida não seria muito significativa no cálculo da área máxima da mancha oleosa formada após um derrame acidental. Entretanto, mesmo em baixas concentrações os compostos solúveis geralmente são tóxicos para as espécies aquáticas, fazendo da dissolução um fenômeno relevante na avaliação dos impactos ambientais da presença de derivados de petróleo no ecossistema aquático.

2.2.4. Espalhamento

O processo físico caracterizado pela formação de um delgado filme superficial na interface água-ar é chamado espalhamento. Na prática, este pode ser definido como o aumento da área da mancha oleosa formada devido à tendência que o óleo tem para se espalhar em água parada.

Segundo a Environmental Protection Agency [EPA, 2001], a expansão do óleo proveniente de um vazamento depende da força gravitacional e da tensão superficial, e é contrabalançada pelo efeito inercial e viscosidade interfacial (óleo-água). Esse balanço de forças foi analisado por Fay, 1969, assumindo que a mancha assume forma circular e que a espessura da poça é homogênea.

O processo de espalhamento da mancha inicia imediatamente após o derrame e pode durar de sete a dez dias ou enquanto o óleo não for contido. Nos primeiros instantes após a liberação, o espalhamento constitui o processo predominante. Procede com grande rapidez nas primeiras horas (algumas centenas de metros por hora), porém após os dois primeiros dias o processo diminui sensivelmente devido à evaporação que torna o petróleo mais pesado e viscoso [American Petroil Institute, API, 1999].

Passado um tempo indeterminado, e mediante a existência de fortes ventos e ondulações e o efeito das correntes, a mancha pode ser deformada, fragmentada e dispersa, condições nas quais a aproximação tal aproximação torna-se inaplicável. Contudo, na fase inicial do derrame o cálculo da área da poça estabelecida pode ser estimado pela teoria de Fay.

As dimensões da mancha oleosa constituem um parâmetro importante para o desenvolvimento de estratégias de contenção e remediação da mesma, bem como para a avaliação dos demais processos de intemperismo (como a evaporação, principalmente), diretamente dependentes da área superficial ocupada por ela.

2.2.5. Evaporação

Primeiro processo de remoção estabelecido na ocorrência de um derrame de derivados refinados de petróleo, inicia imediatamente após o vazamento e predomina sobre os outros durante as 24 a 48 horas iniciais, mantendo-se por aproximadamente duas semanas caso não sejam adotadas técnicas de combate à emergência e o produto permaneça no ambiente, podendo atuar por até um ano sobre compostos pesados remanescentes, embora a velocidade de remoção seja muito reduzida depois da primeira semana [ITOPF, 2003]. Consiste na transferência da fração volátil que constitui o óleo da forma líquida para a gasosa, e sofre a interferência da própria intemperização devido aos efeitos de outros processos que ocorram simultaneamente:

- Expansão da área exposta em decorrência do espalhamento, aumentando a eficiência da evaporação;
- Formação de um filme persistente que retarda a remoção do produto da superfície da água, resultado da emulsificação e degradação;
- Decréscimo da pressão de vapor da fase oleosa à medida que as moléculas mais leves são removidas devido à própria evaporação, formando um resíduo viscoso que retarda a volatilização dos componentes restantes.

Os derrames de hidrocarbonetos mais leves podem ter os seus volumes reduzidos em 40% em poucas horas [Costa, 1999]. Por sua vez, a velocidade da remoção, expressa através da taxa de evaporação, é influenciada por fatores climáticos, como temperatura da água e do ar, intensidade de radiação solar e velocidade do vento, e pelas características do óleo, como densidade, viscosidade e solubilidade [CETESB, 2002]. Assim, embora haja redução do volume derramado no decorrer deste processo, os compostos remanescentes têm viscosidade e densidade elevadas, o que torna a mancha mais espessa e persistente, diminuindo a evaporação progressivamente.

2.2.6. Dispersão

A transferência dos compostos do produto derramado para a coluna d'água é denominada dispersão vertical, provocada pelo efeito da gravidade sobre os constituintes de maior densidade, que terminam por desprender-se da mancha oleosa principal [CETESB, 2002]. Apenas uma pequena fração do óleo liberado é dissolvida, podendo chegar a 5% [API, 1999], normalmente a mais tóxica.

Corpos hídricos agitados, com ondulações e turbulência, promovem a “quebra” da mancha, produzindo gotículas de óleo de diversos tamanhos. As menores ficam em suspensão na coluna d'água, sofrendo processos como foto-oxidação e biodegradação, enquanto as maiores se aderem aos sedimentos com mais facilidade. Já a taxa de dispersão depende do tipo de óleo, do grau de intemperização em que se encontra e do estado das águas, sendo maior naquelas mais agitadas.

Este processo é influenciado por três fatores essenciais [Reed, 1999]: viscosidade do óleo, temperaturas da água e do ar e condições hidrológicas. Quanto maior a viscosidade do produto, maior é a possibilidade de se formarem espessas camadas de óleo na superfície da água, diminuindo sua dispersão. Temperaturas baixas da água e do ar também podem inibir a dispersão, e as condições

hidrológicas estão associadas à agitação, tornando a dispersão o principal mecanismo de remoção de óleo da superfície durante tempestades, por exemplo. Caso contrário, espera-se que a evaporação seja o processo mais significativo.

2.2.7. Emulsificação

A emulsificação é caracterizada pela incorporação de água ao óleo, formando um novo produto relativamente resistente a outros processos de intemperismo [ITOPF, 2003], que consiste em uma emulsão óleo-água conhecida como mousse. O processo tem início ainda no primeiro dia e pode persistir na mancha remanescente ao longo de todo o primeiro ano, porém grande parte da emulsão é formada durante a primeira semana após a perda dos componentes leves pelos processos de evaporação e dissolução [CETESB, 2002].

A emulsificação aumenta de duas a três vezes o volume total da poça remanescente na superfície aquática, que passa a conter de 30% a 80% de água [API, 1999]. Uma emulsão é extremamente viscosa e tem densidade próxima à da água do corpo hídrico, resultando no produto final de um derrame, chamado *tar balls* ou pelotas de óleo.

O processo depende diretamente da viscosidade e composição do óleo, bem como da agitação das águas. Óleos mais viscosos, com componentes pesados, tendem a formar emulsões água-óleo estáveis. Enquanto isso, uma maior energia de mistura promove a formação de uma emulsão mais rapidamente. Entretanto, emulsões podem se separar em água e óleo novamente.

Quando formadas, estas emulsões podem apresentar características muito diferentes dos óleos antes da emulsificação, aspecto com implicações importantes no comportamento do óleo derramado, e subseqüentes operações de limpeza, sendo assim importante conhecer se o óleo tende a formar emulsões estáveis. A formação de emulsões normalmente provoca um aumento da viscosidade e diminui o espalhamento e a evaporação, e devido à sua estabilidade e persistência, retardam a sua eliminação, inibindo algumas reações químicas e biológicas, uma vez que reduzem as áreas expostas ao ar e à água.

Contudo, informações referentes à modelagem do processo são escassas, embora este seja um mecanismo importante para o envelhecimento do petróleo. Já a maior parte dos produtos refinados não chega a formar emulsões água-óleo estáveis antes das operações de remoção e limpeza devido às suas baixas viscosidades [FINGAS et al., 1995].

2.2.8. Dissolução

A dissolução é o processo através do qual os hidrocarbonetos solúveis se dissolvem na água, originando uma massa líquida homogênea. Assim como o espalhamento e a evaporação, a dissolução ocorre com maior intensidade nas primeiras horas após a liberação e tende a ser mais efetiva para compostos com menor peso molecular, pois são mais solúveis do que as frações mais pesadas.

O processo de dissolução é improvável para muitos dos óleos derivados de petróleo, uma vez que os componentes que poderiam se dissolver normalmente volatilizam primeiro, pois a evaporação ocorre de 10 a 100 vezes mais rápido [ITOPF, 2003]. Mesmo após a dissolução pode ocorrer a remoção subsequente por evaporação ou por algum outro processo, como biodegradação ou foto-oxidação.

Com relação à toxicidade, as frações que se dissolvem, além de nocivas aos organismos, tornam-se biodisponíveis. No entanto, os compostos dissolvidos concentram-se próximos à superfície, sendo assim os riscos são considerados localizados e de curta duração devido à evaporação e mistura na coluna de água.

2.2.9. Biodegradação

A biodegradação é o processo pelo qual os compostos de origem orgânica podem ser oxidados através de processos biológicos promovidos por microrganismos. Nesse processo, bactérias e fungos presentes no meio se utilizam dos hidrocarbonetos de petróleo como fonte de alimentação, transformando as moléculas em subprodutos oxidados, que serão, por fim, degradados a dióxido de carbono (CO_2) e água [ITOPF, 2003].

Teoricamente, todos os compostos orgânicos são suscetíveis à degradação por algum tipo de microrganismo, porém existem compostos que apresentam taxas de biodegradação tão baixas, que geralmente o processo é desconsiderado. É o caso de muitos dos compostos químicos presentes em produtos petrolíferos. Apesar de lento, é um processo significativo, que tem início logo após a

redução da toxicidade devido à intemperização do óleo derramado e o crescimento e multiplicação da população microbiana residente, cujo pico se dá dentro do primeiro mês.

O desenvolvimento de áreas científicas emergentes, como é o caso da biotecnologia, permitiu o avanço do conhecimento dos fenômenos envolvidos na biodegradação de compostos persistentes. A disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, e oxigênio são fatores limitantes do processo, enquanto temperaturas moderadas favorecem a atividade microbiana [CETESB, 2002]. Observa-se que este processo ocorre na presença de água e óleo, mais especificamente na superfície e coluna de água e no sedimento, sendo rara a degradação do óleo na linha da costa devido à falta de água.

A biodegradação será mais significativa quanto maior forem a extensão da superfície da mancha oleosa em contacto com a água e as bactérias, as temperaturas da água e do óleo e a disponibilidade de nutrientes e oxigênio. A composição dos hidrocarbonetos também é importante, uma vez que a biodegradação é mais relevante nas frações leves. Assim, o espalhamento, a dispersão e a dissolução acabam por facilitar a ocorrência da biodegradação, porém a redução de hidrocarbonetos por este processo biológico é insignificante quando comparada com as perdas por evaporação ou dispersão, sobretudo nos primeiros dias após o derrame.

2.2.10. Oxidação Fotoquímica

A foto-oxidação ocorre quando reações, desencadeadas pela ação da energia solar na presença de oxigênio, modificam a estrutura química de alguns compostos produzindo novos compostos que tendem a ser mais solúveis e tóxicos [CETESB, 2002]. Tais produtos, no entanto, apresentam meia-vida de poucas horas a poucos dias, sendo oxidados por ações fotolíticas subsequentes e diluídos na coluna de água.

A oxidação fotoquímica ocorre na superfície da mancha de petróleo, conseqüentemente, é acelerada por um maior espalhamento. Contudo, é um processo lento, já que a penetração de oxigênio é muito reduzida. Outros fatores podem condicionar a taxa de oxidação do óleo, como a espessura da mancha, a presença de sais minerais dissolvidos na água, a composição do produto, e a incidência de radiação com comprimento de onda inferior a 400 nanômetros.

Iniciado após decorridas algumas horas do derrame, pode durar de semanas a meses sem, no entanto, ter um pico durante o processo de intemperismo. Apesar de alguns tipos de óleos serem

mais suscetíveis à foto-oxidação do que outros, seus mecanismos ainda não são bem conhecidos e o processo não é considerado importante na intemperização da maioria deles [ITOPF, 2003].

2.2.11. Sedimentação

A sedimentação pode ocorrer essencialmente de três formas: adsorção a partículas em suspensão, deposição como pelotas de óleo ou por afundamento direto resultante do aumento da densidade em consequência da intemperização [CETESB, 2004]. O processo ocorre com os componentes pesados que não se dissolvem na água, ampliando a residência do produto, uma vez sedimentado, no ambiente e tornando-o uma fonte de contaminação à longo prazo. Importante em áreas costeiras de alto hidrodinamismo, onde há maior quantidade de organismos e partículas em suspensão na coluna de água, a sedimentação não é considerada significativa nos primeiros dias, atingindo seu ápice algumas semanas depois da liberação [CETESB, 2002].

A densidade específica exerce grande influência sobre o processo: quanto maior a densidade específica, menos partículas em suspensão são necessárias para que o óleo sedimente. Uma porção dele acaba por sedimentar em decorrência da associação à matéria em suspensão na coluna de água, originando um aumento da densidade e o consequente movimento descendente das partículas na até ao fundo do corpo hídrico. Outros fenômenos que podem originar a sedimentação são os processos de evaporação, dissolução e emulsificação. Entretanto, qualquer um dos fenômenos citados é menos importante do que a agregação de matéria em suspensão às partículas de hidrocarbonetos, exceto para produtos mais densos que a água que possam afundar por natureza e assim sedimentar.

2.3. EFEITOS DE VAZAMENTOS

As misturas de hidrocarbonetos e outras substâncias que compõem o petróleo bruto e seus derivados conferem-lhes propriedades físico-químicas variadas, determinantes do aspecto adquirido e dos impactos sobre os recursos ambientais e ecossistemas associados. Tais compostos podem ser classificados de acordo com essas propriedades e, conseqüentemente, com seu

comportamento no ambiente aquático, conforme critérios adotados pelo API, 1999, e pela FRONAPE, 2002. No Quadro 2.3.1 é indicada a classificação em função do peso específico.

Quadro 2.3.1: Caracterização dos derivados de petróleo em função do peso específico.

Classificação	Exemplos de produtos	Massa específica (kg.m ⁻³)	Características
Tipo I – Voláteis Leves	Gasolina Querosene Diesel Parafina	≤ 850	-Muito a moderadamente voláteis e inflamáveis; -Evaporação de até 2/3 do volume liberado; -Toxicidade aguda elevada a moderada para a biota; -O espalhamento, a cobertura e a penetração dos substratos tende a asfixiar os organismos.
Tipo II – Moderados	Bunkering Óleos combustível e de reciclo leves	850 a 950	-Moderadamente volátil, ponto de inflamação > 52°C; -Evaporação de até 1/3 do volume derramado; -Toxicidade aguda variável para a biota, dependente da quantidade da fração leve; -Cobre e penetra o substrato (provável contaminação pesada abaixo da superfície); -Espalhados tendem a asfixiar os organismos.
Tipo III – Pesados	Óleos crus Óleo lubrificante pesado Emulsões água-em-óleo	950 a 1000	- Ligeiramente volátil, ponto de inflamação superior a 65°C; - Evaporação inferior a 20% do volume; - Dispersão natural e solubilidade relativamente baixas; - Espalhados tendem a asfixiar os organismos; -Baixa toxicidade aguda; -Formam emulsões estáveis.
Tipo IV – Residuais	Óleo combustível pesado Óleo cru degradado Asfalto	>1000	- Semi-sólidos não voláteis; -Dispersão nula; -Muito baixa solubilidade em água e toxicidade aguda.

Fonte: API, 1999.

A classificação conforme a persistência dos compostos no ambiente é apresentada no Quadro 2.3.2.

Quadro 2.3.2: Caracterização dos derivados de petróleo em função da persistência no ambiente.

Categoria	Persistência	Exemplos de Produtos
Grupo I	Não persistente	Gasolina Condensados
Grupo II	Moderadamente persistente	Diesel Óleos cru e de reciclo leves
Grupo III	Persistente	Bunkering Óleo combustível pesado

Fonte: FRONAPE, 2002.

Os incidentes envolvendo a liberação de óleo em corpos hídricos, embora menos frequentes do que episódios de poluição por substâncias como ozônio, organoclorados ou metais pesados, têm maior visibilidade, concentrando os maiores esforços para o seu combate. Essa preocupação é justificada pela magnitude de eventos dessa natureza, que podem alcançar o *status* de catástrofes ambientais.

Segundo a ITOPF, 1998, a severidade dos impactos impostos por um vazamento relaciona-se à velocidade de recuperação do ambiente, ou seja, ao estabelecimento de uma comunidade biológica na qual microorganismos, plantas e animais característicos daquela região estejam presentes e exercendo suas funções normalmente. São citados como fatores que determinam a severidade e capacidade de recuperação os seguintes:

- Tipo de óleo:

Diferentes variedades de petróleo e seus derivados apresentam propriedades distintas. Aqueles com baixo ponto de ebulição costumam acarretar os efeitos toxicológicos mais sérios devido à facilidade de absorção pelos organismos, danificando suas estruturas celulares. Entretanto, constituem os compostos mais voláteis, resultando numa toxicidade localizada e de curta duração após a liberação. Já os mais densos e viscosos não causam intoxicação aguda, porém provocam mortandade por efeitos físicos (como sufocamento) e permanecem no ambiente por longos períodos.

- Características ecológicas da região atingida

A alta diluição observada nas águas abertas de biomas marinhos é um fator de minimização da contaminação. Contudo, essa não é uma característica das águas doces, uma vez que as baixas velocidades das correntes (se comparadas às correntes marítimas) ocasionam uma intensificação dos impactos [Silva, 2005].

Nessas condições o óleo tende a empoçar, o que torna a evaporação praticamente o único processo de remoção atuante, resultando na persistência do produto na superfície da água por períodos prolongados. Assim, aumenta a probabilidade de que o óleo chegue às margens e seja fixado pela vegetação e aderido aos sedimentos, afetando a fauna que deles se alimenta. Além do alimento contaminado, pode ocorrer o contato direto com o produto derramado.

O ambiente costeiro também exerce influência sobre a duração e intensidade dos efeitos da exposição, pois alguns substratos e formações geológicas favorecem a retenção do óleo. É o caso das praias que margeiam lagunas costeiras, onde a ocorrência de ondulações não é suficiente para a dissolução. A sensibilidade das espécies endêmicas e migratórias, em especial as aves, que costumam ser mais sujeitas à contaminação, é outro aspecto a ser considerado.

- Sazonalidade

Os efeitos de vazamentos diferem de acordo com a época do ano. Isto se deve ao fato de, além dos processos de intemperismo serem dependentes da temperatura, tanto as plantas quanto os animais apresentam comportamentos distintos principalmente no que se refere à reprodução em estações mais frias, sendo menos atingidas no outono ou inverno.

- Limpeza

As técnicas empregadas na recuperação do ambiente podem por vezes potencializar os danos de um derrame. As vantagens e desvantagens dos métodos mais utilizados, apresentados de forma sucinta posteriormente, devem ser analisadas durante a elaboração de um plano de contingências.

Quanto aos efeitos da contaminação ambiental, estes podem ser divididos em diretos e indiretos [Sobreira, 2004]. Os efeitos diretos referem-se: a intoxicações agudas (exposição a altas concentrações por um curto intervalo) ou crônicas (exposição a baixas concentrações por um período prolongado); a interferências físicas na locomoção, alimentação, reprodução ou outro

comportamento; e ao abafamento, que provoca asfixia e estresse térmico. No caso de efeitos indiretos ocorrem alterações das funções e estruturas da biota, como desequilíbrios na cadeia alimentar devido à mortandade de espécies predadoras e, conseqüentemente, proliferação de outras ou mesmo o desaparecimento de comunidades biológicas inteiras por escassez de alimento.

Os danos decorrentes de um vazamento de produtos petrolíferos não se restringem à biota, incluindo prejuízos sócio-econômicos [ITOPF, 2004]. A deterioração da qualidade da água compromete suas múltiplas funções, como o abastecimento público e industrial de água potável, a pesca e criação de espécies de interesse comercial, o uso em atividades agropecuárias e o aproveitamento recreacional.

No que se refere à saúde das populações, equipes de atendimento e voluntários, os planos de contingências costumam contemplar apenas os efeitos agudos da exposição aos hidrocarbonetos. Estudos contemplando a toxicidade dos compostos em humanos ainda são insuficientes, embora haja dados disponíveis acerca dos efeitos da exposição ocupacional a hidrocarbonetos. Estes apontam para a possibilidade de complicações pulmonares em caso de aspiração, dores de cabeça, tonturas e efeitos narcóticos, além de ser irritante em contato com os olhos e pele. Não há indícios de que os derivados de petróleo causem câncer, contudo alguns de seus componentes são considerados componentes carcinogênicos e a ocorrência de tumores em aves já foi observada [Ferrão, 2005].

Um resumo das propriedades de alguns hidrocarbonetos foi elaborado por Fingas, 2000, que apresenta esquematicamente cada um dos contaminantes (Tabela 2.3.1) baseando-se em sua composição físico-química (viscosidade), comportamento no meio ambiente (toxicidade) e capacidade de degradação do contaminante no meio ambiente (persistência). Na tabela, a numeração está relacionada à importância relativa dos contaminantes de acordo com a propriedade avaliada, de maneira que uma numeração igual a 1 indica um contaminante de menor toxicidade, enquanto a numeração igual a 5 representa um contaminante de maior toxicidade. O mesmo sucede para a viscosidade e degradação, pois quanto menor o número, menor é a viscosidade ou capacidade de degradação do contaminante. Assim, um composto como o diesel, que é considerado toxicologicamente preocupante, assume importância moderada devido à intemperização permitida por suas características físico-químicas.

Tabela 2.3.1: Classificação dos derivados de petróleo quanto ao potencial de contaminação.

Contaminante	Toxicidade	Viscosidade	Degradação
Nafta	5	1	3
MTBE	5	1	4
Diesel	5	2	3
Gasolina	5	1	4
Borra oleosa	5	5	5
Querosene de aviação	4	1	4
Óleo combustível	3	3	2
Petróleo	2	4	2

Fonte : Fingas, 2000.

O agrupamento desses produtos pode se dar de duas formas: contaminantes de alta concentração (viscosidade menor 3 e degradação acima ou igual a 3) e baixa concentração (viscosidade maior ou igual a 3 e degradação menor que 3); e contaminantes de alta preocupação (toxicidade igual a 5), média preocupação (toxicidade igual a 3 ou 4) e baixa preocupação (toxicidade menor que 3).

2.4. PREVENÇÃO E RESPOSTA A ACIDENTES

O maior potencial de sucesso na redução dos riscos relativos às atividades de transporte aquaviário de derivados de petróleo, conforme Vanem et al., 2007, se encontra nos sistemas de apoio à navegação como os terminais aquaviários, as centrais de controle e monitoramento do tráfego hidroviário ou mesmo a tripulação, e não em medidas adotadas na própria embarcação, visto que os navios tanque utilizados são certificados e os dispositivos e equipamentos de segurança dos quais são dotados são regulamentados, previstos na fase de projeto, e vistoriados pela entidade certificadora. Assim, a prevenção de acidentes passa principalmente pela manutenção das vias navegáveis e equipamentos de sinalização pelos órgãos responsáveis (na Laguna dos Patos: Superintendência de Portos e Costas), pela instrução de operadores e tripulantes quanto à tomada de

decisões em situações como a ocorrência de instabilidades meteorológicas e, num segundo momento, na implantação de um sistema de resposta a acidentes em terra, através da aquisição de materiais de combate a emergências e aprimoramento da comunicação com equipes de atendimento vinculadas a entidades governamentais e demais empresas usuárias da hidrovía.

