

LUIZ ALBERTO DE VASCONCELLOS

**APLICAÇÃO DO MÉTODO PROBABILÍSTICO
NA AVALIAÇÃO DO DERRAMAMENTO DE ÓLEO DE
CHATAS-TANQUE**

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

São Paulo
2005

LUIZ ALBERTO DE VASCONCELLOS

**APLICAÇÃO DO MÉTODO PROBABILÍSTICO
NA AVALIAÇÃO DO DERRAMAMENTO DE ÓLEO DE
CHATAS-TANQUE**

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

Área de Concentração:
Engenharia Naval

Orientador:
Prof. Dr. Cláudio Mueller Prado Sampaio

São Paulo
2005

“VIVAM COM DIGNIDADE”
Antonio Roberto de Vasconcellos

À memória de Alda de Vasconcellos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Cláudio Mueller Prado Sampaio, meu orientador, pela confiança em mim depositada em desenvolver este trabalho, pela paciência, compreensão e ensino, tanto no campo acadêmico quanto no campo das boas relações humanas.

À CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo custeio deste trabalho, por meio da concessão da bolsa de pesquisa.

À PETROBRAS em especial aos Engenheiros Geovani Paiva, José Arnildo Teixeira e A. Pereira pelas informações “garimpadas” e enviadas.

Ao amigo Agnaldo Holanda pela ajuda na revisão deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica – Adenilson, César, Damaris, Lânia, Maxwell e Sandra, pela atenção e auxílio que tiveram com a minha pessoa e pelos serviços prestados durante todo o período de mestrado.

Aos colegas de Pós-Graduação Alex Nunes Ferreira, Ary de Oliveira, Celso Hino, Dewar, Eduardo Cordeiro, Francois, Giuliana Bonatelli, Jairo Tovar, Kátia Yaguiu, Líria, Ricardo Ono, Walter Santana e demais que conquistei durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais Luiz Carlos de Vasconcellos e Maria da Graça Bergamo de Vasconcellos que sempre me incentivaram a ir atrás dos meus sonhos e deram a melhor “arma” para conquistá-los, o amor deles.

Ao meu melhor amigo Antonio Roberto de Vasconcellos, meu avô, que é essencial na formação da minha história. Em todas as decisões que tive de aspectos profissionais e pessoais, sempre resgatei os seus ensinamentos e vou continuar resgatando-os por toda minha vida.

RESUMO

Em 1995, através do regulamento 13F do anexo I da Marpol 73/78, a IMO adotou o método probabilístico para avaliação da capacidade de navios-tanque em minimizar a poluição devida à colisões e à encalhes. Esse critério foi desenvolvido a partir da análise de estatísticas de acidentes e de estudos sistemáticos com modelos. O método tem a capacidade de avaliar as expectativas de derramamento de óleo de projetos alternativos através do Índice de Prevenção à Poluição, índice esse que corresponde a um adimensional resultante de três parâmetros de vazamento de óleo; a probabilidade de vazamento nula, o vazamento médio e o vazamento extremo.

O objetivo do trabalho proposto foi avaliar o emprego de diferentes arranjos internos de chatas-tanque de casco duplo. Para tanto, utilizaram-se chatas de quatro portes bruto distintos (700 TPB, 1400 TPB, 3.000 TPB e 5.000 TPB) sendo que, para cada porte bruto, variou-se sistematicamente a largura do costado duplo, a altura do fundo duplo, bem como o número de anteparas transversais e longitudinais. Por sua vez, para efetuar essa análise foi necessário desenvolver um programa capaz de automatizar o cálculo das diversas situações de colisão e encalhe definidas pelo conjunto de funções densidade de probabilidade relacionadas à localização longitudinal e vertical e à extensão tridimensional da avaria. Essas probabilidades, em conjunto com o cálculo dos volumes, permitem determinar as condições definidas pelas regras internacionais.

O estudo realizado também permitiu verificar se os espaçamentos do duplo casco recomendados pelas normas da autoridade marítima ou pela Organização Marítima Internacional correspondem às únicas possibilidades existentes ou se, em função das características das chatas, outros arranjos satisfazem os requisitos de desempenho ambiental.

ABSTRACT

In 1995, the IMO amended the MARPOL 73/78 rules with regulation 13F Annex I. This regulation considers the probabilistic method for evaluation of the oil spill avoidance capability of tankers. This new criterion was developed based on accident statistics and model tests and is intended to compare alternative designs with double hull reference tankers. For this purpose, IMO developed the Pollution Prevention Index, an averaged weighted parameter composed of the three parameter; the probability of zero oil outflow, the mean oil outflow and the extreme oil outflow.

The objective of this research was to evaluate different cargo layouts for double hull barges. To carry out this work, four different deadweight barges (700 DWT, 1.400 DWT, 3.000 DWT and 5.000 DWT) were considered and, for each of them, a systematic variation of the double bottom height and wing tank width and of the number of longitudinal and transverse bulkheads were undertaken. A computer program was developed for estimating, automatically, the different collision and grounding events. The probability of each event is evaluated by integrating the probability density distribution functions of the longitudinal and vertical damage location and tri-dimensional damage extent. These probabilities together with the oil spill volumes allowed the estimation of the pollution parameters.

Besides, the analysis permitted the verification of the maritime authority or International Maritime Organization recommended values and, as function of the barge characteristics, if other values satisfy the spill reduction requirements.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Os grandes derramamentos de óleo.....	04
1.2 Justificativa.....	09
1.3 Objetivo do trabalho.....	10
1.4 Seqüência do desenvolvimento do trabalho.....	11
CAPÍTULO 2 - EVOLUÇÃO DOS NAVIOS-TANQUE E MEDIDAS PREVENTIVAS DE ACIDENTES PARA ESTAS EMBARCAÇÕES.....	12
2.1 A evolução dos navios-tanque de transporte de petróleo e óleo.....	12
2.1.1 Chatas.....	15
2.2 Aspectos estruturais e dinâmicos.....	15
2.3 Aparecimento de fogo e explosão.....	19
2.3.1 Incêndios e explosões fora dos tanques de carga.....	20
2.4 O efeito da pressão hidrostática.....	21
2.5 Medidas de prevenção de acidentes com navios tanque.....	23
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA PROBABILÍSTICA PARA O CÁLCULO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO.....	27
3.1 Breve histórico.....	27
3.2 Revisão Conceitual da Aplicação do Método Probabilístico para Avaliação das Condições de Sobrevivência do Navio após o Acidente.....	34
3.2.1 Probabilidade da localização, extensão da avaria.....	35
3.2.2 Probabilidade de sobrevivência.....	39
3.2.3 Critério de Estabilidade Avariada.....	43
3.2.4 Observações Finais.....	45
3.3 Conceituação do Modelo Probabilístico.....	46
3.5 Prevenção da poluição pelo vazamento de óleo no caso de colisão ou encalhe de um navio-tanque.....	50

CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DO CÁLCULO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO E SEUS RESULTADOS.....	65
4.1 Metodologia para avaliar a segurança da embarcação-tanque.....	65
4.2 Descrição do software.....	70
4.3 Características dos casos estudados.....	78
4.4 Resultados.....	85
4.5 Discussão e análise dos resultados obtidos.....	90
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
ANEXO I CRITÉRIO DE SUBDIVISÃO – SOLAS.....	103
ANEXO II FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE – MARPOL 73/78 (CONSOLIDATED 1997).....	105
ANEXO III EXEMPLO DE UM CASO ANALISADO.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Maiores derramamentos de óleo, provenientes de navios-tanque.....	07
Tabela 2.1	Redução do peso leve em relação à TPB dos navios tanque.....	14
Tabela 3.1	Regras de Estabilidade.....	34
Tabela 3.2	Referência dos navios de casco duplo.....	53
Tabela 3.3	Probabilidade de Vazamento de Óleo.....	59
Tabela 4.1	Probabilidade total/global da avaria.....	70
Tabela 4.2	Probabilidade cumulativa e valores dos vazamentos de óleo.....	77
Tabela 4.3	Características de chatas empregadas na hidrovia e em mar aberto....	79
Tabela 4.4	Características principais das chatas empregadas na análise.....	83
Tabela 4.5	Parâmetros de vazamento de óleo em função da quantidade de avarias.....	85
Tabela 4.6	Parâmetros dos vazamentos de óleo não considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	87
Tabela 4.7	Parâmetros dos vazamentos de óleo sem pressão de gás inerte.....	88
Tabela 4.8	Parâmetros dos vazamentos de óleo considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	89
Tabela AI.1	Fator de Subdivisão – SOLAS / USCG - Navios de Passageiros.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Causas dos derramamentos de óleo com menos de 700ton, entre 1974 e 2003.....	06
Figura 1.2	Causas dos derramamentos de óleo entre 7 e 700ton, entre 1974 e 2003.	06
Figura 1.3	Causas dos derramamentos de óleo com mais de 700 ton, entre 1974 e 2003.....	06
Figura 1.4	Vazamentos de óleo de 1970 a 2004.	08
Figura 2.1	Evolução dos navios-tanque. (A) 1886, Gluckauf – 3.000TPB. (B) 1945, T-2 - 16.500. (C) 1962, Manhattan – 115.000TPB.....	13
Figura 2.2	Esquema do navio leve ao passar por um obstáculo.....	18
Figura 2.3	Ilustração de um encalhe típico de alto impacto.....	19
Figura 3.1	Sampam chinês – Instalação anteparas estanques.....	27
Figura 3.2	Critério de Subdivisão.....	29
Figura 3.3	Navios com tanques de lastro segregados e/ou localizados de maneira protetora.....	32
Figura 3.4	Seção característica navio-tanque de convés intermediário.....	33
Figura 3.5	Funções densidade de probabilidade.....	37
Figura 3.6	Função densidade de probabilidade da extensão vertical da avaria (v) em função da existência de uma antepara horizontal estanque.....	38
Figura 3.7	Disposição do arranjo interno do navio.....	38
Figura 3.8	Esquema ilustrativo do cálculo da borda livre efetiva média avariada.....	42
Figura 3.9	Esquema ilustrativo da curva do braço de endireitamento avariada...43	
Figura 3.10	Comparação do índice R com os valores calculados de A de navios existentes.....	44
Figura 3.11	Função densidade de probabilidade unidimensional.....	47
Figura 3.12	Probabilidade de um evento bidimensional.....	48
Figura 3.13	Função densidade de probabilidade simplificada da extensão e localização da avaria.....	49
Figura 3.14	Diagrama ilustrativo definições probabilidades $P_i, P_{i,j}$, etc.....	50

Figura 3.15	Esquema do vazamento de óleo para avaria no fundo.....	54
Figura 3.16	Função de distribuição acumulada do derramamento de óleo de um navio-tanque de casco duplo.....	55
Figura 3.17	Esquema arranjos avaliados.....	59
Figura 3.18	Expectativa de derramamento de óleo.....	60
Figura 3.19	Vazamento médio de óleo.....	64
Figura 4.1	Definição da avaria do costado.....	67
Figura 4.2	Definição da avaria do fundo.....	68
Figura 4.3	Função densidade de probabilidade da extensão longitudinal resultante de colisão.....	69
Figura 4.4	Procedimento para entrada de dados da geometria da embarcação....	72
Figura 4.5	Simulação das dimensões e posições da avaria do costado durante a execução do programa.....	74
Figura 4.6	Parte do código responsável pela interseção da avaria com o compartimento, em caso de avaria do costado.....	75
Figura 4.7	Boca em função do comprimento.....	78
Figura 4.8	Arranjos dos tanques.....	81
Figura 4.9	Costado duplo/boca em função do TPB.....	91
Figura 4.10	Fundo duplo/pontal em função do TPB.....	92
Figura 4.11	Vazamento médio de óleo de chatas com 700 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	92
Figura 4.12	Vazamento extremo de óleo de chatas com 700 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	92
Figura 4.13	Vazamento médio de óleo de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	92
Figura 4.14	Vazamento extremo de óleo de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	92
Figura 4.15	Vazamento médio de óleo de chatas com 700 TPB, não considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	92
Figura 4.16	Vazamento extremo de óleo de chatas com 700 TPB, não considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	92

Figura 4.17	Vazamento médio de óleo de chatas com 5000 TPB, não considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	92
Figura 4.18	Vazamento extremo de óleo de chatas com 5000 TPB, não considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	92
Figura 4.19	Volume do vazamento médio de óleo de chatas com 700 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	93
Figura 4.20	Volume do vazamento extremo de óleo de chatas com 700 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	93
Figura 4.21	Volume do vazamento médio de óleo de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	94
Figura 4.22	Volume do vazamento extremo de óleo de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.....	94
Figura AII.1	Funções densidade de probabilidade.....	105
Figura AIII.1	Dimensões de uma embarcação analisada.....	106

LISTA DE ABREVIATURAS

E	Índice de Prevenção de Poluição
cd	Costado duplo
fd	Fundo duplo
g	Gravidade
IGS	Sistema de Gás Inerte
IMO	Organização Marítima Internacional
ITOPF	<i>International Tanker Owners Pollution Federation Limited.</i>
MARPOL	Convenção Internacional para Prevenção da Poluição por Navios
MEPC	Comitê de Proteção do Ambiente Marinho das Nações Unidas
OPA	Oil Pollution Act
SOLAS	Salvaguarda da Vida Humana no Mar
TPB	Toneladas de Porte Bruto
VLCC	Very Large Crude Carrier
ULCC	Ultra Large Crude Carrier

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Desde milênios antes de Cristo, o petróleo vem sendo transportado, vendido e procurado como matéria prima útil e preciosa à qualidade de vida do ser humano. Ele foi utilizado desde as antigas civilizações do Egito, Fenícia, Mesopotâmia, Pérsia, China e também nas Américas pelos Incas e Astecas. Foi empregado para pavimentar estradas, calafetar construções como, por exemplo, as grandes pirâmides egípcias e embarcações como a “Arca de Noé”. A História também descreve seu uso para aquecer e iluminar casas, embalsamar múmias, construir cisternas, produzir medicamentos, fabricar flechas incendiárias e lubrificar equipamentos.

Mas foi só na segunda metade do século XIX que o petróleo começou a ser aproveitado industrialmente. Em 1859 foi aberto o primeiro poço de extração nos Estados Unidos, pelo Coronel Edwin L. Drake. A notícia da descoberta de Drake empolgou a nação e difundiu-se rapidamente; passados cinco anos, achavam-se constituídas nos Estados Unidos da América, nada menos que 543 companhias entregues ao novo e rendoso ramo de atividade.

Nos primeiros anos, após o início do processamento de petróleo e produção de seus derivados, transportá-lo até o local de refino era tão difícil quanto retirá-lo do solo. No princípio o petróleo era acondicionado a bordo de navios em barris, ou em caixas metálicas. Apesar de bem protegidos, esses recipientes muitas vezes provocavam incêndios e explosões. Isso fez com que em menos de 30 anos, após o primeiro poço perfurado por Drake, a indústria naval iniciasse a construção dos precursores navios-tanque.

Ao longo das primeiras décadas do transporte marítimo de petróleo durante o período da Revolução Industrial, os acidentes eram freqüentes, porém suas conseqüências ambientais limitadas em razão do pequeno volume de carga

transportada. Nos anos posteriores, a evolução da economia mundial e os novos padrões de consumo da sociedade acarretaram, mais acentuadamente depois da Segunda Grande Guerra, um aumento significativo do consumo de petróleo e, conseqüentemente, do volume do produto transportado pelos mares.

Durante a década de 1970, com a expansão industrial alcançando as mais diversas regiões do globo e estando as fontes de petróleo localizadas longe dos grandes centros de demanda, houve um aumento expressivo da frota mundial de navios-tanque. Nesse mesmo período, fatores políticos, como o fechamento do Canal de Suez em 1967, e econômicos incentivaram a construção de navios-tanque de maiores dimensões (VLCC/ULCC – Very/ Ultra Large Crude Carrier).

Apesar de esse aumento de dimensões estar acompanhado de requisitos de segurança e de procedimentos de projeto mais sofisticados, e de o meio ambiente ter uma capacidade natural para absorver determinados volumes de óleo, os diversos acidentes que ocorreram nas últimas décadas, com conseqüências inadmissíveis aos padrões da sociedade moderna, causaram uma evolução forçada nos procedimentos de projeto, manutenção e operação desse tipo de embarcação de transporte.

A implementação de requisitos de projetos para minimizar os efeitos de acidentes com navios e garantir maior segurança aos passageiros e à carga teve início na Inglaterra ao final do século XIX, com a realização de diversas conferências internacionais. Foram criados diversos procedimentos e normas para aprimorar a segurança marítima, porém ainda com pouca ênfase ao problema ambiental. Em 1954 surge a primeira convenção específica para discutir a prevenção da poluição causada por derramamento de óleo (OILPOL); coordenada pelo governo britânico e de iniciativa do Conselho Econômico e Social das Nações Unidas. É importante ressaltar que, ainda naquela década (1958), a Organização das Nações Unidas (ONU) cria a Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization – IMO*) que, então, passa a ser o organismo responsável pela coordenação e implementação de todos procedimentos relativos à segurança marítima.

Em 1967, o acidente do navio *Torrey Canyon* na costa da Bretanha (Reino Unido) provocou o derramamento de 123 mil toneladas de óleo cru, causando grande mortandade de aves e graves prejuízos à pesca e ao turismo da região. Esse acidente e outros que o sucederam acabaram estimulando diversas reuniões internacionais a respeito da segurança do transporte de petróleo e sobre mecanismos para provisão de recursos financeiros com fins de indenização. Os resultados dos trabalhos desenvolvidos possibilitaram que a IMO desenvolvesse critérios para prevenir tanto a poluição acidental quanto a operacional. Estes, em princípio, foram aceitos pelos países participantes na Convenção Internacional sobre Prevenção da Poluição Marítima de 1973 e, posteriormente, foram incluídos no protocolo adicional de 1978. Atualmente, essas duas convenções são amplamente conhecidas como MARPOL 73/78.

Apesar dos diversos mecanismos estipulados pela MARPOL 73/78, como os tanques de lastro segregados e o emprego de sistema de gás inerte, o navio-tanque continuava a ser construído em casco simples. Em 24 de março de 1989, o navio Exxon Valdez encalha em Prince Willian Sound, Alasca, provocando o mais nefasto acidente, não tanto pela quantidade de óleo derramado, mas principalmente pela área ambientalmente sensível atingida.

O acidente causou o vazamento de cerca de 37 mil toneladas de petróleo cru. O resultado do derramamento foi devastador para a fauna da região; de acordo com estimativas, 250 mil aves marinhas morreram, além de outras espécies, como lontras e salmões. Em decorrência, o governo norte-americano estabeleceu, unilateralmente, a obrigatoriedade de casco duplo para navios-tanque navegando em suas águas territoriais (OPA 90 – *Oil Pollution Act*).

A IMO, em 1995, para avaliar projetos alternativos ao casco duplo, apresentou um método probabilístico, baseado nas estatísticas de acidentes com navios-tanque. O método probabilístico está fundamentado na definição de um parâmetro capaz de representar a ocorrência de derramamento de óleo, obtido através

do emprego de funções densidade de probabilidade. Estas funções estão relacionadas à:

Avaria do costado:

- Localização Longitudinal
- Comprimento Longitudinal
- Penetração Transversal
- Extensão Vertical
- Localização Vertical

Avaria do fundo:

- Localização Longitudinal
- Comprimento Longitudinal
- Penetração Vertical
- Extensão Transversal
- Localização Transversal

Para avaliar projetos alternativos ao casco duplo foi elaborado um Índice de Prevenção de Poluição. Este parâmetro quantifica o grau de segurança de uma embarcação tanque, sendo expresso por um adimensional composto de três variáveis representantes do vazamento de óleo: probabilidade de vazamento nulo, vazamento médio de óleo e vazamento extremo de óleo. Neste trabalho serão utilizadas essas variáveis para a avaliação das análises. Para evitar repetitividade usaremos, o termo “desempenho ambiental” de uma embarcação para igualmente referir ao seu uso “Índice de Prevenção de Poluição”.

1.1 Os derramamentos de óleo por embarcações-tanque

Na história do transporte marítimo de petróleo, a ocorrência de acidentes sempre esteve presente com conseqüências maiores ou menores à sociedade. Inicialmente, a maior preocupação estava restrita à tripulação e à carga, porém a preocupação da sociedade com relação à sustentabilidade da qualidade de vida em nosso planeta acarretou uma indignação crescente com os derramamentos de óleo.

Muitas vezes a reação dos cidadãos e grupos ambientalistas chegou a ser quase irracional, colocando assim autoridades, armadores e donos da carga sob grande pressão para o aprimoramento de procedimentos de segurança do transporte.

O desenvolvimento e aprimoramento de procedimentos de segurança não podem ficar restritos a uma avaliação especulativa, requerendo a existência de um banco de dados cujo gerenciamento permita que os fatos sejam entendidos e interpretados. Com esse objetivo, a Federação Internacional dos Armadores dos Navios-Tanque (*International Tanker Owners Pollution Federation Limited* – ITOPF) gerencia um banco de dados que permite avaliar a evolução dos acidentes no transporte marítimo de petróleo.

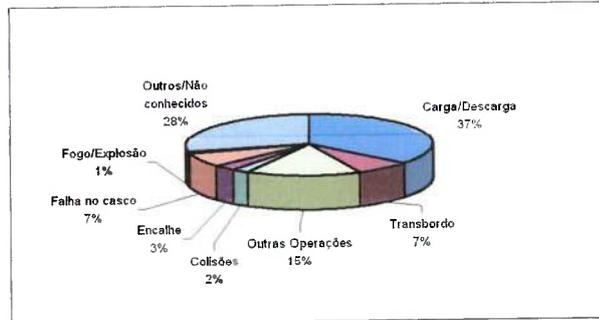
Segundo estatísticas da ITOPF, os derramamentos de óleo podem ser classificados de acordo com a quantidade de óleo derramada, variando em:

- Pequenos derramamentos, até 7 ton;
- Médios derramamentos, entre 7 ton e 700 ton; e
- Grandes derramamentos, acima de 700 ton.

A análise de aproximadamente 10 mil registros da ITOPF a respeito dos vazamentos de óleo provenientes de navios-tanque no globo terrestre revela que:

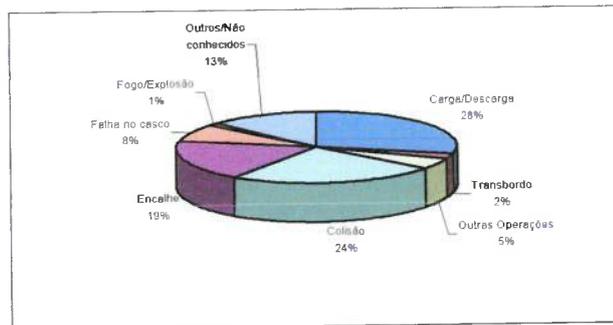
- Mais de 85% de todos os vazamentos provenientes de navios-tanque foram de casos envolvendo menos de 7 ton;
- Muitos vazamentos ocorrem durante rotinas de operações, tais como de carregamento, descarregamento e transbordo, ou seja, quando a embarcação está atracada no porto ou nos terminais de óleo;
- Vazamentos com mais de 700 ton representam menos de 3% do número total dos casos de derramamento;
- Mais de 62% de todos vazamentos com mais de 700 ton são causadas por colisões e encalhes.

As figuras 1.1 e 1.2 permitem concluir que, em pequenos e médios vazamentos, o manuseio durante a operação de carga e descarga é o principal fator responsável pelos derramamentos, enquanto a colisão e o encalhe são os responsáveis pelos grandes derramamentos de óleo, como demonstrado na figura 1.3.



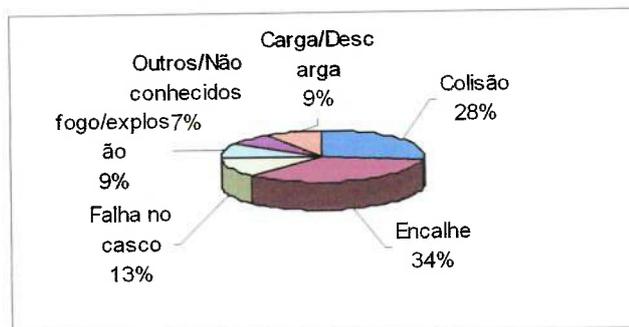
Fonte: ITOPF – *International Tanker Owners Pollution Federation Limited*.

Figura 1.1 – Causas dos derramamentos de óleo com menos de 7 ton, entre 1974 e 2004.



Fonte: ITOPF – *International Tanker Owners Pollution Federation Limited*.

Figura 1.2 – Causas dos derramamentos de óleo entre 7 ton e 700 ton, entre 1974 e 2004.



Fonte: ITOPF – *International Tanker Owners Pollution Federation Limited*.

Figura 1.3 – Causas dos derramamentos de óleo com mais de 700 ton, entre 1974 e 2004.

A tabela 1.1 apresenta os 20 maiores vazamentos de petróleo desde 1967 ocasionados por navios-tanque. Alguns desses acidentes provocaram pequenos ou

nenhum dano ambiental nas costas marítimas, por isso passando quase despercebidos pelo público em geral. Apesar do acidente com o navio Exxon Valdez não estar entre os vinte maiores derramamentos de petróleo, a sua ocorrência está incluída na tabela por causa do grande impacto que teve no meio-ambiente da região e por ser o fator fundamental a despertar uma nova preocupação com o projeto de navios-tanque.

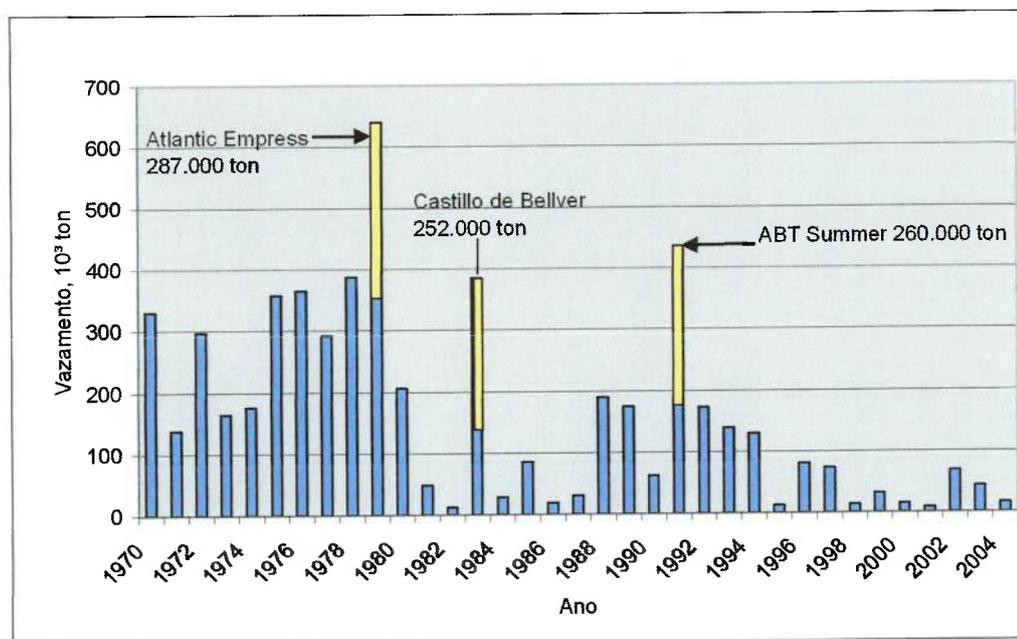
Tabela 1.1 – Maiores derramamentos de óleo ocasionados por navios-tanque

Navio	Vazamento (10 ³ ton)	Localização	Ano
Atlantic Empress	287	Oeste da Índia	1979
ABT Summer	260	Angola	1991
Castillo de Bellver	252	África do Sul	1983
Amoco Cadiz	223	França	1978
Haven	144	Itália	1991
Odyssev	132	Canadá	1988
Torrev Canyon	119	Reino Unido	1967
Sea Star	115	Golfo de Omã	1972
Irenes Serenade	100	Grécia	1980
Urquiola	100	Espanha	1976
Hawaiian Patriot	95	Ilhas Havaianas – EUA	1977
Independenta	95	Turquia	1979
Jakob Maersk	88	Portugal	1975
Braer	85	Reino Unido	1993
Khark 5	80	Marrocos	1989
Prestige	77	Espanha	2002
Aegean Sea	74	Espanha	1992
Sea Empress	72	Reino Unido	1996
Katina P	72	Mocambique	1992
Exxon Valdez	37	Alaska – EUA	1989

Fonte: ITOPF – International Tanker Owners Pollution Federation Limited.