O planejamento das medidas de contingência e monitoramento após um vazamento de óleo precisa um mapa simples que mostre em quanto tempo para onde o óleo pode se dirigir, o que a simulação de cenários de acidentes utilizando um modelo simplificado pode fornecer [Rosman, 2007]. Portanto, a obtenção de resultados para cada cenário selecionado a partir da aplicação de ferramentas de análise de riscos e da modelagem computacional descrita anteriormente fornecem dados relevantes para a elaboração de um PC voltado ao transporte dos produtos oriundos da Refap na Laguna dos Patos, podendo ser utilizada para a previsão do comportamento do óleo em tempo hábil para o atendimento.

Nesse contexto, os esforços preventivos são direcionados à salvaguarda da vida humana e minimização da contaminação ambiental, fazendo-se necessária a elaboração de Plano de Contingências (PC) com tal enfoque. O PC tem por objetivo proporcionar uma resposta tecnicamente adequada, rápida e eficaz frente à possibilidade ou ocorrência de um derrame acidental de substâncias perigosas, de forma a reduzir os danos ao ambiente e os impactos sobre os bens econômicos e sociais das populações ribeirinhas ou situadas nas suas proximidades. Um PC deve contemplar pelo menos os aspectos descritos abaixo [Souza Filho, 2006]:

- Responsabilidade e âmbito: definição da área geográfica abrangida e identificação das autoridades responsáveis;
- Riscos acidentais: previsão de possíveis cenários para locais específicos, considerando os tipos e as quantidades dos produtos manuseados, os tipos de acidentes e as prováveis fontes de poluição;
- Comportamento dos produtos: dados relativos às propriedades físicas, químicas e toxicológicas dos produtos de interesse;
- Recursos em risco: as zonas devem ser mencionadas e devidamente assinaladas em mapas com a indicação de graus de sensibilidade, bem como as prioridades para a sua proteção em caso de acidentes;
- Seleção das técnicas: planejamento estratégico da utilização das técnicas de combate selecionadas, determinado em função da avaliação dos riscos de vazamento e de

prioridades de proteção previamente acordadas. Definição das técnicas apropriadas e das operações a empreender;

- Localização do equipamento: listagem de todos os equipamentos e produtos disponíveis, provenientes tanto do setor público quanto do setor privado, com indicação de dados técnicos e dos locais de armazenamento mais apropriados;
- Mão-de-obra: estabelecimento do número necessário de operadores dos diferentes equipamentos, com a indicação da sua qualificação e experiência, e dos apoios logísticos como transportes, alojamento, alimentação, proteção individual e primeiros socorros;
- Transporte, armazenamento e eliminação de detritos: previsão dos locais mais adequados para o armazenamento temporário dos detritos recolhidos e das opções para o seu tratamento e eliminação, considerando as desvantagens ambientais de cada método e custos envolvidos;
- Organização: definição de uma estrutura que permita a coordenação e condução das ações de combate de forma flexível e eficaz, qualquer que seja a natureza e dimensão da emergência, e de um Coordenador Operacional das ações de combate. Nessa seção do plano são abordadas as relações públicas, as ligações aos organismos estatais e privados e a formação e treinamentos.

Após a ocorrência de liberações acidentais de óleo em corpos hídricos, a abrangência e intensidade dos seus efeitos adversos podem ser consideravelmente reduzidas com ações emergenciais apropriadas adotadas no menor intervalo de resposta possível. A seleção de técnicas de limpeza apropriadas para o corpo hídrico e demais ecossistemas faz parte do planejamento a ser incluído em um PC, uma vez que a escolha de métodos inadequados pode trazer prejuízos ambientais e econômicos adicionais.

De acordo com a CETESB, 2005, estratégias de limpeza da superfície aquática pode ser constituídas de processos mecânicos (barreiras, escumadeiras, absorventes), químicos (dispersantes), ou biológicos (biorremediação), sendo a ação preferencial nas primeiras horas após uma liberação a contenção (Figura 2.4.1) do óleo para posterior recuperação [ITOPF, 2005], cuja importância é aumentada quanto mais próximo à costa ocorrer o derrame. Entretanto, nem sempre é possível realizá-la em tempo hábil, e o óleo atinge ecossistemas costeiros. A opção pelo método deve ser vinculada ao tipo de ecossistema impactado, suas características e sensibilidade, bem como ao tipo

de óleo derramado e fatores técnicos como acesso e tipo de equipamento passível de ser utilizado, além do custo da operação.



Figura 2.4.1: Barreiras flutuantes de contenção dispostas em “U”.

Fonte: Sobreira, 2004.

Baseados em casos reais e estudos bibliográficos, Cantagallo et al., 2007, propõem os métodos considerados mais apropriados para a limpeza de cada ambiente, sendo descritos a seguir aqueles selecionados para lagoas costeiras.

- Lagoas Costeiras

O óleo, quando derramado em uma laguna, pode ficar persistir por muito tempo, já que a remoção natural é lenta. Devido à sua sensibilidade, recomenda-se que sejam evitados procedimentos que causem maiores danos ao ecossistema, como a utilização de equipamentos pesados de bombeamento e recolhimento e o uso de dispersantes químicos.

Os *skimmers*, apesar de praticamente não causarem danos, podem perder sua eficiência na remoção do óleo devido à quantidade de plantas aquáticas existentes na superfície da lâmina d’água. Já a queima *in situ* (Figura 2.4.2) não é indicada, pois geralmente as distâncias de ecossistemas sensíveis são relativamente pequenas, e os efeitos adversos como a geração de fumaça e calor poderiam afetar as populações ribeirinhas.



2.4.2: Ignição deliberada após derrame acidental de óleo combustível.

Fonte: ITOPF, 2007.

Portanto, pode-se recomendar para estes ambientes o uso de absorventes com posterior recolhimento, corte controlado da vegetação ao redor e limpeza natural. A biorremediação deve ainda ser testada nestes ambientes, mas é uma técnica com potencial para limpeza em longo prazo.

- Manguezais

Altamente sensíveis à contaminação e ao pisoteio, que leva à perda de tecido fotossintético, exposição do interior das plantas a compostos tóxicos e aceleração da erosão. Para casos leves de contaminação recomenda-se deixá-las em recuperação natural, enquanto acumulações de óleo devem ser removidas por bombeamento a vácuo, materiais absorventes ou lavagem a baixa pressão (Figura 2.4.3).



Figura 2.4.3: Limpeza de zona costeira utilizando a técnica do jateamento.

Fonte: ITOPF, 2007.

Métodos mais agressivos, como o uso de dispersantes e o corte da vegetação, somente são considerados em casos de contaminação severa, onde a fauna esteja ameaçada, uma vez que sua utilização pode trazer impactos adicionais e causar maior impregnação do contaminante nos substratos.

- Praias

A limpeza das praias após derrames de petróleo sempre foi uma atividade prioritária, já que tais elementos conectam-se às atividades de turismo e lazer. Os métodos disponíveis para limpeza de praias são a absorção, remoção manual, bombeamento a vácuo, remoção mecânica, biodegradação induzida, dispersão química, limpeza natural e jateamento.

Inicialmente, a limpeza deve se concentrar em remover manualmente o óleo, de maneira que a quantidade de areia removida seja menor. O jateamento a baixa pressão pode ser usado para direcionar e acumular o óleo a ser recolhido por *skimmers* (Figura 2.4.4) e absorventes, enquanto o jateamento a alta pressão deve ser evitado, pois pode transportar material contaminado, causar impacto mecânico sobre a fauna ou desalojá-la e remover sedimentos.



Figura 2.4.4: Escumadeira de discos giratórios.
Fonte: CETESB, 2007.

Quanto à biorremediação, não há resultados conclusivos acerca da eficácia do aumento induzido de microorganismos, e seu uso, bem como o de dispersantes, deve ser autorizados pelo órgão ambiental competente.

Antes da aplicação de qualquer técnica de limpeza das áreas costeiras é fundamental este seja realizado somente após o óleo ter sido retirado, ao menos parcialmente, das águas próximas aos locais atingidos. Do contrário, ambientes já limpos podem vir a ser novamente contaminados, sendo necessária a repetição dos procedimentos de descontaminação [CETESB, 2002].

3. MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO ÓLEO EM ÁGUAS SUPERFICIAIS

Embora grande parte das ocorrências de acidentes durante o transporte aquaviário de petróleo e seus derivados apresente pequenas proporções, alguns deles resultam no lançamento de quantidades de óleo suficientes para causar impactos severos ao meio ambiente [Reed et al., 1999]. O combate a um derrame dessa magnitude requer o conhecimento do comportamento e destino da mancha oleosa formada.

Os recursos computacionais para previsão do desenvolvimento de manchas constituem uma importante ferramenta de gestão ambiental em situações que requerem o atendimento a emergências envolvendo vazamentos acidentais de derivados de petróleo em corpos hídricos. Nesse contexto, buscou-se elaborar dois modelos computacionais simplificados, para vazamentos instantâneos e contínuos separadamente, com o objetivo de realizar simulações genéricas para as quais as condições iniciais e os parâmetros de entrada foram adotados de forma a atender os critérios estabelecidos na Informação Técnica ELPN/IBAMA N° 023/02. Esta determina que o volume de óleo liberado a ser considerado na modelagem deve utilizar o critério de “descarga de pior caso”, que corresponde à capacidade máxima do tanque, enquanto os parâmetros hidrológicos e climatológicos devem ser selecionados de acordo com séries temporais de dados para a região, simulando os piores cenários, nos quais o óleo atinge a costa.

O óleo derramado em água pode comportar-se de diversas maneiras, espalhando até formar uma lâmina delgada, evaporando, prendendo-se aos sedimentos e formando emulsões, dependendo das suas características e das condições ambientais prevalecentes. A modelagem computacional pode agregar uma quantidade considerável de informações para a previsão de efeitos de acidentes envolvendo o transporte de derivados refinados de petróleo, relevantes para a tomada de decisões em eventuais ocorrências dessa natureza. A modelagem para esse fim utiliza-se, a princípio, de dados climatológicos também simples, consistindo nos valores médios de temperatura e velocidade de ventos e correntes, obtidos em séries históricas que podem ser substituídas por informações meteorológicas.

Nos modelos desenvolvidos para o presente estudo da deriva de manchas de óleo em diferentes cenários são considerados os efeitos do espalhamento e da evaporação devido à sua predominância sobre os demais processos de intemperização nas primeiras horas após o derrame, visto que nesse período são postas em prática as ações de combate a emergências. Estes visam prever o comportamento de compostos imiscíveis menos densos que a água e são baseados em

metodologias que permitem sua execução levando em conta diferentes condições de temperatura, ventos e correntes, bem como produtos com características físico-químicas distintas, com baixo custo computacional.

A seguir são descritas as formulações incluídas na modelagem de acidentes com derramamento de óleo na Laguna dos Patos.

3.1. MODELAGEM DO ESPALHAMENTO

Um produto liberado na superfície da água espalhará imediatamente nas proximidades da embarcação avariada. O movimento horizontal do óleo na superfície da água devido aos efeitos da densidade, inércia, fricção, viscosidade e tensão superficial terá continuidade até a contenção da poça de óleo, ou até que esta atinja uma extensão na qual sua espessura esteja reduzida a uma altura mínima, a partir da qual a partição em manchas menores é comum.

O processo de espalhamento aumenta a mancha de óleo, aumentando também a área de exposição ao ar, ao sol e o contato com a água, permitindo, dessa forma, um incremento na eficiência de outros processos. Saber a taxa à qual o óleo espalha na superfície da água é indispensável, uma vez que a área e espessura da mancha oleosa são dados de entrada na modelagem dos demais processos de intemperismo e transporte [Reed et al., 1999]. São usados nos cálculos de evaporação e, além disso, são requeridos para a avaliação da eficiência potencial dos diferentes métodos de combate a vazamentos de óleo e para estimativas dos impactos ambientais.

A previsão dos processos de espalhamento e evaporação do óleo proveniente de perfurações acidentais de compartimentos de carga de embarcações em corpos hídricos é realizada por modelos computacionais. Muitos dos algoritmos usados na simulação do espalhamento, incluindo aqueles adotados neste estudo, são simples e reproduzem somente o comportamento visível do vazamento, objetivando orientar a elaboração de planos de contingência e promover ações efetivas no combate à mancha oleosa. Formulados de forma generalizada, permitem o tratamento dos processos sem a necessidade de descrições detalhadas do perfil de velocidades, rugosidade do fundo e seções transversais do corpo hídrico e das dimensões do orifício, dados geralmente indisponíveis, de maneira que possam ser usados também na avaliação de um acidente em tempo real.

A modelagem do espalhamento requer a definição do volume derramado ou taxa de liberação, pressão de vapor do óleo, densidades, temperaturas e viscosidades do óleo e da água e velocidades dos ventos e correntes, a serem utilizados como parâmetros de entrada. As primeiras fórmulas foram idealizadas para liberações instantâneas e descrevem o fenômeno em ambiente marinho e águas calmas, usando substâncias flutuantes e insolúveis como o óleo [Reed et al., 1999].

Considera-se um volume total descarregado de uma só vez (entretanto, vazamentos de até dez minutos de duração são modelados como instantâneos), resultando num espalhamento axi-simétrico, ou seja, a poça resultante é modelada como um cilindro de seção circular isolada em deslocamento pela ação de ventos e correntes superficiais, sem sofrer deformações pelos mesmos, resultante de uma fonte pontual. Na Figura 3.1.1 é mostrado um caso experimental de espalhamento axi-simétrico.

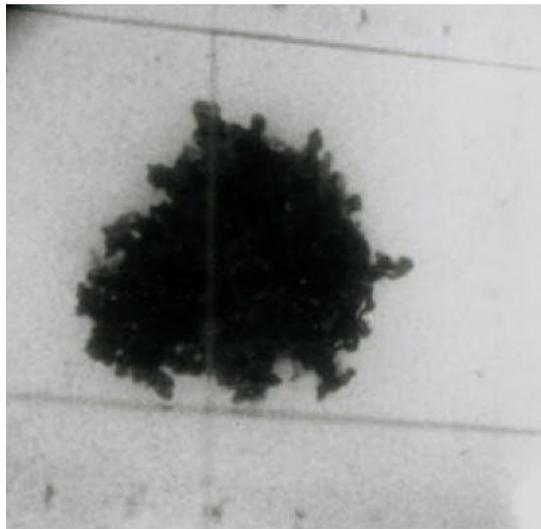


Figura 3.1.1: Espalhamento axi-simétrico do óleo em experimentos laboratoriais.

Fonte: Yappa et al., 2007.

A metodologia mais utilizada para a simulação de liberações instantâneas, formulada através de Análise Dimensional, foi desenvolvida por Fay [1969] e confirmada por Hoult, 1972, que dividiu o processo de espalhamento em três fases distintas, conforme as forças atuantes. Estas foram descritas da seguinte forma:

- Gravitacional-inercial: a massa descendente do óleo é acelerada pela força gravitacional e retardada pela inércia;

- Gravitacional-viscosa: a força gravitacional de espalhamento passa a ser contrariada pela viscosidade;
- Tensão superficial-viscosa: a tensão superficial substitui a gravidade como força motriz.

Quando o vazamento tem início e a poça é relativamente espessa, a gravidade causa o espalhamento lateral do óleo, enquanto a inércia retarda o processo. A essa primeira fase atribui-se a denominação gravitacional-inercial, que se estende até que a espessura da mancha formada seja suficientemente reduzida, dando lugar a outras forças, caracterizando o início da próxima fase. O primeiro estágio do espalhamento de óleo em águas calmas após uma liberação instantânea é mostrado na Figura 3.1.2.

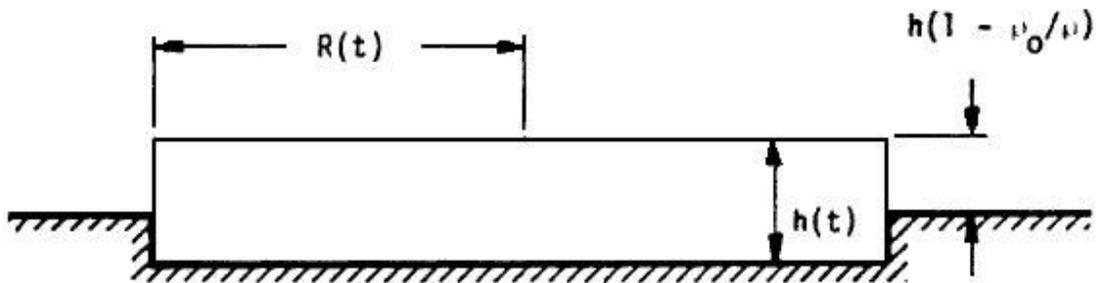


Figura 3.1.2: Fase Gravitacional-inercial do espalhamento.

O método desenvolvido por Fay foi expandido e modificado, cuja forma final adotada neste trabalho foi sugerida por Mackay, 1978, e aplicada em modelo desenvolvido pela U.S. Coast Guard (1983). Durante o período no qual a poça é relativamente espessa, o espalhamento lateral é ocasionado pela força gravitacional F_g atuante sobre a porção emergente da periferia da poça indicada na ilustração com magnitude expressa por:

$$F_g = 2\pi R \left[\frac{1}{2} \rho_l g H^2 \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_w} \right) \right] \quad (1)$$

Sendo:

$$\Delta = \frac{\rho_w - \rho_l}{\rho_w}$$

Onde:

R = raio da poça formada [m]

H = altura da poça formada [m]

g = aceleração gravitacional	[m.s ⁻²]
ρ_l = densidade do óleo	[kg.m ⁻³]
ρ_w = densidade da água	[kg.m ⁻³]
Δ = razão da diferença de densidades entre água e óleo	[-]

A força gravitacional é contraposta pelas forças inerciais, que constituem o segundo termo do balanço de forças resultante na primeira fase, indicado na Equação (2).

$$2\pi R \left[\frac{1}{2} \rho_l g H^2 \left(\frac{\rho_w - \rho_l}{\rho_w} \right) \right] = \rho_l (\pi R^2 H) \left(\frac{d^2 R}{dt^2} \right) \quad (2)$$

Onde $\rho_l \pi R^2 H$ corresponde à massa total de óleo derramada e $d^2 R/dt^2$ refere-se à aceleração da fronteira R da poça, que pode, portanto, ser aproximada pela expressão abaixo:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{k g H \Delta}{R} \quad (3)$$

Na qual:

$k = 1.53$ (constante empírica para primeira fase)	[-]
t = tempo decorrido a partir da emissão	[s]

A integração da Equação (3) fornece a velocidade de expansão da mancha oleosa (Equação 4).

$$\frac{dR}{dt} = k (g H \Delta)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Uma vez que a fase inicial costuma ser muito curta, não chega sequer a ser modelada diretamente, sendo a área e a altura no final da primeira fase assumidas como as condições iniciais da mancha para os cálculos da fase seguinte. Para definir as condições iniciais a partir da fase gravitacional-inercial, considera-se que o tempo decorrido a partir do derrame até a transição à segunda fase corresponda àquele no qual o raio obtido seja igual para os dois regimes.

Com o passar do tempo as forças viscosas da água predominam sobre as inerciais, e a aceleração da mancha decresce significativamente devido à sua atuação, dando início à fase Gravitacional-viscosa do espalhamento. Esta é representada na Figura 3.1.3.

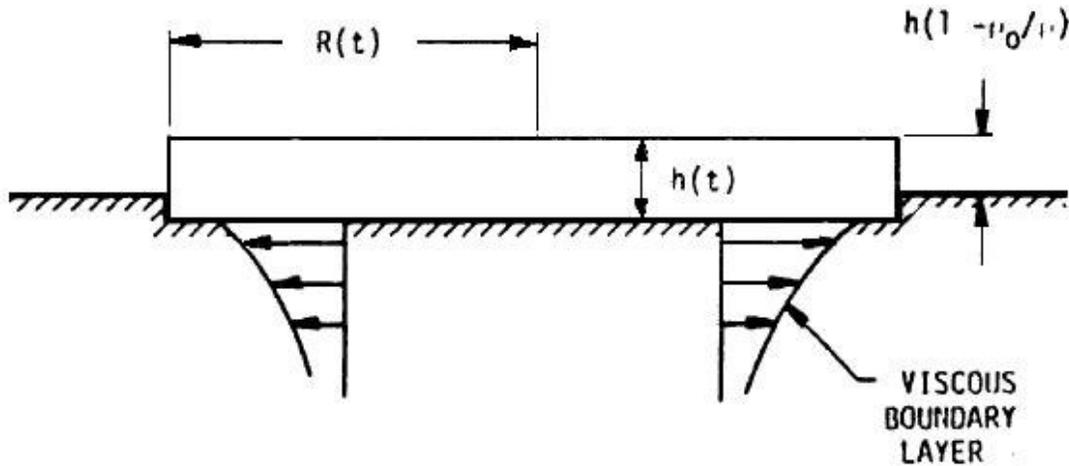


Figura 3.1.3: Fase Gravitacional-viscosa do espalhamento

A espessura δ de uma camada limite viscosa é aproximada por $(\mu_w t / \rho_w)^{1/2}$, resultando no novo balanço de forças indicado na Equação (5):

$$2\pi R \left[\frac{1}{2} \rho_l g H^2 \Delta \right] = \pi R^2 \left[\mu_w \left(\frac{dR}{dt} \right) \left(\frac{\rho_w}{\mu_w t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

Para o qual:

$$\mu_w = \text{viscosidade da água} \quad [\text{N.s.m}^{-2}]$$

Reescrevendo em termos da velocidade de expansão, com $v_w = \mu_w / \rho_w$:

$$\frac{dR}{dt} = k_2 \left(\frac{g V_d \Delta}{v_w^2 R^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

Sendo:

$$k_2 = 1.21 \text{ (constante empírica para segunda fase)} \quad [-]$$

$$V_d = \text{volume de óleo liberado} \quad [\text{m}^3]$$

$$v_w = \text{viscosidade cinemática da água} \quad [\text{m}^2.\text{s}^{-1}]$$

Essa costuma ser a fase dominante em derrames devido à sua importância no período que compreende as primeiras horas após o vazamento, coincidente com o tempo no qual as operações de resposta a acidentes costumam ter início.

Posteriormente, a força gravitacional perde importância à medida que a espessura da mancha se torna muito pequena, portanto o espalhamento passa a ser regido pela tensão superficial e a viscosidade segue se opondo ao avanço dos limites da poça, instaurando-se a fase tensão superficial-viscosa. O balanço das forças na última fase considerada por Fay é apresentada na Equação (7):

$$2\pi R\sigma = \pi R^2 \left[\mu_w \left(\frac{R}{t} \right) \left(\frac{\rho_w}{\mu_w t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (7)$$

A terceira fase é frequentemente inaplicável, uma vez que só tem início quando a poça já é muito fina, resultando muitas vezes na sua divisão em pequenas manchas. Desta forma, os pressupostos de Fay não são satisfeitos, visto que a mancha deixa de ser única e passa a ser transportada sob os efeitos do vento e corrente. Portanto, são utilizadas apenas as fases gravitacional-inercial e gravitacional-viscosa para calcular o espalhamento e a evaporação simultaneamente, assumindo que o espalhamento termina quando a espessura da mancha decresce até um determinado valor. Recomenda-se adotar um valor de 0.1 mm, proposto por Mackay et al., 1980, e utilizado no modelo desenvolvido.

Quando a perda de massa por evaporação é considerada, o volume inicialmente contido na mancha oleosa passa a ser uma função do tempo e a formulação proposta por Mackay, expressa em termos da taxa de variação da área da poça (Equação 8) e introduzindo uma taxa de transferência de massa, é a mais adequada:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2} (\pi k_2^2)^2 \left[\frac{(g\Delta)^2}{v_w} \right]^{\frac{1}{3}} (H)^{\frac{4}{3}} (A)^{\frac{1}{3}} - \frac{2}{3} \left(\frac{m_{ev}}{\rho_l H} \right) \quad (8)$$

Onde:

A = área da poça [m²]

m_{ev} = taxa de evaporação [kg.s⁻¹]

Na qual o primeiro termo à direita representa a expansão superficial e o segundo a perda evaporativa, sendo m_{ev} a taxa mássica de produto evaporado.

A previsão da espessura da poça também é requerida pelo modelo. Como $\rho_l AH$ é igual à massa total do derrame, a taxa de regressão vertical devido à transferência de massa pode ser obtida a partir da Equação (9).

$$\frac{dH}{dt} = - \left[m_{ev} + \rho_l H \left(\frac{dA}{dt} \right) \right] \frac{1}{\rho_l A} \quad (9)$$

O tempo no qual ocorre a transição da fase gravitacional-inercial à fase gravitacional-viscosa é determinado equacionando-se (5) e (7), a partir do qual podem ser estabelecidas as condições iniciais:

$$t_i = \left(\frac{k_2}{k} \right)^4 \left(\frac{V_d}{g \Delta v_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Onde:

t_i = tempo para transição à segunda fase [s]

Como condições iniciais $A = A_i$ e $H = H_i$, onde A_i é a área e H_i a altura da mancha espessa ao final da fase gravitacional-inercial, ou seja, após decorrido o tempo t_i (Equações 11 e 12).

$$A_i = \pi (k_2)^2 \left(\frac{k_2}{k} \right)^2 \left[\frac{(V_d)^5 g \Delta}{v_w^2} \right]^{\frac{1}{6}} \quad (11)$$

$$H_i = \frac{V_d}{A_i} \quad (12)$$

O modelo descrito também é aplicável para os casos de vazamentos ocorridos na presença de correntes ou ventos constantes. Para liberações instantâneas, considera-se que a mancha é transportada em sua totalidade na superfície do corpo hídrico, sem interferências no processo de espalhamento, a uma velocidade de transporte U_t , induzida pelas velocidades dos ventos e correntes predominantes, indicada na expressão a seguir:

$$U_T = U_c + 0.035 U_v \cos \theta \quad (13)$$

Para a qual:

U_t = velocidade de transporte [m.s⁻¹]

U_c = velocidade da corrente [m.s⁻¹]

U_v = velocidade do vento [m.s⁻¹]

θ = ângulo formado entre as direções do vento e da corrente

No caso de liberações contínuas, a formulação desenvolvida para descrever o espalhamento após uma liberação instantânea não é adequada, uma vez que o óleo se afastará da fonte durante a descarga devido aos ventos e correntes. Além disso, a maior diferença entre as formulações dos dois tipos de vazamento é a ocorrência das fases gravitacional-viscosa e tensão superficial-viscosa simultaneamente. Portanto, a porção espessa da pluma que sofre espalhamento gravitacional-viscoso fornece a massa necessária para a porção delgada, que espalha sob o regime tensão superficial-viscoso.

As previsões para esse tipo de simulação apresentadas neste estudo foram realizadas com base no proposto por Mackay, no qual a espessura da porção mais fina é assumida constante e sua área inicial é um múltiplo da área inicial. A modelagem descrita anteriormente para liberações instantâneas foi reformulada por Waldman et al., 1973, que desenvolveu um modelo para liberações contínuas em correntes, adaptado pela U.S. Costal Guard para contabilizar as perdas evaporativas.

Nesse caso, a ação de ventos e correntes transporta a mancha, distorcendo seu formato: enquanto uma das extremidades permanece fixa na região fonte, o restante do material derramado se distancia dela a uma velocidade igual à velocidade de transporte apresentada anteriormente na Equação (13), fazendo com que a mancha deixe de ser simétrica. As laterais da mancha sofrem espalhamento gravitacional-viscoso unidimensional, resultando numa pluma de formato triangular cujo vértice se encontra na região fonte e a base na extremidade transportada.

Para desenvolver o modelo, imagina-se que uma corrente de emissões instantâneas, como uma composição de *puffs* retangulares de volume $m_d \delta t / 2\rho_l$, seja transportada na direção da corrente a uma velocidade de transporte U_T e espalhe lateralmente ao longo de um canal de largura $U_T \delta t$ perpendicular à direção da corrente. A largura L da pluma resultante em qualquer ponto x ao longo da corrente é derivada de um modelo unidimensional, conforme a Equação (14):

$$L(x) = 2k_{21} \left[\frac{g \Delta Q d^2}{(2\rho_l)^2 U_T^2 v_w^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{3}} t^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

Onde:

$k_{21} = 1.09$ (constante empírica)

[-]

Q_d = taxa mássica de descarga

[kg.s⁻¹]

As taxas de variação de área das porções espessa e delgada da pluma passam a ser expressas de acordo com as equações (15) e (16), respectivamente.

$$\frac{dA}{dt} = \frac{11}{8} (k_2)^{\frac{8}{11}} \left[\frac{(g\Delta)^2 U_T^4 (Q_d - m_{ev} - \rho_l h \left(\frac{da}{dt}\right))^4}{(2\rho_l)^4 v_w} \right]^{\frac{1}{11}} A^{\frac{3}{11}} \quad (15)$$

$$\frac{da}{dt} = 2.06 \left[\frac{(\sigma U_T^2)^2}{\rho_w^2 v_w} \right]^{\frac{1}{7}} a^{\frac{3}{7}} \quad (16)$$

Já a taxa de regressão vertical da mancha espessa para liberações contínuas é dada pela equação (17), enquanto para a delgada a taxa é nula, uma vez que a espessura dessa porção é considerada constante e igual à altura mínima de poça, $H_{min} = 10^{-4}$.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\left[(Q_d - m_{ev} - \rho_l h \left(\frac{da}{dt}\right)) - \rho_l H \left(\frac{dA}{dt}\right) \right]}{\rho_l A} \quad (17)$$

Para a modelagem de liberações contínuas na presença de correnteza, são consideradas as condições iniciais indicadas nas expressões (18), (19) e (20):

$$A_i = k_{22} \left(\frac{k_{22}}{k_{12}} \right)^{\frac{33}{7}} \left[\frac{Q_d^9}{(2\rho_l)^9 U_T^2 v_w^5 g \Delta} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (18)$$

$$a_i = 8 A_i \quad (19)$$

$$H_i = \frac{Q_d t_i}{\rho_l A_i} \quad (20)$$

Os efeitos do processo de evaporação considerados na modelagem do espalhamento são descritos na próxima seção.

3.2. MODELAGEM DA EVAPORAÇÃO

A evaporação do óleo é outro processo importante a ser contabilizado, já que este é responsável pela redução do volume da mancha oleosa em cerca de 40%, podendo chegar a 60%, dependendo da densidade do produto derramado [Fingas et al., 1995]. A taxa e o volume da evaporação dependem de diversos fatores. Assim, um modelo evaporativo requer a definição de parâmetros de entrada como área superficial e espessura da mancha, pressões de vapor do óleo e taxa de transferência de massa, que são funções da composição do óleo, velocidade do vento, estado do corpo d'água e temperatura do ar e da água.

O propósito da modelagem do processo de evaporação em poça é fornecer estimativas da quantidade de material removido e da velocidade de remoção representada pela taxa de regressão vertical, que por sua vez são dados indicativos das dimensões máximas que a mancha oleosa pode atingir. Portanto, os processos de espalhamento e evaporação estão interligados e seus resultados são indicativos da magnitude dos impactos de um acidente dessa natureza.

Muitas simulações de derrames em corpos hídricos incorporam a evaporação como o único processo de transformação sofrido pelo óleo devido à sua importância no período que compreende as primeiras horas após o derrame, anterior ao início das operações de resposta a acidentes. Adotando este critério, a modelagem proposta para as simulações constantes deste estudo incluem somente as formulações para os processos de intemperismo predominantes nos primeiros instantes subsequentes à liberação, de forma a prever simultaneamente o espalhamento e a evaporação dos derivados de petróleo.

As equações mais utilizadas para descrever o processo para liberações instantâneas constituem o método desenvolvido por Stiver e Mackay, 1984, conhecido como exposição evaporativa. Essa abordagem não requer informações relacionadas a cada um dos componentes do produto em evaporação, podendo por isso subestimar as quantidades removidas, contudo foi adotado na modelagem elaborada devido à complexidade da composição dos produtos de interesse.

Quando um óleo é liberado sobre a água, a vaporização constitui um processo superficial no qual o vento remove vapor da superfície da mancha oleosa, induzindo a transferência de massa devido ao gradiente de concentração [Committee for Prevention of Disasters, CPD, 1997]. Para derrames de produtos menos densos que a água essa transferência de massa associada à evaporação se dá por uma camada limite turbulenta, sendo o fluxo de transferência é expresso na equação (21):

$$m_{ev} = \rho_a W (C_S - C_\infty) Da \quad (21)$$

Na qual:

J_o = fluxo de transferência de massa	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]
ρ_a = densidade do ar	[kg.m ⁻³]
W = velocidade do vento a 10 m da superfície aquática	[m.s ⁻¹]
C_S = fração mássica de vapor de óleo saturado na camada turbulenta	[-]
C_∞ = fração mássica de vapor de óleo saturado acima da camada turbulenta	[-]
Da = número de Dalton	[-]

Da abordagem clássica da teoria da camada limite turbulenta, o número de Dalton aplicável ao modelo de placas planas é dado por:

$$Da = 0.037Re_L^{-\frac{1}{5}}Sc^{-\frac{2}{3}} \quad (22)$$

Sendo:

$$Re_L = \frac{WL}{\nu_a} \quad (23)$$

$$Sc = \frac{\nu_a}{D} \quad (24)$$

Onde:

Re = número de Reynolds [-]

L = comprimento da placa plana [m]

ν_a = viscosidade cinemática do ar [m².s⁻¹]

Sc = número de Schmidt [-]

D = difusividade molecular do óleo no ar

Neste estudo o modelo descrito acima foi modificado por apresentar limitações quando aplicado a escoamentos sobre a água. Segundo Wu, 1980, além de não serem rígidos, os corpos hídricos superficiais são considerados rugosos para velocidades de vento a partir de 3 m.s⁻¹; em adição, uma escala de comprimento L em uma camada limite atmosférica não é facilmente definida.

A modelagem empregada no desenvolvimento deste trabalho baseia-se em variáveis de escala interna, de forma a superar tais limitações. Nas proximidades da superfície aquática os perfis de velocidade e concentração são universais e independem de variáveis externas. Fora da subcamada viscosa assume-se a hipótese de fluxos constantes e perfis logarítmicos, conforme as expressões (25) e (26).

$$u^+ = \frac{(U-U_s)}{u^*} = A \ln \left(\frac{z^+}{z_o^+} \right) \quad (25)$$

$$c^+ = \frac{(C-C_s)}{c^*} = A Sc \ln \left(\frac{z^+}{z_o^+} \right) \quad (26)$$

Sendo $A = k^{-1}$ a constante de Von Karman, z_o^+ o chamado parâmetro de rugosidade local, u^* e c^* as velocidade e concentração de fricção, U_s e C_s são os valores de velocidade e concentração na superfície e $z^+ = zu^*/\nu_a$. Ou seja, os perfis das equações (25) e (26) são dependentes apenas da rugosidade local e não de quaisquer parâmetros de escala externa. Desta forma, o cálculo do número de Dalton local para transferência de massa é dado por:

$$Da^* = A Sc \ln(\delta^*) + \alpha(Sc, h_w) + \beta_1 \quad (27)$$

Onde:

δ^* = espessura da subcamada viscosa [m]

α = função baseada no número de Schmidt e tamanho médio da ondulação

β = constante dependente da geometria do escoamento [-]

A função β foi definida por Kader e Yaglom, 1974, para corpos hídricos com agitação:

$$\beta = \left[0.55 \left(Sc^{\frac{2}{3}} - 0.2 \right) H^{*\frac{1}{2}} \right] - 2.5 * 7.85 * \ln(H^*) + 11.27 + 7.85 \quad (28)$$

Os números de Dalton de escala interna e externa são relacionados conforme a equação (29):

$$Da = Da^* \left(\frac{u^*}{W} \right) \quad (29)$$

Assim, a única informação requerida para o cálculo das perdas evaporativas, além dos dados meteorológicos e hidrológicos locais no momento do derrame, é a velocidade de fricção, neste caso para velocidades de vento entre 1 e 20 m.s⁻¹, expressa por:

$$u^* = W \left((0.08 + 0.065W) 10^{-3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

Portanto, o cálculo do fluxo de transferência de massa por evaporação, expresso em kg.s⁻¹.m⁻², é obtido a partir da equação (21), substituindo $W Da$ por $u^* Da^*$ e considerando a fração mássica de vapor de óleo função da pressão de vapor e da temperatura ambiente:

$$k_{ev} = \frac{Da^* u^* P_v M}{R_g T_{amb}} \quad (31)$$

Na qual:

P_v = pressão de vapor	[N.m ⁻²]
M = massa molecular	[kg.mol ⁻¹]
R_g = 8.314 (constante dos gases)	[J.mol ⁻¹ .K ⁻¹]
T_{amb} = temperatura ambiente	[K]

Na ocorrência de perda de massa da poça oleosa por evaporação, o volume do derrame passa a ser função do tempo inclusive em casos de liberação instantânea. Essa perda é representada pela definição de uma taxa de perda mássica equivalente a $-\rho_l(dV_p/dt)$, na qual (dV_p/dt) representa a variação de volume promovida pela perda evaporativa, dada pela equação (32).

$$m_{ev} = k_{ev} A \quad (32)$$

A previsão do comportamento da mancha considera simultaneamente os efeitos de espalhamento e evaporação, cuja solução é obtida resolvendo numericamente um sistema de equações diferenciais ordinárias acopladas, formado pelas equações (8) e (9) para liberações instantâneas, e (15), (16) e (17), para liberações contínuas. Assumem-se uma área e uma altura iniciais equivalentes aos resultados obtidos ao fim da primeira fase do processo de espalhamento, o qual desconsidera os efeitos da evaporação do óleo, conforme descrito na seção 3.1 durante o período estimado na expressão (10). O método selecionado para a modelagem desenvolvida do problema de valor inicial neste estudo foi o método de Runge-Kutta de ordem quatro, resolvido com a utilização do software MathCad como ferramenta de cálculo.

Devido aos efeitos do processo de evaporação, no qual é assumida uma redução homogênea da espessura da poça, espera-se que a espessura mínima de 0.1 mm seja atingida em menor tempo e, conseqüentemente, a área máxima da poça seja menor do que a obtida considerando apenas o efeito de espalhamento.

4. CARACTERIZAÇÃO DA LAGUNA DOS PATOS

Segundo descrição do Ministério dos Transportes, 1971, a Laguna dos Patos (Figura 4.1.1) situa-se no Estado do Rio Grande do Sul entre 30° e 32° de latitude sul, inserida na Planície Costeira Sul-Rio-Grandense. De forma alongada na direção nordeste-sudoeste, possui 250 km de comprimento com extensão navegável de 230 km, e uma largura média de 40 km, tratando-se da maior laguna costeira do Brasil, separada do Oceano Atlântico por uma estreita restinga de 240 km de comprimento.

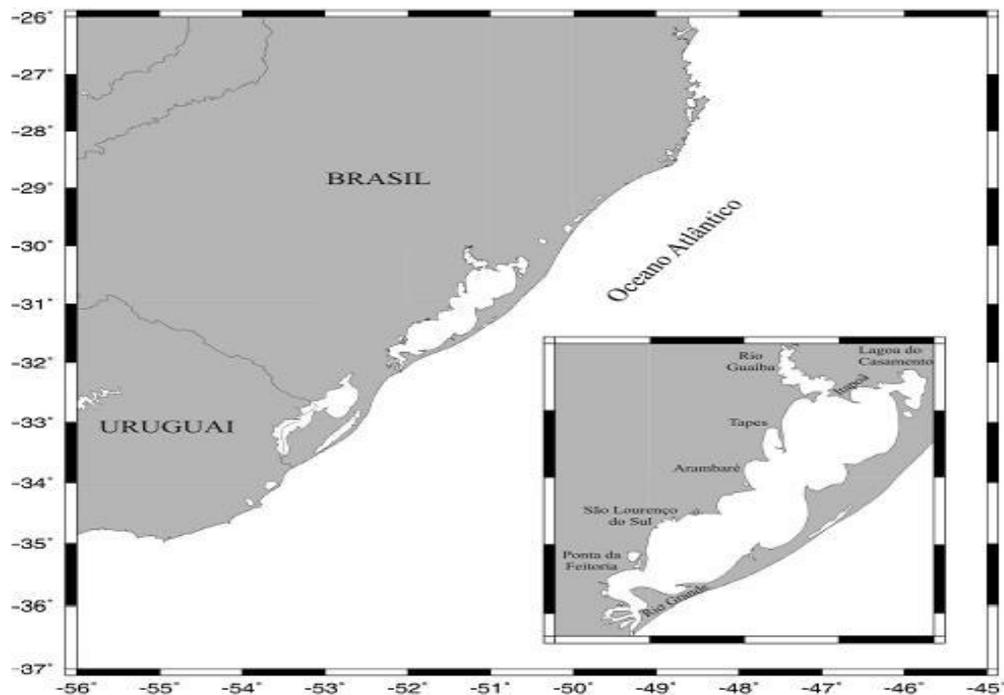


Figura 4.1: Localização geográfica da região em estudo.

Fonte: IBGE, 2006.

Apesar de sua grande extensão, é um corpo hídrico de águas bastante rasas, cuja topografia de fundo é suave e variada. A maioria das margens oscila entre 0.5 e 1 metros de profundidade, enquanto as partes mais fundas encontram-se restritas aos canais de navegação, com média de 80 metros de largura e 6 metros de profundidade. No trajeto que liga as cidades de Porto Alegre e Rio Grande o acesso aos portos é dificultado pelas pequenas profundidades existentes nos canais de Itapuã e da Feitoria, cujas extensões são de 2175 metros e 17000 metros, respectivamente.

Enquanto a profundidade mínima ideal para a navegação, estimada em estudos do Ministério dos Transportes, 1977, é de 6.5 metros, nos referidos canais podem ser encontradas profundidades de aproximadamente 3 metros, impedindo a circulação de embarcações de maior calado. Além disso, o serviço de balizamento não atende satisfatoriamente à navegação nesses trechos, uma vez que as bóias e sinalizações terrestres são insuficientes ou encontram-se danificadas nos canais estreitos e rasos, locais onde se fazem mais necessárias.

4.1.CLIMATOLOGIA

O sistema hidrológico da Laguna dos Patos está condicionado aos fenômenos atmosféricos característicos da região geomorfológica de Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul. A hidrologia e qualidade da água são fortemente influenciadas por fatores meteorológicos como temperatura, vento e precipitações pluviométricas [Hartmann e Schettini, 1991]. Portanto, o conhecimento de dados relativos ao regime de correntes do corpo hídrico em estudo e à velocidade e direção dos ventos na região, suas principais determinantes, é indispensável na análise dos cenários de acidentes objetivando a avaliação de seus efeitos físicos.

As informações climatológicas e hidrológicas da região de estudo foram usadas para estimar o deslocamento e as taxas de espalhamento e evaporação da mancha oleosa em acidentes envolvendo o derrame de cargas transportadas na Laguna dos Patos. No entanto, a grande extensão da área de interesse dificulta a aquisição de dados precisos que abranjam toda a região. Sendo assim, os cálculos foram efetuados adotando-se as médias características da Planície Costeira Sul-Rio-Grandense descritas em literatura.

O clima da região é do tipo subtropical úmido, com média pluviométrica anual de 1300 milímetros no litoral, sendo bastante dominado pela massa tropical marítima, apresentando temperatura média anual de 17,5°C com ocorrências de médias máxima de 22,9°C e mínima de 12,9°C [Matthiensen et al., 1999]. Durante o verão, a temperatura da água apresenta valores maiores do que 20°C, podendo ultrapassar os 25°C, enquanto no inverno os valores geralmente são menores do que 15°C, com registros de ocorrências entre 9 e 10°C [Capítoli e Bemvenuti, 2004]. A influência da maré sobre a região onde a laguna está inserida é mínima [Defant, 1961], com o Canal do Rio Grande atuando como amortecedor, limitando seus efeitos à porção afunilada do estuário

[Fernandes et al., 2003]. Isso faz da ação dos ventos e das descargas fluviais os principais forçantes da circulação [Möller Jr., 1996].

Conforme Castellão e Möller Jr., 2003, nessa região predominam os ventos de nordeste, porém no inverno aumenta a frequência de ventos do quadrante sul, com velocidades médias entre 3 e 5 m.s^{-1} para os dois quadrantes. Assim, conforme Hartmann e Schettini, 1991, durante o verão a incidência de ventos de nordeste promovem o deslocamento das águas superficiais do centro do corpo lagunar na direção sul, enquanto os ventos de sudoeste, predominantes a partir do mês de março, geram o transporte das águas na direção norte, com velocidades médias de aproximadamente 0,8 m.s^{-1} e 0,5 m.s^{-1} , respectivamente [Hartmann e Harkot, 1990].

Castelão e Möller Jr., 2003, observaram, durante o período de predominância dos ventos de nordeste atuantes sobre a região central da laguna, uma elevação no nível do corpo lagunar na Zona Estuarina (Ponta da Feitoria) de aproximadamente 0,02 metros e o rebaixamento do nível do mar na costa, resultando no transporte das águas em direção ao oceano. A resposta das águas da Laguna dos Patos à ação do vento sudoeste é oposta, causando um empilhamento de água na Zona Superior (Canal de Itapuã) e a elevação de nível na costa, ocasionando o transporte de água para o interior da laguna.

4.2. OCUPAÇÃO DAS MARGENS

A região geomorfológica denominada Planície Costeira ocupa 33000 km^2 de faixa litorânea, caracterizada por possuir cerca da metade de sua área constituída por corpos hídricos superficiais, como pode ser observado na Figura 4.2.1, destacando-se a Laguna dos Patos [Ministério dos Transportes, 1977]. Consiste numa extensa área costeira de usos múltiplos, incluindo a recreação, o abastecimento e a reprodução e criação de espécies de interesse comercial. Em seu entorno, desenvolve-se vegetação tipicamente litorânea, com floras pobres e rasteiras nas regiões arenosas e matas nativas naquelas em que o solo apresenta maior capacidade de acúmulo de água.



Figura 4.2.1: Imagem de satélite da região da Laguna dos Patos.
Fonte: Google Earth, 2007.

A identificação dos diferentes usos do solo às margens da Laguna dos Patos permite estimar o alcance das conseqüências, para a comunidade e o sistema biótico, de um acidente envolvendo o derrame de óleo transportado no trecho compreendido entre os municípios de Canoas e Rio Grande. Segundo estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE, 2007], margeando a bacia hidrográfica da Laguna dos Patos encontram-se mais de 9.000.000 de habitantes, utilizando-se das águas da laguna para consumo doméstico e atividades de pesca, agricultura, indústria, navegação e lazer em cidades, vilas e povoados. Nesse contexto, consideram-se recursos biológicos sensíveis as plantas e os animais e seus habitats e rotas migratórias, enquanto os recursos sócio-econômicos incluem captações de água para consumo humano, agrícola e industrial, áreas de lazer, cultivo e extração de recursos naturais e sítios históricos e culturais [Alpina, 2004].