É importante ressaltar que, apesar de serem poucos os grandes vazamentos, eles representam a grande porcentagem do óleo derramado. Por exemplo, no período de 1990-1999 houve 346 vazamentos com mais de 7 toneladas, totalizando 1 096 000 ton; destes, apenas 10 acidentes foram responsáveis por mais de 75% do óleo derramado (830 000 toneladas). Por outro lado, a característica de um ano pode ser drasticamente alterada por um grande acidente, fato claramente verificado na figura 1.4, nos anos de 1979 (Atlantic Empress – 287 000 toneladas), 1983 (Castillo de

Bellver – 252 000 toneladas) e 1991 (ABT Summer – 260 000 toneladas). A figura mostra ainda que a incidência de grandes vazamentos é relativamente baixa e têm diminuído significativamente nos últimos trinta anos.



Fonte: ITOPF – *International Tanker Owners Pollution Federation Limited*.

Figura 1.4 – Vazamentos de óleo de 1970 a 2004. (As quantidades destacadas em amarelo representam derramamentos causados por um único acidente.)

Como é possível observar, a quantidade média de vazamento de óleo causada em acidentes durante a década de 1990 foi um terço da registrada para a década de 1970 (Figura 1.4), permitindo-nos concluir que os mecanismos adotados pela IMO, principalmente na Convenção de 1978, ajudaram significativamente na redução do derramamento de óleo. O volume de óleo derramado, no entanto, continua variando de ano para ano.

1.2 Justificativa

Nas últimas décadas, a humanidade vem se defrontando com toda uma série de problemas globais – ambientais, financeiros, econômicos, sociais e de mercado. Neste quadro, as preocupações com o ambiente, em geral, e com a água, em particular adquirem especial importância, pois as demandas estão se tornando cada

vez maiores, sob o impacto do crescimento acelerado da população e do maior uso da água, imposto pelos padrões de conforto e bem-estar da vida moderna. Entretanto, a qualidade das águas da Terra – rios, lagos naturais e represas, em particular – dos ecossistemas e da vida, em geral, vem sendo degradada de uma maneira alarmante, e esse processo pode logo ser irreversível.

Apesar do esgoto ser o grande responsável da poluição marinha, o derramamento de petróleo contribui nas atuais condições do equilíbrio planetário, o qual depende fundamentalmente do equilíbrio climático atual e da biodiversidade existente.

Investimentos feitos na área da prevenção dos vazamentos de óleo são benéficos porque reduzem a probabilidade de gastos com futuras ocorrências. “Esses investimentos não representam um aumento direto nos bens das companhias mas uma redução no custos” devido às despesas com as operações de contenção remoção, limpeza e indenizações entre outras.

Em resumo, o desenvolvimento é sustentável “quando provê as necessidades da geração atual sem comprometer a habilidade de que as futuras gerações possam prover as suas”. (Salati, 1999).

1.3 Objetivo do trabalho

Até o desastre do navio Exxon Valdez em 1989, os petroleiros eram, na sua maioria, construídos com cascos simples. Nesses navios, os hidrocarbonetos contidos nos tanques de carga estavam separados da água apenas pela envoltória do chapeamento do fundo e do costado. Assim, se o casco fosse avariado em decorrência de uma colisão ou um encalhe, o conteúdo dos tanques de carga estaria em contato direto com o meio externo, podendo causar grave poluição. Um meio eficaz de evitar tal risco é proteger os tanques de carga com um segundo chapeamento interno, a uma distância suficiente do externo. Esta construção,

conhecida como casco duplo, protege os tanques de carga contra avarias e reduz, assim, o risco de poluição.

O propósito deste trabalho é avaliar, por meio de uma ferramenta computacional, qual é o efeito que diferentes arranjos de tanques, bem como de espaçamentos de casco duplo têm sobre as possíveis probabilidades de vazamento de óleo. Os resultados obtidos serão comparados com as exigências das normas da Autoridade Marítima Brasileira e da MARPOL 73/78.

O estudo realizado permite verificar se os valores de espaçamento recomendados para o casco duplo correspondem às únicas possibilidades existentes ou se, em função das características das chatas, outros arranjos otimizariam o arranjo das chatas-tanque. Desse modo, pode-se assegurar as melhores condições de segurança possíveis na navegação, principalmente por via navegável interior, em que o transporte de mercadorias perigosas tem aumentado consideravelmente nos últimos anos.

1.4 Seqüência do desenvolvimento do trabalho

Neste último item apresenta-se, de forma sucinta, a seqüência do trabalho desenvolvido. O capítulo 2 tem como objetivo entender os diferentes mecanismos físicos associados a colisões e encalhes e, apresentar as diversas possibilidades de redução de acidentes e prevenção de derramamento de óleo. Descrevem-se um breve histórico da evolução do navios-tanque, os mecanismos de dissipação de energia durante colisão ou encalhes, as medidas necessárias para a redução da ocorrência de incêndios e explosões, os efeitos da corrosão e da fadiga do material na redução de capacidade de resistência, as possibilidades de emprego da pressão hidrostática como mecanismo de minimização de óleo derramado e, finalmente, mostra-se a evolução das características dos navios necessárias para acompanhar as legislações.

No capítulo 3 é realizado um levantamento bibliográfico dos critérios de subdivisão de navios que, inicialmente baseado em modelo determinístico,

atualmente está fundamentado no modelo probabilístico. De maneira análoga, realiza-se uma análise bibliográfica da evolução dos requisitos de prevenção de derramamento de óleo e das respectivas metodologias de cálculo. Uma vez que o trabalho foi desenvolvido através de um modelo probabilístico, o capítulo apresenta uma breve descrição dos fundamentos da teoria de probabilidade, dos conceitos e idéias associadas à sua implementação. Também é apresentada a metodologia de cálculo das expectativas de vazamento de óleo.

No capítulo 4 são apresentadas a metodologia e descrição do software outflow performance, que foi elaborado para determinar o desempenho ambiental das embarcações. Para a avaliação das chatas tanque são apresentados as características dos casos estudados e os resultados obtidos das expectativas de vazamento óleo.

No capítulo 5 apresenta as conclusões das análises realizadas, do estudo de caso e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2 EVOLUÇÃO DOS NAVIOS-TANQUE E MEDIDAS PREVENTIVAS DE ACIDENTES PARA ESTAS EMBARCAÇÕES

2.1 A evolução dos navios-tanque de transporte de petróleo e óleo

A primeira grande especialização no transporte marítimo ocorreu com a introdução dos navios-tanque. Tal especialização é devida ao grande aumento do transporte de petróleo no final do século XIX e durante o princípio do século XX. O petróleo era transportado nos porões dos navios de carga geral, primeiramente em barris de madeira e mais tarde em tambores. Esse transporte era realizado sob os mesmos regulamentos de navios carga geral acabando por provocar graves acidentes. Os armadores ao recusar tais cargas nos porões dos seus navios, deram início à construção de embarcações especializadas, com tanques e tubulações dedicados ao manuseio e ao transporte do petróleo e seus derivados.

Após a 2ª Guerra Mundial, o espetacular aumento do emprego de energia no desenvolvimento dos países e o aprimoramento da petroquímica aumentaram o consumo e, conseqüentemente, a dependência da humanidade dos hidrocarbonetos. Este processo provocou um aumento do tráfego e do número de rotas marítimas de transporte de petróleo como, por exemplo, entre o Golfo Pérsico e a América do Norte, Europa e Japão, isto é, entre a região produtora e os grandes centros de refino, distribuição e de consumo. Por sua vez, fatores políticos e econômicos como, por exemplo, as guerras no Oriente Médio (fechamento do Canal de Suez), somados ao desenvolvimento tecnológico impulsionaram a tendência ao gigantismo dos petroleiros que, em pouco tempo, aumentaram de 25.000 para 200.000 TPB, alguns exemplos de navios-tanque atingindo valores acima de 500.000TPB.

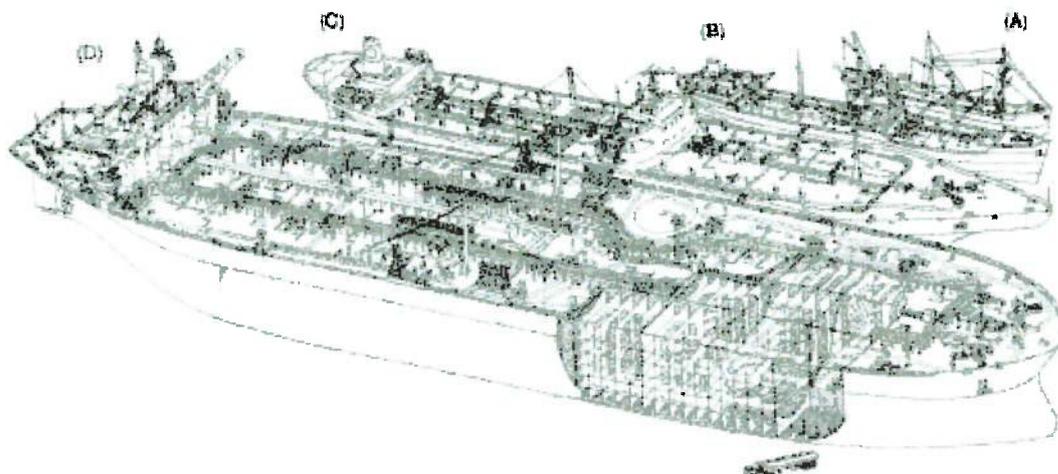


Figura 2.1 – Evolução dos navios-tanque. (A) 1886, Gluckauf – 3.000TPB. (B) 1945, T-2 - 16.500. (C) 1962, Manhattan – 115.000TPB. (D) 1977, Kapetan Giannis 517.000TPB.

O aumento de dimensões dos navios-tanque foi possível devido à evolução das técnicas de projeto (métodos numéricos e experimentais), ao aprimoramento dos materiais, à introdução de novos processos de construção e ao aparecimento de organizações internacionais responsáveis pela segurança do tráfego marítimo (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1991). Alguns exemplos podem ser citados:

- No século XIX e início do século XX, a fixação de chapas era através de rebites. O início da Segunda Grande Guerra induziu os primeiros cascos soldados acarretando grandes benefícios para a indústria de construção naval;
- A introdução dos computadores nas décadas de 1950 e 1960 permitiu o emprego de métodos numéricos de maior precisão que permitiram o avanço na otimização dos requisitos e, conseqüentemente, o crescimento das dimensões dos navios-tanque que, em menos de 20 anos, passaram de 150 metros para mais de 400 metros.
- O avanço das pesquisas nas mais diversas áreas possibilitou o melhor entendimento dos fenômenos e, portanto, a redução nos “fatores de segurança” (compensação das incertezas no projeto);
- A redução do peso estrutural acompanhada da redução do número de compartimentos simplificou as operações e baixou os custos de construção. Por outro lado, essa tendência causou críticas em razão da redução do fator de segurança

em fadiga e da possibilidade do maior volume derramado em caso do navio ser avariado.

- O aparecimento das regulamentações da MARPOL que, por exemplo, tornou obrigatória a instalação de sistema de gás inerte para evitar explosões como as ocorridas com três navios-tanque VLCC em 1969.

Tabela 2.1 – Redução do peso leve em relação à TPB dos navios tanque

Ano	TPB/DWT (ton)	Peso leve (ton)	Peso leve/TPB
1940	16.500	6.000	0,36
1950	50.000	12.000	0,24
1960	100.000	27.000	0,27
1960	200.000	30.000	0,15
1970	300.000	39.000	0,13
1970	500.000	65.000	0,13

Apesar desses avanços de projeto e construção de navios-tanque, novas dificuldades apareceram uma vez que os projetos tradicionais aplicavam margens de segurança maiores que ofereciam uma proteção para fatores desconhecidos. À medida que os cálculos tornaram-se mais precisos para a estimativa de um determinado aspecto, a margem existente diminuía afetando indiretamente outros fatores como, por exemplo, a resistência à corrosão e a resistência à fadiga. Sob esse ponto de vista, o avanço do cálculo e da análise acarretou navios-tanque mais vulneráveis a fatores e condições incomuns (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1991).

Por outro lado, a fim de reduzir os riscos de poluição, organismos internacionais criaram critérios adicionais para o projeto de navios-tanque. Apesar dessa preocupação maior com o meio ambiente, na prática, o fator custo é ainda o principal elemento de decisão provocando o aprimoramento dos requisitos estruturais pelas Sociedades Classificadoras para minimizar o peso, o maior componente no custo de um navio comercial. Adicionalmente, como fator de redução da qualidade do projeto, a necessidade

das Sociedades Classificadoras em buscar recursos provocava uma concorrência na busca dos requisitos de menor custo e um possível conflito de interesses uma vez que a estrutura societária das mesmas inclui os próprios armadores.

2.1.1 Chatas

As chatas são embarcações de pequeno calado, sem propulsão própria e com capacidade de transportar cargas pesadas. Como não possuem um sistema de propulsão, são normalmente impulsionadas por embarcações denominadas empurradores. Suas formas são normalmente simples; essa simplicidade das linhas decorrendo do fato de navegarem sempre em velocidades relativamente baixas (baixo número de Froude) nas quais a formação de ondas é menos pronunciada. Por outro lado, a perspectiva de compor comboios altera o conceito de formas finas (baixos coeficientes prismático e volumétrico), ou seja, quando navegando isoladas, as chatas apresentam um bom desempenho hidrodinâmico, enquanto que, quando integradas em comboio, as chatas apresentam rendimento hidrodinâmico relativamente menor. Adicionalmente, o projeto de chatas inclui restrições geométricas importantes entre as quais pode-se citar aquelas resultantes das características da via navegável, isto é, as profundidades, larguras e raios de curvaturas dos canais de navegação, os vãos e alturas das pontes e as dimensões das eclusas de transposição de barragens.

Finalmente, as chatas oceânicas têm sido utilizadas no transporte marítimo por muitos anos. Nos Estados Unidos, especialmente, tornaram-se extremamente importantes no transporte costeiro, particularmente após a II Guerra Mundial. Para tanto contribuíram duas razões principais: o fato dos regulamentos americanos para embarcações não propelidas permitirem uma redução do número de tripulantes e a possibilidade da construção com escantilhões menores do que aqueles adotados em navios de mesma dimensão.

2.2 Aspectos estruturais e dinâmicos

As forças geradas quando ocorre uma colisão ou encalhe tendem a levar os corpos envolvidos para uma situação de mesma velocidade. Quando o evento é de pequena intensidade e a estrutura do navio não é avariada, a energia cinética envolvida é armazenada sob a forma de energia potencial de deformação. Por outro lado, na maioria das colisões e encalhes a energia cinética é alta comparada à energia potencial que pode ser armazenada sob a forma de deformação da estrutura. Em encalhes, há quatro mecanismos básicos da dissipação de energia;

- Levantamento do navio contra a ação da força da gravidade;
- Atrito gerado pelo contato entre o casco e o fundo;
- Deformação elástico-plástica, alteração permanente da forma do casco;
- Ruptura (fratura) do material;

enquanto que, no caso de colisões, apenas os dois últimos mecanismos mencionados são os grandes responsáveis pela dissipação de energia.

A dinâmica de encalhe é um processo altamente complexo em que a quantidade de energia dissipada por qualquer um dos mecanismos listados depende das características do fundo marinho (textura, inclinação, etc...), da resistência dos elementos estruturais e de parâmetros globais do navio, tais como comprimento, deslocamento e velocidade. Apesar das grandes energias envolvidas, somente uma pequena porcentagem dos encalhes conduz a vazamento de óleo, a maioria provocando apenas pequenas avarias somente detectadas quando o navio é docado (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1991).

A seqüência de eventos envolvendo a dissipação de energia cinética quando a estrutura é rompida tem características similares tanto em encalhes, como em colisões. O fenômeno corresponde a um processo de deformação elasto-plástica, perfuração e ruptura de vários elementos estruturais. Na colisão estes elementos estão principalmente localizados na proa e no costado do casco, enquanto que no encalhe eles estão no fundo do navio. Em qualquer caso, a ação dos esforços acarreta a deformação do chapeamento externo e os elementos estruturais e que corresponde à capacidade da estrutura em resistir à

penetração. À medida que o corpo continua em seu movimento, as deformações e, conseqüentemente, as tensões aumentam de intensidade até que seja ultrapassado o limite elástico, momento em que as estruturas mais próximas da região de impacto começam a empenar, isto é, a sofrer uma deformação permanente. Se o processo continuar, a redistribuição da energia do impacto estende-se a elementos adjacentes que passam a absorver uma energia cada vez maior. É importante ressaltar que, durante o impacto, alguns elementos têm sua tensão de ruptura excedida, enquanto outros ainda trabalham no regime de deformação elástico. Este processo continua até que a energia seja totalmente absorvida ou que ocorra o rompimento da estrutura (tensão de ruptura do material), momento a partir do qual o corpo (estrutura) perde a capacidade de resistir à penetração.

Apesar do processo de dissipação de energia pela deformação estrutural ocorrer tanto em colisões, como em encalhes, há diferentes mecanismos de dissipação de energia entre encalhe e colisão. No encalhe, o trabalho realizado para elevar o navio e o atrito que aparece quando o casco move-se sobre a superfície do solo podem contribuir significativamente para a dissipação de energia cinética. Normalmente o encalhe envolve um processo de duração relativamente longa; a avaria estendendo-se freqüentemente ao longo de uma porção considerável do comprimento do navio. Ainda no caso de encalhe, a largura da penetração pode variar de uma fenda com mínimo material retorcido até uma ruptura com o material extremamente deformado. Por outro lado, a avaria por colisão tende a estar mais restrita a uma localização específica, sendo caracterizada tanto pela forma da proa, como pelo ângulo de impacto.

Uma maneira de descrever o processo de encalhe ou de colisão pode ser através de três estágios distintos: Dinâmica exterior; início do local da avaria e interação entre movimento total do navio e localização da avaria. O primeiro estágio, dinâmica exterior, está associado ao movimento do corpo rígido durante o impacto, sem levar em conta qualquer avaria. Este movimento determina os esforços de reação entre os navios ou entre o navio e o fundo. O estágio seguinte corresponde ao processo de formação da avaria, isto é, os esforços obtidos pela dinâmica exterior provocam a deformação progressiva de uma determinada região do casco. Finalmente, a fase de interação é caracterizada pelas forças de

contato atuantes no movimento de corpo rígido e pelo processo de deformação/ruptura do local da avaria, fatores esses que determinam a magnitude relativa do movimento final do navio e a profundidade da penetração local. É interessante notar que os resultados dependem de cada situação como, por exemplo, embarcações leves e rígidas, com chapeamento resistentes, podem passar por cima de obstáculos com o mínimo de avaria (Fig. 2.2), enquanto que no caso de um VLCC totalmente carregado é provável que a altura da avaria seja quase igual a altura da protuberância do fundo (Fig. 2.3).

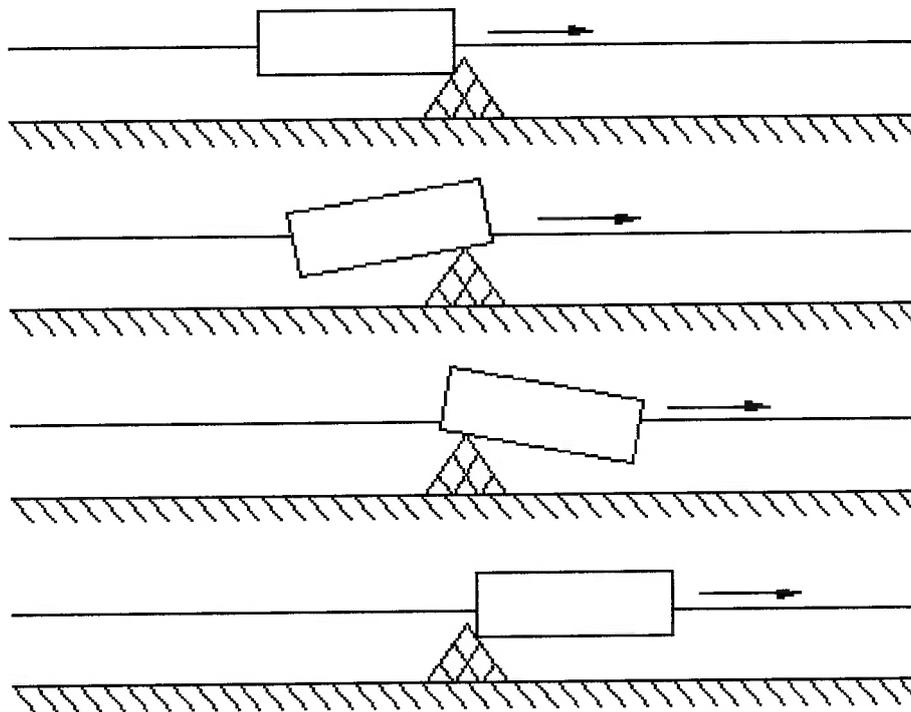


Figura 2.2 – Esquema do navio leve ao passar por um obstáculo (Fonte: Tankers Spills, 1991).

Os elementos estruturais normalmente avariados em uma colisão ou encalhe são o chapeamento do casco, as longarinas, as cavernas, as anteparas transversais e longitudinais, assim como os conveses. Entre as medidas para melhorar a capacidade de absorção de energia dos navios envolvidos em encalhes ou colisões, estudos mostram que o aumento da espessura do chapeamento, o emprego de materiais de maior tenacidade e o desenvolvimento de um arranjo estrutural capaz de distribuir as tensões uniformemente colaboram na redução dos efeitos devidos ao impacto.

Adicionalmente, no projeto do navio a distância entre anteparas é um parâmetro importante na dissipação da energia total. A instalação de anteparas transversais, espaçadas ao longo do comprimento, atua como elemento restritivo à extensão longitudinal da avaria durante uma colisão; efeito semelhante acontecendo com as anteparas longitudinais, que limitam a extensão transversal da avaria em um encalhe.

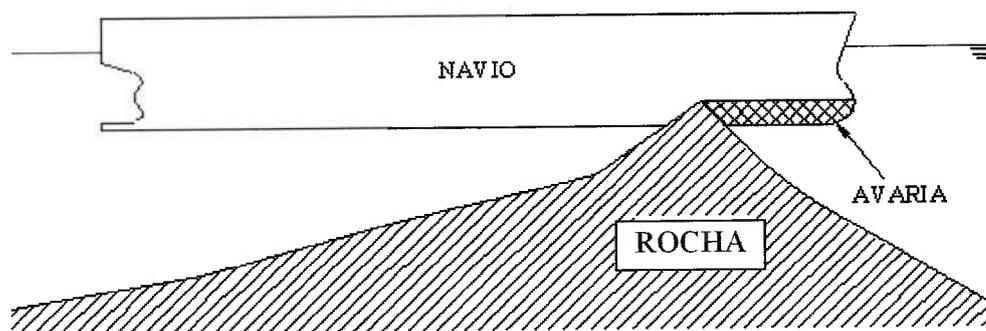


Figura 2.3 – Ilustração de um encalhe típico de alto impacto (Fonte: Tankers Spills, 1991).

2.3 Aparecimento de fogo e explosão

Todo carregamento de hidrocarbonetos e seus derivados, isto é, óleo cru, diesel, gasolina, querosene e nafta, envolvem o perigo de combustão. Para que se processe essa reação química, dois agentes químicos devem estar obrigatoriamente presentes; o combustível (sólido, líquido e gasosos) e o comburente. Os primeiros podem ser voláteis, capazes de se inflamar à temperatura ambiente (álcool, éter, benzina, etc) e não voláteis que necessitam de aquecimento acima da temperatura ambiente para desprenderem vapores capazes de se inflamar (óleo combustível, óleo lubrificante, etc). Por sua vez, o comburente geralmente encontrado na combustão é o oxigênio. Sua porcentagem no ar atmosférico corresponde a, aproximadamente, 21% sendo que, em porcentagens abaixo de 16%, já não é capaz de alimentar o processo de combustão. Finalmente, além do combustível e do comburente, é necessária uma terceira condição para que a combustão ocorra. Essa condição está associada à temperatura de ignição, isto é, a temperatura acima da qual o combustível pode queimar.

A prevenção da ocorrência de fogo ou explosão requer a eliminação de pelo menos um dos três elementos, entretanto, na prática, os combustíveis e as fontes de ignição não

podem ser eliminados em um navio-tanque. Os hidrocarbonetos estarão sempre presentes durante operações normais, pois constituem a carga ou o combustível dos motores. Mesmo quando o navio estiver em lastro ou em reparo, a presença de gases residuais nos tanques exige cuidados especiais para que se possa trabalhar nesses espaços. Com relação às fontes de ignição, existem nos navios tanques uma multiplicidade de situações que podem provocar a ignição, tornando quase impossível a eliminação de todas. Das principais fontes, podem ser citadas:

- Eletricidade estática e faísca gerada por diferença de potencial elétrico;
- Contato de aço com aço como, por exemplo, no caso um objeto cair na chapa do fundo de um tanque gerando uma faísca;
- Fontes externas, tais como um raio ou uma colisão;
- Processos mecânicos na praça de máquinas ou problemas nas instalações elétricas do navio.

Devido à impossibilidade de exercer um controle sobre os efeitos dos hidrocarbonetos e das fontes de ignição, o oxigênio foi o elemento escolhido para ser eliminado. Esse processo é realizado através da inertização dos tanques, ou seja, completando os espaços acima da carga com gases inertes. Estes gases são produzidos pelo gerador de gás inerte e apresentam composição de nitrogênio (aproximadamente 80%) e o dióxido de carbono (aproximadamente 12-14%). É importante ressaltar que a convenção internacional SOLAS de 1974 tornou obrigatório a implantação de um sistema de gás inerte (IGS) para os navios tanque com mais de 100.000TPB, regulamento estendido em 1978 para todos navios tanque com mais de 20.000TPB.