Uma vez que as águas da região de estudo caracterizam-se pela multiplicidade de usos, a deterioração da sua qualidade, especialmente em localidades com aglomerações humanas e intenso desenvolvimento de atividades econômicas, como o entorno da Laguna dos Patos, resulta em impactos potenciais a diversos setores. McCay et al., 2004, atribuiu uma prioridade para os investimentos na recuperação em caso de contaminação ambiental baseada na importância sócio-econômica dos serviços afetados (Tabela 4.2.1).

Tabela 4.2.1: Usos da água com prioridade para a restituição.

Prioridade	Função da água
1	Abastecimento público
2	Valor ecológico
3	Pesca profissional
4	Abastecimento industrial
5	Transporte de água potável e gêneros alimentícios
6	Agricultura e pecuária
7	Recreação e turismo
8	Corpo hídrico principal
9	Corpo hídrico afluyente
10	Atividades recreativas e turísticas nas margens
11	Extração mineral
12	Navegação recreativa e turística

Fonte: McCay et al., 2004.

Uma divisão da laguna em três regiões foi proposta por Delaney, 1965: a Zona Estuarina, situada no extremo sul da laguna entre a Ponta da Feitoria e o Canal do Rio Grande, canal de desembocadura no Oceano Atlântico cuja extensão é de 20 km de comprimento e apresenta larguras variando de 1 a 2 km; a Zona Central, formada pela área entre a Ponta da Feitoria e a entrada da Lagoa do Casamento; e a Zona Superior, situada no extremo norte, entre a Lagoa do Casamento e a área do Lago Guaíba próxima à laguna, formada pelos rios Jacui, Caí, dos Sinos, Taquari e Gravataí. A região estuarina (Figura 4.2.2), localizada nas proximidades da zona urbana da cidade de Rio Grande, que concentra cerca de 200.000 habitantes, é considerada uma região de alta densidade

populacional e industrial e um dos mais importantes pólos comerciais para navegação e pesca do sul do Brasil, além de contar com uma enorme produtividade biológica.

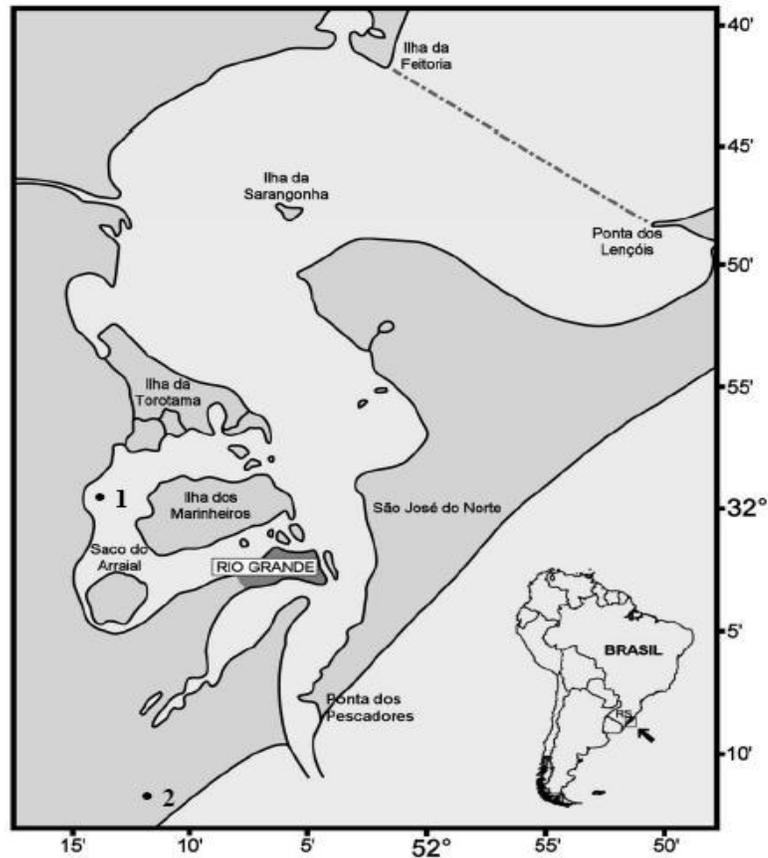


Figura 4.2.2: Região Estuarina, ao sul da Laguna dos Patos.
Fonte: Matthiensen et al., 1999.

A região superior abriga o Parque Estadual de Itapuã (Figura 4.2.3), área de preservação que apresenta formações diversas como dunas, campos, ilhas, praias e morros, onde se encontram exemplares de vegetação nativa remanescentes da Mata Atlântica, orquídeas e bromélias, e de fauna como bugios, capivaras, jacarés, jaguatiricas e grande variedade de peixes e aves, além de 14 sítios arqueológicos de tradição tupi-guarani.



Figura 4.2.3: Parque Estadual de Itapuã.
Fonte: Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2007.

Na região central encontra-se o Parque Nacional da Lagoa do Peixe (Figura 4.2.4), uma extensa planície recortada por matas e banhados, rota de mais de cem espécies migratórias, onde também é possível avistar ratões do banhado, capivaras, jacarés, tatus, graxains e diversas espécies de peixes, bem como camarões e siris nas épocas de entrada das águas do oceano na Laguna dos Patos.



Figura 4.2.4: Parque Nacional da Lagoa do Peixe.
Fonte: IBAMA, 2007.

Ao longo de toda a extensão da laguna observa-se o desenvolvimento da atividade agrícola associada à criação de gado, favorecidas pelas condições ecológicas e climáticas existentes, bem como pela facilidade de transporte. A região é intensamente cultivada, com plantações comerciais de milho, arroz, soja, batata e cebola. Nas áreas correspondentes ao litoral, de solos arenosos e ácidos, o uso do solo é determinado sob a influência dos centros urbanos e industriais do entorno. Assim, a paisagem rural caracteriza-se pelos bosques de eucaliptos, destinados à produção de lenha para consumo doméstico e industrial, e de acácia negra, da qual é extraído o tanino.

5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE

O transporte hidroviário, excetuando raros casos, depende de integrações multimodais para viabilizá-lo. Na Laguna dos Patos, a necessidade de outros meios de transporte se dá somente no momento de concentração e captação das cargas em seu terminal de origem, uma vez que a destinação final se trata diretamente de um porto fluvio-marítimo [Padovezzi, 2003].

As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam estimativas dos valores investidos e dos custos de transporte para cada modal, respectivamente.

Tabela 5.1: Comparação entre investimentos de implantação.

Alternativa de transporte	Extensão (Km)	Área Desmatada (m ²)	Investimento (US\$)
Ferrovário	2010	77.100.000	1.827.000
Rodoviário	2500	100.000.000	625.000
Hidroviário	2202	0	1.157.700

Fonte: Superintendência de Portos e Hidrovias (2007).

Tabela 5.2: Comparação entre custos de fretes, para cada tonelada transportada.

Modal	Custo (R\$/Km)
Ferrovário	0,056
Rodoviário	0,016
Hidroviário	0,009

Fonte: Superintendência de Portos e Hidrovias (2007).

Os terminais aquaviários têm como finalidade o recebimento, o armazenamento e a distribuição do petróleo e seus derivados, garantindo o abastecimento do mercado nacional e internacional. A seguir são descritas as instalações dos terminais TENIT e TERIG.

5.1. TERMINAIS AQUAVIÁRIOS

Dois terminais da Petrobrás estão localizados na região de interesse para a determinação de efeitos de derrames acidentais: o TENIT, que serve à Refap e localiza-se às margens do Rio Gravataí, e o TERIG, responsável por abastecer a Refinaria Ipiranga e navios que ingressam no Porto de Rio Grande, localizado no estuário da laguna. Os produtos a serem transportados chegam ao TENIT por meio de dutos e caminhões, de onde serão transferidos para os navios-tanque. Ao serem descarregados no TERIG são transportados por diferentes modais até os consumidores finais ou empresas distribuidoras.

5.1.1. TENIT

O Terminal Aquaviário de Niterói (Figura 5.1.1.1), localizado no município de Canoas, movimenta cerca de 40000 toneladas de diesel, bunker e LCO mensalmente.



Figura 5.1.1.1: Terminal Aquaviário de Niterói.

Fonte: Petrobrás, 2005.

O TENIT tem capacidade para receber cerca de 1200 caminhões-tanque por mês, dos quais descarrega o óleo combustível, enquanto os derivados claros podem ser recebidos diretamente através da dutovia que inicia na Refap. No Quadro 5.1.1.1 é apresentado o volume acumulado de cargas movimentadas durante o ano de 2006.

Quadro 5.1.1.1: Volume (m³) de produtos movimentados no TENIT no ano de 2006.

		Recepção				Entrega			
TENIT		Aquav	Dutov	Rodov	Ferrov	Aquav	Dutov	Rodov	Ferrov
	Diesel	0	155068	16	0	150827	0	0	0
	LCO	0	28104	52973	0	80614	0	0	0
	Bunker	0	0	338049	0	335773	0	3394	0
	Total	0	183172	391038	0	567214	0	3394	0

Fonte: FRONAPE (2007).

O parque de tancagem conta com cinco tanques, totalizando 14792 m³ de capacidade de armazenagem. O píer possui espaço de 15 m de comprimento destinado a navios com calado máximo de 3,8 m. Estima-se que o tempo de permanência das embarcações no local durante operações de carga seja de até 36 horas.

5.1.2. TERIG

O Superporto, área portuária do município de Rio Grande que dispõe de cais de 1552 m, com profundidades que variam de 5 a 14.5 m, abriga uma série de terminais especializados, entre eles o Terminal Aquaviário de Rio Grande. O TERIG (Figura 5.1.2.1) conta com píer petroleiro e área de tancagem cuja capacidade de armazenamento totaliza mais de 100000 m³, movimentando cerca de 160000 toneladas de petróleo e derivados por mês.



Figura 5.1.2.1: Terminal Aquaviário de Rio Grande.

Fonte: Petrobrás, 2005.

No Quadro 5.1.2.1. é apresentado o volume acumulado de cargas movimentadas durante o ano de 2006.

Quadro 5.1.2.1: Volume (m³) de produtos movimentados no TENIT no ano de 2006.

		Recepção				Entrega			
TERIG	Produto	Aquav	Dutov	Rodov	Ferrov	Aquav	Dutov	Rodov	Ferrov
	Diesel	163069	2302	731	31407	29423	4140	119367	3254
	LCO	83949	416	4173	0	42004	0	0	0
	Bunker	525757	0	24657	0	628453	0	0	0
	Total	772775	2718	29561	31407	699880	4140	119367	3254

Fonte: FRONAPE (2007).

5.2. EMBARCAÇÕES

O presente estudo aborda estritamente os riscos inerentes à própria operação das embarcações durante o transporte dos produtos refinados de petróleo, uma vez que eventuais acidentes durante atividades de carga e descarga teriam seus efeitos minimizados. Por serem desempenhadas nos terminais hidroviários, os quais dispõem de equipamentos específicos para atendimento a emergências, o tempo de resposta a incidentes é reduzido a intervalos mínimos, pois não há necessidade de deslocamento de pessoal e materiais para o local de ocorrência.

No que se refere aos aspectos de segurança e prevenção à poluição, as embarcações Guaratan e Guaíba, empregadas no transporte dos produtos provenientes da Refap, seguem as regulamentações internacionais, a legislação brasileira vigente e as normas estabelecidas pela Diretoria de Portos e Costas (DPC). Os navios tanque da Navegação Guarita são submetidos a auditorias da qualidade e classificados pela sociedade classificadora Bureau Veritas Quality International (BVQI) conforme normas técnicas que consideram principalmente aspectos de integridade de estrutura, equipamentos e sistemas, alguns deles tratados de maneira uniforme para todos os tipos de embarcações, outros observando os requisitos aplicáveis ao tipo específico em avaliação. A empresa conta hoje com as certificações ISSO 9001:2000, ISM CODE e OHSAS 18001:1999 no segmento “transferência de produtos químicos e derivados de petróleo, líquidos a granel por navegação interior e marítima e abastecimento de bunker a navios”.

5.2.1. NT Guaratan

Cada navio é concebido, construído e equipado de forma a atender especificamente à sua função. O navio tanque Guaratan, construído em 2005 para operar em portos e hidrovias interiores no transporte de produtos refinados de petróleo, foi considerado uma embarcação Classe I pela BVQI. Essa classificação atesta a conformidade do navio quanto à sua construção e manutenção com as normas pertinentes, sendo a Classe I a mais alta classificação concedida pelas sociedades classificadoras.

A embarcação possui 95.36 m de comprimento e calado de projeto de 4.10 m. O espaço destinado à carga é compartimentado em 10 tanques (Figura 5.2.1.1) com capacidades entre 357.2 e

656.3 m³, totalizando um volume de 3560 m³, cujo limite de carregamento é de 98%, conforme indicado na Figura 5.2.1.2.

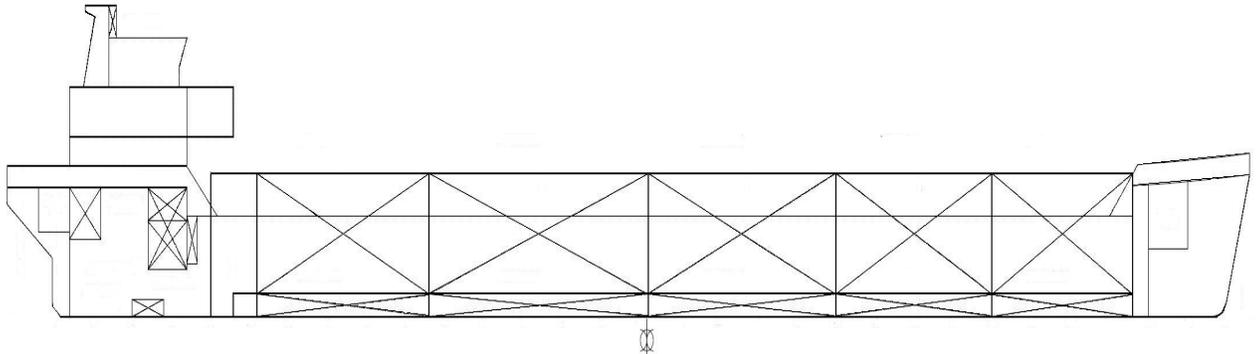


Figura 5.2.1.1: Corte vertical longitudinal do NT Guaratan.

Fonte: Navegação Guarita S.A., 2007.

TANQUES DE CARGA						
COMPARTIMENTO	LOCALIZAÇÃO		CAPACIDADE (m ³)	PESO (t)	CENTRO GRAV.	
	CAV.	CAV.			VERT.	LONG.
TQ. CARGA 1 BB	120	138	374,6	374,6	4,03	-31,63
TQ. CARGA 1 BE	120	138	357,2	357,2	4,03	-31,62
TQ. CARGA 2 BB	100	120	467,1	467,1	3,95	-20,35
TQ. CARGA 2 BE	100	120	448,4	448,4	3,95	-20,35
TQ. CARGA 3 BB	76	100	562,5	562,5	3,95	-7,17
TQ. CARGA 3 BE	76	100	540,1	540,1	3,95	-7,17
TQ. CARGA 4 BB	48	76	656,3	656,3	3,95	8,44
TQ. CARGA 4 BE	48	76	630,0	630,0	3,95	8,44
TQ. CARGA 5 BB	26	48	495,7	495,7	3,95	23,22
TQ. CARGA 5 BE	26	48	474,8	474,8	3,95	23,20

OBS. 1: OS TANQUES DE CARGA SÃO DESTINADOS A ÓLEO COMBUSTÍVEL OU ÓLEO DIESEL.

OBS. 2: PESO ESPECÍFICO CONSIDERADO FOI UNITÁRIO, CORRESPONDENDO AO ÓLEO COMBUSTÍVEL.

OBS. 3: LIMITE DE CARREGAMENTO É DE 98% DOS VOLUMES ACIMA.

OBS. 4: VOLUMES DIFERENTES NUM E NOUTRO BORDO DEVEM-SE À ASSIMETRIA DA ANTEPARA DA LINHA DE CENTRO.

Figura 5.2.1.2: Plano de cargas do navio Guaratan.

Fonte: Navegação Guarita S.A., 2007.

Outros 10 tanques, dispostos horizontalmente e estendendo-se longitudinalmente e transversalmente (em contato com as extremidades das células contendo óleo), constituem espaços vazios durante o transporte ou tanques de lastreamento após a descarga, protegendo os compartimentos internos em caso de ruptura do fundo ou das laterais do casco (Figura 5.2.1.3). A embarcação é contornada por bandejas coletoras, capazes de diminuir os riscos de derrames em situações de avarias seguidas de inclinação acentuada da embarcação.

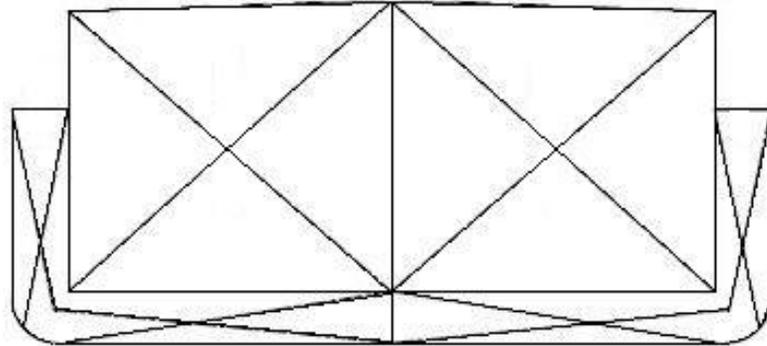


Figura 5.2.1.3: Seção transversal, mostrando casco duplo do NT Guaratan.
Fonte: Navegação Guarita S.A., 2007.

5.2.2. NT Guaíba

Em 1999 o navio tanque Guaíba, construído em 1984, foi reformado. Assim como o NT Guaratan, recebeu a classificação máxima de conformidade, concedida pela BVQI, tratando-se de uma embarcação reconstruída e equipada para navegar em portos e hidrovias interiores transportando produtos refinados de petróleo.

Com comprimento de 87.5 metros e 4 metros de calado de projeto, possui compartimento de carga fragmentado em 10 tanques com volumes entre 372.7 e 447.2 m³, com configuração similar à do navio Guaratan (Figura 5.2.1.1), totalizando uma capacidade de carregamento de 3560 m³. Os compartimentos inferiores, divididos em 6 tanques de lastreamento, encontram-se dispostos horizontalmente ao longo da embarcação até as laterais do casco, conforme ilustrado anteriormente para o NT Guaratan na Figura 5.2.1.3. Para reduzir o risco de despejos acidentais em caso de ruptura do casco e conseqüente inclinação da embarcação, esta é dotada de coletores em seu contorno.

6. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS TRANSPORTADOS

O conhecimento das características físico-químicas dos produtos de interesse para esta análise é importante para a previsão de seu comportamento no ambiente em caso de vazamento. O diesel, o bunker e o LCO são misturas complexas de hidrocarbonetos, resultantes do processamento do petróleo, cujas propriedades distintas de seus diversos componentes fazem com que o seu comportamento seja muito variável [Fernandes, 2001].

No caso específico dos produtos refinados de petróleo provenientes da Refap, as características são semelhantes e até mesmo previsíveis, uma vez que estes são compostos por hidrocarbonetos similares. Entretanto, os óleos combustíveis residuais apresentam propriedades variáveis, pois consistem na mistura de compostos pesados (aromáticos, asfaltenos) e resíduos do processo de refino do óleo cru.

6.1. CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DIESEL

O óleo diesel é um destilado intermediário, obtido através da destilação atmosférica no processo de refino do petróleo [Shreve e Brink Jr., 1997]. Consiste em uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos e naftênicos, contendo quantidades variáveis de hidrocarbonetos aromáticos (10 a 40% v/v), enxofre (máximo de 0,5% p/p) e impurezas como compostos nitrogenados e oxigenados. Sua utilização em motores de combustão interna requer uma viscosidade adequada, dentro de limites rígidos. No Quadro 6.1.1 estão listadas esta e outras características físico-químicas do óleo diesel.

Quadro 6.1.1: Propriedades físico-químicas do óleo diesel.

ÓLEO DIESEL	
Propriedades Físicas e Químicas	
Estado físico e classificação: Líquido límpido inflamável	Ponto de ebulição: 288 a 338°C
Cor e odor: Coloração vermelha (corante), odor característico de hidrocarbonetos	Ponto de fusão: -18 a -34°C
Viscosidade: 2,5 a 5,5 Cst (40°C, método NBR-7148)	Faixa de destilação: 100 a 400°C (760 mmHg, método NBR-9619)
Solubilidade em água: Desprezível	Densidade: 802 – 880 g/l (20°C, método NBR-7148)
Pressão de vapor: 2,17 mmHg (20°C)	Ponto de fulgor: 38°C (método NBR-7974)
Inflamabilidade	
Temperatura de auto-ignição: 254 a 285°C	Agentes extintores: Espuma para hidrocarbonetos, pó químico e CO ₂

Limites de inflamabilidade no ar: Superior – 6% v/v Inferior – 1,3% v/v	Métodos especiais: Resfriar recipientes com água, removê-los da área em chamas
---	--

6.2. CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO BUNKER

O óleo combustível residual usado em embarcações, também chamado de bunker, é um destilado considerado pesado, usado em motores de combustão interna. Obtido a partir da diluição de resíduo de vácuo ou asfáltico com óleo diesel, querosene de aviação ou com o óleo leve de reciclo proveniente do processo de craqueamento catalítico, pode conter traços de gás sulfídrico (H₂S).

Assim como o óleo diesel, requer uma viscosidade adequada, dentro de limites rígidos. No Quadro 6.2.1 são apresentadas as características físico-químicas do bunker.

Quadro 6.2.1: Propriedades físico-químicas do bunker.

ÓLEO COMBUSTÍVEL “BUNKER”	
Propriedades Físicas e Químicas	
Estado físico e classificação: Líquido viscoso inflamável	Ponto de ebulição: 101 a 588°C
Cor e odor: Coloração escura, odor característico de hidrocarbonetos	Ponto de fusão: dado não disponível
Viscosidade: 30 a 650 Cst (50°C, método NBR-7148)	Faixa de destilação: dado não disponível
Solubilidade em água: Desprezível	Densidade: 0,904 a 0,967 (20°C, método NBR-7148)
Pressão de vapor: 2,17 mmHg (20°C)	Ponto de fulgor: 66°C (método NBR-7974)
Inflamabilidade	
Temperatura de auto-ignição: 263°C	Agentes extintores: Espuma para hidrocarbonetos, pó químico e CO ₂
Limites de inflamabilidade no ar: Superior – 5% v/v Inferior – 1% v/v	Métodos especiais: Resfriar recipientes com água, porém seu uso diretamente sobre o produto pode produzir espuma e espalhar as chamas

6.3. CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO LEVE DE RECICLO

O óleo leve de reciclo (LCO) é um destilado leve, obtido a partir da corrente produzida no craqueador catalítico em leito fluidizado, usado na diluição do óleo combustível objetivando diminuir sua viscosidade [Shreve, 1997]. Consiste em uma mistura de hidrocarbonetos, podendo conter traços de gás sulfídrico (H₂S).

As propriedades físico-químicas do óleo leve de reciclo estão contidas no Quadro 6.3.1.

Quadro 6.3.1: Propriedades físico-químicas do óleo leve de reciclo.

LCO	
Propriedades Físicas e Químicas	
Estado físico e classificação: Líquido límpido inflamável	Ponto de ebulição: 148,9 a 454,5°C
Cor e odor: Coloração clara, odor característico de querosene	Ponto de fusão: dado não disponível
Viscosidade: 2,5 a 5,5 Cst (40°C, método NBR-7148)	Faixa de destilação: dado não disponível
Solubilidade em água: Desprezível	Densidade: 802 – 880 g/l (20°C, método NBR-7148)
Pressão de vapor: 4 mmHg (20°C)	Ponto de fulgor: 38°C (método NBR-7974)
Inflamabilidade	
Temperatura de auto-ignição: 260°C	Agentes extintores: Espuma para hidrocarbonetos, pó químico e CO ₂
Limites de inflamabilidade no ar: Superior – 8% v/v Inferior – 0,4% v/v	Métodos especiais: Resfriar recipientes com água, removê-los da área em chamas

7. ANÁLISE HISTÓRICA

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através de uma análise histórica de acidentes ocorridos durante o transporte aquaviário de óleo diesel, óleo leve de reciclo e bunker. Para isso, foram realizadas consultas ao banco de dados do Safety and Reliability Directorate (SRD) do Reino Unido, Major Hazard Incident Data System (MHIDAS), atualizado até fevereiro de 2005, e aos dados relativos a incidentes relatados pela Capitania dos Portos na região da Laguna dos Patos.

Durante a realização da análise, foram consideradas todas as ocorrências registradas para os produtos de interesse. A partir das informações contidas nos registros foram identificadas, através do tratamento estatístico dos dados, as origens e conseqüências associadas a acidentes dessa natureza, bem como a incidência de feridos vítimas fatais.

Os dados analisados indicam a ocorrência de setenta e cinco incidentes, entre os anos de 1979 e 2004, envolvendo o sistema de transporte aquaviário de óleo diesel, LCO e bunker. Destes, quarenta e três incidentes têm sua origem no transporte marítimo e vinte e oito no transporte lacustre/fluvial.

7.1. CAUSAS DE ACIDENTES DURANTE O TRANSPORTE

O banco de dados MHIDAS apresenta sete opções pré-definidas para descrição das causas gerais de acidentes, mostradas na Tabela 7.1.1.

Tabela 7.1.1: Causas gerais de acidentes durante o transporte aquaviário.

Causas Gerais
Eventos externos
Fator humano
Falha por impacto
Falha de instrumentação
Falhas de serviços
Perturbações de processo
Reação violenta

Dos setenta e cinco registros analisados, sessenta e um referem-se ao óleo diesel, sete ao LCO e sete ao bunker. Para o óleo diesel, as causas de acidentes são falhas por impacto, em 92% dos casos; eventos externos, em 5% dos registros; fator humano, em 3% das ocorrências (Figura 7.1.1).

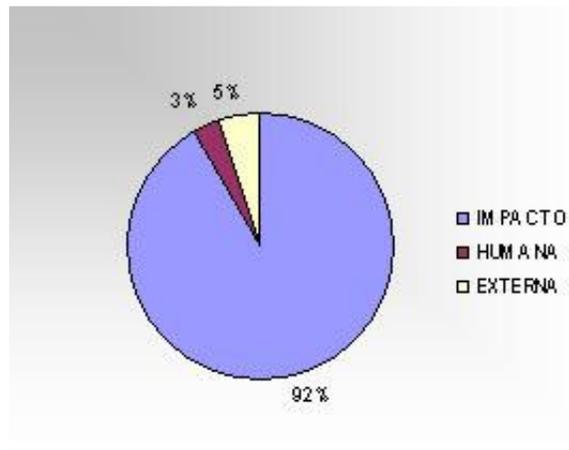


Figura 7.1.1: Causas gerais dos acidentes com óleo diesel.

Na Figura 7.1.2 são mostrados os resultados obtidos para o bunker, os quais indicam 71% de incidentes causados por falhas de impacto, enquanto 29% dos registros apontam como causa eventos externos.

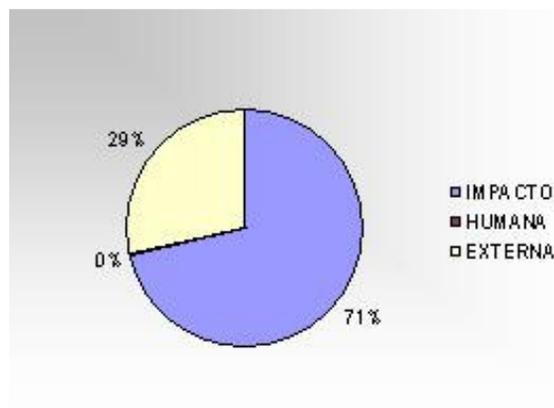


Figura 7.1.2: Causas gerais dos acidentes com bunker.

Quatro registros reportam o desconhecimento da causa geral do incidente registrado, todos referentes ao LCO, totalizando 58% dos registros encontrados para o produto (Figura 7.1.3).

Essa limitação se deve à insuficiência na disponibilidade de dados providos pelas fontes de informações utilizadas na composição do banco de dados, baseadas na literatura técnica e não em relatos diretos acerca dos acidentes [Montiel, 1996].

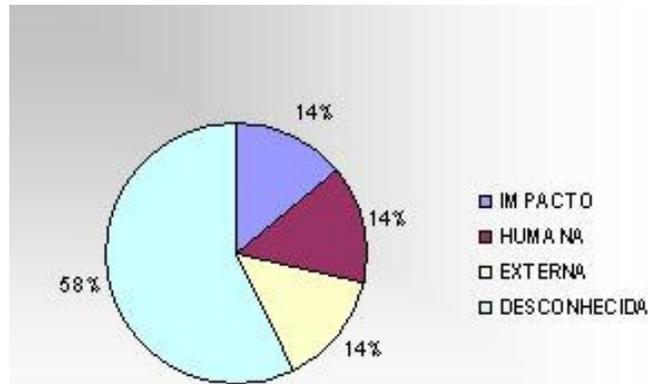


Figura 7.1.3: Causas gerais dos acidentes com LCO.

7.2.TIPOLOGIA DOS ACIDENTES DURANTE O TRANSPORTE

Foram observados quatro tipos de conseqüências resultantes dos acidentes analisados. Tais conseqüências são descritas em quarenta e nove dos registros, representando 65% dos casos registrados, enquanto em 35% dos incidentes não foram observadas avarias nas embarcações e, conseqüentemente, não há relatos da ocorrência de efeitos adversos ocasionados pelos produtos transportados.

Os registros envolvendo o óleo diesel apresentam como principal tipo de conseqüência do acidente a liberação contínua do produto, constituindo 44% das ocorrências, seguido de incidentes sem conseqüências em 36% dos casos. Os resultados encontram-se ilustrados na Figura 7.2.1.

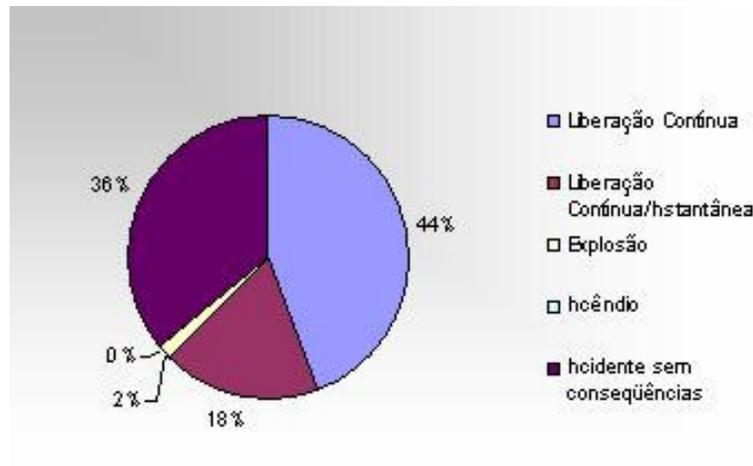


Figura 7.2.1: Tipologia dos acidentes com diesel.

Os dados relativos ao bunker indicam dois tipos de conseqüências dos acidentes (Figura 7.2.2). Em 29% das ocorrências houve liberação contínua do produto e em 14% dos casos o acidente resultou em explosão. O restante dos registros refere-se a incidentes sem conseqüências.

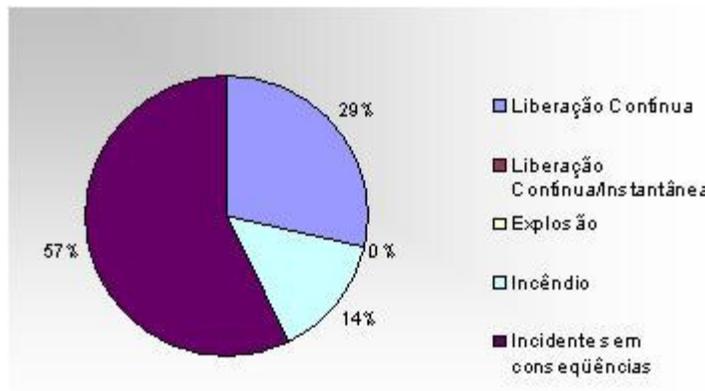


Figura 7.2.2: Tipologia dos acidentes com bunker.

A análise dos casos envolvendo o transporte de LCO demonstra que todos os incidentes registrados resultaram na liberação contínua do produto.

7.3. ACIDENTES COM FERIDOS E FATALIDADES

O número mortos e feridos em acidentes durante o transporte de óleo diesel, LCO e bunker é demonstrado na Tabela 7.3.1 e o percentual ilustrado na Figura 7.3.1. Das setenta e cinco ocorrências registradas, são contabilizados sete óbitos, totalizando 7% dos acidentes, e seis registros nos quais esse dado é desconhecido. O número de feridos em acidentes dessa natureza é de cinco pessoas, enquanto os incidentes indicando número desconhecido totalizam nove registros.

Tabela 7.3.1: Número de mortos e feridos.

Produto	Mortos	Feridos
Óleo Diesel	7	0
LCO	0	0
Bunkering	0	5

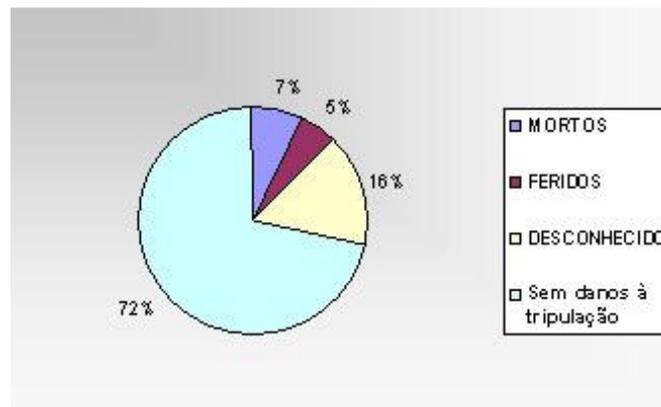


Figura 7.3.7.3.1: Percentual de mortos e feridos em acidentes no transporte de diesel, LCO e bunker.

O número médio de mortos e feridos é mostrado na Tabela 7.3.2. As fatalidades observadas estão distribuídas em dois registros, ambos relativos ao transporte de diesel. O maior número de mortes identificado é seis, e a média de vítimas por acidente fatal é 3,5. Foi identificado apenas um registro contendo informações relativas ao número de feridos.

Tabela 7.3.2: Número médio de mortos e feridos.

	Conseqüência	
	Mortos	Feridos
Média	3,5	5
Desvio Padrão	3,54	0
Máximo	6	5
Total	7	5
Registros	2	1

7.4. VARIAÇÃO DO NÚMERO DE ACIDENTES E DE MORTOS E FERIDOS AO LONGO DO TEMPO

O Quadro 7.4.1, apresentadas a seguir, contém a variação, entre os anos de 1994 e 2004, do número de acidentes e de mortos e feridos durante o transporte aquaviário de óleo diesel, LCO e bunkering e o número de mortos e feridos associados aos mesmos. Os registros nos quais o número de mortos e feridos é desconhecido foram considerados incidentes sem vítimas.

Quadro 7.4.1: Variação do número de acidentes e de mortos e feridos entre 1994 e 2004.

Ano	Acidentes durante o transporte de diesel		
	Nº de acidentes	Mortos	Feridos
1994	3	0	0
1995	4	0	0
1996	4	0	0
1997	10	0	0
1998	2	0	0
1999	6	0	0
2000	5	1	0
2001	6	0	0
2002	4	0	0
2003	5	0	0
2004	1	0	0
Ano	Acidentes durante o transporte de LCO		
	Nº de acidentes	Mortos	Feridos
1994	2	0	1
1995	1	0	0
1997	1	0	0
Ano	Acidentes durante o transporte de bunkering		
	Nº de acidentes	Mortos	Feridos
1994	1	0	0
1996	3	0	5
2000	1	0	0
2004	1	0	0

8. IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS

Como consequência da crescente demanda pelo escoamento da produção industrial, o volume de produtos perigosos transportados aumenta anualmente. Para atendê-la, faz-se necessária a integração entre os modais de transporte rodoviário, dutoviário, ferroviário e aquaviário, sendo este último o mais empregado no transporte de petróleo e seus derivados no Brasil [Oliveira, 1993].

A relevância dos riscos envolvidos no deslocamento de cargas perigosas foi analisada por Glickman et al., 1992, através da comparação entre incidentes ocorridos durante o desenvolvimento de atividades de transporte e de processamento em instalações fixas. Os resultados do estudo (Figura 8.1) indicam a ocorrência de perigos similares, demonstrando a necessidade de avaliação de ambas fontes de riscos.

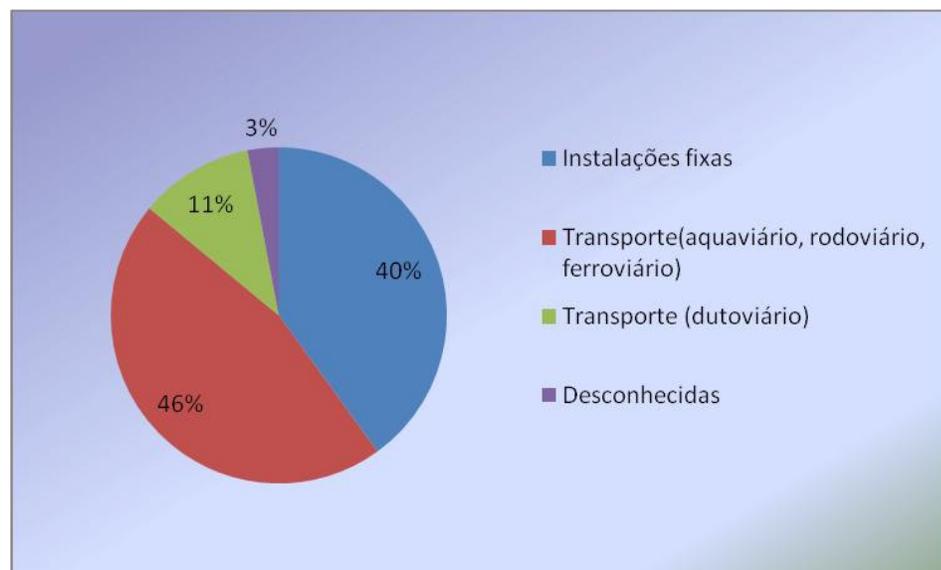


Figura 8.1: Fontes dos principais acidentes industriais.

Fonte: adaptado de Glickman et al. (1992)

A mesma comparação foi realizada a partir de consulta ao banco de dados MHIDAS, que fornece dados mais atuais. Os resultados apresentados na Figura 8.2 são atualizados até fevereiro de 2005, confirmando a tendência indicada em estudos anteriores.

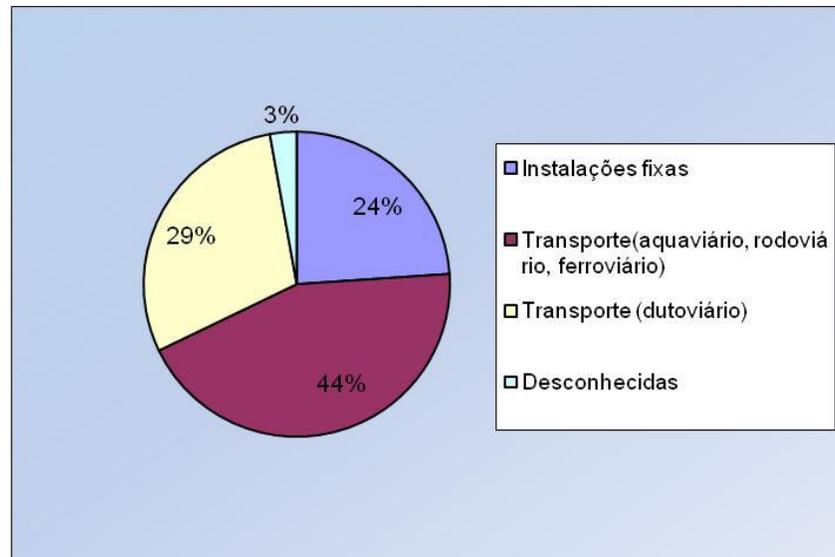


Figura 8.2: Fontes dos principais acidentes industriais (dados até 2005).

Nesse contexto, o desenvolvimento de estudos que objetivem a identificação dos riscos inerentes às atividades de transporte aquaviário e a análise das conseqüências de eventuais acidentes na Laguna dos Patos é essencial na definição de ações preventivas e medidas mitigadoras.

8.1. METODOLOGIA

Após o estudo das instalações e da caracterização da região e das substâncias envolvidas visando o levantamento dos perigos associados à atividade de interesse, procedeu-se à elaboração da Análise Histórica, através da qual os eventos com maior potencial de originar acidentes, ou seja, aqueles com maior número de incidências, e seus desdobramentos foram identificados. Chamados de eventos iniciadores, a cada um deles atribuem-se suas causas básicas e respectivas conseqüências, dependentes da evolução do acidente após a ocorrência do evento iniciador. A esse conjunto dá-se o nome de cenário de acidente.

A seleção dos cenários de acidentes constantes deste relatório adotou dois critérios: a observação de ocorrências do mesmo tipo dentre os resultados da Análise Histórica e o levantamento de aspectos das atividades de transporte de interesse considerados relevantes e capazes de resultar em acidentes com conseqüências ao ambiente e à população, avaliados em reuniões envolvendo as equipes técnicas da Refap e da Navegação Guarita.

8.2. CARACTERIZAÇÃO DOS CENÁRIOS SELECIONADOS

Na avaliação dos riscos envolvidos no transporte aquaviário de produtos refinados de petróleo, observou-se que a principal causa dos acidentes dessa natureza são os impactos (Capítulo 4), sejam eles choques com as margens ou o fundo do corpo hídrico, ou as colisões com outras embarcações ou estruturas (pontes, atracadouros). A partir da análise desses dados foram encontradas, em duas regiões da Laguna dos Patos, particularidades que dificultam a passagem de embarcações de maior porte e aumentam os riscos de acidentes.

A existência de canais com profundidades de aproximadamente três metros, enquanto a ideal é de cerca de seis metros, aumenta as possibilidades de ocorrência de incidentes como encalhes e perfurações de navios. Assim, a cada uma dessas regiões foi atribuída uma hipótese de evento iniciador, consistindo na liberação de produtos refinados de petróleo durante o trajeto, cujos desdobramentos originariam quatro cenários de acidentes potencialmente danosos ao ambiente e à saúde pública, conforme duas possíveis consequências para o incidente:

- Liberação instantânea: ruptura catastrófica do casco do navio tanque, com vazamento de 300 m³ de material, contido em um dos módulos do compartimento de carga, com formação de uma mancha oleosa isolada levada pela correnteza superficial;
- Liberação contínua: rompimento parcial de um dos compartimentos de carga, no qual o conteúdo é liberado de forma contínua durante um determinado intervalo, constituindo uma pluma oleosa sobre a água;

A possibilidade de incêndios em poça, nos quais ocorre ignição da mancha formada a partir de uma liberação instantânea ou contínua, não é objeto deste trabalho, uma vez que a maioria dos derrames de óleo não fornece as condições para que se estabeleça tal cenário, pois os produtos de interesse formam um filme fino em pouco tempo e apresentam baixos pontos de fulgor. Assim, a hipótese de queima do material constituinte da poça somente seria plausível mediante uma ignição intencional visando estabelecer a queima *in situ* como método de remoção do óleo, porém sua aplicação é condicionada legalmente, não sendo permitida em zonas costeiras e corpos hídricos interiores, abrangidos pelo presente estudo.

Desta forma, dois eventos iniciadores de acidentes e suas respectivas consequências foram identificados, compondo quatro cenários distintos. Os dois eventos iniciadores estabelecidos distinguem-se pelos produtos liberados e condições climatológicas a que estão sujeitos, uma vez que

as regiões e períodos considerados nas simulações apresentam variações nos parâmetros meteorológicos (Quadro 8.2.1.1), condicionando seus desdobramentos, os quais diferem quanto ao tipo de liberação (instantânea ou contínua), demonstrados no Quadro 8.2.1.2.

Quadro 8.1.1: Dados climatológicos adotados para a simulação.

Evento	Local (m)	Temperatura (°C)	Velocidade Ventos (m.s ⁻¹)	UR (%)	Velocidade Correntes (m.s ⁻¹)
EI-01	30°25'S, 51°W	18	2 SW	53	0.5 N
EI-02	31°46'S, 52°04'W	20	3 NE	64	0.8 S

Quadro 8.1.2: Eventos iniciadores de acidentes e cenários correspondentes.

Descrição dos Eventos Iniciadores	Cenários da APR
E-01: Vazamento de produtos refinados de petróleo na Zona Superior da Laguna dos Patos	C-01: Liberação instantânea com espalhamento da poça
	C-02: Liberação contínua com espalhamento da mancha
E-02: Vazamento de produtos refinados de petróleo na Zona Estuarina da Laguna dos Patos	C-05: Liberação instantânea com espalhamento da poça
	C-06: Liberação contínua com espalhamento da mancha

Neste estudo são apresentados os resultados obtidos para os quatro cenários, selecionados por sua recorrência, observada na análise histórica apresentada no Capítulo 7, e devido às peculiaridades da via navegável citadas anteriormente. A descrição dos eventos iniciadores e cenários para cada um dos possíveis desdobramentos é fornecida a seguir.

9. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Os resultados das simulações, obtidos para os quatro cenários selecionados e classificados anteriormente, são apresentados neste capítulo. Estes foram divididos em duas seções, nas quais são descritos os dois eventos iniciadores identificados e cada um dos possíveis desdobramentos, constituindo os quatro cenários.

9.1. EVENTO INICIADOR 1: Liberação de produtos refinados de petróleo na zona superior da Laguna dos Patos

Para este evento iniciador foram elaborados quatro cenários distintos, nos quais consideraram-se liberações de derivados refinados de petróleo devido à ruptura catastrófica do casco duplo do navio que os transportava e ao vazamento, a uma taxa constante de 100 kg.s^{-1} , em um dos tanques contendo óleo diesel. Para cada tipo de liberação (instantânea e contínua), foi atribuído um desdobramento, descrito nesta seção: o deslocamento de uma mancha oleosa em expansão até uma das margens da laguna (C-01 e C-02).