2.3.1 Incêndios e explosões fora dos tanques de carga

Existem numerosas fontes potenciais de ignição além dos espaços de carga em um navio-tanque, tais como a praça de máquinas e a área de acomodações do navio. Nestes espaços o principal mecanismo de prevenção contra incêndios é o bom uso das máquinas, a remoção de fontes de vazamento de óleo, graxas e outros inflamáveis. Em um navio-tanque

existe ainda, normalmente, a sala de bombas que é considerada a segunda área mais perigosa, após os tanques de carga. Normalmente, a sala de bombas está localizada a ré da área de carga e avante da praça de máquinas e é responsável pelo controle do sistema de carga e de lastro. Os propulsores das bombas, por serem fontes potenciais de ignição, estão localizados na praça de máquinas e isolados da área de bombas através de sistemas estanques (líquido e gás). O principal meio de defesa contra o fogo ou a explosão é a rápida ventilação para remover os vapores de hidrocarbonetos assim que são gerados.

2.4 O efeito da pressão hidrostática

Quando o casco de um navio-tanque é rompido, raramente toda carga é derramada. O encalhe do navio *Exxon Valdez*, apesar de um desastre ecológico, provocou somente o derramamento de 20% da carga (COHEN, 1995). Por outro lado, é óbvio que nenhuma carga sairá de tanques de carga que permanecerem intactos, dos tanques de lastros ou dos tanques de carga vazios. O fenômeno que explica esse reduzido volume de óleo derramado está associado ao equilíbrio de pressões no tanque avariado.

A pressão é uma grandeza isotrópica, isto é, em qualquer ponto do fluido a pressão é a mesma independentemente da direção de atuação. O casco de um navio está sujeito a um campo de pressões interno e externo e o óleo somente sairá através de uma abertura se a pressão hidrostática do óleo (interior) for maior do que a pressão hidrostática da água (exterior) naquele mesmo ponto. A condição de equilíbrio de uma embarcação (casco simples) fornece a expressão;

$$Z_O = Z_A \frac{\gamma_A}{\gamma_O} \quad (2.1)$$

em que Z_O é a altura da coluna de óleo no tanque¹; Z_A , a altura da coluna de água até a superfície livre e γ_O e γ_A correspondem, respectivamente, ao peso específico do óleo e da água. Considerando, por exemplo, que um carregamento em um tanque provoque uma pressão hidrostática no fundo maior do que aquela resultante da pressão hidrostática externa da água, no caso de avaria desse tanque haverá um fluxo de óleo para fora até que o

equilíbrio seja restabelecido. Por outro lado, se o tanque estiver apenas parcialmente carregado, isto é, se o nível do tanque de óleo estiver abaixo da superfície livre do mar ocorrerá um escoamento em sentido oposto, ou seja, a água tenderia a entrar pela avaria. É claro que, como mostrado na equação (2.1), a relação de equilíbrio entre as alturas depende da relação entre densidades entre as substâncias envolvidas. Essa propriedade sugere a possibilidade dos navios adotarem esquemas de carregamento, arranjos alternativos ou instalações de sistemas que tirem vantagens desse equilíbrio afim de minimizar a perda da carga devido o encalhe.

Existem ainda outros mecanismos que podem afetar a quantidade de óleo derramado. Por exemplo, após uma avaria do costado em que, porém um pouco de óleo permaneça dentro do tanque. Uma perturbação, tal como o movimento de balanço (“roll”) do navio, pode lançar a água para dentro do tanque. A água possuindo um peso específico maior afundará; o óleo, mais leve, será deslocado e sairá pela avaria sendo, porém um processo muito mais lento do que aquele devido ao desequilíbrio da pressão hidrostática. Adicionalmente deve-se também comentar a possibilidade de uma alteração do equilíbrio hidrostático devido a diminuição da maré que, então, acarretaria um escape de uma quantidade de óleo até o restabelecimento do novo equilíbrio. Finalmente, é importante ressaltar que qualquer líquido de peso específico maior do que a água sairá pela avaria uma vez que seu peso específico é maior que o empuxo gerado pelo volume deslocado (princípio de Arquimedes).

A ocorrência de uma avaria provoca uma nova condição na qual há o aparecimento de uma mistura na superfície de contato entre os dois fluidos (água e óleo). O grau de mistura depende da particularidade de cada situação, porém espera-se que, depois de um certo tempo, haja uma determinada quantidade de mistura de água e óleo intensificada por efeitos externos como, por exemplo, turbulência hidrodinâmica ou devidos a colisões/encalhes de alto impacto.

¹ A pressão na superfície do óleo é suposta igual a pressão atmosférica.

2.5 Medidas de prevenção de acidentes com navios tanque

Na lei americana, entre outros dispositivos, há exigências de casco duplo para os petroleiros e um cronograma de retirada de serviço dos navios de casco simples construídos antes de 1990, de acordo com a capacidade do navio e sua idade. Conforme essa lei, os navios petroleiros de casco simples sem fundo duplo ou costado duplo não serão autorizados a operar em águas norte-americanas a partir de 1º de janeiro de 2010, a menos que satisfaçam alguns requisitos. Além disso, nos cinco anos que antecedem essa data limite, ou seja, a partir de 2005, os referidos petroleiros não poderão operar em águas norte-americanas logo que atinjam 25 anos de idade, ou 23 em alguns casos. Relativamente aos navios petroleiros de casco simples com fundo duplo ou costado duplo (petroleiros de casco simples com a zona dos tanques de carga parcialmente protegida por tanques de lastro segregado), a data limite é fixada em 1º de janeiro de 2015 e o limite de idade, no período de 2005 a 2015, em 30 anos, ou 28 anos em alguns casos.

Seguindo o exemplo da legislação americana, em 1995, importantes emendas foram introduzidas pela Organização Marítima Internacional, especificamente relacionadas com requisitos de casco duplo: as Regras 13F e 13G do Anexo I da Marpol.

A Regra 13F requer que novos navios-tanque de 5.000 toneladas e superiores, sejam equipados com casco duplo, separados por um espaço de até 2 metros (nos navios de até 5.000 toneladas, o espaço deve ser pelo menos de 0,76 m). Como alternativa, os navios-tanque podem incorporar o conceito “mid-deck”, pelo qual a pressão no tanque não excede a pressão hidrostática externa.

Já a Regra 13G se aplica a navios-tanque existentes, de 20.000 toneladas ou maiores, destinados a transportar petróleo bruto ou a navios de transporte de derivados de petróleo de 30.000 toneladas ou superiores. Tais navios-tanque, que tenham mais de 25 anos de idade e que não tenham sido construídos de acordo com os requisitos estabelecidos pelo Protocolo de 1978, devem ser ajustados de forma a disporem de tanques laterais ou fundo duplo, não utilizados para o transporte de carga, em localização de proteção, ou,

ainda, que só operem com carga hidrostaticamente equilibrada. Os navios-tanque construídos de acordo com os padrões do referido Protocolo estão isentos dessa obrigação até a idade de 30 anos. A Regra 13G entrou em vigor em julho de 1995, ou seja, na prática, os navios de casco simples sem tanques de lastro protetores deixariam, em nível internacional, de poder operar a partir de 2007 ou 2012 em alguns casos. Para os navios de casco simples com tanques de lastro protetores, a desativação deveria estar concluída em 2026.

Em 2001, novas alterações foram incluídas na MARPOL 73/78 por meio da Resolução nº 95 (46) da Comissão de Proteção do Ambiente Marinho (MEPC) da IMO e que consistem, basicamente, da antecipação da retirada de operação de navios de casco simples, bem como da classificação dos navios petroleiros em três categorias, de acordo com a respectiva tonelagem, tipo de construção e idade:

- Categoria 1: Navios-tanque cujos tanques de carga não são protegidos por tanques de lastro segregados de 20.000 toneladas ou superiores que transportam petróleo, óleo combustível, óleo diesel pesado ou óleo lubrificante e navios de 30.000 toneladas ou superiores que transportam outros hidrocarbonetos;
- Categoria 2: Navios-tanque com tanques de lastro segregados de 20.000 toneladas ou superiores que transportam petróleo, óleo combustível, óleo diesel pesado ou óleo lubrificante e de 30.000 toneladas ou superiores que transportam outros tipos de produtos petrolíferos;
- Categoria 3: Navios-tanque de 5.000 toneladas e superiores mas menores do que aqueles das categorias 1 e 2.

Conforme essas alterações, a data limite para a eliminação dos navios de casco simples ocorrerá entre 2003 e 2007 para os petroleiros da categoria 1 e até 2015 para os petroleiros das categorias 2 e 3. No entanto, os navios das categorias 1 e 2 só poderão operar após, respectivamente, 2005 e 2010 se cumprirem as disposições do programa de avaliação das condições dos navios, programa esse aprovado pela Resolução nº 94 (46) da

MEPC. Na mesma resolução, prevê-se que os petroleiros das categorias 2 e 3 continuem a operar, em determinadas circunstâncias, após a data limite de sua desativação. Entretanto, os países membros da Convenção MARPOL 73/78 podem recusar a entrada de navios enquadrados nessa exceção bastando para isso, comunicar essa intenção à IMO.

Em razão das regras da MARPOL serem menos rígidas que as normas americanas, a Comissão da Comunidade Européia, após o acidente com o *Erika* em 1999, apresentou ao parlamento Europeu uma proposta de política de segurança marítima, compreendendo a organização, à nível comunitário, de uma aplicação mais restrita das convenções internacionais e a adoção de disposições especificamente comunitárias nos casos em que as normas da IMO são inexistentes ou insuficientes. Na proposta estava incluído um cronograma de desativação de navios de casco simples de prazos menores aos estabelecidos pela MARPOL em 1992 para evitar que, navios banidos das águas americanas, passassem a operar em águas européias. Em 2002, o Parlamento Europeu e o Conselho da União Européia aprovaram o Regulamento (CE) n° 417/2002 relativo à introdução acelerada dos requisitos de construção em casco duplo ou equivalente para os navios petroleiros de casco simples. Os prazos fixados no Regulamento estão em consonância com os estabelecidos pela MARPOL em 2001.

As graves conseqüências do acidente com o petroleiro *Prestige*, um navio-tanque de casco simples com 26 anos de idade, que transportava 77.000 toneladas, fez com que a União Européia adotasse regras mais rígidas para o transporte marítimo de produtos perigosos. Entre as providências, a Comissão da Comunidade Européia enviou uma comunicação ao Parlamento Europeu sugerindo medidas que considera necessárias para melhorar as condições de segurança no mar. Entre essas, pode-se citar:

- Acelerar a implantação da Agência Européia de Segurança Marítima;
- Monitorar mais estreitamente a ação das Sociedades Classificadoras;
- Publicar uma lista negra dos navios que tenham sido detidos repetidamente nos últimos dois ou três anos e bani-los das águas européias;
- Efetivar as medidas necessárias para alcançar uma suficiente taxa de inspeção em todos os portos da União Européia;

- Estabelecer um fundo de compensação suplementar de poluição por óleo até 2003 para cobrir danos de até EUR 1 bilhão (o atual limite internacional é de EUR 185 milhões);
- Propor regulamentação destinada a proibir o transporte de óleo combustível pesado em navios de casco simples que se destinem aos portos europeus ou deles partam;
- Rever, a nível internacional, aspectos quanto à responsabilidade e à compensação por poluição de óleo de forma a possibilitar a aplicação mais severa do princípio poluidor-pagador;
- Introduzir sanções penais contra qualquer pessoa (inclusive jurídica) que tenha provocado poluição.

Deve-se ressaltar que, quanto a este último aspecto, a legislação brasileira é bastante moderna, destacando-se a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, que “dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente”; a Lei nº 9.966, de 28 de abril de 2000, que “dispõe sobre a prevenção, o controle e a fiscalização da poluição causada por lançamento de óleo e outras substâncias nocivas ou perigosas em águas sob jurisdição nacional” e a Lei nº 9.537, de 11 de dezembro de 1997, que “dispõe sobre a segurança do tráfego aquaviário em águas sob jurisdição nacional”.

Outra questão é relativa às exigências quanto ao tipo de navio. Embora a obrigatoriedade de desativação de navios de casco simples na Europa começasse a partir de 2003, já era observada a tendência de substituição de navios de casco simples por navios de casco duplo. De acordo com dados da Intertanko, a proporção de navios-tanque de casco duplo aumentou de 39% em 2000 para 51% em 2002 estimando-se que, em 2007, esta proporção atinja 75% da frota mundial.

CAPÍTULO 3

3 EVOLUÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO PROBABILÍSTICO NO CÁLCULO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO

3.1 Estabilidade - Breve histórico

O emprego de anteparas de subdivisão para aumentar a segurança de passageiros e da carga é uma prática recente entre as nações marítimas ocidentais, apesar de que textos chineses mostrarem seu emprego desde o século XIII ou, como recentes evidências históricas sugerem, já no século III. A primeira exigência legal com a respeito da instalação de anteparas estanques aparece em 1854, com o decreto “*British Marine Shipping Act*”. Em 1891, um comitê da câmara de comércio inglesa, “*British Board of Trade*”, estabelece um padrão de subdivisão para navios de passageiros com mais de 130 metros de comprimento. Apesar dessas regras nunca terem sido implementadas em consequência das argumentações dos armadores sobre custos excessivos, já existiam nesse período alguns requisitos em relação às anteparas de colisão e de separação da praça de máquinas impostos pelas seguradoras através de formulações empíricas oferecidas pelo recém criado *Lloyd’s Register of Shipping*.

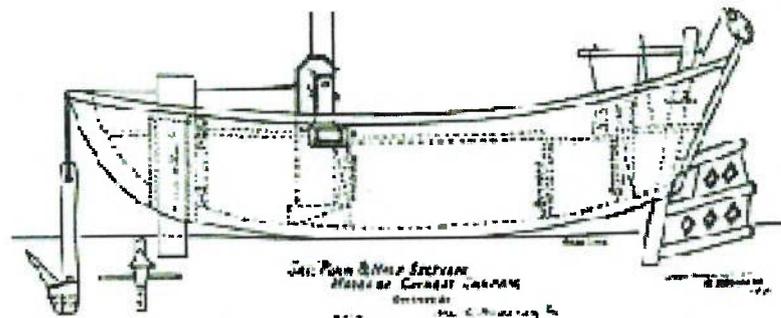


Figura 3.1 – Sampan chinês – Instalação anteparas estanques.

A perda do navio Titanic em 1912 estimulou as autoridades dos diversos países a trabalhar no desenvolvimento de uma regulamentação internacional. Esses esforços culminaram, em 1914, com a realização da primeira Convenção Internacional para Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS/1914) e que, como resultado, introduzia regras que proibiam o transporte de mercadorias cuja natureza pudesse colocar em perigo a vida dos passageiros e a segurança do navio. Entretanto,

em função do início da Primeira Guerra Mundial, esse primeiro esforço internacional de garantir condições mínimas de segurança ao transporte marítimo nunca entrou em vigor.

Após o fim das hostilidades, reiniciaram-se os estudos para a adoção de um critério de subdivisão principalmente, em função da insistência dos armadores e dos estaleiros sobre a severidade dos regulamentos de 1914. Durante a década de 20, várias conferências informais foram realizadas para analisar um extenso número de testes e estudos sobre os mais diversos aspectos relacionados ao problema de compartimentagem. Em 1929, foi realizada a Segunda Conferência Internacional para Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS/1929) em que as nações participantes aceitaram o conceito do fator de subdivisão para estabelecer a compartimentagem do navio e do critério de serviço para diferenciação entre navios de passageiros e de carga. Os Estados Unidos estavam entre os países não satisfeitos com a nova proposta, continuando a empregar a regulamentação nacional. Esta posição somente foi mudada após a perda de dois navios de bandeira americana, o *Mohawk* e o *Morro Castle*, durante a década de 30 quando, então, o senado americano aprovou o relatório 184, uma versão mais severa das regras definidas pela conferência SOLAS de 1929.

Esta regra de estabilidade (Anexo A.I) estava baseada no conceito de fator de subdivisão, F_S , que é a relação da distância entre anteparas estanques e do comprimento alagável, sendo este definido como o comprimento, em relação ao centro da avaria, da distância entre duas anteparas fictícias cujo volume corresponde ao afundamento e trim do navio até uma linha pouco abaixo do último convés contínuo (linha marginal). Esse fator diminui com o comprimento do navio e com o critério de serviço. Um fator de subdivisão entre 1,0 e 0,5 significa que o navio pode sobreviver a um alagamento de comprimento pouco maior que o compartimento, porém não ao alagamento de dois compartimentos. Já um fator de subdivisão entre 0,5 e 0,33 corresponde ao alagamento de, no máximo, dois compartimentos.

Por outro lado, o critério de serviço foi desenvolvido para representar o número de passageiros transportados pelo navio. O cálculo desse parâmetro (Anexo A.I) forneceu um valor de 123 para o navio de passageiros Aquitania, padrão de qualidade em 1914, e um valor de 23 para navio padrão de carga geral. Esses valores definem os limites das curvas para o cálculo de subdivisão do navio, como apresentado na Figura 3.2 em que o fator de subdivisão é obtido a partir do comprimento de subdivisão² e as curvas de critério de serviço. Finalmente, é importante citar que, os requisitos da SOLAS/1929 nada estipulavam quanto à estabilidade transversal após a avaria.

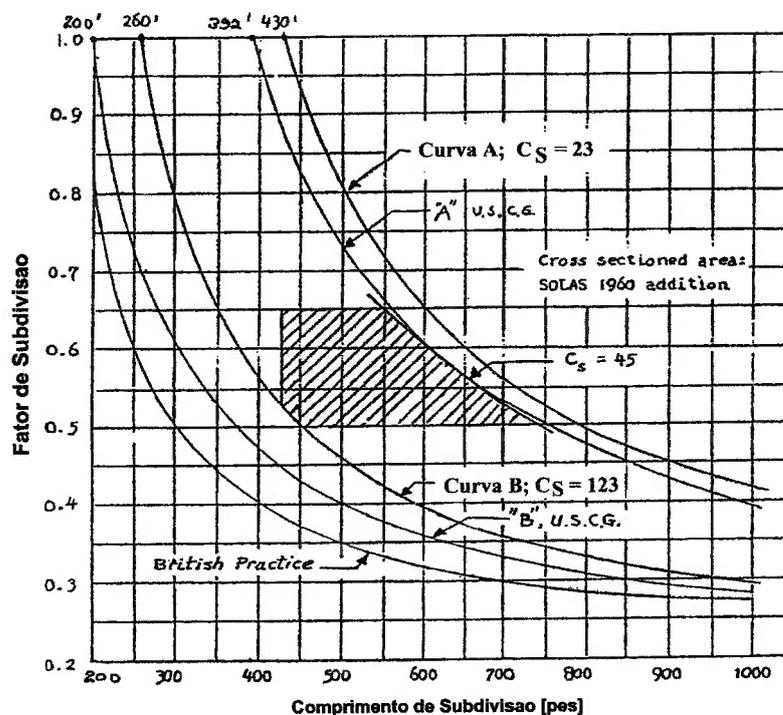


Figura 3.2 – Critério de Subdivisão (Fonte: Parson, 2001)

A terceira Conferência Internacional para Salvaguarda da Vida no Mar (SOLAS/1948) inclui pequenas alterações na versão anterior, porém corrigiu a omissão existente com relação à estabilidade avariada transversal. Durante o início da década de 50, o emprego de tanques únicos de óleo e lastro tornou-se um problema operacional, agravado pela proibição de descarga de óleo dentro da zona de 50 milhas da costa (Conference on Marine Pollution – MARPOL/1954). Em julho de 1956, a perda do navio de passageiros *Andréa Doria*, cujos tanques de combustível

² Comprimento do navio definido pela regra para o cálculo de subdivisão.

Em 1967, foi nomeado um novo grupo para preparar uma regulamentação de estabilidade e subdivisão baseada nos estudos realizados que, após um extenso trabalho resultou, em 1971, em uma proposta baseada no método probabilístico para a definição da estabilidade avariada. Em formato revisado, este trabalho é a base do regulamento de navios de passageiros de 1973 (IMO/1973) adotada pela Organização Marítima Internacional.

Por outro lado, enquanto que para navios de passageiros estudava-se a aplicação do método probabilístico, a evolução das regulamentações para o transporte de carga foi mais lenta devido à oposição dos armadores em relação aos custos associados e a inexistência de perda de vidas humanas no mar. Em 1966 a IMCO patrocina a Conferência Internacional de Linha de Carga, ICLL/1966 (“International Conference on Load Line”) que define normas para navios de carga, inclusive navios-tanque. Estas normas estão associadas aos requisitos para diversas condições específicas de borda livre mínima em relação à linha de carga de verão (“summer load lines”). Esta década é marcada por mudanças técnicas e operacionais, principalmente, com relação aos navios-tanque. Em decorrência de fatores como; aumento de dimensões do navio (fechamento do canal de Suez), introdução de tanques de asa, segregação no armazenamento de óleo e lastro e mudança do perfil operacional com navios parcialmente carregados e executando paradas em diversos portos; houve uma redução dos padrões de segurança o que levou a Guarda Costeira Americana (“US Coast Guard”) a impor, após o acidente com o navio “Torrey Canyon”, uma subdivisão que previsse a possibilidade de alagamento de dois compartimentos adjacentes, ou seja, compartimentagem dois para estes navios.

A crescente preocupação com a preservação do meio ambiente acarreta a realização de uma nova Conferência em Poluição Marítima em 1973 (MARPOL/1973) que, entre seus resultados, estabelece o padrão de compartimentagem dois para a maioria dos navios-tanque, define um limite para a capacidade de armazenagem dos porões de carga (tanques), impõe tanques segregados de óleo e lastro⁴ (“Segregated Ballast Tanks” – SBT), sistema de gás

⁴ Este requisito transforma os navios-tanque, de limitados por peso, em navios limitados em volume.

inerte e um procedimento para a estimativa do derramamento máximo hipotético. Após uma série de acidentes com navios-tanque durante os anos de 1976 e 1977, cresceu nos EUA o interesse do público sobre os riscos associados ao transporte marítimo de petróleo que resultou em pronunciamento do Presidente Jimmy Carter sobre uma série de novas medidas para reduzir tais riscos. Além disso, o governo norte-americano solicitou uma nova Conferência sobre Poluição Marítima (MARPOL/1978).

Entre as decisões adotadas por esta nova conferência, por meio de um protocolo adicional, estavam a instalação de tanques de lastro segregados (Fig. 3.3) localizados de maneira protetora (“Protective Located Segregated Ballast Tanks” – PL/SBT) e o emprego de método de limpeza dos tanques (“Crude Oil Washing” - COW). Adicionalmente, os Estados Unidos sugeriram o estabelecimento de uma altura mínima para o fundo duplo de B/15 ou 2,00m, qual fosse a menor, em todos navios-tanque novos com mais de 20.000TPB. Para essa proposta, entretanto, não houve um consenso e, portanto, não foi adotada.

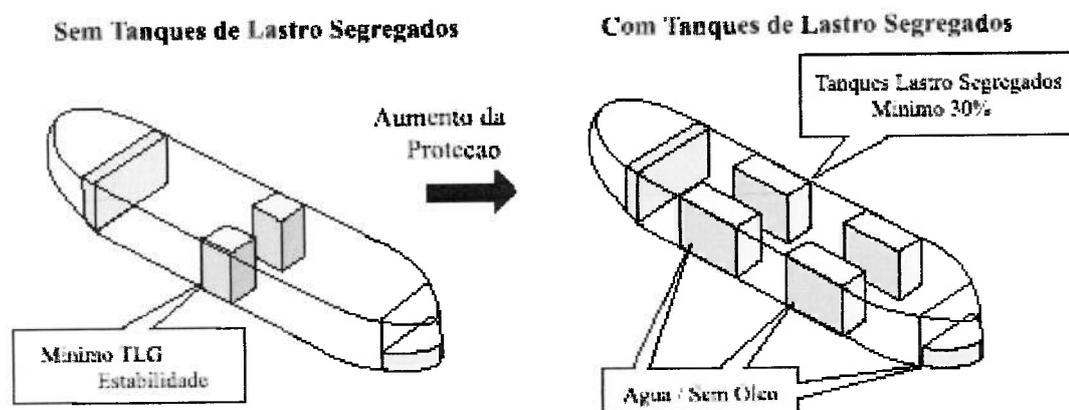


Figura 3.3 – Navios com tanques de lastro segregados e/ou localizados de maneira protetora (Fonte: Dickins, 1995).

O acidente com o navio “*Exxon Valdez*”, em 1989, que havia sido construído segundo as regras estabelecidas pela MARPOL 73/78 fizeram os EUA adotarem, unilateralmente, uma legislação mais severa que as normas internacionais vigentes para navios navegando em suas águas territoriais, o *Oil Pollution Act - OPA*, de 1990. Estas regras impõem, de certa maneira, como única solução o emprego de navios de casco duplo. Por outro lado, a legislação internacional adotada pelas nações membro da IMO (MARPOL/1995), permite o emprego de qualquer

alternativa do arranjo de tanques que apresente um desempenho igual ou superior ao desempenho apresentado por navios tomados como referência (casco duplo). Entre estas alternativas destaca-se a possibilidade da existência de um convés intermediário (“mid-deck tanker” – Fig. 3.4).

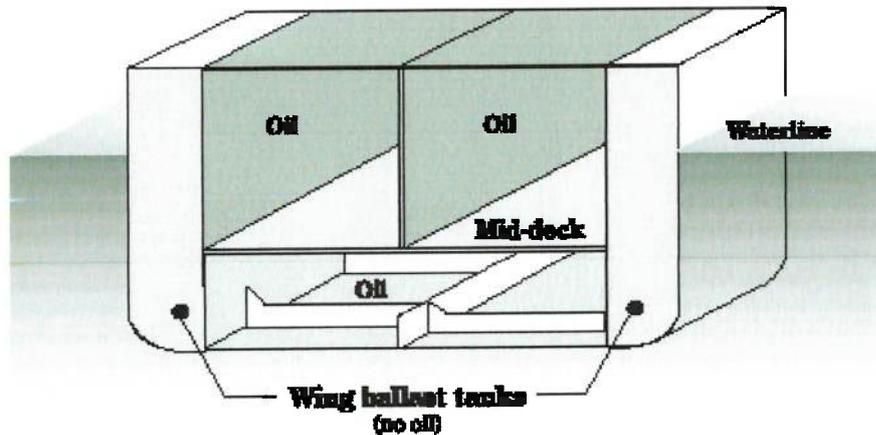


Figura 3.4 – Seção característica navio-tanque de convés intermediário (Fonte: Dickins, 1995).

Em virtude das regras da MARPOL/1995 terem abrangência internacional e, portanto, serem o resultado de um consenso entre os países; apresentam muitas vezes regras menos rígidas em relação às regras nacionais de alguns países. Entretanto, a questão ambiental de derramamento de óleo assume cada vez mais um aspecto político que pode impor alterações bastante abruptas nos requisitos dos navios-tanque. Até recentemente a Comunidade Européia seguia as determinações da IMO, porém os acidentes com os navios *Erika* e *Prestige*, cujos acidentes não estavam relacionados à problemática de casco duplo, acarretam tal indignação pública que os políticos europeus instituíram, em 2002, uma legislação de retirada imediata dos navios de casco simples de suas águas territoriais, apesar das regras da IMO apresentarem um cronograma mais flexível.

Finalizando esta seção, é importante ressaltar que as regras descritas no SOLAS estão basicamente relacionados à segurança da vida humana no mar, isto é, estabelecendo regras de subdivisão e estabilidade, princípios gerais de construção e requisitos de proteção contra incêndios e de rádio-transmissão e, portanto, relacionados apenas indiretamente com o problema de poluição. Por outro lado, as regras estabelecidas pela MARPOL têm como objetivo específico a prevenção da poluição tanto acidental como operacional. No projeto de um navio-tanque, essas

duas regras devem ser observadas e, portanto, na Tabela 3.1 apresenta-se, com relação aos requisitos de subdivisão e estabilidade, os principais parâmetros de projeto.

Tabela 3.1 – Regras de Estabilidade.

		SOLAS 74	ICLL 66	MARAD	MARPOL 73	IMCO Passageiro 73
Extensão da Avaria		1, 2 ou 3 compts. Somente navios de passageiros	1-Compt. A ou B - 60% 2-Compt. B - 100% Somente SLL	1 - Compartimento Todos Calados	2 - Compartimentos Apenas Navios-Tanque Todos Calados Carregados	Vários Compartimentos Método Probabilístico
Costado	Longitudinal	10' + 0.31, max 35'	Como acima	10' + 0.30L	1/3L ^{2/3} , max 14.5m	até 0.24L, max. 48m
	Transversal	B / 5	B / 5	B / 5	B / 5, max 11.5m	Até 0.80B
	Vertical	Acima - L.B	D	Quilha / L. M.	Acima L. B.	Acima L. B.
	Menor / Local	-----	-----	Menor extensão	-----	1 - compartimentos
Fundo	Trans	Vante 0.3L Ré 0.7L	-----	-----	1/3L ^{2/3} , max 14.5m L/10, max 5m	-----
	Long	Vante 0.3L Ré 0.7L	-----	-----	B / 6, max 10m 5m	-----
	Vertical	-----	-----	-----	B / 15, max 6m	-----
	Vertical	-----	-----	-----	-----	-----
Permeabilidades						
Acomodações	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Depósitos, Cargas	0.60	0.95	0.60	0.60	0.60	0.60 - 0.95
Maquinaria	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Vazio ou Líquido	0.95 ou 0	0.95 ou 0	0.95 ou 0	0.95 ou 0	0.95 ou 0	0.95 ou 0
Efeitos da Avaria						
Banda Máxima	7° ou 15°	17° / 15°	15°	30° / 25°	12°	
Limite Afundamento	Linha Marginal	Alagamento Progressivo	Linha Marginal	Alagamento Progressivo	Convés das Anteparas	
GM	2" vertical	Positivo	Positivo	-----	Função da borda-livre	
GZ	-----	20° alcance, max 1m	-----	20° alcance, max 1m	-----	
Menor/Intermediário	-----	-----	-----	-----	20° banda	
Tempo Equalização	15 minutos	-----	"prático"	-----	10 minutos	

L. B. - Linha de Base, L. M. - Linha Marginal

* dependente do calado

3.2 Revisão Conceitual da Aplicação do Método Probabilístico para Avaliação das Condições de Sobrevivência do Navio após o Acidente

Como descrito no item anterior em 1967 foi criado um comitê para desenvolver um procedimento alternativo para avaliar a subdivisão e estabilidade de navios. Em 1973, a IMO adota uma regulamentação equivalente, conhecida como resolução A265 (VIII) que introduz o conceito probabilístico na avaliação da estabilidade. Os conceitos da metodologia probabilística foram apresentados, de maneira formal, no trabalho de Wendel (1960) e, de uma forma mais prática, no trabalho de Comstock (1961).

Esta nova metodologia, considerada mais lógica e consistente, foi inicialmente aplicada aos navios de passageiros uma vez que esse tipo de navio envolve grande número de vidas humanas. Posteriormente, regulamentação semelhante foi adotada para navios de carga geral (Resolução IMO MSC.19 (58)) e

seus conceitos sendo também estendidos para a avaliação de derramamento de óleo. A idéia básica do emprego do método probabilístico envolve três probabilidades distintas:

- (a) A probabilidade que o navio sofrer um acidente, isto é, de ser avariado;
- (b) A probabilidade da localização e extensão do alagamento;
- (c) A probabilidade que o navio possa sobreviver ao alagamento.

A primeira probabilidade está associada às condições de navegação, isto é, a densidade do tráfego, a visibilidade, a velocidade do navio, a capacidade de manobra do navio, a confiabilidade dos equipamentos de navegação e a competência e o bom senso da tripulação. A avaliação dos efeitos de cada um desses fatores permitiria, em princípio, determinar essa probabilidade para cada navio ou, pelo menos, para cada classe de navio. Apesar de levantamentos realizados no âmbito do sub-comitê de estabilidade da IMO (Tagg, 1982) mostrarem que o risco de ocorrência de um grave acidente ser de 4 a 5 em cada 1000 navios, a dificuldade de informações mais detalhadas das condições de cada evento, impossibilitou a inclusão dessa primeira parcela diretamente de qualquer procedimento de cálculo probabilístico.

A análise dos dados permitiu, entretanto, a obtenção de algumas conclusões gerais como, por exemplo, a maior incidência de acidentes em áreas portuárias ou em regiões de alta densidade de tráfego (canal da Mancha). Além desse aspecto, a probabilidade de um navio ter um acidente também está associada ao tempo de permanência em determinada rota, ou seja, navios em rotas curtas têm maior probabilidade de envolvimento em um acidente do que navios de longo curso que, somente eventualmente, atuam na rota.

Caso o navio permanecesse incólume após o acidente, não haveria necessidade para qualquer procedimento de subdivisão ou avaliação da estabilidade avariada. Entretanto, existe um risco de avaria e, portanto, a necessidade de avaliar os efeitos da avaria sobre a capacidade de sobreviver do navio. Essa avaliação é obtida através da estimativa da probabilidade dos itens (b) e (c).

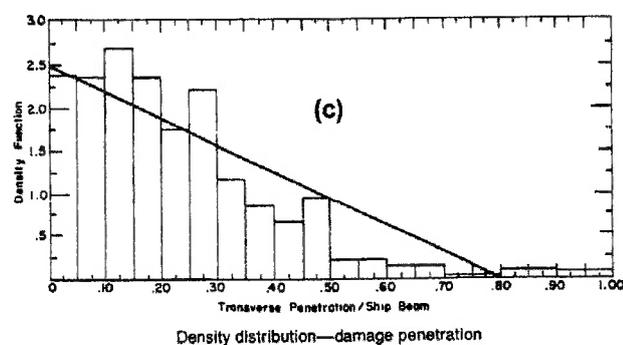
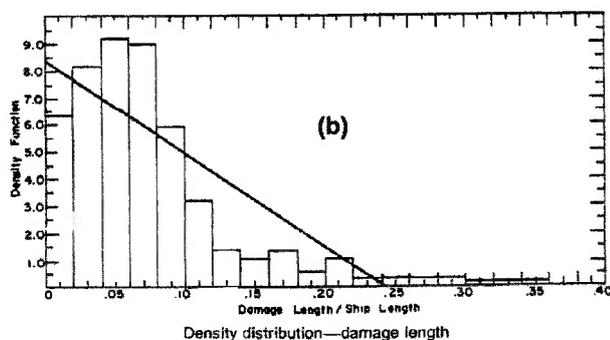
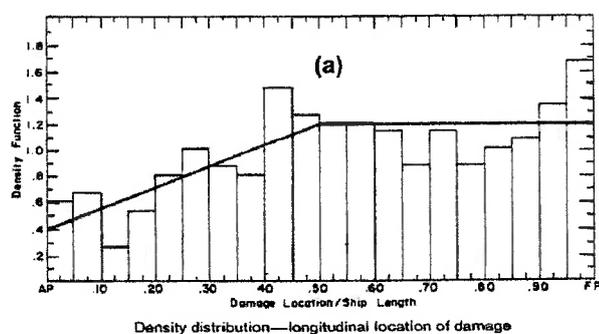
3.2.1 *Probabilidade da localização, extensão da avaria.*

Esta probabilidade está relacionada à distribuição das características da avaria (localização e extensão) ao longo do casco e do efeito dessas características no processo de alagamento do arranjo interno do navio. É interessante observar que a localização e extensão da avaria dependem das características do navio impactante⁵ (forma, massa, velocidade, etc.) e do navio impactado (arranjo estrutural). Segundo Robertson (1974), a implementação do método probabilístico para navios de passageiros envolvia um banco de dados constituído de, aproximadamente, 860 navios avariados em colisões ou em encalhes. Após uma revisão preliminar, decidiu-se limitar o conjunto de estudo a navios de passageiros e carga geral uma vez que os navios-tanque, por não possuírem estrutura horizontal (conveses), apresentariam um comportamento diferente em relação à extensão da avaria resultante de colisão devido à menor capacidade de absorção de energia. Ainda, no desenvolvimento da resolução IMO A265 (VIII) para navios de passageiros, decidiu-se eliminar os eventos associados a encalhes uma vez que, apesar de ser uma simplificação, observações mostravam que grande porcentagem de encalhes não acarretava penetração do envólucro interna (teto do fundo duplo).

A partir das características das avarias do banco de dados obtiveram-se as curvas de distribuição de densidade de probabilidade da localização e extensão longitudinal da avaria para avaliação de navios de passageiros. É importante ressaltar dois aspectos em relação ao desenvolvimento das curvas de distribuição de densidade: o primeiro está relacionado à adimensionalização das abscissas com relação ao comprimento, isto é, à independência da localização e extensão da avaria em relação ao tamanho do navio. Apesar de oferecer uma excelente aproximação, essa hipótese, considerada válida nos estudos de Wendel (1960), Robertson (1974), Sekine (1991) e outros, foi contestada em trabalho recente de Pedersen (2000). O segundo aspecto diz respeito à independência entre os dois eventos (localização e extensão da avaria) que, apesar de assumida nas regulamentações existentes (navios

de passageiros, navios de carga geral e navios-tanque), ainda hoje requer melhor análise e avaliação.

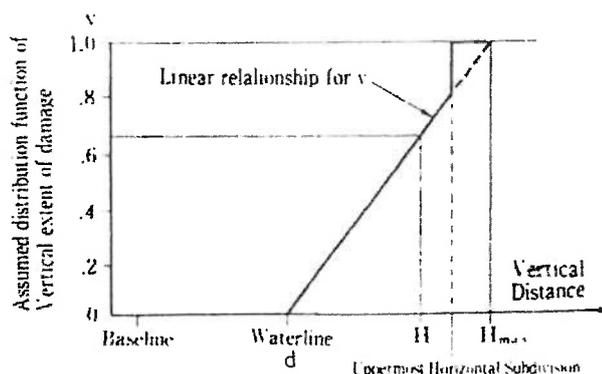
Como descrito acima, a regulamentação de navios de passageiros está restrita a dois eventos probabilísticos. Para o caso de navios de carga geral, a regulamentação da IMO já inclui o fato da avaria devida à colisão ter um caráter tridimensional (extensão longitudinal, vertical e transversal⁶) associada a sua localização longitudinal, entretanto, não inclui o caso de encalhe. Segundo Sekine (1991), a amostra analisada era constituída de 296 navios que permitiram obter as distribuições de densidade de probabilidade relativas à posição longitudinal e às extensões longitudinal e transversal (Fig. 3.5 (a), (b) e (c)).



⁵ Navio Impactante (“Striking ship”); que provoca o impacto e navio impactado (“struck ship”); que recebe o impacto.

Figura 3.5 – Funções densidade de probabilidade (Fonte: Tagg, 1982).

Para a obtenção da distribuição de extensão vertical (e localização vertical), importante segundo Tagg (1982) para navios de carga geral tipo roll on / roll off, a resolução IMO MSC.19 (58) adota a distribuição na Figura 3.6 em que a probabilidade associada ao parâmetro extensão vertical da avaria (v) é definida entre a linha d'água e a posição do convés horizontal contínuo.

Figura 3.6 – Função densidade de probabilidade da extensão vertical da avaria (v) em função da existência de uma anteparas horizontal estanque (Fonte: Sekine, 1991).

É interessante observar que para um navio de carga com anteparas transversais, longitudinais e horizontais, conforme apresentado na Figura 3.7, as probabilidades associadas a cada compartimento são obtidas pelos seguintes produtos de probabilidades:

- i) Compartimento 1 é alagado

$$P_i r v \quad (3.1)$$

- ii) Compartimento 1 e 2 são alagados

$$P_i (I-r)v \quad (3.2)$$

- iii) Compartimento 1 e 3 são alagados

$$P_i r (I-v) \quad (3.3)$$

- iv) Compartimentos 1, 2, 3 e 4 são alagados

$$P_i (I-r)(I-v) \quad (3.4)$$

em que P_i corresponde à probabilidade obtida do produto das funções densidade de probabilidade associadas à localização e à extensão longitudinal da avaria i e o

⁶ Transversal – Profundidade da avaria.

parâmetro r está associado à probabilidade de extensão transversal (profundidade) da avaria.

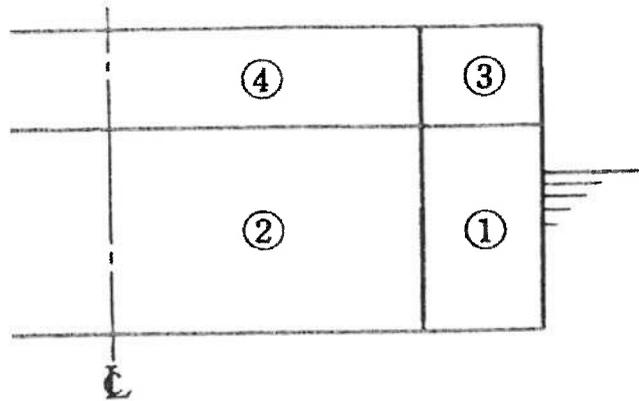


Figura 3.7 – Disposição do arranjo interno do navio (Fonte: Sekine, 1991).

Os procedimentos até o momento descritos não incluem as avarias devido a encalhes cuja estimativa, de certa forma, está incluída na consideração de extensão vertical ilimitada da avaria abaixo da linha d'água no procedimento de estabilidade avariada. Por outro lado, na avaliação do derramamento de óleo, as possibilidades de avaria devido a encalhes tornam-se importantes. Hook (1991), com o intuito de analisar diferentes arranjos de navios-tanque com relação às expectativas de vazamento de óleo, adotou as funções densidade de probabilidade para encalhes. É interessante ressaltar que as regras da MARPOL (1997) para a avaliação das expectativas de vazamento de óleo adotam funções padrão para as distribuições de densidade de probabilidade tanto para colisão, como para encalhes para cinco parâmetros da avaria, isto é, extensão longitudinal, transversal e vertical da avaria, bem como com relação à localização longitudinal e vertical (Anexo A.II).

Finalmente, para concluir esse item, pode-se verificar que até o momento o procedimento apresentado esteve restrito ao navio impactado. Para o caso de navios impactantes as avarias estão, quase sempre, localizadas na parte avante do navio. Nas análises estatísticas realizadas observou-se que em metade dos eventos a avaria se estendia para além de $0,05L$ da perpendicular avante, a máxima distância sendo de $0,11L$. A posição para uma antepara de colisão é, portanto, bastante vulnerável sendo desejável que os navios sejam capazes de suportar o alagamento simultâneo do compartimento de pique de vante e do adjacente.

3.2.2 *Probabilidade de sobrevivência.*

A probabilidade de sobrevivência (C) em uma condição alagada depende de diversos fatores existentes no momento do acidente. Esses fatores estão associados à condição intacta (permeabilidade⁷, calado e estabilidade) do navio, à extensão e localização do alagamento e ao estado das forças e momentos existentes na condição avariada (ventos, mar, movimentação de líquidos, pessoas e outros pesos). A determinação do efeito de cada fator poderia, em princípio, estar associada à sua respectiva distribuição probabilística, porém são necessárias algumas simplificações para se ter um critério realístico de estimativa da probabilidade de sobrevivência.

Neste item é importante ressaltar que para não haver a perda do navio o empuxo na condição avariada deve ser maior que o peso e qualquer ponto em que alagamento progressivo ocorra esteja acima da linha d'água avariada. Outro ponto importante de salientar corresponde ao fato do emborcamento não ser necessariamente o evento responsável pela perda do navio sendo, entretanto, importante assegurar na condição de estabilidade avariada uma condição mínima para o abandono do navio ou posterior operação de salvatagem.

Para o desenvolvimento da formulação de estimativa da probabilidade de sobrevivência de navios de passageiros cada um dos fatores citados foram analisados e avaliados. Segundo Robertson (1974), estudos realizados mostraram que as distribuições de altura da onda baseadas nos relatórios dos acidentes eram menos severas do que aquelas existentes nas regiões estudadas. Essas discrepâncias, provavelmente, estão associadas ao fato de que os acidentes ocorriam em áreas protegidas, em situações de névoa e maré baixa. Porém, também é possível relatar algumas condições calmas, com a presença de pequenas ondas. Por outro lado, para avaliar a relação entre estado do mar, estabilidade e flutuação na condição avariada, extenso número de ensaios com modelos de diferentes tipos de navio (navio de longo curso, “ferry-boat” para pequeno percurso) e nas mais diversas condições (variação

⁷ Permeabilidade (μ): Volume livre de um espaço (porão, tanque, praça de máquinas, etc.) possível de ser ocupada pela água no caso de um alagamento.

sistemática da boca, do calado e do arranjo interno) foram realizados. Apesar das diferenças no tipo e nas proporções do navio, foi observado que a condição de estabilidade para o navio emborcar ou não emborcar independia desses fatores e, portanto, para fins de simplificação, optou-se pela adoção de valores médios de estabilidade em função do estado de mar, isto é, em um tratamento determinístico para o efeito do estado de mar.

Por sua vez, para avaliar o efeito da distribuição do calado na capacidade de sobrevivência do navio, o sub-comitê da IMCO responsável pelo desenvolvimento da regulamentação avaliou dados de viagem de um grande número de navios. As curvas de distribuição obtidas mostraram uma variação considerável que, claramente, estavam associadas ao perfil operacional do navio, ou seja, a variações no arranjo operacional dos tanques, da carga e das outras parcelas do carregamento (passageiros). É interessante ressaltar em que a condição de calado mínimo é limitada pela estabilidade, o calado mais provável está próximo da condição de calado operacional mínimo. Por outro lado, navios de longo percurso com apreciável carga ou “ferry-boats” com capacidade de tanques limitada, a variação do calado é função basicamente da variação do carregamento e, conseqüentemente, o calado mais provável encontra-se próximo ao calado máximo operacional. Apesar dessas conclusões, a expressão adotada pela IMO assume uma forma padrão de distribuição para os calados considerada adequada em função da dificuldade de obtê-la na fase preliminar de projeto e da pouca sensibilidade do parâmetro de subdivisão à sua forma.

Esse mesmo conjunto de dados sobre as condições de navegação permitiu a obtenção de informações sobre o tipo e a quantidade de carga carregada, o volume do espaço de carga e a correspondente porcentagem do volume total ocupado pela carga. A partir desse conhecimento os membros do Sub-Comitê estimaram a permeabilidade do espaço de carga, para cada condição de carregamento e calado, verificando que a mesma variava para um mesmo calado. Conseqüentemente, para possibilitar o procedimento de cálculo, adotaram a formulação determinística dada pela expressão:

$$\mu = 1000 - \frac{1,2(d_i - d_0)}{d_s} - \frac{0,05(d_s - d_i)}{(d_s - d_0)} \quad (3.5)$$

em que μ é a permeabilidade de carga para um calado qualquer d_i , d_s é o calado de subdivisão e d_0 corresponde ao calado mínimo de serviço. Deve-se acrescentar que a permeabilidade obtida não deve ser superior a 0,95 nem inferior a 0,60.

Conforme apresentado por Robertson (1974), a probabilidade de sobrevivência, s_i , para um determinado calado d_i é dada pela expressão:

$$s_i = 4,9 \left[\left(\frac{F_1}{B_2} - \frac{\tan \theta}{2} \right) (GM_R - MM_S) \right]^{1/2} \quad (3.6)$$

em que θ é o ângulo de banda devido ao alagamento assimétrico; GM_R é a altura metacêntrica intacta máxima requerida e MM_S é a redução do metacentro resultante do alagamento. Adicionalmente, B_2 corresponde à boca moldada do convés de antepara do ponto médio do comprimento enquanto que o parâmetro F_1 está associado à borda livre média efetiva avariada conforme apresentado na Figura 3.8. O cálculo da probabilidade de sobrevivência (s_i) é, conseqüentemente, o resultado da avaliação dessa probabilidade em um conjunto de calados específicos cada qual associado a condições particulares de permeabilidade e de meio ambiente.

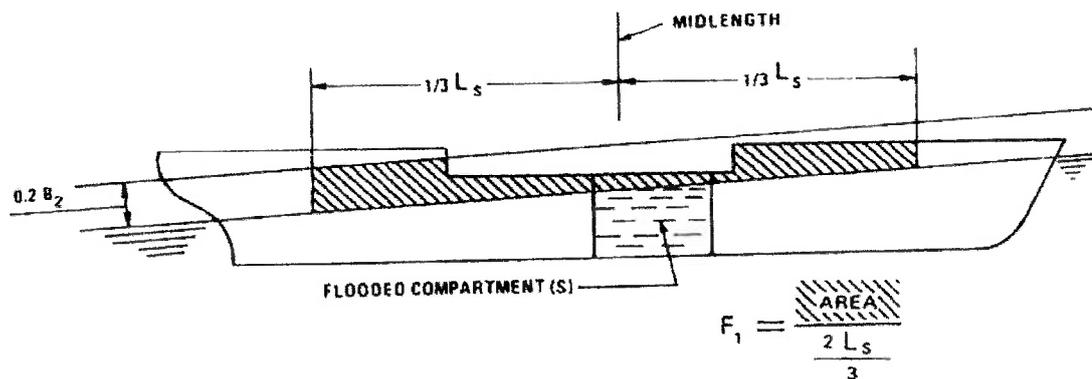


Figura 3.8 – Esquema ilustrativo do cálculo da borda livre efetiva média avariada (Fonte: Robertson, 1974)

Finalmente, é importante ressaltar que o parâmetro s_i não é estritamente uma probabilidade, porém um parâmetro que, obtido através de simplificações, está intimamente associado com a probabilidade de sobrevivência.

Para navios de carga geral, a expressão da probabilidade de sobrevivência para cada condição de avaria corresponde a um valor obtido a partir da curva do braço de endireitamento, como mostrado na Figura 3.9;

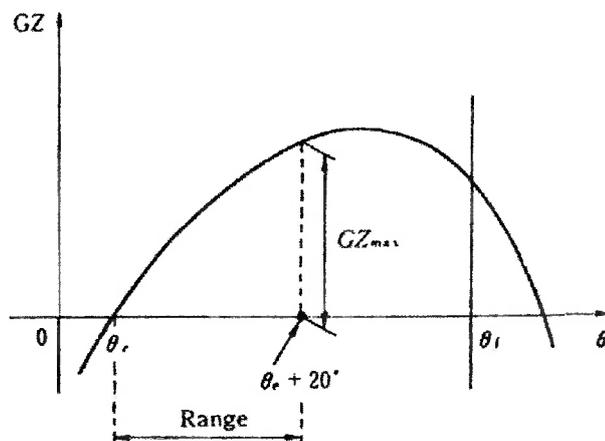


Figura 3.9 – Esquema ilustrativo da curva do braço de endireitamento avariada (Fonte: Sekine, 1991) em que θ , θ_e e θ_f são, respectivamente, o ângulo de banda, o ângulo de equilíbrio e o ângulo de alagamento e GZ é o braço de endireitamento.

3.2.3 Critério de Estabilidade Avariada

Os critérios de estabilidade avariada tanto para navios de passageiros (Resolução A265 (VIII)), como navios de carga geral (Resolução IMO MSC.19 (58)) prescreve que o parâmetro “Índice de Subdivisão Obtido” (“Attained Subdivision Index”), A , deverá ser maior ou igual ao Índice de Subdivisão Requerido (“Required Subdivision Index”), R . A expressão para o parâmetro A corresponde a uma somatória do produto das probabilidades de avaria dos diversos compartimentos, individuais ou em grupo, com as respectivas probabilidades de sobrevivência,

$$A = \sum p_i s_i \quad (3.7)$$

em que: p - Representa a probabilidade de alagamento de um compartimento ou grupo de compartimentos, ou seja, a integral do produto das funções densidade de probabilidade relativas à localização e à extensão (longitudinal, transversal e vertical) da avaria;

s - Representa a probabilidade de sobrevivência do navio avariado em relação às condições de estabilidade intacta (borda livre, banda, calado)

e do meio ambiente para cada compartimento ou grupo de compartimentos considerados.

De maneira análoga ao antigo fator de subdivisão, o Índice de Subdivisão Requerido, R , reflete o grau de subdivisão (arranjo) necessária ao navio em função do comprimento e do número de total de pessoas transportadas. A definição de uma curva (linha cheia - Fig. 3.10) que representasse esse índice foi obtida através da avaliação de índices de subdivisão obtido A para uma série de navios projetados (pontos - Fig. 3.10) segundo o antigo procedimento SOLAS/1960 e do fato de que o nível de segurança deveria corresponder ao oferecido pela antiga regra. Essa última consideração, apesar de não satisfazer alguns países que desejavam um padrão de maior segurança, permitiu a IMCO introduzir da nova regulamentação. A expressão para navios e passageiros corresponde a,

$$R = 1 - \frac{1000}{4L_S + N + 1500} \tag{3.8}$$

em que L_S é o comprimento de subdivisão e N corresponde à soma $N_1 + 2N_2$ sendo N_1 , o número de pessoas para os quais existe botes salva-vidas e N_2 o número permitido de pessoas (inclusive tripulantes e oficiais) em excesso a N_1 . Por sua vez, a equação para navios de carga geral é dada por:

$$R = (0,002 + 0,0009L_S)^{1/3} \tag{3.9}$$

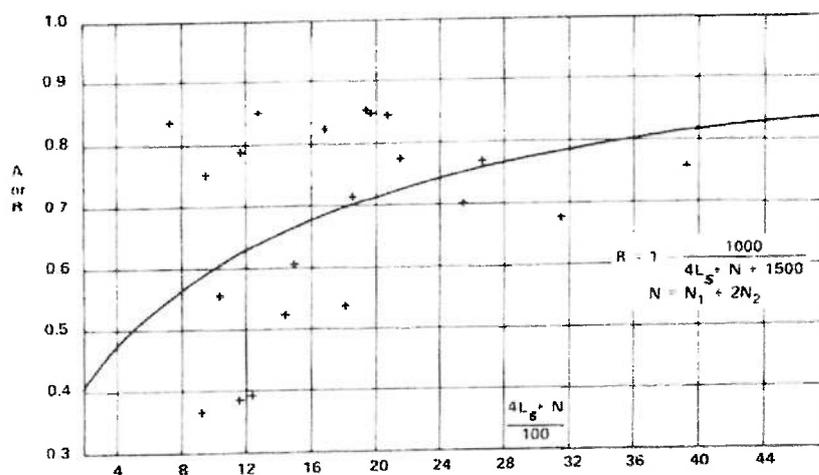


Figura 3.10 – Comparação do índice R com os valores calculados de A (ordenada) de navios existentes em função do parâmetro $(4L_S + N/100)$ (Fonte: Robertson, 1974)

3.2.4 Observações Finais

As diversas regulamentações da IMO relativas à aplicação do método probabilístico estabelece que a variável independente das funções densidade de probabilidade sejam parâmetros adimensionais em relação ao comprimento ou boca, isto é, por exemplo, a curva de distribuição da extensão longitudinal da avaria independe do comprimento do navio. Esta afirmação constitui, segundo alguns, uma limitação ao emprego das regras. Para tentar avaliar este aspecto, Pedersen (2000) implementou um modelo analítico para a avaliação tanto da avaria devida ao encalhe, como aquela resultante de colisões. Em seu desenvolvimento empregou considerações de energia cinética, relação entre energia dissipada e material destruído, tipo do navio e geometria do obstáculo ou do corpo impactante para obter os parâmetros de comparação entre navios. As expressões para as relações obtidas para o encalhe e a colisão são, respectivamente, dadas por:

$$\frac{(L_A/L)_1}{(L_A/L)_2} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^{0,2} \left(\frac{Fn_1}{Fn_2}\right) \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{1,313} \quad (3.10)$$

$$\frac{(L_A/L)_1}{(L_A/L)_2} = \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^{0,25} \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{0,3171} \left(\frac{L_2^{3,33} + 0,6L_0^{3,33}}{L_1^{3,33} + 0,6L_0^{3,33}}\right)^{0,5} \quad (3.11)$$

em que L_A corresponde ao comprimento da avaria, L_i (L) ao comprimento do navio impactado i , σ á tensão de escoamento do material, Fn ao número de Froude e L_0 ao comprimento do navio impactante.