O local para as simulações, situado na porção superior da Laguna dos Patos, mais especificamente nas proximidades do Canal de Itapuã ($30^{\circ}25'S$, $51^{\circ}W$), foi escolhido por ser um trecho de difícil navegação devido a sua pouca profundidade e largura, e por abrigar um Parque de Proteção Ambiental de grande sensibilidade ecológica em sua margem norte. Os cálculos visando a avaliação dos efeitos de derrames foram efetuados para uma distância de 14 km ao sul da saída do canal, e os parâmetros climatológicos referem-se a um dia ensolarado de outono, para o qual foram registrados os valores de temperatura, umidade relativa e velocidades dos ventos e correntes contidos no Quadro 8.2.1.1.

9.1.1. Cenário C-01: Liberação instantânea

O primeiro cenário consiste na liberação instantânea do inventário de um dos compartimentos de carga do navio, estimado em 300 m^3 de óleo diesel, após ruptura do casco do navio tanque durante sua passagem pelo Canal de Itapuã.

Na simulação do comportamento da mancha oleosa formada após o vazamento foram considerados os efeitos de espalhamento e evaporação, predominantes nas primeiras horas após a formação da poça, conforme as formulações clássicas de Fay (1969) e de Mackay (1978), descritos no Capítulo 3. O modelo desenvolvido para a resolução das duas equações diferenciais ordinárias acopladas, a serem resolvidas simultaneamente empregando o método Runge-Kutta, foi implementado utilizando o software MathCad como ferramenta de cálculo.

A expansão da mancha é expressa pelas equações (7) e (9), que representam a variação temporal da área superficial a partir do início da segunda fase do processo de espalhamento, consistindo na primeira equação do sistema de equações diferenciais, e a condição inicial referente à área atingida ao final da primeira fase, respectivamente. As perdas evaporativas são contabilizadas na equação (8), a segunda expressão do sistema, representando a variação da espessura da mancha oleosa contabilizando a regressão vertical, e sua condição inicial (10).

Os resultados obtidos por meio da simulação indicam a formação de uma poça circular com área máxima de aproximadamente 0.171 km^2 , atingida 1.72 horas após a liberação. Do total de 210.9 toneladas derramadas de óleo diesel, estima-se que cerca de 95.9 toneladas sejam evaporadas a uma taxa de $9,363.10^{-5} \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$.

A mancha oleosa resultante está representada na Figura 9.1.1.1, onde a distorção na forma se deve à escala, uma vez que a distância a ser percorrida é significativamente maior que as dimensões da mancha oleosa. A diferenciação entre as cores indica dimensões distintas, atingidas após 0.5 h, 2.5 h, 4.5 h e 6.5 h, enquanto seu posicionamento ilustra o distanciamento do ponto de liberação e conseqüente aproximação da costa.

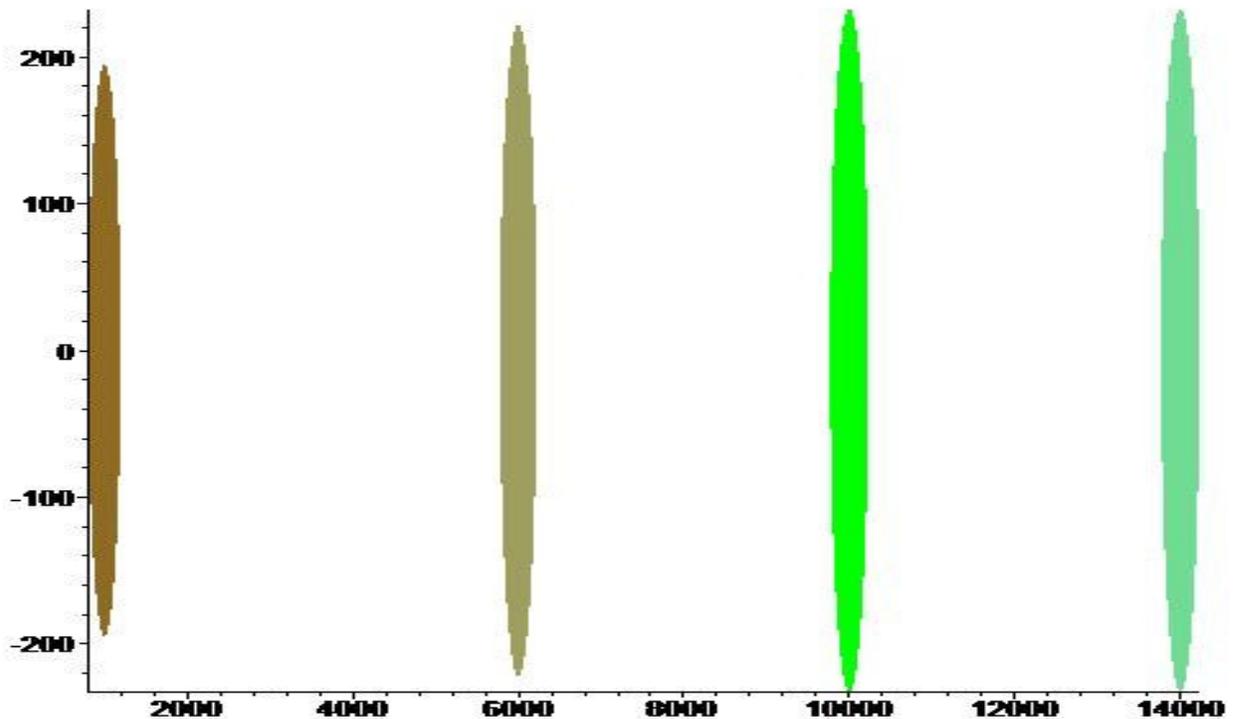


Figura 9.1.1.1: Desenvolvimento da mancha, a partir do lançamento, após 0.5 h, 2.5 h, 4.5 h e 6.5 h.

O óleo se move horizontalmente no corpo hídrico tendo ventos, ondas e correntes como forçantes. Modelos simplificados para derrames são tipicamente bidimensionais, podendo adotar parâmetros constantes para relacionar as velocidades de ventos e correntes às velocidades superficial e de crescimento da poça. Nesta simulação, seu deslocamento está condicionado ao regime hidrológico na laguna (correntes de $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na direção norte) conforme a equação (11), resultando numa velocidade de transporte de $0.569 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Desta forma, estima-se que a mancha oleosa levaria em torno de 6.5 horas para alcançar a margem da laguna onde o parque de proteção ambiental está localizado. O posicionamento da mancha oleosa em diferentes intervalos de tempo, da região fonte até a região costeira, está representado nas Figuras 9.1.1.2, 9.1.1.3 e 9.1.1.4.



Figura 9.1.1.2: Posição da poça 1h após a liberação.

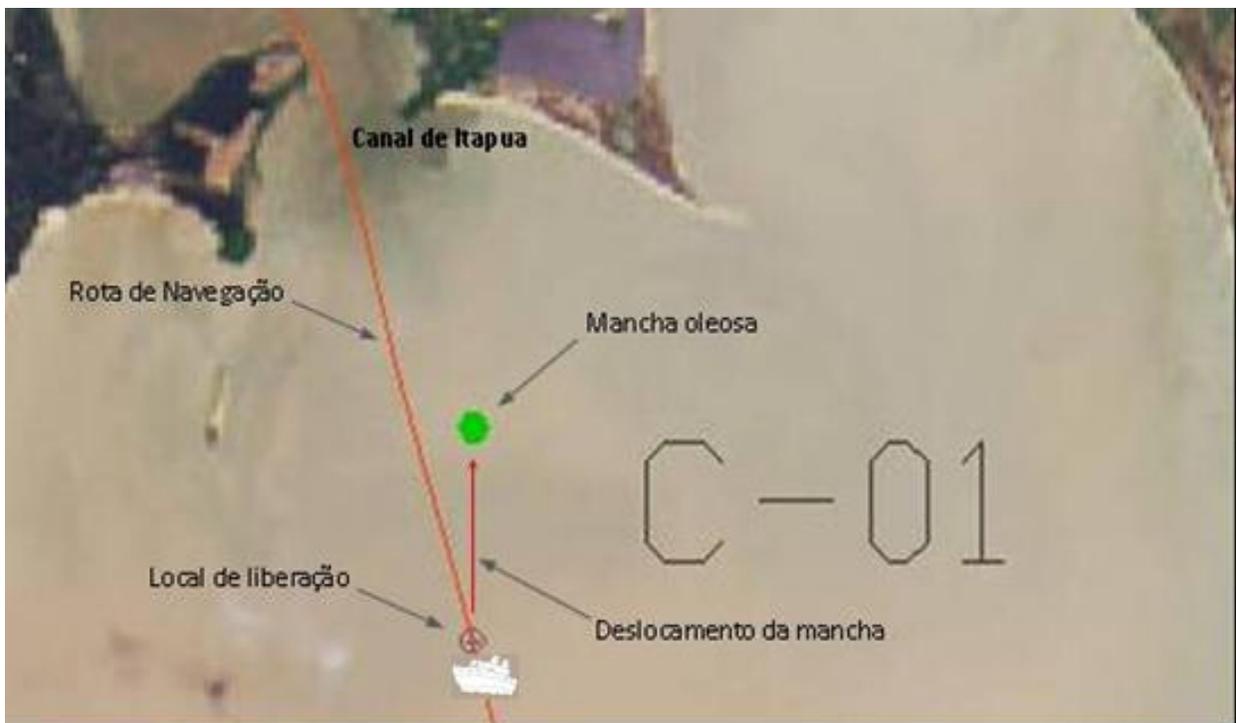


Figura 9.1.1.3: Posição da poça 3 h após a liberação.



Figura 9.1.1.4: Posição da poça 6.5 h após a liberação.

9.1.2. Cenário C-02: Liberação contínua

O cenário C-02 refere-se à liberação por um orifício de 6 metros de diâmetro, após avaria no casco sofrida durante a passagem pelo Canal de Itapua, do conteúdo de um dos módulos do tanque compartimentado do navio a uma taxa contínua de $100 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, cujo derrame totaliza um volume de 300 m^3 de óleo diesel após 0.59 horas.

Na previsão do comportamento da mancha oleosa formada após o vazamento foram considerados os efeitos de espalhamento e evaporação, predominantes no decorrer das primeiras horas após a formação da mancha. O modelo implementado para sua simulação é constituído por um sistema de equações diferenciais formado pelas equações (13), (14) e (15), que descrevem as variações de área e espessura da pluma considerando os efeitos do processo de evaporação, acrescido das condições iniciais (16), (17) e (18), apresentadas no terceiro capítulo.

Ao término da liberação, 210.9 toneladas de óleo diesel formam uma pluma assumida triangular, das quais cerca de 189 toneladas são removidas devido à evaporação a uma taxa de $8,959 \cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Os resultados apontam o estabelecimento de uma pluma com área máxima de

cerca de 0.198 km^2 após aproximadamente 6 horas, mostrada na Figura 9.1.2.1. Esta ilustra o seu desenvolvimento, onde a distorção na forma se deve à grande diferença entre as dimensões da poça e a distância percorrida por ela e as cores distinguem as áreas estimadas decorridas 0.5 h, 2.5 h e 6.5 h do princípio do vazamento acidental.

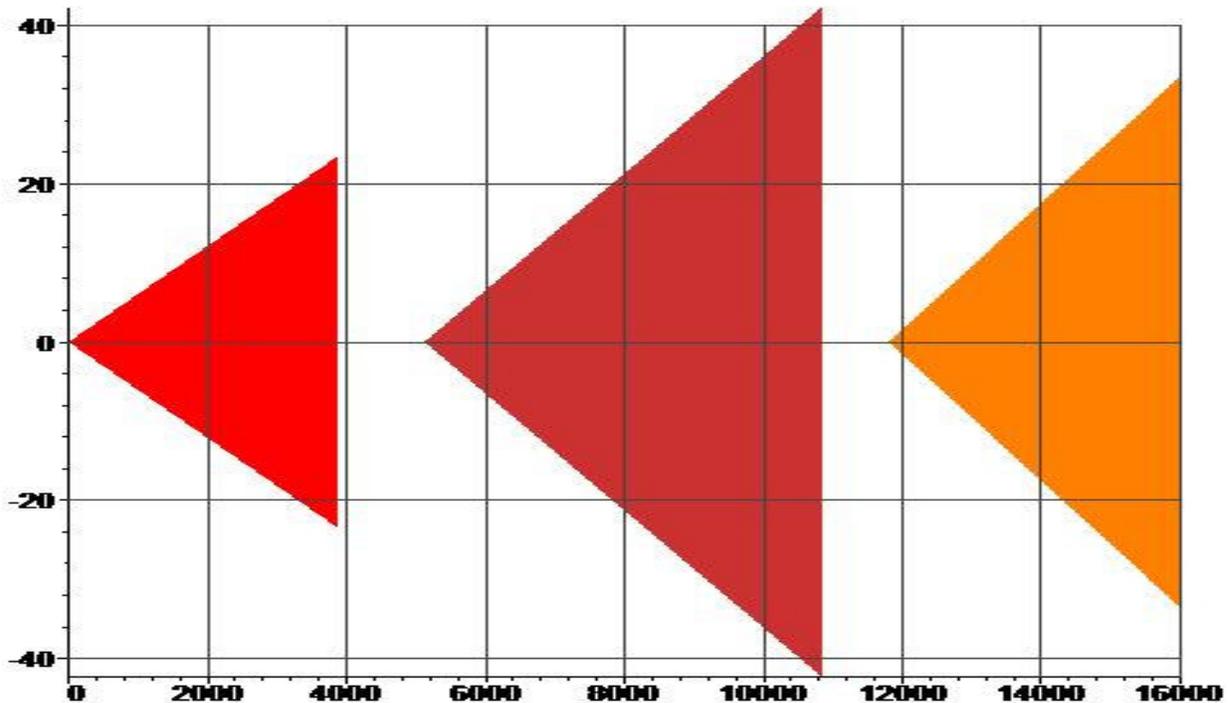


Figura 9.1.2.1: Desenvolvimento da pluma, a partir do lançamento, após 0.5 h, 3.5 h e 5.5 h

É possível observar uma retração da pluma, iniciada em torno de 4.5 h depois do início da liberação, devida à predominância dos efeitos da evaporação a partir desse período. Entretanto, para fins de planejamento de contingências, consideram-se as dimensões máximas da mancha, uma vez que sua redução iniciaria a uma distância muito pequena da zona costeira, aumentando o potencial danoso do vazamento.

A movimentação do óleo no corpo hídrico, influenciada por ventos, ondas e correntes, se dá horizontalmente e pode ser modelada de forma simplificada. Para isso, consideram-se efeitos bidimensionais para o derrame e parâmetros constantes para relacionar o deslocamento e espalhamento da mancha às velocidades de ventos e correntes. Portanto, o distanciamento da pluma da região fonte, aproximando-se da região costeira, está sujeito ao regime hidrológico da laguna descrito no Capítulo 4, adotando nesta simulação uma corrente de transporte com velocidade de 0.569 m.s^{-1} na direção norte como principal agente (Equação 11).

Espera-se que a pluma atinja a região onde se situa o Parque de Itapuã em aproximadamente 5.5 horas. As Figuras 9.1.2.2, 9.1.2.3 e 9.1.2.4 ilustram a localização da pluma formada decorridos intervalos temporais distintos.



Figura 9.1.2.2: Alcance da pluma 1 h após o vazamento.

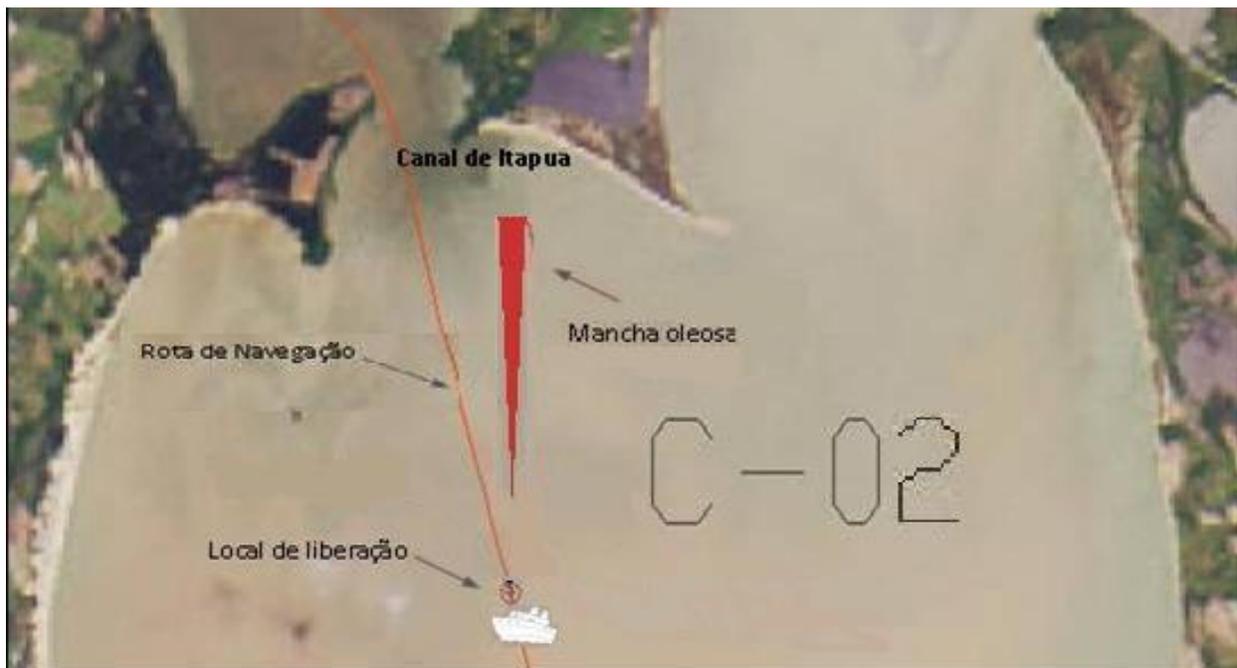


Figura 9.1.2.3: Alcance da pluma 4 h após o vazamento.



Figura 9.1.2.4: Alcance da pluma 5.5 h após o vazamento.

9.2. EVENTO INICIADOR 2

Para o segundo evento iniciador foram elaborados dois cenários distintos. De forma análoga aos cenários C-01 e C-02, considerou-se a liberação instantânea de óleo bunker devido ao rompimento total do casco do navio que os transportava (C-03) e o seu vazamento a uma taxa constante de $100 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ (C-04). A cada uma delas estipulou-se como consequência a formação de uma mancha oleosa em expansão, cujo deslocamento resultaria no alcance das margens da laguna.

A escolha do local para as simulações, situado na região estuarina da Laguna dos Patos, deve-se às dificuldades de travessia impostas pelas dimensões reduzidas do canal de navegação e a sua proximidade à desembocadura da laguna no Oceano Atlântico, constituindo uma região de grande sensibilidade ecológica e importância para a indústria pesqueira. Os efeitos dos derrames foram avaliados para uma distância de 8 km da saída da Ponta da Feitoria ($31^{\circ}46'S$, $52^{\circ}04'W$), considerando os valores de temperatura, umidade relativa e velocidades dos ventos e correntes apresentados no Quadro 8.2.1.1, registrados para um dia ensolarado de primavera.

9.2.1. Cenário C-03: Liberação instantânea

Neste cenário considerou-se uma liberação instantânea do conteúdo de um dos recipientes de carga da embarcação, resultando no derrame de aproximadamente 300 m³ de óleo bunker, após a ruptura do casco do navio tanque durante sua passagem pela Ponta da Feitoria.

Os efeitos de espalhamento e evaporação, determinantes do comportamento da mancha oleosa nas primeiras horas após a formação da poça, foram simulados conforme os modelos descritos no Capítulo 3. Neles a expansão da mancha é expressa pelas equações (7) e (8), com as condições iniciais obtidas através das expressões (9) e (10), sendo as perdas evaporativas contabilizadas pela equação (8), representando a variação volumétrica da mancha.

Os resultados da simulação apontam para a formação de uma poça circular constituída a partir da liberação de 211.3 toneladas do produto, cuja evaporação a uma taxa de $3,18 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ promove a remoção de aproximadamente 99.6 toneladas, com área máxima de aproximadamente 0.24 km², atingida 2.5 horas após a liberação, cujo desenvolvimento está representado na figura 9.2.1.1. A distorção na forma da poça ilustrada se deve à escala, uma vez que a distância a ser percorrida é significativamente maior que as dimensões da mancha oleosa, e as cores diferenciadas denotam as dimensões atingidas após 0.5 h, 1 h, 1.5 h, 2 h e 2.5 h, enquanto seu posicionamento ilustra o deslocamento do ponto de liberação até a região costeira.

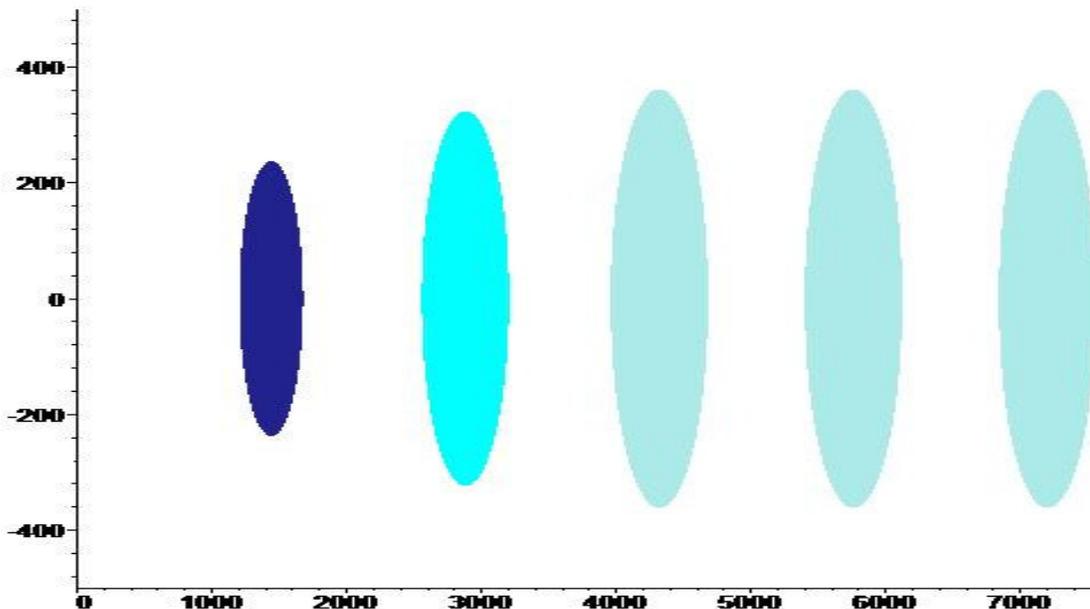


Figura 9.2.1.1: Desenvolvimento da mancha, a partir do lançamento, após 0.5 h, 1h, 1.5 h, 2h e 2.5 h.