Através das expressões acima, as análises mostraram que as hipóteses adotadas pela IMO não representam a realidade pois as avarias não obedecem uma escala linear com relação as dimensões dos navios. Para o caso de encalhe, as dimensões do navio-tanque têm influência significativa como, por exemplo, para avarias de mais de 30% do comprimento, a probabilidade para um navio-tanque de 300m corresponde a 30%, enquanto para um navio de comprimento 185 m esta probabilidade é de 25%. Por sua vez, a regulamentação da IMO considera que uma probabilidade de 25% para todos os navios.

Para o caso de colisão, a análise realizada por Pedersen (2000) para dois grupos de navios, isto é, navios de comprimento abaixo de 100 m e navios maiores de 100 m, revelou que o grupo constituído pelos navios pequenos tinha uma probabilidade maior a grandes avarias. Para as avarias cujo comprimento fosse maior do que 15% do comprimento do navio, a probabilidade era de 20% para o grupo de navios pequenos e de 17% para o grupo dos navios maiores.

3.3 Conceituação do Modelo Probabilístico

O estudo quantitativo de qualquer fenômeno físico torna necessário à implementação de um modelo matemático que o descreva, sua representação (determinística ou probabilística) dependendo da natureza do fenômeno. Para tanto, torna-se importante caracterizar adequadamente o que se entende por modelo determinístico e/ou probabilístico. Na modelagem determinística, a definição das condições de contorno (de espaço ou de tempo) sob as quais ocorre um experimento definem, de uma maneira bastante precisa, os resultados do mesmo. Na natureza, muitos fenômenos podem ser explicados através desse modelo como, por exemplo, a queda livre de um corpo através do emprego das leis de gravitação.

Existem, contudo, outras situações em que o modelo determinístico é incapaz de representar o fenômeno físico em estudo. Esses modelos são denominados não determinísticos ou probabilísticos e seu emprego define um comportamento médio para o fenômeno físico observado, isto é, as condições de contorno da experimentação não definem um resultado numérico específico para a variável em estudo, mas o valor mais provável da mesma e, portanto, sua lei de probabilidade.

Em outras palavras, em um modelo determinístico a lei que representa o fenômeno e suas condições de contorno é capaz de caracterizar de maneira única o resultado esperado, enquanto que no modelo probabilístico, essas mesmas considerações são apenas capazes de apresentar a expectativa de um determinado resultado.

Conforme apresentado no item anterior, a aplicação do método probabilístico requer a obtenção da probabilidade de uma série de eventos para o qual torna-se necessário conhecer as funções de densidade de probabilidade associadas ao evento. A função densidade de probabilidade $f(x)$ representa uma função contínua da distribuição de ocorrência do evento. A função densidade de probabilidade unidimensional $f(x)$, Figura 3.11, está definida para um domínio de possíveis eventos que variam entre um valor mínimo X_1 e um valor máximo X_2 . A integral da função densidade $f(x)$ entre esses limites resulta no valor unitário, isto é, a probabilidade de ocorrência de qualquer evento do domínio $X_1 \leq x \leq X_2$ é 100%. Este conceito é apresentado na expressão;

$$P(X_1 \leq x \leq X_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = 1 \quad (3.12)$$

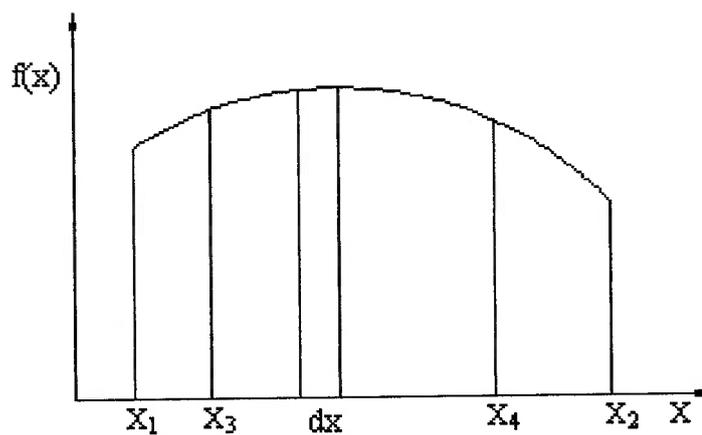


Figura 3.11 – Função densidade de probabilidade unidimensional.

O interesse em aplicações de cálculo probabilístico, entretanto, está associado em conhecer a probabilidade de um evento específico. Essa probabilidade é nula uma vez que o intervalo δx tende a zero e, portanto, o que se deseja conhecer é a probabilidade do evento definido em um intervalo como, por exemplo, entre os valores X_3 e X_4 (eq. 3.13) cujo resultado necessariamente é menor do que o valor unitário.

$$P(X_3 \leq x \leq X_4) = \int_{X_3}^{X_4} f(x) dx \quad (3.13)$$

A função densidade de probabilidade pode também representar eventos bidimensionais, como apresentado esquematicamente na Figura 3.12 em que a função densidade de probabilidade $f(x, y)$ está definida no domínio $X_1 \leq x \leq X_2$ e $Y_1 \leq y \leq Y_2$. De maneira análoga ao problema unidimensional, a probabilidade entre os limites do domínio (x, y) é obtida pela integral dupla (Eq. 3.14) correspondendo geometricamente ao volume abaixo da superfície definida pela curva $f(x, y)$.

$$P(X_1 \leq x \leq X_2 : Y_1 \leq y \leq Y_2) = \int_{X_1}^{X_2} \int_{Y_1}^{Y_2} f(x, y) dx dy = 1 \quad (3.14)$$

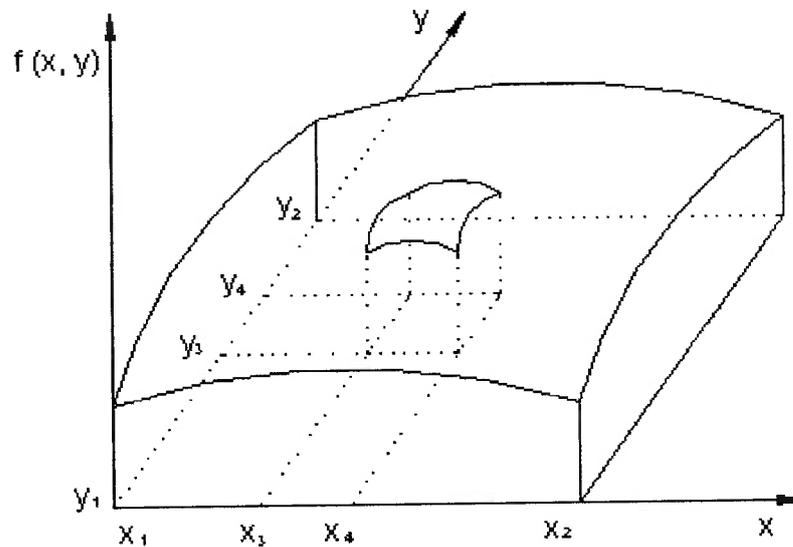


Figura 3.12 – Probabilidade de um evento bidimensional.

Por sua vez, o cálculo da probabilidade de um evento específico, limitado às mesmas restrições conceituais da estimativa unidimensional, pode ser obtido, para o intervalo $[X_3, X_4 : Y_3, Y_4]$, através da equação:

$$P(X_3 \leq x \leq X_4 : Y_3 \leq y \leq Y_4) = \int_{X_3}^{X_4} \int_{Y_3}^{Y_4} f(x, y) dx dy \leq 1 \quad (3.15)$$

A teoria pode ser estendida para eventos multidimensionais, situação na qual a probabilidade é obtida por uma integral múltipla, como indicado pela expressão abaixo.

$$P(x, y, z, w, \dots) = \int \int \int \int f(x, y, z, w, \dots) dx dy dz dw \dots \quad (3.16)$$

Como descrito anteriormente, a aplicação do método probabilístico requer o conhecimento das funções densidade de probabilidade relativas aos diversos eventos, isto é, a localização e extensão longitudinal, transversal e vertical da avaria. Essas distribuições foram obtidas através de levantamento estatístico realizado sob o auspícios da IMO. Para exemplificar o procedimento de avaliação probabilística suporemos que o navio em análise seja subdividido exclusivamente por anteparas transversais, isto é, que somente duas variáveis aleatórias, a localização e extensão da avaria caracterizem esse evento bidimensional. Neste caso a distribuição de probabilidade será caracterizada por uma função densidade de probabilidade bidimensional $f(l,c)$ cuja integral fornecerá o valor da probabilidade (Fig. 3.13). A distribuição de probabilidade tridimensional é semelhante a distribuição bidimensional, mas não pode ser representada como esta, pois a distribuição tridimensional requereria um espaço de quatro dimensões.

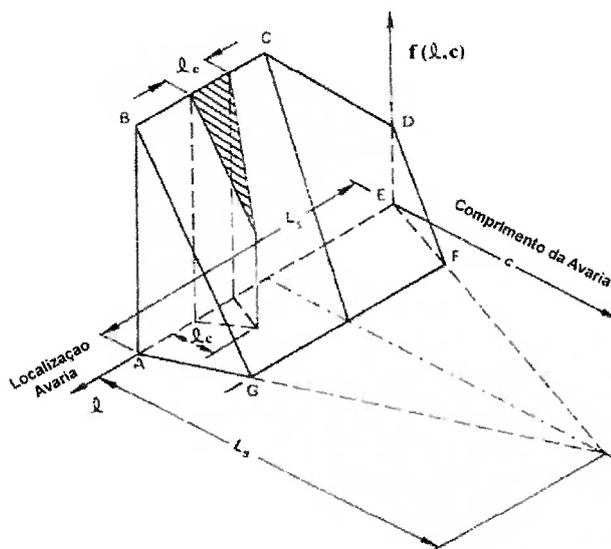


Figura 3.13 – Função densidade de probabilidade simplificada da extensão e localização da avaria

Finalmente, a figura 3.14 ilustra todas as combinações possíveis de avarias em que cada ponto da região definida pelo triângulo isósceles representa uma possível combinação de extensão e localização de uma avaria. A probabilidade de um certo evento, por exemplo, a avaria de um único compartimento i ($i = 1, 2, \dots$) é representada pela integral definida na região representada pelo triângulo i . É importante acrescentar que os índices mostrados na Figura 3.14 representam as probabilidades de mais de um compartimento ser variado, isto é, uma avaria, de pequena extensão, que ocorra na antepara estanque necessariamente ocasiona um

alagamento de dois compartimentos. A integral obtida a partir da região definida por i, j representará, portanto, a probabilidade deste dois compartimentos serem avariados.

É importante ressaltar que o cálculo de probabilidade considera que os eventos localização e extensão da avaria sejam representados por funções densidade de probabilidade independentes. Essa hipótese, apresentada pela equação abaixo, foi adotada para as aplicações em navios de passageiros, de carga geral, bem como para o caso de navios-tanque.

$$P_i = \iint f(l, c) dc dl = \int f(l) f(c) dc dl \quad (3.17)$$

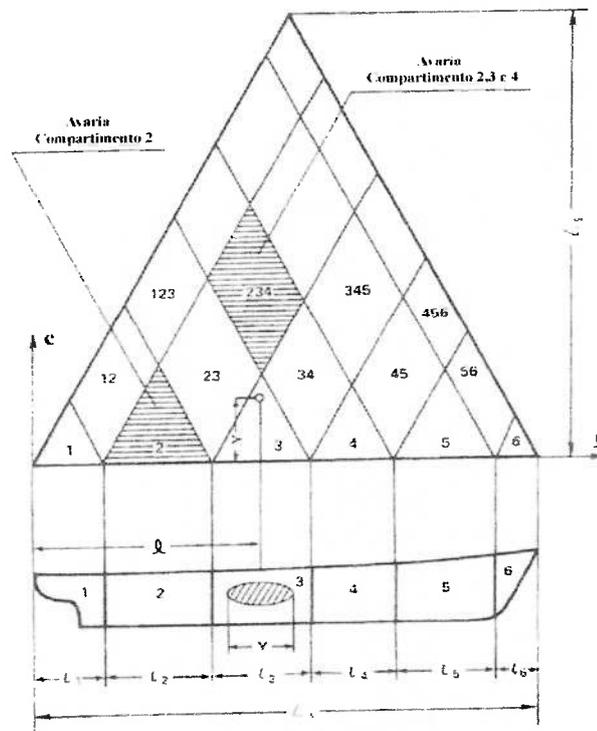


Figura 3.14 – Diagrama ilustrativo definições probabilidades $P_i, P_{i,j}$, etc. (Fonte: Robertson, 1974).

3.5 Prevenção da poluição pelo vazamento de óleo no caso de colisão ou encalhe de um navio-tanque

As regulamentações atuais de projeto de navios-tanque incluem procedimentos que visam minimizar a poluição provocada em caso de acidente, isto é, estabelecem requisitos quanto à minimização do derramamento de óleo. Os

regulamentos baseados na MARPOL 73/78 especificavam requisitos quanto às dimensões da avaria, prescreviam a verificação do derramamento de óleo hipotético (“hypothetical outflow of oil”) para avarias do costado e do fundo, bem como estabeleciam limitações para o volume, dimensões e arranjo dos porões (tanques) de carga. Estas regras, como as primeiras regras de estabilidade, eram determinísticas e prescritivas.

Mais recentemente, com a introdução do método probabilístico para verificar a estabilidade, a IMO propôs um procedimento alternativo, na mesma linha, para avaliar o projeto de navios-tanque que minimizem os efeitos de derramamento de óleo em caso de avarias acidentais do fundo e dos costados. O procedimento de cálculo para a avaliação do navio-tanque quanto às suas qualidades de minimização do derramamento de óleo envolve o emprego das funções de densidade de probabilidade relacionadas às características da avaria, o volume derramado baseado em princípios hidrostáticos e quase-hidrodinâmicos e a determinação dos parâmetros característicos definidos pela IMO (probabilidade de derramamento nulo, volume derramado médio e probabilidade do volume de derramamento extremo). A partir dos parâmetros característicos, a regra define o Índice de Prevenção à Poluição (“Pollution Prevention Index”) como uma média ponderada cujo valor deve ser maior ou igual ao valor definido pelo critério.

É importante ressaltar que as probabilidades de avaria dos diversos compartimentos e, conseqüentemente, os volumes derramados estão intrinsecamente relacionados à subdivisão do navio, isto é, aos espaçamentos do costado duplo, do fundo duplo e da disposição transversal e longitudinal das anteparas estanques. Os parâmetros definidos pela regra são definidos da seguinte maneira:

- *Probabilidade de vazamento de óleo nulo, P_0* : Este parâmetro representa a probabilidade de não ocorrer um vazamento de óleo em caso de avaria, ou seja, as condições de avaria (fundo e costado) do casco que não acarretam a poluição do mar. Esta probabilidade é dada pela expressão:

$$P_O = \sum_{i=1}^n p_i K_i \quad (3.18)$$

em que: i - representa cada compartimento/grupo de compartimentos;

p_i - probabilidade de alagamento do compartimento ou grupo de compartimentos;

$K_i = 0$ (caso haja vazamento de óleo) e 1 (avaria não acarreta vazamento, compartimento sem óleo).

- *Vazamento médio de óleo, O_M* : O vazamento médio de óleo médio corresponde à somatória do produto entre o volume vazado e a respectiva probabilidade de ruptura do compartimento ou grupo de compartimentos. Este parâmetro é expresso como uma fração da capacidade total do navio supondo que os tanques estejam 98% cheios.

$$O_M = \sum_{i=1}^n \frac{p_i O_i}{C} \quad (3.19)$$

em que: O_i - Óleo derramado (m^3) em consequência da ruptura do compartimento ou grupo de compartimentos;

C - Capacidade total dos tanques de óleo do navio (m^3).

- *Vazamento extremo de óleo, O_E* : Este parâmetro representa o valor do pior cenário de derrame de óleo, isto é, corresponde à média ponderada do décimo superior de todos os derramamentos de óleo possíveis. Seu valor descreve o comportamento do navio submetido às avarias extremas. Para sua obtenção considera-se a somatória do produto volume derramado com a respectiva probabilidade relativa aos 10% superiores da distribuição de probabilidade acumulada. Analogamente ao parâmetro anterior, o valor é apresentado como fração da capacidade total de armazenamento com os tanques 98% cheios sendo multiplicado por 10 para emprego no índice de prevenção à poluição.

$$O_E = 10 \left(\sum \frac{P_{ie} O_{ie}}{C} \right) \quad (3.20)$$

em que: P_{ie} - probabilidade do compartimento ou grupo de compartimento ser rompido associado à situação extrema de vazamento, ou seja, para a faixa entre 0,9 e 1,0 da distribuição de probabilidade acumulada do vazamento de óleo.

O_{ie} - Volume de óleo derramado (m^3) a partir da ruptura de compartimento ou grupo de compartimentos que acarretam situações de avaria extrema.

Para caracterizar as qualidades do navio-tanque de reduzir a poluição ambiental no caso de ocorrência de um encalhe ou de uma colisão, os membros do Sub-Comitê de Estabilidade e Subdivisão da IMO estabeleceram um índice adimensional, denominado Índice de Prevenção à Poluição, E , composto pelos três parâmetros acima descritos. A expressão obtida é dada por:

$$E = k_1 \frac{P_0}{P_{OR}} + k_2 \frac{0,01 + O_{MR}}{0,01 + O_M} + k_3 \frac{0,025 + O_{ER}}{0,025 + O_E} \geq 1,0 \quad (3.21)$$

em que k_1 , k_2 e k_3 (= 0,5, 0,4 e 0,1) representam fatores de ponderação da importância de cada parâmetro na capacidade de minimizar a poluição ambiental e P_{OR} , O_{MR} e O_{ER} são os valores de referência do navio de casco duplo de mesma capacidade. Para obter os valores de referência, avaliaram-se navios que representavam a última tecnologia da época em navios de casco duplo, a tabela 3.2 apresentando os parâmetros P_{OR} , O_{MR} e O_{ER} para as quatro classes de navios-tanque (5.000TPB, 60.000TPB, 150.000TPB e 283.000TPB) estudadas.

Tabela 3.2 – Referência dos navios de casco duplo (navio não sobrevive à avaria)⁸

TPB	Parâmetros de vazamento de óleo		
	P_{OR}	O_{MR}	O_{ER}
5.000,00	0,81	0,017	0,127
60.000,00	0,81	0,014	0,104
150.000,00	0,79	0,016	0,113
283.000,00	0,77	0,013	0,085

⁸ A IMO considera duas situações. A primeira, para análise preliminar, considera que as avarias não ocasionam a perda do navio e, portanto, os limites de referência são muito mais brandos. Na segunda ocorre a perda do navio.

O procedimento de aplicação das regras da IMO inicia-se com a montagem dos padrões de avaria empregando as funções densidade de probabilidade. A aplicação das funções densidade de probabilidade para a compartimentagem do navio define a probabilidade de ocorrência de cada incidente de avaria. Esse processo é realizado para dois casos distintos; colisão, isto é, avaria do costado e encalhe, isto é, avaria do fundo. Adicionalmente, para a avaria do fundo, três condições de maré (0,0, 2,0 e 6,0 metros) são analisados.

Na obtenção dos parâmetros de derramamento para a primeira situação, a IMO estabeleceu que todo óleo armazenado nos tanques é perdido, enquanto que em avarias devido a encalhe, o volume derramado é obtido através do equilíbrio hidrostático. Esse balanço de pressão é realizado considerando o navio encalhado em um baixo, no calado original, sem banda e trim. Adicionalmente, o tanque avariado está submetido a uma pressão de pressão de 0,05 bar devido ao sistema de gás inerte e o espaço do fundo duplo localizado abaixo dos tanques “captura” uma porção do volume de óleo derramado (Fig. 3.15) que, de acordo com a MARPOL 73/78, apresenta uma composição de 50% de óleo e 50% de água.

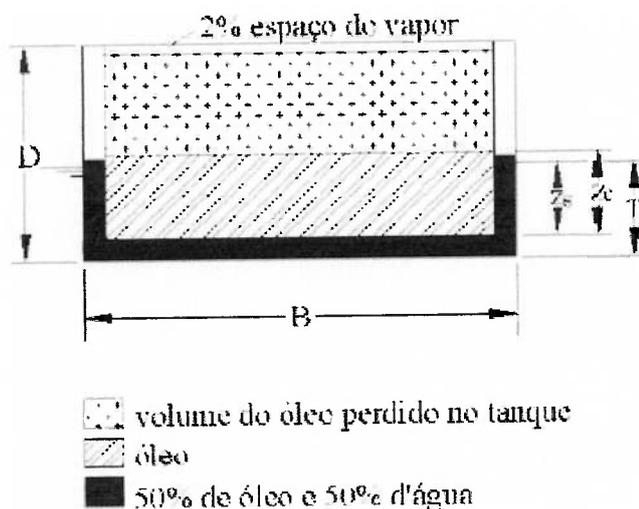


Figura 3.15 - Esquema do vazamento de óleo para avaria no fundo

A equação que fornece a condição de equilíbrio e, conseqüentemente, permite determinar os volumes é dada pela expressão:

$$g \rho_c Z_c + 100 \Delta P = g \rho_s Z_s \quad (3.22)$$

em que: z_c - altura do óleo que restou no tanque avariado (m);

ρ_c - densidade do óleo ($0,9t/m^3$);

g - aceleração da gravidade ($9,81m/s^2$);

Δp - pressão da carga do tanque / dispositivo de vácuo (0,05 bar);

z_s - altura do calado menos o espaçamento do fundo duplo (m);

ρ_s - densidade da água (t/m^3);

A obtenção dos parâmetros de derramamento apresentados nas equações 3.18, 3.19 e 3.20 podem ser melhor descritas através da curva de distribuição acumulada do derramamento de óleo. Essa curva pode ser facilmente obtida quando todas as combinações possíveis de avaria estejam avaliadas e dispostas em ordem crescente de dimensão do vazamento. A soma das probabilidades é realizada, iniciando-se com aquela correspondente ao mínimo vazamento de óleo, acrescentando sucessivamente volumes maiores até chegar-se ao valor máximo. A distribuição de probabilidade acumulada obtida, como apresentada na Figura 3.16, permite o cálculo do derramamento médio através da área do gráfico acima da curva da função acumulada até a linha horizontal $F = 1$. A confecção dessa curva permite, adicionalmente, a obtenção de outros parâmetros de interesse como, por exemplo, o derramamento efetivo em que o derramamento médio é dividido pela probabilidade de haver vazamento. Finalmente, caracterizar as estatísticas relativas ao derramamento mediano, significativo e extremo.

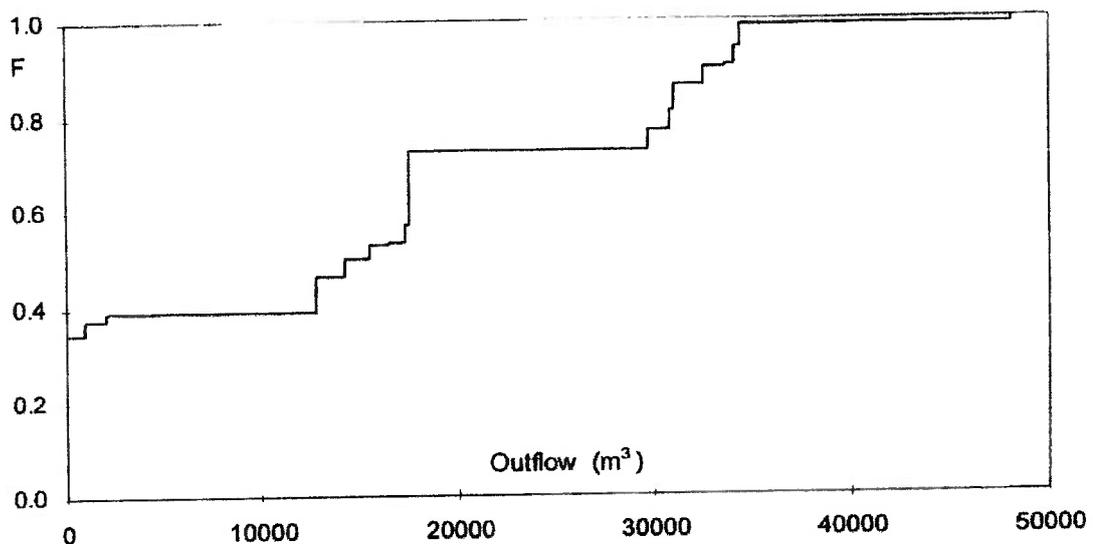


Figura 3.16 – Função de distribuição acumulada do derramamento de óleo de um navio tanque de casco duplo. (Fonte: Pawlowski, 1996).

Por ser um procedimento rigoroso e de demanda computacional intensa, a IMO solicitou ao Sub-Comitê de Gases e Líquidos a Granel o desenvolvimento de uma metodologia alternativa simplificada para facilitar a aplicação em projetos de novos navios. Sirkar, et. al. (1997) desenvolveram um procedimento simplificado para avaliação do desempenho quanto ao derramamento de óleo que, ao invés de determinar individualmente cada evento de avaria e sua respectiva probabilidade, considera a probabilidade de avaria exclusiva a cada tanque, isto é, a probabilidade do rompimento daquele tanque específico, isolado ou em conjunto com outros tanques, e que corresponde à soma das probabilidades para todos os casos de avaria que envolve o tanque em análise.

A idéia implementada no procedimento simplificado envolve o estabelecimento da probabilidade correspondente à limitação da extensão da avaria por um plano horizontal, vertical ou horizontal, isto é, considerando dois planos transversais d_1 e d_2 , a probabilidade desse espaço (tanque) ser avariado seria dada por:

$$p = 1 - p_b(d_1) - p_a(d_2) \quad (3.23)$$

essa probabilidade incluindo todas as avarias que afetam a região e não somente aquelas que avariam diretamente o espaço.

Uma diferença importante quanto à aplicação do método simplificado é com relação ao volume de óleo retido no fundo duplo quando dois ou mais tanques estão localizados acima. Esse volume é estimado proporcionalmente às capacidades dos tanques de carga envolvidos, uma vez que o método simplificado não associa uma avaria a um tanque específico. A estimativa dos parâmetros de derramamento, isto é, a probabilidade de vazamento nulo e o vazamento médio, são obtidos considerando o bloco de carga como se fosse um tanque. Finalmente, a metodologia simplificada possibilita o cálculo do vazamento extremo uma vez que a distribuição do derramamento por volume não é conhecida.

Um dos primeiros trabalhos empregando o método probabilístico para avaliar a capacidade do navio quanto à minimização do derramamento de óleo devido a uma

colisão ou encalhe é devido a Hook (1991). Com o intuito de analisar diferentes arranjos de navios-tanque com relação às expectativas de vazamento de óleo, o autor utilizou as funções densidade de probabilidade dos regulamentos de 1973 para subdivisão e estabilidade de navios de passageiros e determinou as probabilidades de derramamento de óleo e as expectativas do volume de óleo derramado.

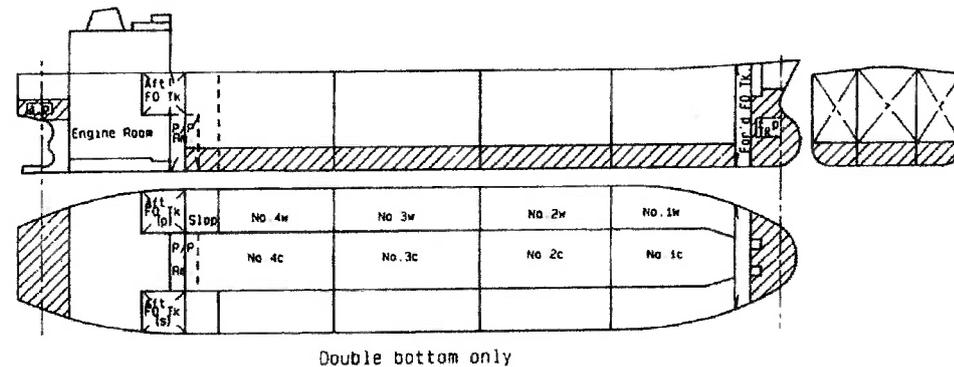
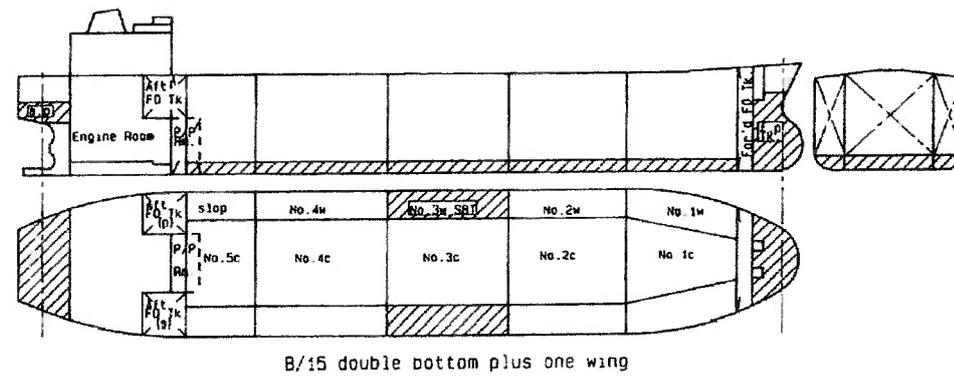
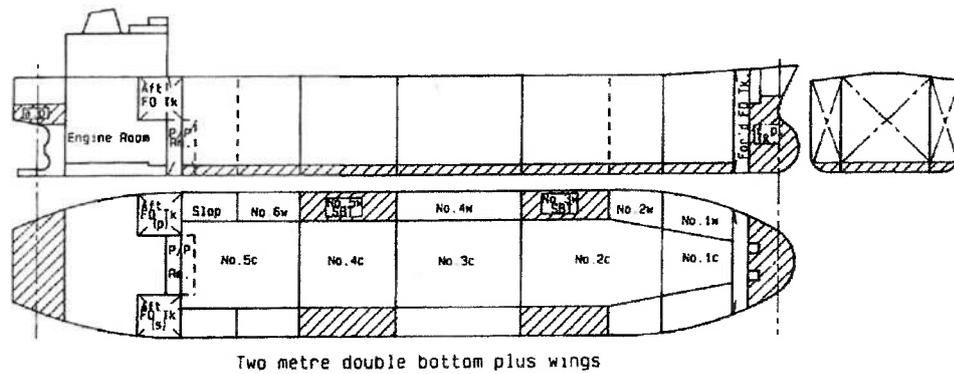
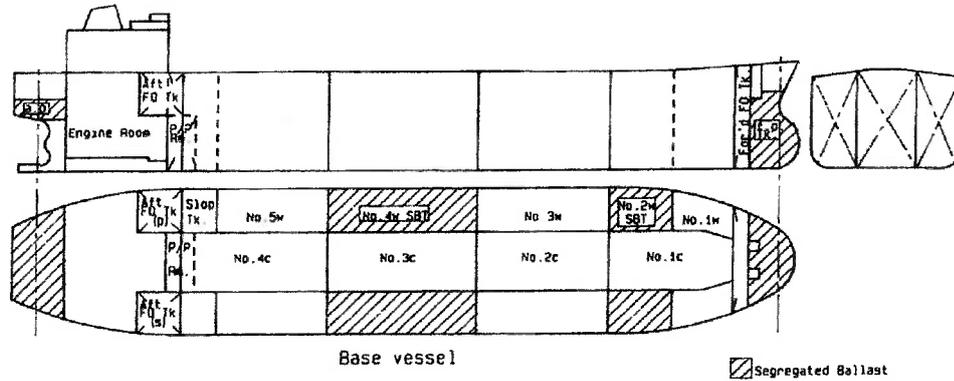
No desenvolvimento do trabalho de comparação das diversas possibilidades de arranjo, o autor utilizou, como navio base, um navio-tanque de 98.000 TPB construído em 1978 e que, portanto, ainda não atendia os requisitos de tanques segregados localizados protetoramente. Como citado, há diversas formas de prover tanques de lastro segregados, incluindo a instalação de fundo duplo, costado duplo e arranjo com tanques de asa. Para avaliar a eficiência em reduzir a poluição ambiental por óleo foram avaliados seis arranjos distintos (Fig. 3.17):

- (a) Navio convencional (base) com tanque asa de lastro;
- (b) Navio com fundo duplo de dois metros e tanque de lastro no costado;
- (c) Navio de fundo duplo $B/15$ (2,93m) e par de tanques de lastro no costado;
- (d) Navio com altura de fundo duplo suficiente para lastro segregado;
- (e) Navio de casco duplo com variação de subdivisão longitudinal e
- (f) Navio de antepara horizontal (“mid-deck”) e lastro segregado (costado duplo).

Os resultados da comparação entre os projetos alternativos com relação à eficiência em minimizar o derramamento de óleo é apresentado na tabela 3.3, na qual são fornecidas as probabilidades de vazamento de óleo, bem como as expectativas da quantidade de óleo derramado tanto em colisões, como em encalhes.

O trabalho possibilitou que algumas conclusões fossem obtidas, entre as quais, que alguns arranjos não contribuem para a redução da expectativa de derramamento de óleo acarretando até, em alguns casos, uma deterioração como, por exemplo, a instalação de tanques de lastro localizados protetoramente que encorajam tanques centrais maiores e menores tanques de asa. O estudo mostra que a instalação de anteparas horizontais apresentam-se particularmente efetivas na redução da expectativa de derramamento uma vez que permitem o aumento do duplo costado para o mesmo volume de carga transportada. Outra desvantagem citada para navios

de fundo duplo está associada a que, em encalhes, a avaria acarretaria uma maior perda de empuxo devido ao espaço livre existente e, conseqüentemente, condições de carregamento mais severas, desvantagem inexistente em navios de antepara horizontal.



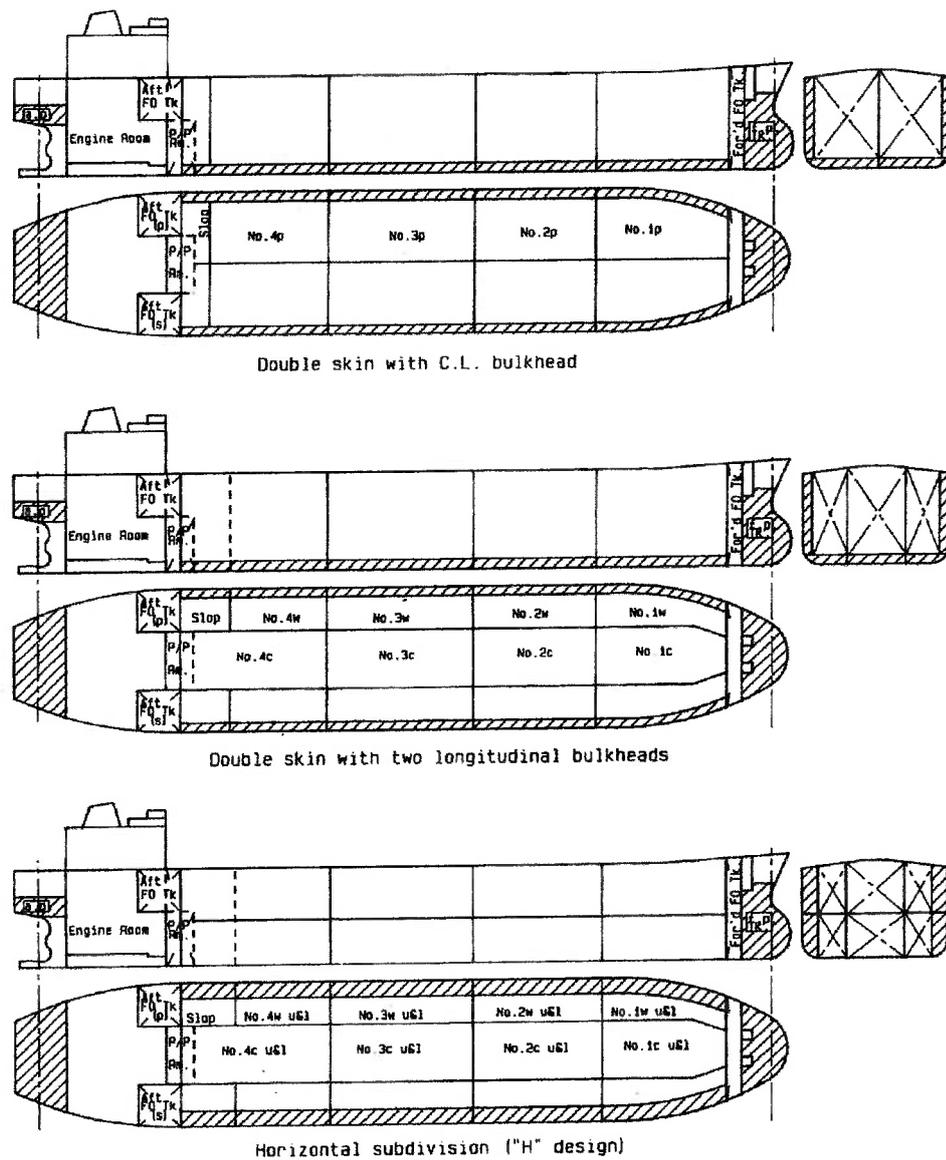


Figura 3.17 - Esquema arranjos avaliados (Fonte: Hook, 1991).

Tabela 3.3 – Probabilidade de Vazamento de Óleo (Fonte: Hook, 1991).

Arranjos	Colisão		Encalhe	
	Probabilidade Vazamento	Expectativa Vazamento (m ³)	Probabilidade Vazamento	Expectativa Vazamento (m ³)
Navio base	0,7581	7864	0,9692	4191
DF (2m) +TL	0,8261	11230	0,3267	1179
DF (2,93m) + TL	0,8351	10436	0,1220	576
DF	0,8914	9702	0,0010	4
CD (AL1/CL)	0,7185	9930	0,3267	844
CD (AL2)	0,7185	7877	0,3267	844
AH ("Mid-deck")	0,6295	7211	0,0000	0

DF – Fundo duplo; TL – Tanque de lastro; CD – Casco duplo; AL1/CL – Antepara longitudinal central; AL2 – Duas anteparas longitudinais e AH – Antepara horizontal.

Finalmente, nos comentários do trabalho, o autor acrescenta dois casos adicionais (navio tipo “mid-deck” com apenas uma antepara longitudinal central e navio tipo casco duplo com 24 tanques) que mostram a necessidade de cuidadosa comparação de alternativas na escolha entre casco duplo e antepara horizontal (Fig. 3.18). O gráfico apresenta a variação da expectativa de vazamento de óleo em função da razão de incidência entre colisões e encalhes mostrando que, caso os navios estudados operem em rota com reduzida possibilidade de encalhe, o navio de convés horizontal (“mid-deck”) apresenta melhor desempenho, entretanto, o resultado final depende do volume dos tanques, como pode ser observado pelo aumento do número de anteparas transversais (casco duplo – 24 tanques).

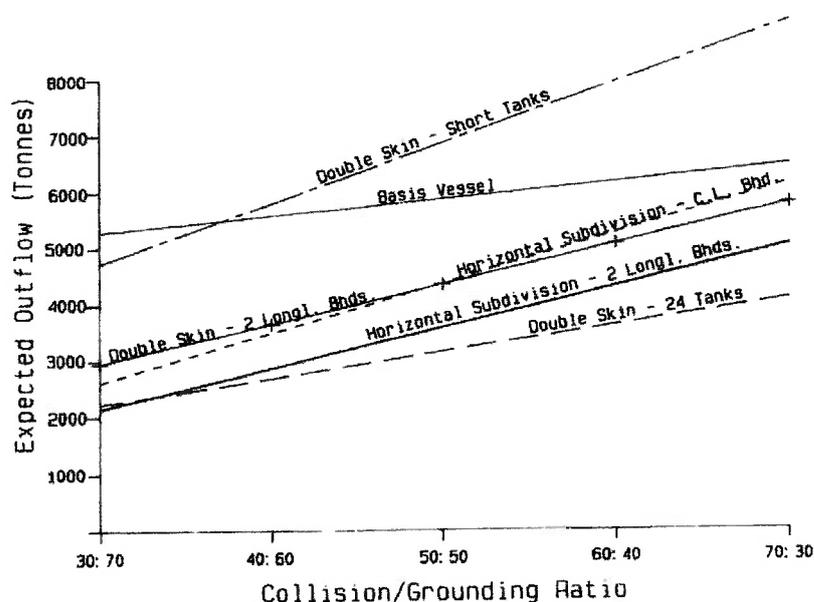


Figura 3.18 – Expectativa de derramamento de óleo (Fonte: Hook, 1991).

As normas da IMO quanto ao problema de derramamento de óleo podem ser sub-divididas em duas partes: As regras da IMO Regulamentação N^o. 22-24 que estabelecem volumes máximos e os requisitos de volume derramado hipotético e aquelas que empregam o método probabilístico para avaliação de projetos alternativos em relação a navios-tanque padrão de casco duplo (Regulamento 13 F do anexo I da MARPOL 73/78). Com relação às normas adotadas pela IMO tanto Sinkar (1997), como Pawlowski (1996) afirmam que o procedimento das primeiras é prescritivo e, portanto, sugerem que qualquer novo padrão deva ser orientado à avaliação de desempenho o que permitiria maior flexibilidade, enquanto mantém a

segurança. Adicionalmente, o procedimento de definir a extensão longitudinal da avaria não considera adequadamente o aumento de probabilidade de avaria em uma antepara transversal à medida que o espaçamento entre anteparas transversal é reduzido.

Por outro lado, os dois autores afirmam que os coeficientes da expressão do índice de prevenção à poluição, E , tem gerado intensa discussão no âmbito da IMO. Alguns membros argumentam que a escolha dos coeficientes de ponderação deveria ter uma base racional associada aos benefícios de se evitar derramamento e dos impactos ambientais e econômicos entre as dimensões do derramamento de óleo. Os valores atuais desses coeficientes foram basicamente estipulados para assegurar a equivalência entre navios de duplo casco e de convés horizontal, porém muitos pesquisadores acreditam que a melhor forma seria medir, de alguma forma, o “dano ambiental”. Sinkar (1997), seguindo sugestão de outros autores, sugere o emprego dos custos incorridos em um vazamento de óleo como forma de quantificar o efeito sobre o meio ambiente.

Em seu trabalho, Pawlowski (1996), analisando o conceito probabilístico aplicado a navios-tanque, critica a inclusão do parâmetro vazamento extremo sugerindo que o processo de avaliação poderia possuir duas variáveis globais (probabilidade de derramamento nulo e vazamento médio de óleo) e duas variáveis locais. As variáveis globais caracterizariam a capacidade global do navio sendo, entretanto, insuficientes para fins regulamentais, uma vez que dois navios poderiam ter medidas de méritos globais idênticas, porém diferir em suas capacidades reais de proteção em determinada posição ao longo do casco. Esses parâmetros locais serviriam para evitar que qualquer parte do navio seja deixada aquém do mínimo desejado para o segurança do meio ambiente. É interessante ressaltar que essa consideração local é, na regra atual, caracterizada pelo limite ao tamanho máximo dos tanques.

Continuando sua análise, Pawlowski (1996) argumenta que, dos parâmetros empregados na expressão 3.21, a inclusão da probabilidade de derramamento nula é

óbvia uma vez que mesmo um derramamento pequeno pode ter conseqüências desastrosas em uma área ambientalmente sensível. É importante notar que a probabilidade de vazamento nula independe da subdivisão do espaço de carga sendo, entretanto, função da largura do costado duplo e da máxima profundidade de avaria e, conseqüentemente, do comprimento do navio. Cabe ainda ressaltar que, para um mesmo valor de P_0 , o efeito do comprimento do navio representa larguras de costado duplo relativamente maiores para os navios de menores.

Por sua vez, a importância do derramamento médio reflete o efeito da compartimentagem do navio na mitigação do derramamento, isto é, a divisão do espaço de carga através de anteparas transversais e longitudinais tem uma influência significativa no valor médio do derramamento. Por outro lado, a inclusão do derramamento extremo, por ser um evento improvável e especulativo, apresenta-se como de menor importância para caracterizar a capacidade do navio em minimizar a poluição. Essa figura de mérito é pouco significativa, pois independe do número e localização das anteparas longitudinais e a subdivisão transversal tem um efeito modesto. Seu valor reflete, de certa maneira, a uniformidade da distribuição dos tanques. Dessa forma, o autor sugere que, do ponto de vista de uma metodologia orientada ao desempenho, os parâmetros globais sejam estabelecidos através de limites, isto é,

$$P_0 \geq R_0$$

$$O_M \leq R_M$$

em que R_0 e R_M são os limites dos parâmetros. As variáveis globais seriam suficientes no caso da subdivisão do navio ser ótima, entretanto, como esse não é normalmente o caso, torna-se necessário prover uma salva-guarda adicional para evitar um valor excessivo em alguma parte do navio. Considerando que, para diferentes arranjos com um mesmo parâmetro de vazamento médio, aquele que possuir menor variância seria aquele melhor sob o ponto de vista ambiental. Para tanto o autor sugere a obtenção de parâmetros locais que se constituem em um tipo de média móvel ao longo do navio cuja equalização ao longo do comprimento equivale a uma minimização da variação da quantidade de óleo derramado. Os parâmetros locais são definidos pelas expressões:

$$P_j = \frac{\sum p_{Bi}}{\sum p_i} \quad \text{para } i \in I_j \text{ e } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.24)$$

$$O_j = \frac{\sum p_i O_i}{\sum p_i} \quad \text{para } i \in I_j \text{ e } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.25)$$

em que p_{Bi} corresponde a probabilidade de alagar um compartimento que não contém óleo e o subconjunto I_j compreende os tanques de carga ao longo do navio.

Ao contrário de Pawlowski (1996) que sugere a adoção de parâmetros locais, Sinkar (1997) sugere que os coeficientes da equação 3.21 sejam determinados através de uma avaliação dos custos associados ao derramamento de óleo. O procedimento proposto considera que para cada caso de avaria existe uma probabilidade associada à dimensão do derramamento e que, em função dessa dimensão, os custos do vazamento de óleo podem ser calculados; o desempenho ambiental de um projeto sendo inversamente proporcional ao custo do vazamento de óleo médio total.

Para aplicar essa idéia é, entretanto, necessário desenvolver uma base de dados sobre custos de derramamento de óleo que, entretanto, ainda é deficiente principalmente com relação a derramamentos de menor volume. Os custos do derramamento ou da limpeza dependem do tamanho do vazamento e podem ser divididos em quatro parcelas: Custos associados aos danos provocados nos recursos ambientais, os custos de limpeza, os custos associados às perdas de terceiros e o custo da carga perdida. A aplicação da proposta requer a definição de uma curva de custo unitário que representa o custo marginal para cada metro cúbico de óleo derramado; a área sob a curva fornecendo o custo total. Essas curvas apresentam algumas características interessantes como, por exemplo, um alto custo inicial nas operações de limpeza, o que acarreta altos custos para pequenos vazamentos, e uma diminuição dos custos com o aumento do derramamento.

O trabalho apresenta duas categorias de análise de custos. A primeira corresponde à estimativa do custo do derramamento que combinada com a função de densidade de probabilidade de vazamento permitiria obter custo ponderado

probabilístico ambiental. Essa, então, seria a métrica de risco para avaliação do projeto. A segunda categoria seria uma análise de custo/benefício do navio-tanque que poderia ser adicionalmente utilizada por armadores para verificar as vantagens e desvantagens em exceder os padrões mínimos estabelecidos pelas regras.

Ainda com relação ao trabalho de Sinkar (1997), deve-se citar o estudo paramétrico desenvolvido para 210 variantes de navios-tanque de casco duplo de quatro portes distintos (41K DWT, 98 K DWT, 145 K DWT e 291 K DWT). Alguns resultados são apresentados na Figura 3.19 para o vazamento médio. Esta figura mostra a influência da subdivisão longitudinal na redução do vazamento médio, os maiores ganhos obtidos pela instalação de uma anteparas longitudinal central. Por outro lado, o ganho com a implementação de anteparas adicionais é marginal tanto em relação às anteparas longitudinais, como também às anteparas transversais.

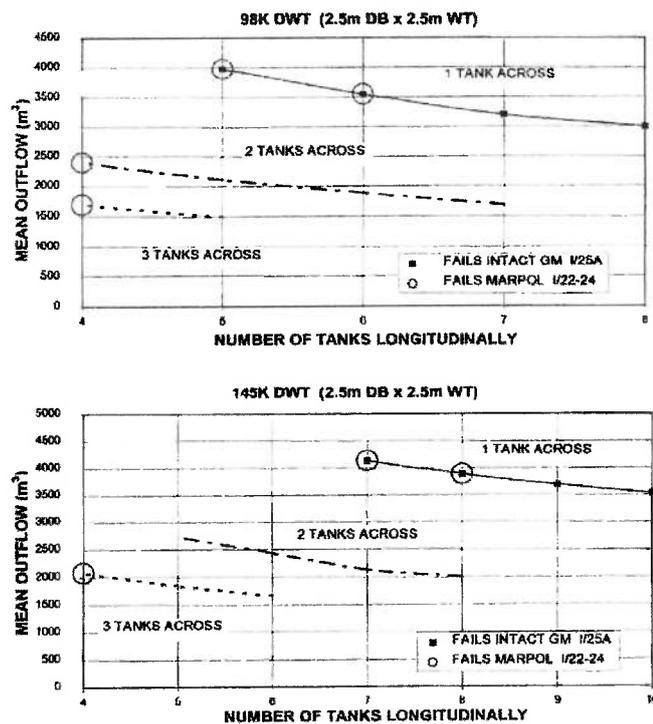


Figura 3.19 – Vazamento médio de óleo (Fonte: Sinkar, 1997).

Finalmente, como colocado por Paik (2003), deve-se ressaltar as funções densidade de probabilidade adotadas pela IMO não refletem os efeitos do projeto estrutural local e a capacidade de absorção de energia da estrutura.

CAPÍTULO 4

4 APLICAÇÃO DO CÁLCULO DE DERRAMAMENTO DE ÓLEO E SEUS RESULTADOS

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do programa para a avaliação de chatas-tanque com relação à possibilidade de derramamento de óleo. Para tanto, após sua implementação, o programa é empregado para estimar o desempenho de quatro chatas-tanque (700 t, 1400 t, 3000 t e 5000 t) em diferentes arranjos dos porões, bem como em diferentes espaçamentos de costado e fundo duplo.

O procedimento implementado está de acordo com o recomendado no Apêndice 8 da MARPOL (1997), em que o requisito necessário de projeto é definido pelo índice de prevenção de poluição, cuja estimativa corresponde a um valor ponderado de três expectativas de derramamento de óleo.

4.1 Metodologia para avaliar a segurança da embarcação-tanque

O desempenho ambiental de uma embarcação é mensurado pela probabilidade de vazamentos de óleo que possam ocorrer e isso envolve a aplicação direta das funções densidade de probabilidade. O procedimento para a estimativa de um número que possa quantificar a segurança da embarcação-tanque envolve três etapas distintas:

- Casos de avarias associadas aos possíveis vazamentos de óleo;
- Cálculo dos parâmetros de vazamento de óleo; e
- Cálculo do Índice de Prevenção de Poluição.

A determinação de um número que pode quantificar o grau de segurança de uma embarcação-tanque foi especificado em 1995 pela IMO. O regulamento

apresenta as funções densidade de probabilidade que estão relacionadas com a localização, comprimento e penetração da avaria.

As figuras 4.1 e 4.2 apresentam respectivamente as definições da avaria do costado e do fundo. Essas definições foram determinadas para uma chata-tanque de acordo com o apêndice 8 da MARPOL (1997). A figura 4.1 (Definição da avaria do costado) mostra as posições para localização longitudinal, dimensões longitudinal e transversal da avaria do costado e apresenta as seguintes considerações:

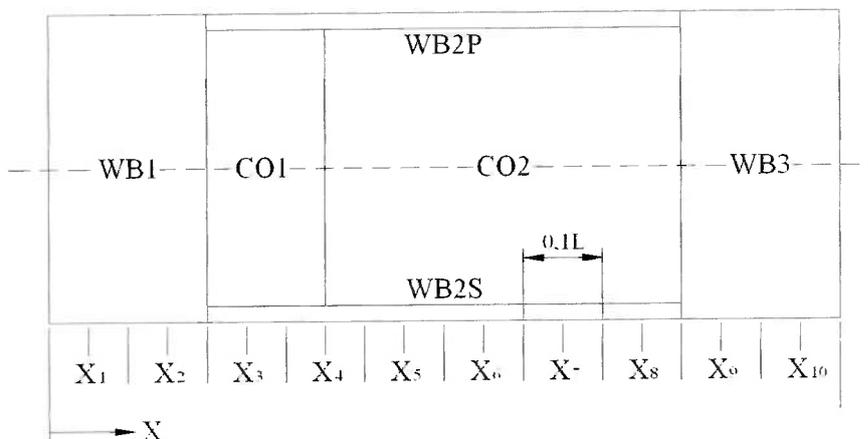
Localização longitudinal em 10 partes =	$L/10$
Extensão longitudinal em 3 partes =	$0,3L/3$
Penetração transversal em 6 partes =	$0,3B/6$

As funções densidade de probabilidade determinam que a extensão longitudinal máxima da avaria do costado é de até trinta por cento do comprimento do navio ($0,3L$) e a penetração transversal máxima é de até trinta por cento da boca do navio ($0,3B$). Para um total de 10 localizações longitudinais, 3 extensões longitudinais e 6 extensões transversais é possível determinar 180 ($10 \times 3 \times 6$) avarias independentes.