O deslocamento horizontal da mancha na superfície aquática é condicionado por forçantes como ventos, ondas e correntes. Em modelos simplificados de previsão do comportamento do óleo derramado, parâmetros constantes podem ser adotados para estabelecer a relação entre as velocidades de ventos e correntes e de aproximação da região costeira. Desta forma, a movimentação da poça é determinada pela equação (11) através da velocidade e direção da corrente na Laguna dos Patos arbitrada para este cenário (0.8 m.s^{-1} na direção sul), resultando na velocidade de transporte de 0.816 m.s^{-1} .

Estima-se que a mancha oleosa levaria em torno de 2.8 horas para alcançar a zona estuarina, rica em espécies aquáticas de grande importância econômica e ecológica. O deslocamento da mancha oleosa, da região fonte até a região costeira, está representado nas figuras 9.2.1.2, 9.2.1.3 e 9.2.1.4.



Figura 9.2.1.2: Posição da poça 1 h após a liberação.



Figura 9.2.1.3: Posição da poça 2 h após a liberação.



Figura 9.2.1.4: Posição da poça 2.5 h após a liberação.

9.2.2. Cenário C-04

Para o cenário C-04 considera-se o derrame acidental do produto contido em um dos compartimentos cargueiros da embarcação, instantes após sua passagem pela Ponta da Feitoria, devido ao rompimento do casco. A liberação por um orifício de 6 metros de diâmetro, a uma taxa constante de $100 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, totaliza um volume de 300 m^3 de óleo bunker após 0.6 h.

A formação de uma pluma é simulada considerando os efeitos de espalhamento e evaporação, que determinam seu comportamento nas primeiras horas após o lançamento. O modelo desenvolvido, apresentado anteriormente, requer a resolução do sistema de equações diferenciais apresentado no terceiro capítulo, calculado utilizando os recursos do software MathCad.

Os resultados indicam a formação de uma mancha oleosa assumida triangular, formada após o vazamento de 211.3 toneladas de óleo, das quais 100.8 toneladas são evaporadas a uma taxa de $3,897\cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, cuja área máxima de aproximadamente 0.276 km^2 alcançada após 2.7 horas é mostrada na figura 9.2.2.1, representando sua expansão. Na ilustração as diferentes colorações da pluma indicam suas dimensões 0.5 h, 1 h e 2.5 h após o início da liberação, e a distorção se deve à diferença significativa entre a largura da mancha e a distância do local de liberação até a margem.

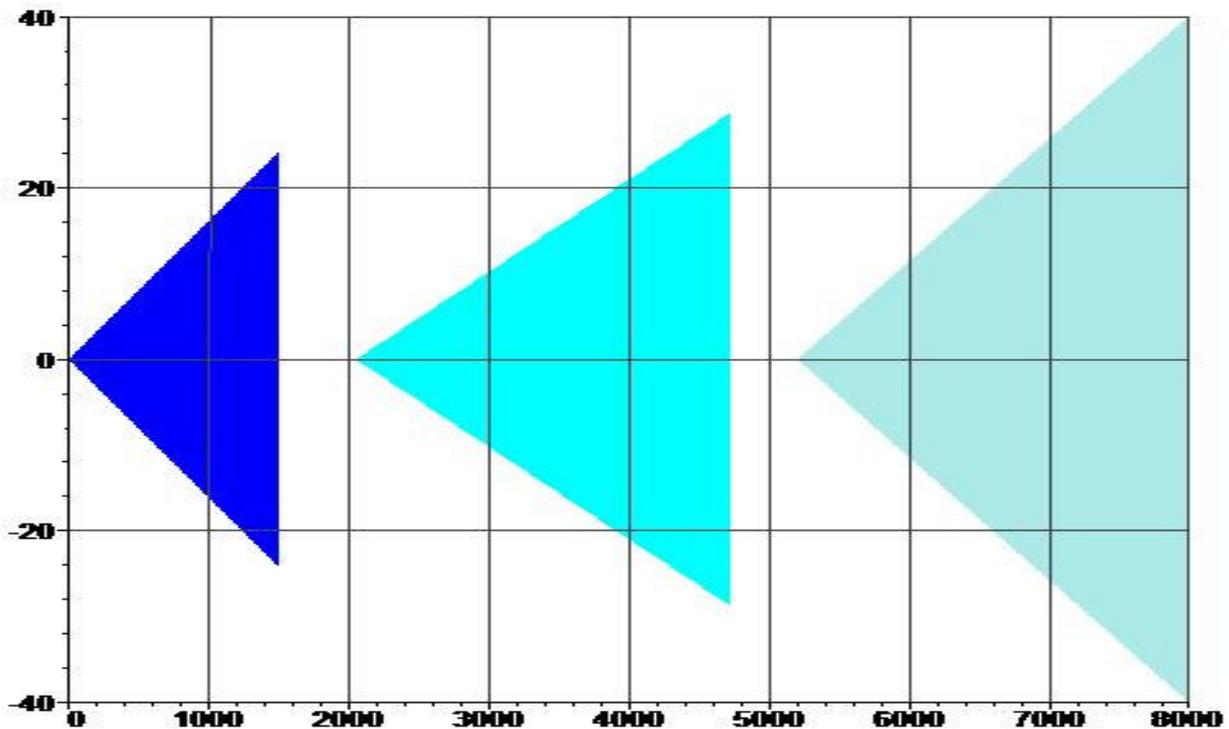


Figura 9.2.2.1: Desenvolvimento da mancha, a partir do lançamento, após 0.5 h, 1.5 h e 2.5 h.

O movimento da mancha no corpo hídrico é considerado bidimensional, com sentido horizontal, em modelos simplificados. Os parâmetros relativos aos ventos, ondas e correntes, forçantes do deslocamento e espalhamento, são considerados constantes. Desta forma, o óleo se aproxima da costa sob a influência do regime hidrológico da Laguna dos Patos descrito no Capítulo 3, com velocidade arbitrada da corrente de 0.8 m.s^{-1} na direção sul e velocidade de transporte de 0.816 m.s^{-1} , obtida através da equação (11).

As figuras 9.2.2.2, 9.2.2.3 e 9.2.2.4 representam o posicionamento da pluma simulada após diferentes intervalos de tempo, indicando sua chegada às margens da laguna em cerca de 2.6 horas.



Figura 9.2.2.2: Posição da poça 1 h após a liberação.



Figura 9.2.2.3: Posição da poça 3 h após a liberação.



Figura 9.2.2.4: Posição da poça 4.5 h após a liberação.

10. CONSIDERAÇÕES E PROPOSTAS PARA REDUÇÃO DOS RISCOS

A identificação dos riscos e a avaliação da severidade das conseqüências de acidentes no transporte hidroviário, bem como da extensão das áreas vulneráveis, permite a implementação de medidas capazes de minimizar os perigos e controlar efeitos nocivos. Os resultados obtidos a partir das simulações de acidentes fornecem informações relevantes para a seleção de técnicas e equipamentos de atendimento a emergências e contribui para o aprimoramento de planos de gerenciamento e contingência.

Os possíveis danos levantados durante a elaboração do estudo referem-se à contaminação ambiental, cujos efeitos são significativamente agravados com o espalhamento dos produtos liberados. Devido à sua persistência no ambiente aquático, vazamentos de óleos combustíveis estão entre os mais difíceis de serem combatidos. O óleo lançado pode percorrer longas distâncias e causar a contaminação difusa das águas, zonas costeiras e recursos ambientais sensíveis. As características do produto liberado determinam seu comportamento no ambiente, como a flutuação das manchas acompanhando a correnteza e a taxa de remoção por evaporação influenciada pela intensidade dos ventos.

Após o despejo, o óleo espalha rapidamente e pode segregar-se em manchas menores, enfileiradas e movendo-se na direção do vento, no decorrer de algumas horas. Enquanto a evaporação levaria ao desaparecimento da poça da superfície, a segregação e formação de emulsões com a água promove sua persistência, resultando no transporte do óleo remanescente até as margens. A validação do modelo desenvolvido neste trabalho é dificultada pela confiabilidade reduzida dos dados disponíveis relativos a acidentes envolvendo a navegação. Geralmente, as conseqüências de derrames acidentais de óleo são divulgadas somente dias após a ocorrência, quando o espalhamento e a evaporação incluídos na modelagem simplificada deixam de ser predominantes e os demais processos de intemperismo passam a atuar sobre a mancha oleosa. Essa dificuldade foi superada através da reprodução dos cenários simulados pelo Hazard Assessment Computer System Models (HACSM), um modelo computacional desenvolvido pela United States Coast Guard, também simplificado e de caráter preventivo. A comparação indicou uma concordância de 98% entre os valores obtidos nas simulações com o modelo desenvolvido e os resultados do programa HACSM.

Os impactos ao ambiente, decorrentes da liberação acidental de derivados refinados de petróleo, se devem às altas concentrações de componentes tóxicos de rápida evaporação, portanto

tais efeitos seriam localizados. Sendo assim, recomenda-se o aprimoramento dos instrumentos de resposta aos incidentes no sentido de restringir a mancha oleosa às proximidades da origem do vazamento, evitando que esta atinja a costa e contamine diferentes ecossistemas.

A contenção e recuperação do óleo derramado são limitadas pelas condições meteorológicas, sendo fundamental o conhecimento dos sistemas de remoção mais adequados para as substâncias em questão e menos agressivos aos ecossistemas a serem recuperados. Limpezas em corpos hídricos requerem embarcações de apoio equipadas e capazes de transferir o resíduo removido à costa, que se encontrarão impregnadas pelo óleo ao término das operações de descontaminação, cuja limpeza é lenta e custosa. Salienta-se a necessidade de pronto atendimento na ocorrência de incidentes dessa natureza, uma vez que manchas segregadas e distribuídas aleatoriamente dificilmente podem ser removidas e permanecem à deriva, podendo alcançar áreas previamente descontaminadas, inviabilizando econômica e ecologicamente sua recuperação.

Os métodos de limpeza passíveis de aplicação em ambientes aquáticos mais difundidos são a limpeza natural, remoção manual, uso de materiais absorventes, bombeamento a vácuo, skimmers, jateamento com água ou areia, corte de vegetação, queima *in situ*, remoção de sedimentos, biorremediação e produtos dispersantes. Para evitar que a contaminação atinja grandes extensões, afetando áreas de interesse econômico e ecológico, o procedimento indicado seria a contenção por meio de barreiras e a remoção manual e/ou mecânica com corte de vegetação. Caso a região costeira seja impactada, as técnicas mais adequadas para cada tipo de ambiente variam.

O emprego de técnicas como a queima *in situ*, biorremediação e aplicação de dispersantes dificilmente seriam consideradas apropriadas devido à formação de resíduos e risco de danos adicionais ao ambiente. A legislação brasileira não permite seu uso em ambientes lagunares ou mesmo sem a autorização do órgão ambiental competente em qualquer ambiente, aplicação que requer estudos mais aprofundados.

A fim de minimizar os perigos e impactos descritos neste estudo, recomenda-se a adoção de Cartas de Sensibilidade para Derrames de Óleo (Cartas SAO) e elaboração de um Plano de Contingência, os quais auxiliam na tomada de decisões e indicam os procedimentos de emergência adequados. Para que o atendimento a eventuais incidentes seja o mais ágil possível, sugere-se que se estabeleça um Programa de Ajuda Mútua, a exemplo do estabelecido em Rio Grande, no qual as empresas usuárias da Laguna dos Patos para o transporte de seus produtos poderiam compartilhar experiências e adquirir equipamentos e materiais que assegurassem a máxima rapidez de resposta às emergências.

11. CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu na elaboração de uma avaliação dos riscos envolvidos na atividade de transporte aquaviário dos óleos combustível, diesel e leve de reciclo, no trecho da Laguna dos Patos compreendido entre os terminais TENIT e TERIG, conforme metodologia aplicada internacionalmente, de acordo com ferramentas de análise de riscos amplamente empregadas, enquanto os cálculos para simulação dos cenários foram efetuados conforme modelos matemáticos descritos em literatura.

Na Análise Histórica de Acidentes foram identificados os possíveis eventos iniciadores capazes de gerar cenários de acidentes com maior potencial de contaminação ambiental. Estes estão relacionados ao rompimento dos tanques e vazamento de derivados refinados de petróleo, cujo comportamento está sujeito às condições meteorológicas mais prováveis na região de ocorrência. Após a identificação dos principais cenários capazes de causar danos ao ambiente, o comportamento dos produtos suscetíveis à liberação acidental em cada um deles foi calculado.

Para os cenários C-01 e C-03 foi considerada a ruptura total de um dos compartimentos contendo a carga, enquanto os cenários C-02 e C-04 tratam-se de rompimentos parciais. A hipótese de liberação de grande parte do conteúdo do recipiente é bastante conservadora, uma vez que a embarcação é dotada de dispositivos de segurança, descritos anteriormente, e projetada para manter a estabilidade em caso de avarias. A avaliação dos efeitos físicos da liberação acidental das substâncias de interesse utilizou-se de modelos e técnicas para estimar a extensão dos impactos ao ambiente. A determinação dos danos às áreas vulneráveis depende da localização e características econômicas e biológicas do ponto de liberação, das propriedades, taxas de liberação e quantidades dos produtos envolvidos e das condições climatológicas e hidrológicas no momento do vazamento.

As diferentes configurações de cenários de acidentes analisadas resultaram na formação de manchas oleosas com áreas entre 0.17 e 0.28 km², cujo alcance está condicionado aos parâmetros definidos para cada evento iniciador e a capacidade de resposta da equipe de atendimento a emergências envolvida. Os resultados demonstraram que tempos de resposta superiores a 2.7 h poderiam resultar na contaminação de áreas costeiras de grande importância ecológica e econômica, implicando na adoção de medidas mais complexas de remoção do óleo.

12. BIBLIOGRAFIA

Agência Nacional de Petróleo, 2006, “**Anuário Estatístico 2006**”. Disponível em: http://www.anp.gov.br/conheca/anuario_estat.asp. Acesso em 24 de fevereiro de 2007.

Alpina Brigs, 2004, “**Carta de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na área de influência da Refap S.A**”, Relatório Técnico.

American Petroleum Institute, 1999, “Fate of spilled oil in marine waters: Where does it go? What does it do? How do dispersants affect it?”, In: **API Publication Number 4691**, USA.

ASCE Task Committee on Modeling Oil Spills of the Water Resources Engineering Division, 1996, “State-of-the-art Review of modeling transport and fate of oil spills”, **Journal of Hydraulic Engineering**, vol. 122(11), pp. 549-609.

Bento, D. M., 2005, “**Análise Química da Degradação dos Hidrocarbonetos de Óleo Diesel no Estuário da Lagoa dos Patos – Rio Grande/RS**”, Dissertação, Departamento de Geociências da Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

Cantagallo C., Milanelli J. C. C., Dias-Brito D., 2007, “Limpeza de ambientes costeiros brasileiros contaminados por petróleo: uma revisão”, **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, vol. 2(1), pp. 1-12.

Capitoli, R.R.; Bemvenuti, C. E., 2004, “Distribuição batimétrica e variações de diversidade dos macroinvertebrados bentônicos da Plataforma Continental e Talude Superior no extremo Sul do Brasil”, **Revista Atlântica Rio Grande**, vol. 26, pp. 27-43.

Castelão, R., Möller Jr., O. O., 2003, “Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos, RS”, **Revista Atlântica Rio Grande**, vol. 25(2), pp. 91-106.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2002, “**Derrames de Óleo no Mar e os Ecossistemas Costeiros**”, Apostila de Curso, São Paulo.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2005, “**Vazamentos de petróleo**”. Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/acidentes/vazamento/vazamento.asp>. Acesso em 24 de fevereiro de 2007.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), 2007, “**Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**”, Cooperação Técnica Brasil-Alemanha, São Paulo.

Committee for Prevention of Disasters, 1997, “**Methods for the calculation of physical effects – Part 1**”, CPR 14E, Holanda.

Costa, M., 1999, “**Evolução de hidrocarbonetos derramados nas zonas costeiras e estuarinas**”. Dissertação, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.

Dehaini, J., 2001, “**Detecção da Pluma de Contaminação de Hidrocarbonetos em Subsuperfície pelo Método de Radar de Penetração**”. Tese, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Delaney, P. J. V., 1965, “Fisiografia e Geologia de Superfície da Planície Costeira do Rio Grande do Sul”, In: **Publicação Especial da Escola de Geologia**, vol. 6, 105 p., Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Environmental Protection Agency., 2001, “**EPA Oil Spill Program Overview**”. Disponível em <http://www.epa.gov/oilspill/overview.htm>. Acesso em 13 de julho de 2007.

Fay, J. A., 1969, “The spread of oil slicks on a calm sea”, In: **Oil on the sea**, Plenum Publishing Corp., NY.

Fay, J. A., 2006, “Model of large pool fires”, **Journal of Hazardous Materials**, vol. 136, pp. 219-232.

Fay, J. A., 2006, "Spread of large LNG pools on the sea", **Journal of Hazardous Materials**, doi:10.1016/j.jhazmat.2006.10.024.

Fernandes, E. H. L., Mariño-Tapia, I., Möller Jr., O. O., Dyer, K. R., 2003, The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary, **Ocean Dynamics**.

Ferrão, C. M., 2005, "**Derramamentos de óleo no mar por navios petroleiros**". Trabalho de Conclusão de Curso, Pós-Graduação Executiva em Meio Ambiente, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Fingas, M. F., 1995, "A literature review of the physics and predictive modelling of oil spill evaporation. *Journal of Hazardous Materials*", vol. 42, pp. 157-175.

Fingas, M., 2000, "Fieldhouse Water in Oil Emulsions: Results of Formation Studies and Application to Oil Spill Modelling", **Spill Science and Technology Bulletin**, vol. 5(1), pp. 81-91.

Frota Nacional de Petroleiros, 2002, "**Plano de emergência para derrames de hidrocarbonetos**", Relatório Técnico PETROBRAS-FRONAPE, Inspetoria Geral do Rio de Janeiro.

Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Roessler (FEPAM), 2001, "**Manual de Análise de Riscos Industriais**". Disponível em: http://www.fepam.rs.gov.br/central/formulários/arqmanual_risco.pdf. Acesso em 5 de novembro de 2006.

Glickman, T. S., Golding, D., Silverman, E. D., 1992, "Acts of God and acts of man - recent trends in natural disasters and major industrial accidents", In: **Washington (DC): Resources for the Future**, Discussion Paper CRM 92.02.

Gomes, R. C. M. B., 2004, "**Sistema de informação para a modelação matemática de derrames de hidrocarbonetos em ambiente marinho**". Dissertação, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.

Hartmann, C., Harkot, P. R. G., 1990, “Influência das águas do Canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da Lagoa dos Patos”, **Revista Brasileira de Geociências**, vol.20, pp. 1-4.

Hartmann, C., Schettini C. A. F., 1991, “Aspectos hidrológicos na desembocadura da Laguna Dos Patos, RS”, **Revista Brasileira de Geociências**, vol. 21(4), pp. 371-377.

Hoult, D. P., 1972, “Oil Spreading on the sea”, **Annu. Rev. of Fluid Mechanics**, pp. 341-362.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2006, “**Mapas Populacionais 2006**”. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/população/default.htm>. Acesso em 3 de março de 2007.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente, 2007, “**Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar**”. Informação Técnica. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/meio/guias/modelagem>. Acesso em 25 de maio de 2007.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente, 2007, “**Parque Nacional da Lagoa do Peixe**”. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/siucweb/mostrauc.php>. Acesso em 18 de janeiro de 2007.

International Tanker Owners Pollution Federation, 1998, “The environmental effect of marine oil spill – Effects, recovery and compensation”, In: **International Seminar on Tanker Safety, Pollution Prevention, Spill Response and compensation**, em 6 de Novembro de 1998, Rio de Janeiro, Brasil.

International Tanker Owners Pollution Federation, 2001, “A review of the problems posed by spills of heavy fuel oil”, In: **International Oil Spill Conference**, de 26 a 29 de Março de 2001, Tampa, Estados Unidos.

International Tanker Owners Pollution Federation, 2002. “Aerial observation of oil”, **Technical Information Paper nº 1**. Disponível em: <http://www.itopf.com/tip2.html>. Acesso em 25 de maio de 2007.

International Tanker Owners Pollution Federation, 2003, “Fate of marine oil spills”, **Technical Information Paper nº 2**. Disponível em: <http://www.itopf.com/tip2.html>. Acesso em 25 de maio de 2007.

International Tanker Owners Pollution Federation, 2005, “Use of chemical dispersants to treat oil spills”, **Technical Information Paper nº 4**. Disponível em: <http://www.itopf.com/tip2.html>. Acesso em: 25 de maio de 2007.

International Tanker Owners Pollution Federation, 2007, “**About marine spills**”. Disponível em: <http://www.itopf.com/tip2.html>. Acesso em 25 de maio de 2007.

Kader, B. A., Yaglom, A. M., 1974, “Heat and mass transfer between a rough wall and turbulent fluid flow at high Reynolds and Peclet numbers”, **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 62, pp. 601-623.

Lehr, W., Jones, R., Evans, M., Simecek-Beatty, D., Overstreet, R., 2002, “Revision of the ADIOS oil spill model”, **Environmental Modelling & Software**, vol. 17, pp. 191-199.

Mackay, D., Buist, I., Mascarenhas, R., Paterson, S., 1980, “**Oil spill processes and models**”, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Toronto, Canada.

Matthiensen, A., Yunes, J. S., Codd, G. A., 1999, “Ocorrência, distribuição e toxicidade de cianobactérias no estuário da Lagoa dos Patos, RS”. **Revista Brasileira de Biologia**, vol. 59, pp. 361-376.

McCay, D. F., Rowe, J. J., Whittier, N., Sankaranarayanan, S., Etkin, D. S., 2004, “Estimation of potential impacts and natural resource damages of oil”, **Journal of Hazardous Materials**, vol. 107, pp. 11–25.

Mehdi, N., 2005, “**Algoritmo adaptativo aplicado à modelagem de transporte de óleo**”. Dissertação, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Ministério dos Transportes, 1977, “**Plano Diretor de Navegação Interior do RS**”, vol. 9, GEIPOT, Porto Alegre.

Möller Jr., O. O., 1996, “**Hydrodynamique de la Lagune dos Patos (30°S, Brésil): Mesures et modélisation**”. Tese, Ecole Doctorale des Sciences de la Terre et de la Mer, Université Bordeaux.

Oliveira, E., 1992, “**Contaminação de Aquíferos por Hidrocarbonetos Provenientes de Vazamentos de Tanques de Armazenamento Subterrâneo**”. Dissertação, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Padovezzi, C. D., 2003, “**Conceitos de embarcações adaptadas à via aplicado à navegação fluvial no Brasil**”. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

PETROBRAS Transporte S.A., 2006, “**Relatório Anual 2006**”. Disponível em: <http://www.transpetrosite/appmanager/transportal>. Acesso em 24 de fevereiro de 2007.

Piovesan, R. B., Alves, F. N. A., Soares, I. D., 2005, “Aplicação de um modelo de transporte de partículas para determinação da trajetória de manchas de óleo na Lagoa do Patos – RS”, In: **3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, de 02 a 05 de Outubro de 2005, Salvador, Brasil.

Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Disponível em: <http://www.portoalegre.rs.gov.br>. Acesso em 18 de janeiro de 2007.

Reed, M., Johansen, O., Brandvik, P. J., Daling, P., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay, D., Prentki, R., 1999, “Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art”, **Spill Science & Technology Bulletin**, vol. 5, pp. 03-13.