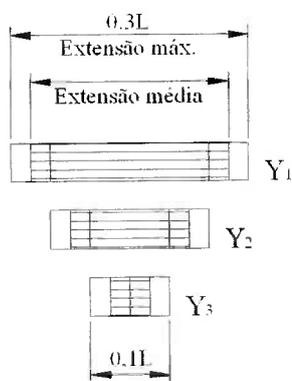
A figura 4.2 (Definição da avaria do fundo) mostra as posições para localização longitudinal, dimensões longitudinal e vertical da avaria do fundo, e apresenta as seguintes considerações:

Localização longitudinal em 10 partes =	$L/10$
Extensão longitudinal em 8 partes =	$0,8L/8$
Penetração vertical em 6 partes =	$0,3D/6$

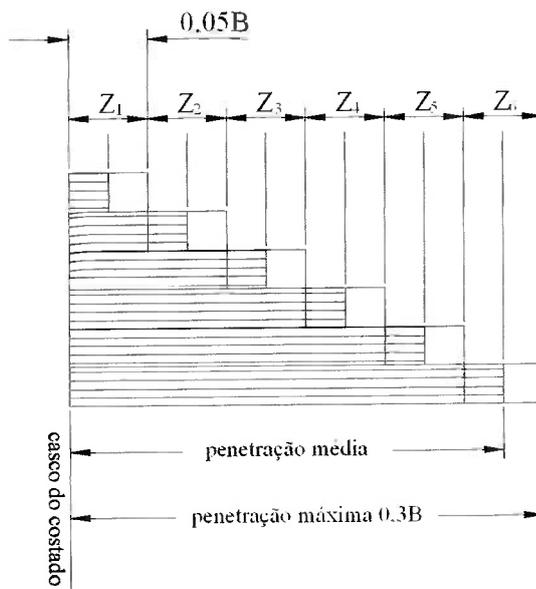
Analogamente, as funções densidade de probabilidade determinam que a extensão longitudinal máxima da avaria do fundo é de até oitenta por cento do comprimento do navio ($0,8L$) e a penetração vertical máxima é de até trinta por cento do pontal do navio ($0,3D$). Para um total de 10 localizações longitudinais, 3 extensões longitudinais e 6 penetrações verticais é possível determinar 480 avarias independentes.



Localização longitudinal da avaria

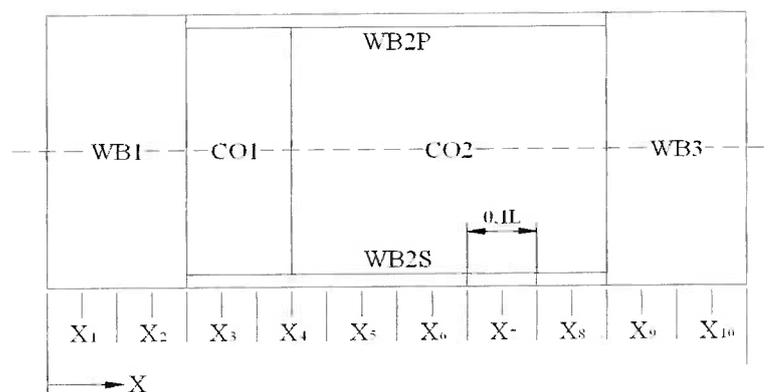


Extensão longitudinal da avaria

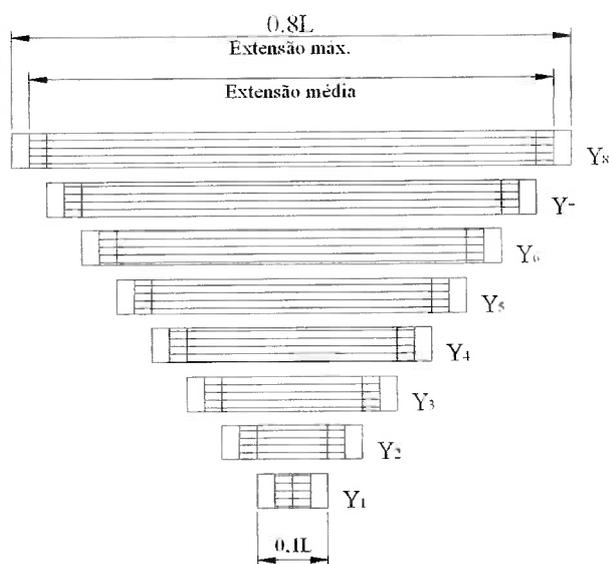


Penetração transversal da avaria

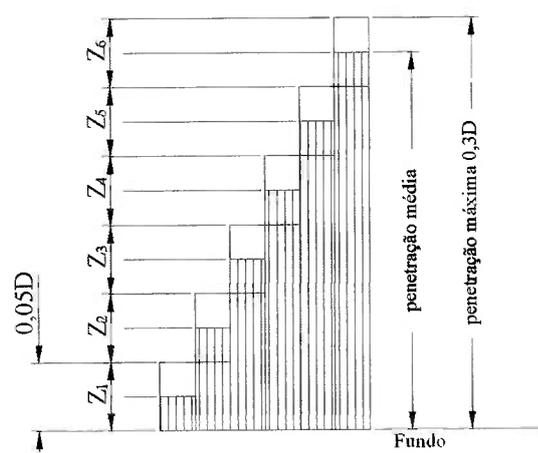
Figura 4.1 – Definição da avaria do costado



Localização longitudinal da avaria



Extensão longitudinal da avaria



Penetração vertical da avaria

Figura 4.2 – Definição da avaria do fundo

No caso da função extensão longitudinal (figura 4.3) a IMO estabelece que a extensão máxima corresponde a trinta por cento do comprimento do navio, isto é, extensões maiores não foram observadas na prática. Se observarmos a figura 4.3, que mostra a função segmentada em três partes, poderemos notar que a probabilidade específica de uma avaria no costado entre 10% e 20% do comprimento do navio será de 0,1925. O cálculo da probabilidade total/global da avaria será determinado pelo produto das probabilidades individuais das características específicas da avaria.

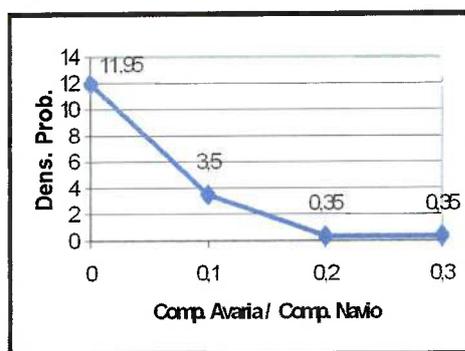


Figura 4.3 – Função densidade de probabilidade da extensão longitudinal resultante de colisão.

A tabela 4.1 ilustra o cálculo da probabilidade total/global de uma avaria do costado, que é determinada pelo produto das probabilidades individuais de cada uma das partes.

Avaria do costado:

- Localização Longitudinal (relacionada ao comprimento do navio)
- Extensão Longitudinal (relacionada ao comprimento do navio)
- Penetração Transversal (relacionada à boca do navio)
- Extensão Vertical (relacionada ao pontal do navio)
- Localização Vertical (relacionada ao pontal do navio)

De acordo com alguns fatores específicos é possível determinar qual compartimento ou grupo de compartimentos de uma embarcação seria avariado; desse modo, para o efeito do cálculo de vazamento de óleo é considerada a quantidade do produto contida nos tanques.

Tabela 4.1 - Probabilidade total/global da avaria

Fatores específicos para o cálculo da avaria		Probabilidade
Localização Longitudinal	0,20L	0,1000
Extensão Longitudinal	0,15L	0,1925
Penetração Transversal	0,10B	0,8880
Localização Vertical	0,25D	0,7490
Extensão Vertical	0,30D	0,0312
Probabilidade total/global da Avaria		0,0004

O próximo passo corresponde à associação das probabilidades de avarias com os volumes derramados para a obtenção dos parâmetros de vazamento de óleo. Esses parâmetros são definidos para três situações distintas: vazamento nulo, vazamento médio e vazamento extremo, como já visto no capítulo anterior. É importante ressaltar que cada parâmetro é definido como uma ponderação, na base de 40 e 60 por cento, entre os efeitos decorrentes da avaria do costado e do fundo.

Finalmente, para caracterizar o projeto do navio quanto à sua segurança ambiental, ou seja, minimização dos riscos de poluição, a IMO estabeleceu o índice de prevenção de poluição.

4.2 Descrição do software

De acordo com a metodologia recomendada na referência MARPOL (1997), desenvolvemos um programa em linguagem C++ que estabelece alguns parâmetros em função dos prováveis vazamentos de óleo de uma embarcação-tanque. Esse programa foi denominado “Outflow performance”.

Os dados de entrada do programa (arquivo input.txt) consistem basicamente das características principais da embarcação (comprimento total, comprimento entre perpendiculares, boca, pontal etc), número de posições das localizações, dimensões das avarias e as coordenadas dos compartimentos da embarcação.

O procedimento computacional para avaliação das probabilidades de avarias é um processo interativo, portanto é necessário especificar o número de posições para o costado e o fundo ao longo do comprimento do navio, assim como, em função das dimensões máximas da avaria, especificar o número de divisões no sentido longitudinal (DSL), transversal (DST) e vertical (DSV). Este último conjunto (DSL, DST, DSV) permite definir a avaria mínima a partir da qual realiza-se o processo sistemático de avaliação da probabilidade de todas as dimensões das avarias.

Ao executar o programa Outflow performance, será necessário entrar com um nome para o arquivo de saída. O arquivo de entrada input.txt deverá estar de acordo com as tabelas 4.1, 4.2 e 4.3

Tabela 4.2 - Entrada de dados do programa Outflow Performance

Características Principais	
Comprimento total	m
Comprimento entre perpendiculares	m
Pontal	m
Boca	m
Calado	m
Altura do fundo duplo	m
Largura do costado duplo	m
Peso leve	m
Deslocamento	t
Densidade d'água	t/m ³
Densidade do óleo	t/m ³
Número de tanques	

Tabela 4.3 - Entrada de dados para gerar as avarias do costado

Avaria do Costado	
Número de posições da localização longitudinal	
Número de espaçamentos da extensão longitudinal	
Número de espaçamentos da penetração transversal	
Número de espaçamentos da extensão vertical	
Número de posições da localização vertical	

Tabela 4.4 - Entrada de dados para gerar as avarias do fundo

Avaria do Fundo	
Número de posições da localização longitudinal	
Número de espaçamentos da extensão longitudinal	
Número de espaçamentos da penetração vertical	
Número de espaçamentos da extensão transversal	
Número de espaçamentos da localização transversal	

Adicionalmente, o usuário deverá fornecer a geometria da embarcação. Os dados de entrada das coordenadas para cada tanque será uma matriz de 9 linhas e 3 colunas. Na primeira linha é definido o número do tanque, a quantidade de óleo desse tanque, e na terceira coluna da primeira linha coloca-se o número zero. Esse número foi definido por uma questão de facilidade para implementação do código. Em relação ao arranjo de tanques, a origem do sistema de coordenadas (x, y, z) inicia-se pela popa da embarcação, pelo bordo de boreste na linha de base. Cada tanque é definido por oito pontos, iniciando-se por quatro pontos de ré (sentido anti-horário) e passa para a definição dos quatro pontos de vante. O procedimento é apresentado na figura 4.4.

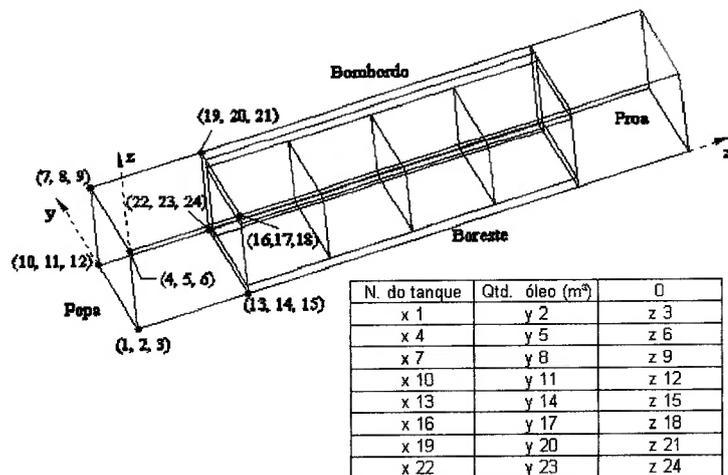


Figura 4.4 – Procedimento para entrada de dados da geometria da embarcação

As funções densidade de probabilidade são definidas em subrotinas específicas no programa, possibilitando ser alteradas. Essa possibilidade deve ser considerada, uma vez que a IMO pode estabelecer outras funções densidade de probabilidade após revisar as estatísticas de acidentes.

O número de divisões especificadas na entrada de dados permite a especificação de uma avaria de mínimas dimensões, que terá suas dimensões aumentadas até o que foi definido como avaria máxima pela MARPOL (1997). Esta avaria percorrerá sistematicamente o casco da embarcação.

Durante a geração hipotética das avarias, o programa efetua a seguinte seqüência para danificações do costado:

1. Inicialmente, a primeira avaria gerada é a com menor dimensão possível e está localizada na parte mais extrema da popa, na linha de base e no bordo de boreste (todas avarias geradas devido à colisão da embarcação estão no costado de boreste).
2. Após a primeira avaria ser gerada, a próxima avaria tem sua dimensão incrementada verticalmente.
3. Depois da avaria ser definida para todos os incrementos verticais, o procedimento retorna à dimensão mínima da avaria com um aumento na profundidade e executa a seqüência análoga à descrita.
4. Uma vez incrementada toda a extensão de profundidade e vertical da avaria, o programa inicia uma seqüência análoga, porém incrementando a extensão longitudinal da avaria.
5. Depois de serem determinadas todas as possíveis dimensões de avaria, o programa altera a posição vertical da avaria no sentido da linha de base para o convés, e o procedimento retorna à dimensão mínima da avaria.
6. Percorridas todas posições verticais, finalmente o programa altera a posição longitudinal da avaria no sentido da popa à proa. Estabelecida

essa nova posição, o programa executa a mesma série de procedimentos descritos anteriormente até englobar todas as localizações da embarcação.

O diagrama apresentado na figura 4.5 mostra esquematicamente o procedimento implementado.

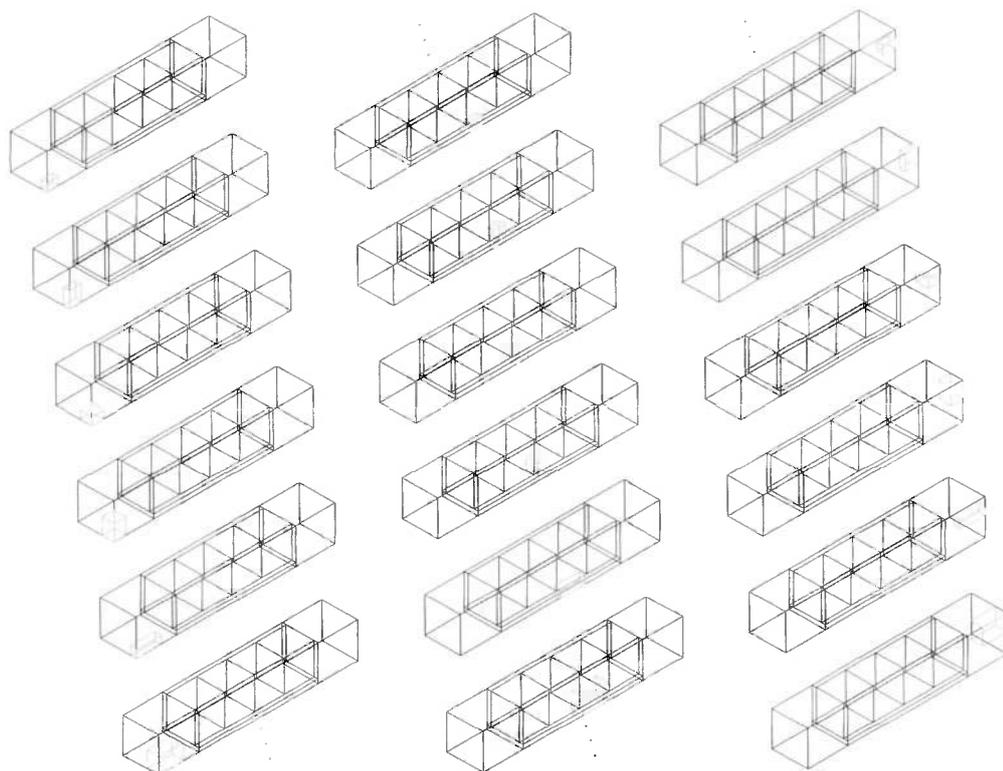


Figura 4.5 – Simulação das dimensões e posições da avaria do costado durante a execução do programa.

A geração de avarias para o fundo da embarcação segue praticamente a mesma seqüência para as avarias do costado, porém, ao invés de elas percorrerem verticalmente o costado da chata, elas percorrerão transversalmente o fundo da embarcação.

Todo incidente ocorrido está relacionado a uma probabilidade associada aos compartimentos atingidos. Para determinar quais compartimentos são atingidos por determinadas avaria, elaboramos um procedimento de verificação de interseção entre o cubo da avaria e as superfícies que definem os tanques/porões do arranjo da embarcação. Esse procedimento considera uma regra de sinais entre as matrizes $avaria_{ij} = (i = 8, j = 3)$ e $tanques_{ij} = (i = 9, j = 90)$ definidas no programa. A figura 4.6 apresenta uma parte do código que é responsável pela interseção da avaria com o compartimento, em caso de avaria do costado.

```

for(alfa=0;alfa<3*tan;alfa=alfa+3){
  if((((tanques[1][2+alfa]<avaria[1][2]&&      /**vertical***/
    tanques[2][2+alfa]>avaria[1][2])||
    (tanques[1][2+alfa]<avaria[0][2]&&
    tanques[2][2+alfa]>avaria[0][2])||
    (tanques[1][2+alfa]>=avaria[0][2]&&
    tanques[2][2+alfa]<=avaria[1][2]))||

    ((tanques[5][2+alfa]<avaria[1][2]&&      /**vertical***/
    tanques[6][2+alfa]>avaria[1][2])||
    (tanques[5][2+alfa]<avaria[0][2]&&
    tanques[6][2+alfa]>avaria[0][2])||
    (tanques[1][2+alfa]>=avaria[0][2]&&
    tanques[2][2+alfa]<=avaria[1][2])))&&

    (tanques[1][1+alfa]<avaria[2][1]||
    tanques[5][1+alfa]<avaria[2][1])&&      /**transversal**/

    ((tanques[1][0+alfa]<avaria[0][0]&&      /**longitudinal**/
    tanques[5][0+alfa]>avaria[0][0])||
    (tanques[1][0+alfa]<avaria[4][0]&&
    tanques[5][0+alfa]>avaria[4][0])||
    (tanques[1][0+alfa]>=avaria[0][0]&&
    tanques[5][0+alfa]<=avaria[4][0]))){
    ...
  }
}

```

Figura 4.6 – Parte do código responsável pela interseção da avaria com o compartimento, em caso de avaria do costado.

Para toda avaria gerada é calculada simultaneamente a respectiva probabilidade dessa avaria, indicando o compartimento ou grupo de compartimentos que foi avariado e a quantidade de óleo contida nos tanques.

Como é bem provável que as avarias geradas sejam redundantes, atingindo o mesmo compartimento ou grupo de compartimentos, o programa mantém a quantidade de óleo e soma a probabilidade da avaria para o compartimento ou grupo de compartimentos avariado.

Depois de o programa determinar a probabilidade do compartimento ou grupo de compartimentos ser avariado, bem como a quantidade de óleo derramada, ele ordena o conjunto de compartimentos ou grupos de compartimentos em ordem crescente de volume derramado, isto é, desde o volume nulo de um compartimento vazio até o máximo volume derramado. Correspondentemente a essa estruturação, o programa calcula a probabilidade cumulativa.

O parâmetro de vazamento nulo pode ser observado na tabela 4.2, na coluna expressa pela probabilidade cumulativa do último compartimento ou grupo de compartimentos que não contém óleo.

Os diversos resultados obtidos são apresentados no arquivo de saída em duas tabelas, a primeira representando os parâmetros relativos ao costado, enquanto a segunda se refere ao fundo. Os dados apresentados são:

- Designação do compartimento ou grupo de compartimentos avariado;
- Quantidade de óleo derramado em m³;
- Probabilidade do compartimento ou grupo de compartimentos ser avariado;
- Probabilidade cumulativa;
- Volume do vazamento médio de óleo em m³;
- Probabilidade de vazamento extremo;
- Volume extremo de vazamento.

Após gerar as tabelas, o arquivo de saída fornece os parâmetros de vazamento de óleo e o índice de prevenção de poluição. No anexo A.III apresentamos um dos casos analisado nesse trabalho.

Tabela 4.5 - Probabilidade cumulativa e valores dos vazamentos de óleo

Compartimentos	Probabilidade Pi	Vazamento de óleo Oi m ³	Probabilidade Cumulativa [Som de Pi]	Vazamento de óleo médio Pi*Oi m ³	Probabilidade Pie	Vazamento Extremo Oie*Pie*10 m ³
1	0,17725	0,00	0,17725	0,00		
5	0,17725	0,00	0,3545*	0,00		
4	0,07725	2250,00	0,43175	173,81		
2	0,07725	2250,00	0,50900	173,81		
1 2	0,04200	2250,00	0,55100	94,50		
4 5	0,04200	2250,00	0,59300	94,50		
3	0,19300	4500,00	0,78600	868,50		
2 3	0,10350	6750,00	0,88950	698,63		
3 4	0,10350	6750,00	0,99300	698,63	0,09300	6277,50
1 2 3	0,00350	6750,00	0,99650	23,63	0,00350	236,25
3 4 5	0,00350	6750,00	1,00000	23,63	0,00350	236,25
				2849,63	0,10000	6750,00

4.3 Características dos casos estudados

Neste estudo, a metodologia proposta para o cálculo é aplicada para uma série de projetos de chatas-tanque, abrangendo uma ampla faixa de dimensões, diferentes arranjos dos tanques de carga e espaçamentos do fundo e costado duplo da embarcação.

O estudo foi realizado para chatas-tanque de quatro portes brutos (*deadweight*) diferentes; 700 TPB, 1400 TPB, 3000 TPB e 5000 TPB. Uma vez que se tratam de chatas, o porte bruto está unicamente associado à carga transportada e, portanto, para a obtenção do seu deslocamento é necessário somente estimar o peso leve da chata.

O comprimento foi definido por meio da comparação com outras embarcações, como mostrado na tabela 4.3, e a boca obtida a partir da relação L/B (figura 4.7) como recomendado por Hirata (1991). A inclusão da consideração das dimensões do casco duplo como aquelas requeridas pela MARPOL, sendo o volume de carga pré-definido, possibilitou o dimensionamento dos tanques de carga e, conseqüentemente, a avaliação do pontal.

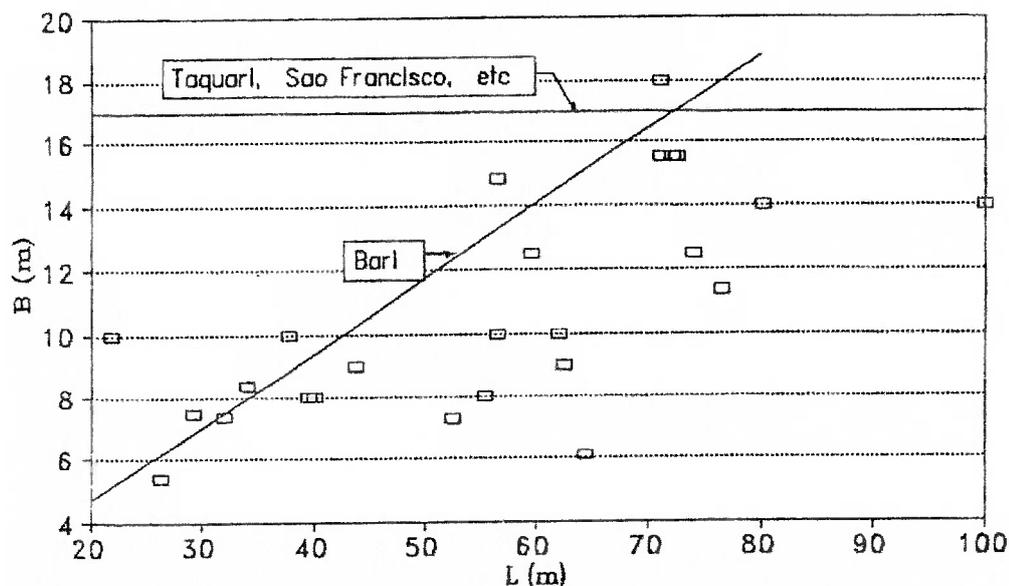


Figura 4.7 – Boca em função do comprimento.

Tabela 4.6 – Características de chatas empregadas na hidrovía e em mar aberto

Nome	Comprimento(m)	Pontal(m)	Boca(m)
Hidrovía Araguaia	45,00	2,50	8,00
Hidrovía Madeira	56,00	3,60	13,70
Hidrovía Tietê	58,00	3,00	11,00
Hidrovía Paraná	58,50	4,00	8,00
Hidrovía Tapajós	60,00	4,20	12,00
Oceanic Barge	82,00	5,48	18,30
Oceanic Barge	105,80	9,60	19,20

Para cada porte bruto, isto é, volume de óleo transportado, definiu-se três arranjos de tanques (ver figura 4.8). O primeiro (9 x 1) possui tanques definidos de bordo a bordo,¹ o número de divisões transversais sendo definido pelas sugestões da regulamentação 24 do Anexo I da MARPOL (1997), uma vez que as regras acima normalmente se aplicam a embarcações de maior porte. As regras da MARPOL estabelecem que, no projeto dos tanques de carga, o comprimento não deverá ser superior a 10 metros ou ao valor calculado pelas expressões abaixo, qualquer que seja o maior valor.

(a) Não existe qualquer antepara longitudinal

$$\left(0,5 \frac{b_i}{B} + 0,1\right)L \quad (4.1)$$

A variável b_i corresponde à distância entre o costado do navio e a antepara longitudinal do casco interno.

(b) Uma antepara longitudinal central

$$\left(0,25 \frac{b_i}{B} + 0,15\right)L \quad (4.2)$$

(c) Duas ou mais anteparas longitudinais

¹ (a x b) A variável a está relacionada ao número de tanques na direção longitudinal e b ao número de divisões na direção transversal.

$$0,2L \quad (4.3)$$

Para determinar os diferentes espaçamentos do casco duplo (costado e fundo) foi utilizada como referência a regulamentação 13F do Anexo 1 da MARPOL (1997), que define:

- (1) para o espaçamento do costado duplo, cd (m), de barças de 5000 toneladas ou maiores, a relação

$$1,00 \leq cd \leq \min \left\{ 0,5 + \frac{TPB}{20.000}; 2,00 \right\} \quad (4.4)$$

enquanto para barças com menos de 5000 toneladas,

$$0,76 \leq cd \leq 0,4 + \frac{2,4 TPB}{20.000} \quad (4.5)$$

desde que o volume de cada tanque não exceda 700 m^3 .