Refinaria Alberto Pasqualini S.A., 2007, “**Perfil Institucional**”. Disponível em: <http://www.refap.com.br>. Acesso em 24 de fevereiro de 2007.

Riazi, M., Edalat, M., 1996, “Prediction of the rate of oil removal from seawater by evaporation and dissolution”, **Journal of Petroleum Science and Engineering**, vol. 16, pp. 291-300.

Rosman, P. C. C., 2007, “**Modelagem em tempo real para planejamento de ações emergenciais**”, Relatório Técnico, COPPE Fundação, 26 p. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/meio/guias/modelagem/artigos/rosman.pdf>. Acesso em 12 de agosto de 2007.

Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1998, “**Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change**”, Wiley – Interscience, Hoboken, USA.

Shreve, R. N., Brink Jr., J. A., 1997, “**Indústrias de processos químicos**”, LTC, N.Y.

Silva, M. A. B., 2005, “**Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas**”. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Sobreira, T. P. M., 2004, “**Análise, Sob o Ponto de Vista Ambiental, do Plano de Contingências da Transpetro – Petrobras Transporte S.A., No Porto de Paranaguá, Paraná**”. Monografia, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Soto, Y. J. M., 2004, “**A modelagem hidrodinâmica como apoio a tomada de decisão em caso de derrame de óleo na parte interna do complexo estuarino Antonina-Paranaguá, PR**”. Dissertação, Universidade Federal do Paraná.

Souza Filho, A.M., 2006, **“Planos nacionais de contingência para atendimento a derramamento de óleo: análise da experiência de países representativos das Américas para implantação no caso do Brasil”**. Dissertação, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal Do Rio De Janeiro.

Superintendência de Portos e Hidrovias do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: www.sph.rs.gov.br. Acesso em 12 de agosto de 2007.

Stiver, W., Mackay, D., 1984, “Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures”, **Environ. Sci. Technol.**, vol. 18, pp. 834-840.

Tkalich, P., Huda, K., Gin, K. Y. H., 2003, “A multiphase oil spill model”, **Journal of Hydraulic Research**, vol. 41, pp. 115–125.

Thomson, B. J., 1999, “International co-operation in hazardous materials accident prevention”, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, vol. 12, pp. 217–225.

United States Coastal Guard, 1983, **“Revision and experimental verification of the Hazard Assessment Computer System Models for Spreading, Movement, Dissolution and Dissipation of insoluble chemicals spilled onto water”**, Final Technical Report.

Vanem, E., Endresen, O., Skjong, R., 2007, “Cost-effectiveness criteria for marine oil spill preventive measures”, **Reliab. Eng. Syst. Safety**, doi:10.1016/j.ress.2007.07.008.

Viichez, J. A., SeviUa, S., Montielt, H., Casalt, J., 1995, “Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials”. **Journal of Loss Prev. Process Ind.**, vol. 8(2), pp. 87-96.

Waldman, G.A., Johnson, R.A., Smith, P.C., 1973, **“The spreading and Transport of Oil Slicks on the Open Ocean in the Presence of Wind, Waves and Currents”**, AVCO Corporation, Wilmington.

Wu, J., 1980, “Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions – a revisit”, **Journal of Physical Oceanography**, vol. 10, pp. 727–740.

Yapa, P. D., Dasanayaka, L. K., Shen, H. T., Shen H. H., 2007, “**Modeling Oil Transport and Spreading in Icy Waters**”, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, NY.

APÊNDICE I

Cálculos realizados para o cenário 1, utilizando o software MathCad

C-01

LIBERAÇÃO INSTANTÂNEA

Volume descarregado (no instante do lançamento)

$$V_d := 300$$

Input

Densidade da água

$$\rho_w := 1000$$

Densidade do líquido

$$\rho_l := 700$$

$$\Delta := 1 - \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right)$$

Viscosidade da água

$$\nu_w := 0.001$$

Massa liberada

$$Q_d := V_d \cdot \rho_l$$

Temperatura da poça

$$T_p := 20 + 273.15$$

Temperatura ambiente

$$T_{amb} := 20 + 273.15$$

Velocidade do vento

$$W := 2$$

Constante dos gases

$$R_g := 8.314$$

Pressão de vapor

$$P_v := 13.62$$

Coeficientes experimentais

$$k_1 := 1.52$$

$$k_2 := 1.21$$

$$k_{21} := 1.09$$

Modelo EVAP

$$M := 114.23;$$

$$\text{rel} := 0.7$$

$$\text{Hon} := 0.01$$

$$U_{xa} := \text{rel} \cdot \frac{(\sqrt{0.00125})}{\text{rel}^{0.2}}$$

$$H_x := \text{Hon} \cdot \frac{1}{(\text{Tamb} + 110.4)} \cdot \frac{U_{xa}}{1.45 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tamb} \cdot \sqrt{\text{Tamb}}}$$

$$Ba := \left[0.55 \left(0.8^3 - 0.2 \right) \cdot \sqrt{H_x} \right] - (2.5 \cdot 7.85 \log(H_x)) + (11.277 \cdot 7.85)$$

$$za := \frac{U_{xa}}{(1.45 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tamb} \cdot \sqrt{\text{Tamb}})}$$

$$\text{Dena} := \frac{(1013.251000)}{\text{Rg} \cdot \text{Tamb}}$$

$$\text{Dan} := \frac{1}{(2.5 \cdot 7.85 \log(za)) + Ba + 2.35}$$

$$\text{EVAPM} := \frac{\left[\text{Dan} \cdot \text{Dena} \cdot U_{xa} \left(\text{Pv} \cdot M \cdot \frac{1}{8.31432 \text{Tamb}} \right) \right]}{\text{Dena}}$$

$$\text{EVAPM} = 9.363 \times 10^{-5}$$

$$\text{mloss} = \text{EVAPM} * A$$

Primeira fase: GRAVITACIONAL-INERCIAL

Duração é o tempo de transição t_t

$$g := 9.8$$

$$t_t := \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^4 \cdot \left[\frac{(V_d \cdot 10^3)}{g \cdot v_w \cdot \Delta} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$tt = 183.41$$

$$At := \pi \cdot k2^2 \cdot \left(\frac{k2}{k1}\right)^2 \cdot \left[\frac{(Vd)^5 \cdot g \cdot \Delta}{vw^2}\right]^{\frac{1}{6}}$$

$$At = 3.986 \times 10^3$$

$$Ht := \frac{Vd}{At}$$

$$Rt := \sqrt{\frac{At}{\pi}}$$

$$Rt = 35.619$$

$$Ht = 0.075$$

$$Hmin := 0.0001$$

Segunda fase: GRAVITACIONAL-VISCOSA

$$X0 := \left(\frac{At}{Ht}\right)$$

Vetor contendo os valores iniciais

$$D(t, X) := \begin{bmatrix} \left[\left(0.5 \cdot \left[\pi \cdot (k2)^2 \right]^2 \cdot \left[\frac{(g \cdot \Delta)^2}{vw} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left[(X_1)^4 \cdot X_0 \cdot 10^3 \right]^{\frac{1}{3}} \right) - \left[\left(\frac{2}{3} \right) \cdot \left[\text{EVAPMX}_0 \cdot \left[\frac{1}{(\rho l \cdot X_1)} \right] \right] \right] \\ - \left[\left(\text{EVAPMX}_0 \right) + \left[\rho l \cdot X_1 \cdot \left[\left(0.5 \cdot \left[\pi \cdot (k2)^2 \right]^2 \cdot \left[\frac{(g \cdot \Delta)^2}{vw} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left[(X_1)^4 \cdot X_0 \cdot 10^3 \right]^{\frac{1}{3}} \right) - \left[\left(\frac{2}{3} \right) \cdot \left[\text{EVAPMX}_0 \cdot \left[\frac{1}{(\rho l \cdot X_1)} \right] \right] \right] \right] \right] \cdot \left[\frac{1}{(\rho l \cdot X_0)} \right] \end{bmatrix}$$

Vetor contendo derivadas das funções desconhecidas

$$t0 := 0$$

Início do intervalo temporal

$t1 := 21000$

Término do intervalo temporal

$N := 21000$

Número de avaliações dentro do intervalo

$S := \text{rkfixed}(X0, t0, t1, N, D)$

$t0 := S^{(0)}$

Valor da variável independente (TEMPO)

$x0 := S^{(1)}$

Solução da primeira função (AREA)

$x1 := S^{(2)}$

Solução da segunda função (ALTURA)

DESLOCAMENTC

$Uc := 0.5$

$Ut := Uc + 0.035W + Hon$

$Ut = 0.58$

APÊNDICE II

Cálculos realizados para o cenário 2, utilizando o software MathCad

C-02

LIBERAÇÃO CONTÍNUA

Taxa massica descarregada (q/rhol)

$$Q_d := 100$$

Duração do vazamento

$$t_d := \frac{300}{0.142}$$

Input

Densidade da água

$$\rho_w := 1000$$

Densidade do líquido

$$\rho_l := 703$$

$$\Delta := 1 - \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right)$$

Viscosidade da água

$$\nu_w := 0.001$$

Taxa massica liberada

$$V_d := \frac{Q_d}{\rho_l}$$

Tensao superficial

$$\sigma := 0.00034$$

Temperatura da poça

$$T_p := 20 + 273.15$$

Temperatura ambiente

$$T_{amb} := 20 + 273.15$$

Velocidade do vento

$$W := 2$$

Velocidade da corrente

$$U_c := 0.5$$

Constante dos gases

$$R_g := 8.314$$

Pressão de vapor

$$P_v := 13.92$$

Coefficientes experimentais

$$k_1 := 1.53$$

$$k_2 := 1.21$$

$$k_{21} := 1.09$$

$$k_{11} := 1.24$$

$$k_{22} := 3.65$$

$$k_{12} := 2.37$$

Velocidade de transporte

$$b := 25$$

$$U_t := U_c + (0.035 W \cdot \cos(b))$$

$$U_t = 0.569$$

Modelo EVAP

$$\text{rel} := 0.5$$

$$H_{on} := 0.5$$

$$M := 114.23$$

$$U_{xa} := \text{rel} \cdot \frac{(\sqrt{0.00125})}{\text{rel}^{0.2}}$$

$$H_x := H_{on} \cdot \frac{1}{(T_{amb} + 110.4)} \cdot \frac{U_{xa}}{1.45 \cdot 10^{-5} \cdot T_{amb} \cdot \sqrt{T_{amb}}}$$

$$B_a := \left[0.55 \left(1^{\frac{2}{3}} - 0.2 \right) \cdot \sqrt{H_x} \right] - (2.5 \cdot 7.85 \log(H_x)) + (11.277 \cdot 8.5)$$

$$z_a := \frac{U_{xa}}{(1.45 \cdot 10^{-5} \cdot T_{amb} \cdot \sqrt{T_{amb}})}$$

$$\text{Dena} := \frac{(1013.251000)}{\text{Rg} \cdot \text{Tamb}}$$

$$\text{Dan} := \frac{1}{(2.5 \cdot 7.85 \log(\text{za})) + \text{Ba} + 2.35}$$

$$\text{EVAPM} := \frac{\left[\text{Dan} \cdot \text{Dena} \cdot \text{Uxa} \cdot \left(\text{Pv} \cdot \text{M} \cdot \frac{1}{8.31432 \text{Tamb}} \right) \right]}{\text{Dena}}$$

$$\text{EVAPM} = 8.959 \times 10^{-5}$$

$$\text{mloss} = \text{EVAPM} * \text{A}$$

Primeira fase: GRAVITACIONAL-INERCIAL

Duração é o tempo de transição tt

$$g := 9.8$$

$$\text{ht} := 10^{-4}$$

$$\text{tt} := \left(\frac{\text{k22}}{\text{k12}} \right)^{\frac{24}{7}} \cdot \left(\frac{\text{Qd} \cdot 10^3}{2 \cdot \rho \text{w}} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot \left[\frac{1}{\text{Ut}^4 \cdot (g \cdot \Delta)^2 \cdot \text{vw}^3} \right]^{\frac{1}{7}}$$

$$\text{tt} = 150.881$$

$$\text{At} := \text{k22} \cdot \left(\frac{\text{k22}}{\text{k12}} \right)^{\frac{33}{7}} \cdot \left(\frac{\text{Qd}}{2 \cdot \rho \text{w}} \right)^{\frac{1}{7}} \cdot \left[\frac{1}{\text{Ut}^2 \cdot (g \cdot \Delta) \cdot \text{vw}^5} \right]^{\frac{1}{7}}$$

$$\text{At} = 2.553 \times 10^3$$

$$\text{Ht} := \frac{(\text{Vd} \cdot \text{tt})}{\text{At}}$$

$$\text{Ht} = 8.407 \times 10^{-3}$$

$t1 := 22000$

Término do intervalo temporal

$N := 22000$

Número de avaliações dentro do intervalo

$S := \text{rkfixed}(Y0, t0, t1, N, D)$

$t0 := S^{(0)}$

Valor da variável independente (TEMPO)

$y0 := S^{(1)}$

Solução da primeira função (AREA)

$y1 := S^{(2)}$

Solução da segunda função (ALTURA)

APÊNDICE III

Cálculos realizados para o cenário 3, utilizando o software MathCad

C-03

LIBERAÇÃO INSTANTÂNEA

Volume descarregado (no instante do lançamento)

$$V_d := 300$$

Input

Densidade da água

$$\rho_w := 1000$$

Densidade do líquido

$$\rho_l := 718$$

$$\Delta := 1 - \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right)$$

Viscosidade da água

$$\nu_w := 0.001$$

Massa liberada

$$Q_d := V_d \cdot \rho_l$$

Temperatura da poça

$$T_p := 20 + 273.15$$

Temperatura ambiente

$$T_{amb} := 20 + 273.15$$

Velocidade do vento

$$W := 3$$

Constante dos gases

$$R_g := 8.314$$

Pressão de vapor

$$P_v := 4.12$$

Constantes experimentais

$$k_1 := 1.53$$

$$k_2 := 1.21$$

$$k_{21} := 1.09$$

Modelo EVAP

$$\text{rel} := 0.7$$

$$\text{Hon} := 0.01$$

$$M := 128.25$$

$$U_{xa} := \text{rel} \cdot \frac{(\sqrt{0.00125})}{\text{rel}^{0.2}}$$

$$H_x := \text{Hon} \cdot \frac{1}{(\text{Tamb} + 110.4)} \cdot \frac{U_{xa}}{1.45 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tamb} \cdot \sqrt{\text{Tamb}}}$$

$$B_a := \left[0.55 \left(0.8^{\frac{2}{3}} - 0.2 \right) \cdot \sqrt{H_x} \right] - (2.5 \cdot 7.85 \log(H_x)) + (11.277.85)$$

$$z_a := \frac{U_{xa}}{(1.45 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tamb} \cdot \sqrt{\text{Tamb}})}$$

$$D_{ena} := \frac{(1013.251000)}{R_g \cdot \text{Tamb}}$$

$$D_{an} := \frac{1}{(2.5 \cdot 7.85 \log(z_a)) + B_a + 2.35}$$

$$\text{EVAPM} := \frac{\left[D_{an} \cdot D_{ena} \cdot U_{xa} \left(P_v \cdot M \cdot \frac{1}{8.31432 \text{Tamb}} \right) \right]}{D_{ena}}$$

$$\text{EVAPM} = 3.18 \times 10^{-5}$$

$$\text{mloss} = \text{EVAPM} * A$$

Primeira fase: GRAVITACIONAL-INERCIAL

Duração é o tempo de transição t_t

$$g := 9.8$$

$$tt := \left(\frac{k2}{k1}\right)^4 \cdot \left[\frac{(Vd \cdot 10^3)^2}{g \cdot vw \cdot \Delta}\right]^{\frac{1}{3}}$$

$$tt = 186.606$$

$$At := \pi \cdot k2^2 \cdot \left(\frac{k2}{k1}\right)^2 \cdot \left[\frac{(Vd)^5 \cdot g \cdot \Delta}{vw^2}\right]^{\frac{1}{6}}$$

$$At = 3.951 \times 10^3$$

$$Ht := \frac{Vd}{At}$$

$$Rt := \sqrt{\frac{At}{\pi}}$$

$$Rt = 35.465$$

$$Ht = 0.076$$

$$Hmin := 0.0001$$

Segunda fase: GRAVITACIONAL-VISCOSA

$$X0 := \begin{pmatrix} At \\ Ht \end{pmatrix}$$

Vetor contendo os valores iniciais

$$D(t, X) := \begin{bmatrix} \left[\left[(0.5 \cdot [\pi \cdot (k2)^2])^2 \cdot \left[\frac{(g \cdot \Delta)^2}{vw}\right]^{\frac{1}{3}} \cdot [(X_1)^4 \cdot X_0 \cdot 10^3]^{\frac{1}{3}} \right] - \left[\left(\frac{2}{3}\right) \cdot [EVAPM_0 \cdot \left[\frac{1}{(\rho \cdot X_1)}\right]] \right] \right] \\ - \left[(EVAPM_0) + \left[\rho \cdot X_1 \cdot \left[\left[(0.5 \cdot [\pi \cdot (k2)^2])^2 \cdot \left[\frac{(g \cdot \Delta)^2}{vw}\right]^{\frac{1}{3}} \cdot [(X_1)^4 \cdot X_0 \cdot 10^3]^{\frac{1}{3}} \right] - \left[\left(\frac{2}{3}\right) \cdot [EVAPM_0 \cdot \left[\frac{1}{((\rho \cdot X_1))} \right]] \right] \right] \cdot \left[\frac{1}{(\rho \cdot X_0)}\right] \right] \right] \end{bmatrix}$$

Vetor contendo derivadas das funções desconhecidas

$$t0 := 0$$

Início do intervalo temporal

$$t1 := 42000$$

Término do intervalo temporal

$$N := 42000$$

Número de avaliações dentro do intervalo

$$S := \text{rkfixed}(X0, t0, t1, N, D)$$

$$t0 := S^{(0)}$$

Valor da variável independente (TEMPO)

$$x0 := S^{(1)}$$

Solução da primeira função (AREA)

$$x1 := S^{(2)}$$

Solução da segunda função (ALTURA)

DESLOCAMENTC

$$Uc := 0.8$$

$$Ut := Uc + 0.035W + Hon$$

$$Ut = 0.915$$

APÊNDICE IV

Cálculos realizados para o cenário 4, utilizando o software MathCad

C-02

LIBERAÇÃO INSTANTÂNEA

Volume descarregado (no instante do lançamento)

$$V_d := 300$$

Input

Densidade da água

$$\rho_w := 1000$$

Densidade do líquido

$$\rho_l := 718$$

$$\Delta := 1 - \left(\frac{\rho_l}{\rho_w} \right)$$

Viscosidade da água

$$\nu_w := 0.001$$

Massa liberada

$$Q_d := V_d \cdot \rho_l$$

Temperatura da poça

$$T_p := 20 + 273.15$$

Temperatura ambiente

$$T_{amb} := 20 + 273.15$$

Velocidade do vento

$$W := 3$$

Constante dos gases

$$R_g := 8.314$$

Pressão de vapor

$$P_v := 4.12$$

Constantes experimentais

$$k_1 := 1.53$$

$$k_2 := 1.21$$

$$k_{21} := 1.09$$

Modelo EVAP

$$\text{rel} := 0.7$$

$$\text{Hon} := 0.01$$

$$M := 128.25$$

$$U_{xa} := \text{rel} \cdot \frac{(\sqrt{0.00125})}{\text{rel}^{0.2}}$$

$$H_x := \text{Hon} \cdot \frac{1}{(\text{Tamb} + 110.4)} \cdot \frac{U_{xa}}{1.45 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tamb} \cdot \sqrt{\text{Tamb}}}$$

$$B_a := \left[0.55 \left(0.8^3 - 0.2 \right) \cdot \sqrt{H_x} \right] - (2.5 \cdot 7.85 \log(H_x)) + (11.277 \cdot 8.5)$$

$$z_a := \frac{U_{xa}}{(1.45 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tamb} \cdot \sqrt{\text{Tamb}})}$$

$$\text{Dena} := \frac{(1013.251000)}{\text{Rg} \cdot \text{Tamb}}$$

$$\text{Dan} := \frac{1}{(2.5 \cdot 7.85 \log(z_a)) + B_a + 2.35}$$

$$\text{EVAPM} := \frac{\left[\text{Dan} \cdot \text{Dena} \cdot U_{xa} \left(\text{Pv} \cdot M \cdot \frac{1}{8.31432 \text{Tamb}} \right) \right]}{\text{Dena}}$$

$$\text{EVAPM} = 3.18 \times 10^{-5}$$

$$\text{mloss} = \text{EVAPM} \cdot A$$

Primeira fase: GRAVITACIONAL-INERCIAL

Duração é o tempo de transição t_t

$$g := 9.8$$

$$t_t := \left(\frac{k_2}{k_1} \right)^4 \cdot \left[\frac{(V_d \cdot 10^3)}{g \cdot v_w \cdot \Delta} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$t_t = 186.606$$

$$At := \pi \cdot k2^2 \cdot \left(\frac{k2}{k1}\right)^2 \cdot \left[\frac{(Vd)^5 \cdot g \cdot \Delta}{vw^2}\right]^{\frac{1}{6}}$$

$$At = 3.951 \times 10^3$$

$$Ht := \frac{Vd}{At}$$

$$Rt := \sqrt{\frac{At}{\pi}}$$

$$Ht = 0.076$$

$$Hmin := 0.0001$$

Segunda fase: GRAVITACIONAL-VISCOSA

$$X0 := \begin{pmatrix} At \\ Ht \end{pmatrix}$$

Vetor contendo os valores iniciais

$$D(t, X) := \begin{bmatrix} \left[\left[(0.5) \cdot \left[\pi \cdot (k2)^2 \right]^2 \cdot \left[\frac{(g \cdot \Delta)^2}{vw} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left[(X_1)^4 \cdot X_0 \cdot 10^3 \right]^{\frac{1}{3}} \right] - \left[\left(\frac{2}{3} \right) \cdot \left[EVAPMX_0 \cdot \left[\frac{1}{(\rho l \cdot X_1)} \right] \right] \right] \right] \\ - \left[\left(EVAPMX_0 \right) + \left[\rho l \cdot X_1 \cdot \left[\left[(0.5) \cdot \left[\pi \cdot (k2)^2 \right]^2 \cdot \left[\frac{(g \cdot \Delta)^2}{vw} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left[(X_1)^4 \cdot X_0 \cdot 10^3 \right]^{\frac{1}{3}} \right] - \left[\left(\frac{2}{3} \right) \cdot \left[EVAPMX_0 \cdot \left[\frac{1}{(\rho l \cdot X_1)} \right] \right] \right] \right] \right] \cdot \left[\frac{1}{(\rho l \cdot X_0)} \right] \right] \end{bmatrix}$$

Vetor contendo derivadas das funções desconhecidas

$$t0 := 0$$

Início do intervalo temporal

$$t1 := 42000$$

Término do intervalo temporal

$N := 4200$

Número de avaliações dentro do intervalo

$S := \text{rkfixed}(X0, t0, t1, N, D)$

$t0 := S^{(0)}$

Valor da variável independente (TEMPO)

$x0 := S^{(1)}$

Solução da primeira função (AREA)

$x1 := S^{(2)}$

Solução da segunda função (ALTURA)

DESLOCAMENTC

$Uc := 0.8$

$Ut := Uc + 0.035W + Hon$

$Ut = 0.915$