- (2) para o espaçamento do fundo duplo, fd (m), de barças de 5000 toneladas ou maiores a relação

$$1,00 \leq fd \leq \left\{ \frac{B}{15}; 2,00 \right\} \quad (4.6)$$

enquanto para barças com menos de 5000 toneladas,

$$0,76 \leq fd \leq \frac{B}{15} \quad (4.7)$$

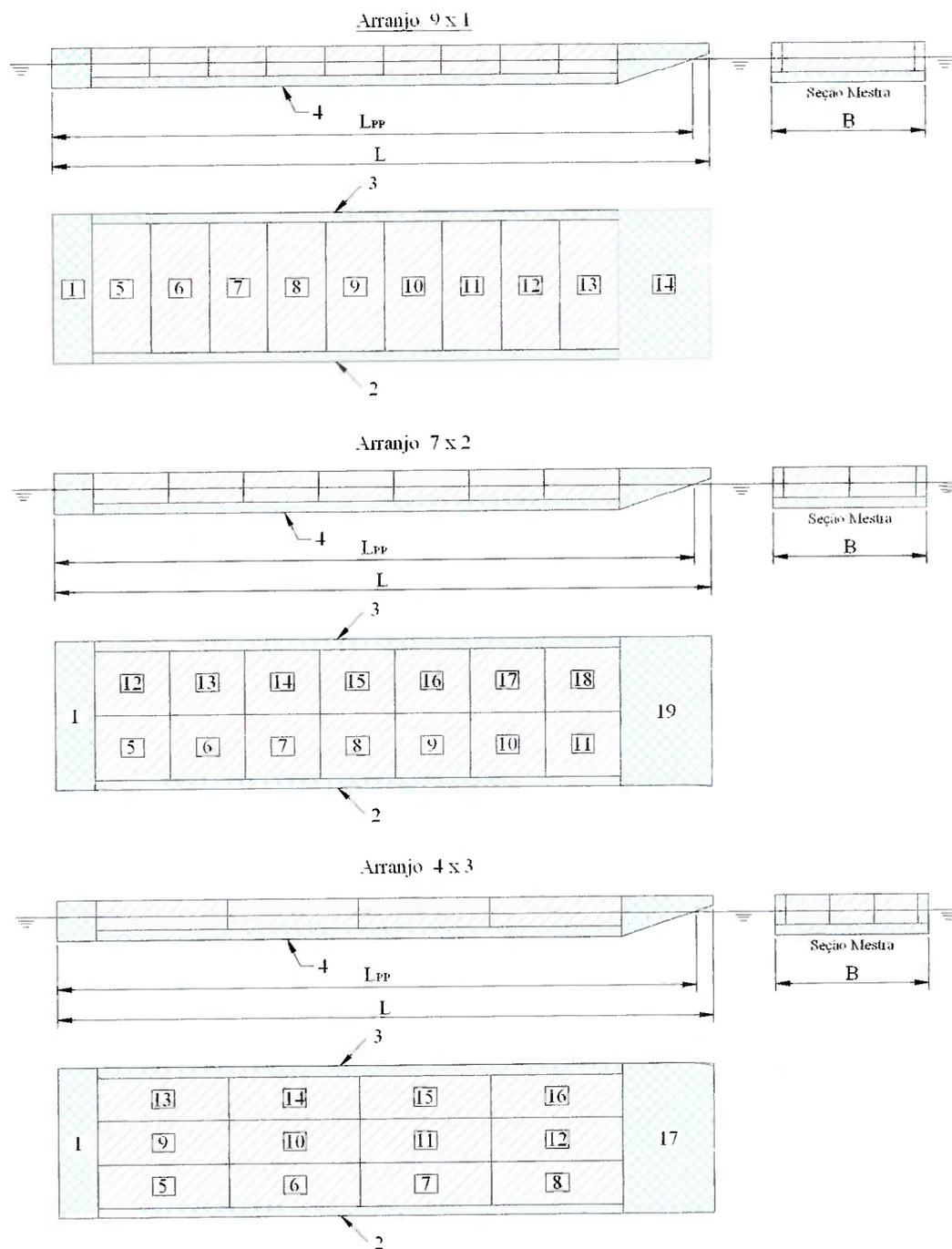


Figura 4.8 – Simulação das dimensões e posições da avaria do costado durante a execução do programa.

O peso leve de uma chata é constituído basicamente pelo peso do chapeamento, anteparas, cavernamentos, elementos de ligação e enrijecedores. Para realizar a estimativa do peso leve foi utilizada a formulação proposta por Riva

(1993), que expressa isso em função das dimensões principais da barcaça, comprimento, boca e pontal:

$$W_c(t) = K * L^{1,2} * B^{0,8} D^{0,5}, \quad (4.8)$$

em que k é um coeficiente a se determinar.

Uma vez que apenas o arranjo interno muda, deve-se determinar o valor de k para representar a influência dos diferentes arranjos no peso leve. O coeficiente para o arranjo (9 x 1) foi determinado comparando-se com o peso leve da chata-tanque apresentada por Riva (1993), a partir da qual obteve-se o valor 0,150. A determinação do coeficiente k para os outros dois arranjos foi realizada estimando-se o peso a mais de aço requerido, isto é, o produto da área das anteparas adicionais por uma espessura de 6,00 mm. Os valores obtidos do coeficiente k para os arranjos (7 x 2) e (4 x 3) foram, respectivamente, 0,155 e 0,160.

A decisão de manter valores de comprimento e boca constante deve-se ao fato de que, normalmente, as restrições da via (pontes, eclusas, etc) limitam a modificação dessas dimensões e, adicionalmente, porque o pontal é a dimensão que menos afeta o peso leve da chata. A tabela 4.4 apresenta as dimensões básicas das chatas estudadas e evidencia a correspondente variação do calado, peso leve e deslocamento.

Tabela 4.7 – Características principais das chatas

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Comprimento total (m)	Comprimento entre perpendiculares (m)	Boca (m)	Pontal (m)	Calado (m)	Deslocamento (t)	Peso leve (t)	Qtde. de óleo em cada tq. (m ³)
700	9 x 1	0,76 x 0,76	47,19	45,78	11,00	3,00	1,85	880,46	180,46	86,42
		0,95 x 0,95	47,19	45,78	11,00	3,28	1,86	888,70	188,67	86,42
		0,57 x 0,57	47,19	45,78	11,00	2,72	1,84	871,83	171,83	86,42
	7 x 2	0,76 x 0,76	47,19	45,78	11,00	3,00	1,86	886,41	186,46	55,55
		0,95 x 0,95	47,19	45,78	11,00	3,28	1,87	894,92	194,99	55,55
		0,57 x 0,57	47,19	45,78	11,00	2,72	1,85	877,49	177,56	55,55
4 x 3	0,76 x 0,76	47,19	45,78	11,00	3,00	1,87	892,44	192,49	64,81	
	0,95 x 0,95	47,19	45,78	11,00	3,28	1,87	901,23	201,28	64,81	
	0,57 x 0,57	47,19	45,78	11,00	2,72	1,85	883,24	183,29	64,81	
1400	9 x 1	0,76 x 0,80	59,48	57,97	14,00	3,50	2,24	1712,00	312,08	172,83
		0,95 x 1,00	59,48	57,97	14,00	3,79	2,25	1724,68	324,76	172,83
		0,57 x 0,60	59,48	57,97	14,00	3,22	2,22	1699,26	299,34	172,83
	7 x 2	0,76 x 0,80	59,48	57,97	14,00	3,50	2,25	1722,49	322,49	111,11
		0,95 x 1,00	59,48	57,97	14,00	3,79	2,26	1735,37	336,58	111,11
		0,57 x 0,60	59,48	57,97	14,00	3,22	2,23	1709,31	309,32	111,11
4 x 3	0,76 x 0,80	59,48	57,97	14,00	3,50	2,26	1732,29	332,89	129,62	
	0,95 x 1,00	59,48	57,97	14,00	3,79	2,27	1746,31	346,41	129,62	
	0,57 x 0,60	59,48	57,97	14,00	3,22	2,24	1719,20	319,30	129,62	

Tabela 4.7 - Continuação

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Comprimento total (m)	Comprimento entre perpendiculares (m)	Boca (m)	Pontal (m)	Calado (m)	Deslocamento (t)	Peso leve (t)	Qtde. de óleo em cada tq. (m³)
3000	9 x 1	0,76 x 1,05	87,48	85,61	15,75	4,50	2,86	3617,58	617,75	370,35
		0,95 x 1,31	87,48	85,61	15,75	4,86	2,87	3641,81	641,98	370,35
		0,57 x 0,79	87,48	85,61	15,75	4,15	2,85	3593,07	593,24	370,35
	7 x 2	0,76 x 1,05	87,48	85,61	15,75	4,50	2,87	3638,15	638,34	238,08
		0,95 x 1,31	87,48	85,61	15,75	4,86	2,89	3663,19	663,38	238,08
		0,57 x 0,79	87,48	85,61	15,75	4,15	2,85	3612,82	613,01	238,08
4 x 3	0,76 x 1,05	87,48	85,61	15,75	4,50	2,89	3658,74	658,93	277,76	
	0,95 x 1,31	87,48	85,61	15,75	4,86	2,90	3684,59	684,78	277,76	
	0,57 x 0,79	87,48	85,61	15,75	4,15	2,87	3632,60	632,79	277,76	
5000	9 x 1	1,00 x 1,24	101,21	98,75	18,60	5,50	3,43	5929,18	929,29	617,27
		1,25 x 1,55	101,21	98,75	18,60	5,94	3,45	5965,64	965,75	617,27
		0,75 x 0,93	101,21	98,75	18,60	5,07	3,41	5892,11	892,22	617,27
	7 x 2	1,00 x 1,24	101,21	98,75	18,60	5,50	3,45	5959,95	960,27	396,80
		1,25 x 1,55	101,21	98,75	18,60	5,94	3,47	5997,62	997,94	396,80
		0,75 x 0,93	101,21	98,75	18,60	5,07	3,43	5921,64	921,96	396,80
4 x 3	1,00 x 1,24	101,21	98,75	18,60	5,50	3,46	5991,21	991,24	462,96	
	1,25 x 1,55	101,21	98,75	18,60	5,94	3,48	6030,10	1030,13	462,96	
	0,75 x 0,93	101,21	98,75	18,60	5,07	3,44	5951,68	951,71	462,96	

4.4 Resultados

O primeiro passo para obter os resultados foi definir o número mais adequado de avarias; esse número está condicionado às localizações e dimensões das avarias. A tabela 4.5 mostra os parâmetros de vazamento de óleo de uma chata-tanque de 5000 TPB em função dos seguintes espaçamentos/posições: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40.

Tabela 4.8 – Parâmetros de vazamento de óleo em função da quantidade de avarias

N	Quantidade de avarias	Parâmetro vaz. médio	Parâmetro vaz. extremo	Probabilidade de vaz. nulo	IPP
5	6,25E+03	0,01526	0,11820	0,87907	1,07620
10	2,00E+05	0,01226	0,09387	0,88899	1,16189
15	1,52E+06	0,01010	0,07363	0,90394	1,24931
20	6,40E+06	0,01052	0,07831	0,90170	1,23003
25	1,95E+07	0,01053	0,07864	0,90046	1,22846
30	4,86E+07	0,00993	0,07258	0,90518	1,25650
35	1,05E+08	0,01010	0,07468	0,90394	1,24782
40	2,05E+08	0,01020	0,07546	0,90246	1,24293

Depois de realizada uma análise, dada a capacidade disponível de *hardware*, foi decidido que o número mais adequado dos arranjos analisados corresponde a 6,40E+06 ($2 \cdot 20^5$) avarias.

Como em barcaças fluviais o sistema de gás inerte é inexistente, e ainda sofrem a influência da velocidade da água na via navegável, as tabelas a seguir apresentam os parâmetros de vazamento de óleo considerando que o derramamento pelos tanques de carga seja capturado pelo fundo duplo e de que exista uma pressão devida ao sistema de gás inerte, e também em condições contrárias, isto é, em que o óleo derramado não seja capturado pelo fundo duplo e em caso de haver pressão de gás inerte.

A tabela 4.9 apresenta os resultados dos parâmetros de vazamento de óleo, as expectativas de vazamento de óleo médio e extremo e, finalmente, o índice de prevenção à poluição, IPP. Tudo isso é feito considerando que o óleo derramado pelos tanques de carga não seja capturado pelo fundo duplo e que exista uma pressão de 0,05 bar decorrente o sistema de gás inerte.

As tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam os mesmos parâmetros da tabela anterior. A tabela 4.10 considera que o óleo derramado pelos tanques de carga não seja capturado pelo fundo duplo e não leva em consideração a pressão do sistema de gás inerte. Já a tabela 4.11 considera a pressão de 0,05 bar do sistema de gás inerte e que o óleo derramado seja capturado pelo fundo duplo. A tabela 4.12 considera que óleo derramado pelos tanques de carga seja capturado pelo fundo duplo e não leva em consideração a pressão de gás inerte.

Tabela 4.9 – Parâmetros dos vazamentos de óleo não considerando a captura de óleo pelo fundo duplo

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Vazamento Médio(m³)		Vazamento Extremo(m³)		Parâmetro Vaz. Médio	Parâmetro Vaz. Extremo	Prob. Vaz. Nulo		IPP				
			Costado	Fundo	Costado	Fundo			Costado	Fundo		Total			
700	9 x 1	0,76 x 0,76	26,08	6,33	14,23	190,88	63,26	114,31	0,018291	0,146970	0,81913	0,94105	0,89228	1,02092	
		0,95 x 0,95	19,46	1,93	8,94	164,37	19,29	77,32	0,011496	0,099416	0,86503	0,98550	0,93731	1,20318	
		0,57 x 0,57	35,87	8,13	19,25	199,46	80,71	128,21	0,024745	0,164843	0,75119	0,89684	0,83858	0,90855	
	7 x 2	0,76 x 0,76	15,03	4,50	8,71	105,42	45,01	69,77	0,011205	0,088945	0,81913	0,94105	0,89228	1,19350	
		0,95 x 0,95	11,22	1,38	5,32	92,76	13,82	45,39	0,006836	0,058370	0,86503	0,98550	0,93731	1,40238	
		0,57 x 0,57	20,68	5,78	11,74	118,95	57,22	81,91	0,015096	0,105329	0,75119	0,89684	0,83858	1,06461	
	4 x 3	0,76 x 0,76	14,93	4,57	8,71	96,91	45,69	66,18	0,011205	0,085092	0,81913	0,94105	0,89228	1,19818	
		0,95 x 0,95	11,14	1,42	5,31	88,76	14,22	44,04	0,006828	0,056623	0,86503	0,98550	0,93731	1,40660	
		0,57 x 0,57	20,54	5,93	11,78	108,97	58,67	78,79	0,015143	0,101311	0,75119	0,89684	0,83858	1,06752	
	1400	9 x 1	0,76 x 0,80	70,94	13,78	36,65	401,07	137,80	243,11	0,023559	0,156294	0,75197	0,92769	0,85740	0,93492
			0,95 x 1,00	51,68	10,30	26,85	377,35	102,99	212,73	0,017263	0,136766	0,81932	0,95662	0,90170	1,04671
			0,57 x 0,60	109,29	17,02	53,93	431,03	160,93	268,97	0,034669	0,172918	0,61790	0,88213	0,77644	0,79786
7 x 2		0,76 x 0,80	41,40	9,78	22,43	237,37	97,84	153,65	0,014421	0,098779	0,75197	0,92769	0,85740	1,09431	
		0,95 x 1,00	30,16	7,33	16,46	211,96	73,30	128,76	0,010583	0,082778	0,81932	0,95662	0,90170	1,22233	
		0,57 x 0,60	63,78	11,98	32,70	245,57	113,94	166,59	0,021023	0,107097	0,61790	0,88213	0,77644	0,94248	
4 x 3		0,76 x 0,80	40,54	9,92	22,17	213,54	98,17	144,92	0,014251	0,093168	0,75197	0,92769	0,85740	1,10323	
		0,95 x 1,00	29,53	7,45	16,28	190,75	74,48	120,99	0,010468	0,077784	0,81932	0,95662	0,90170	1,23214	
		0,57 x 0,60	62,46	12,01	32,19	258,90	113,33	171,56	0,020693	0,110295	0,61790	0,88213	0,77644	0,94350	

Tabela 4.9 – Continuação

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Vazamento Médio(m³)		Vazamento Extremo(m³)		Parâmetro Vaz. Médio	Parâmetro Vaz. Extremo	Prob. Vaz. Nulo		IPP			
			Costado	Fundo	Costado	Fundo			Costado	Fundo		Total		
3000	9 x 1	0,76 x 1,05	151,61	30,84	79,15	860,17	308,44	529,13	0,023747	0,158749	0,75301	0,92633	0,85700	0,93177
		0,95 x 1,31	110,44	22,51	57,68	808,42	225,09	458,42	0,017306	0,137534	0,82007	0,95862	0,90200	1,04583
		0,57 x 0,79	233,56	37,19	115,74	924,76	351,58	580,85	0,034723	0,174266	0,61950	0,88213	0,77708	0,79744
	7 x 2	0,76 x 1,05	88,80	22,04	48,74	509,25	220,44	335,96	0,014624	0,100795	0,75301	0,92633	0,85700	1,08843
		0,95 x 1,31	64,68	16,09	35,53	456,56	160,88	279,15	0,010659	0,083751	0,82007	0,95862	0,90200	1,21934
		0,57 x 0,79	136,79	26,79	70,79	527,14	254,89	363,79	0,021240	0,109145	0,61950	0,88213	0,77708	0,93870
4 x 3	0,76 x 1,05	86,59	21,85	47,74	457,59	218,49	314,13	0,014324	0,094246	0,75301	0,92633	0,85700	1,10048	
	0,95 x 1,31	63,08	16,22	34,96	408,76	162,19	260,82	0,010489	0,078251	0,82007	0,95862	0,90200	1,23111	
	0,57 x 0,79	133,39	26,40	69,20	554,80	249,12	371,40	0,020760	0,111426	0,61950	0,88213	0,77708	0,94219	
5000	9 x 1	1,00 x 1,24	252,21	51,99	132,08	1435,33	519,93	886,09	0,023775	0,159500	0,75197	0,92769	0,85740	0,93141
		1,25 x 1,55	183,72	38,04	96,32	1339,19	380,43	763,93	0,017337	0,137511	0,81932	0,95862	0,90170	1,04520
		0,75 x 0,93	388,53	65,33	194,61	1543,90	617,74	988,20	0,035031	0,177881	0,61790	0,88222	0,77644	0,79404
	7 x 2	1,00 x 1,24	148,40	36,72	81,40	848,43	367,23	559,71	0,014652	0,100755	0,75197	0,92769	0,85740	1,08827
		1,25 x 1,55	108,11	26,94	59,41	760,91	269,41	466,01	0,010694	0,083887	0,81932	0,95862	0,90170	1,21881
		0,75 x 0,93	228,62	45,73	118,89	878,09	434,84	612,14	0,021401	0,110192	0,61790	0,88222	0,77644	0,93565
4 x 3	1,00 x 1,24	144,90	36,88	80,05	762,69	368,75	526,33	0,014408	0,094740	0,75197	0,92769	0,85740	1,09867	
	1,25 x 1,55	105,48	27,09	58,45	681,30	270,91	435,07	0,010521	0,078312	0,81932	0,95862	0,90170	1,23003	
	0,75 x 0,93	223,07	46,33	117,03	924,72	437,34	632,29	0,021066	0,113814	0,61790	0,88222	0,77644	0,93643	

Tabela 4.10 – Parâmetros dos vazamentos de óleo não considerando a captura pelo fundo duplo e sem pressão de gás inerte

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Vazamento Médio(m³)		Vazamento Extremo(m³)		Parâmetro Vaz. Médio	Parâmetro Vaz. Extremo	Prob. Vaz. Nulo		IPP			
			Costado	Fundo	Costado	Fundo			Costado	Fundo		Total		
700	9 x 1	0,76 x 0,76	26,08	6,29	14,21	190,88	62,90	114,09	0,018263	0,146690	0,81913	0,94105	0,89228	1,02144
	7 x 2	0,76 x 0,76	15,03	4,47	8,69	105,42	44,75	69,02	0,011185	0,088744	0,81913	0,94105	0,89228	1,19422
	4 x 3	0,76 x 0,76	14,93	4,54	8,70	96,91	45,42	66,02	0,011184	0,084886	0,81913	0,94105	0,89228	1,19893
5000	9 x 1	1,00 x 1,24	252,21	51,82	131,98	1435,33	518,25	885,08	0,023756	0,159318	0,75197	0,92769	0,85740	0,93167
	7 x 2	1,00 x 1,24	148,40	36,84	81,46	848,43	368,44	560,44	0,014665	0,100885	0,75197	0,92769	0,85740	1,08787
	4 x 3	1,00 x 1,24	144,80	36,75	79,97	762,69	367,51	525,58	0,014395	0,094605	0,75197	0,92769	0,85740	1,09906

Tabela 11 – Parâmetros dos vazamentos de óleo considerando a captura de óleo pelo fundo duplo

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Vazamento Médio(m³)		Vazamento Extremo(m³)		Parâmetro Vaz. Médio	Parâmetro Vaz. Extremo	Prob. Vaz. Nulo		IPP			
			Costado	Fundo	Costado	Fundo			Costado	Fundo		Total		
700	9 x 1	0,76 x 0,76	26,08	0,82	10,92	190,88	8,19	81,27	0,014043	0,81913	0,98498	0,91864	1,13365	
		0,95 x 0,95	19,46	0,24	7,93	164,37	2,44	67,21	0,010196	0,86503	0,99630	0,94380	1,25379	
		0,57 x 0,57	35,87	1,01	14,96	199,46	10,06	85,82	0,019225	0,110342	0,97371	0,88470	1,02797	
	7 x 2	0,76 x 0,76	15,03	0,29	6,19	105,42	2,93	43,93	0,007958	0,056479	0,99643	0,92551	1,35924	
		0,95 x 0,95	11,22	0,09	4,54	92,76	0,90	37,64	0,005839	0,048404	0,99911	0,94548	1,47254	
		0,57 x 0,57	20,68	0,36	8,49	118,95	3,61	49,75	0,010916	0,063964	0,99374	0,89672	1,24075	
	4 x 3	0,76 x 0,76	14,93	0,31	6,16	96,91	3,13	40,64	0,007921	0,052255	0,99295	0,92342	1,36940	
		0,95 x 0,95	11,14	0,10	4,52	88,76	1,00	36,10	0,005805	0,046425	0,99824	0,94496	1,47931	
		0,57 x 0,57	20,54	0,39	8,45	108,97	3,91	45,93	0,010867	0,059065	0,98766	0,89307	1,24966	
	1400	9 x 1	0,76 x 0,80	70,94	2,21	29,70	401,07	22,06	173,66	0,019095	0,111648	0,98122	0,88952	1,03152
			0,95 x 1,00	51,68	1,64	21,66	377,35	16,37	160,76	0,013932	0,103353	0,98873	0,92097	1,13840
			0,57 x 0,60	109,29	2,78	45,38	431,03	27,81	189,10	0,029177	0,121568	0,96939	0,82879	0,89097
7 x 2		0,76 x 0,80	41,40	0,85	17,07	237,37	8,55	100,08	0,010976	0,054336	0,98978	0,89466	1,23727	
		0,95 x 1,00	30,16	0,64	12,45	211,96	6,38	88,61	0,008002	0,056967	0,99322	0,92405	1,35578	
		0,57 x 0,60	63,78	1,05	26,14	245,57	10,52	104,54	0,016808	0,067206	0,98357	0,83730	1,08457	
4 x 3		0,76 x 0,80	40,54	0,89	16,75	213,54	8,88	90,74	0,010768	0,058340	0,99118	0,89550	1,25518	
		0,95 x 1,00	29,53	0,33	12,01	190,75	3,33	78,30	0,009268	0,060407	0,99322	0,92588	1,31002	
		0,57 x 0,60	62,46	1,02	25,60	258,90	10,21	109,69	0,016455	0,070521	0,98643	0,83901	1,08527	

Tabela 4.11 - Continuação

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Vazamento Médio(m³)		Vazamento Extremo(m³)		Parâmetro Vaz. Médio	Parâmetro Vaz. Extremo	Prob. Vaz. Nulo		IPP			
			Costado	Fundo	Costado	Fundo			Costado	Fundo		Total		
3000	9 x 1	0,76 x 1,05	151,61	4,49	63,34	860,17	44,91	371,01	0,019003	0,111310	0,75301	0,98090	0,88974	1,03311
		0,95 x 1,31	110,44	3,22	46,11	808,42	32,25	342,72	0,013834	0,102821	0,82007	0,98875	0,92128	1,14073
		0,57 x 0,79	233,56	5,43	96,68	924,76	54,34	402,51	0,029007	0,120759	0,61950	0,96944	0,82946	0,89317
	7 x 2	0,76 x 1,05	88,80	1,74	36,56	509,25	17,43	214,16	0,010970	0,064251	0,75301	0,98968	0,89501	1,23781
		0,95 x 1,31	64,68	1,24	26,62	456,56	12,40	190,06	0,007986	0,057022	0,82007	0,99384	0,92433	1,35636
		0,57 x 0,79	136,79	2,18	56,02	527,14	21,85	223,97	0,016810	0,067194	0,61950	0,98349	0,83790	1,08493
4 x 3	0,76 x 1,05	86,59	1,68	35,64	457,59	16,82	193,13	0,010694	0,057942	0,75301	0,99159	0,89616	1,25833	
	0,95 x 1,31	63,08	1,31	26,02	408,76	13,15	171,39	0,007806	0,051421	0,82007	0,99476	0,92489	1,37634	
	0,57 x 0,79	133,39	2,05	54,59	554,80	20,53	234,24	0,016378	0,070275	0,61950	0,98654	0,83973	1,08733	
5000	9 x 1	1,00 x 1,24	252,21	8,68	106,09	1435,33	86,82	626,22	0,019097	0,112722	0,75197	0,98117	0,88949	1,03061
		1,25 x 1,55	183,72	6,05	77,12	1339,19	60,46	571,95	0,013881	0,102954	0,81932	0,98870	0,92095	1,13951
		0,75 x 0,93	388,53	11,48	162,30	1543,90	114,75	686,41	0,029214	0,123556	0,61790	0,96930	0,82874	0,88929
	7 x 2	1,00 x 1,24	148,40	3,41	61,41	848,43	34,07	359,81	0,011054	0,064771	0,75197	0,98989	0,89472	1,23459
		1,25 x 1,55	108,11	2,35	44,65	760,91	23,52	318,48	0,008038	0,057330	0,81932	0,99393	0,92409	1,35377
		0,75 x 0,93	228,62	4,44	94,11	878,09	44,44	377,90	0,016942	0,068027	0,61790	0,98374	0,83740	1,08117
4 x 3	1,00 x 1,24	144,80	5,19	61,03	762,69	51,86	336,19	0,010986	0,060515	0,75197	0,98128	0,88956	1,24149	
	1,25 x 1,55	105,48	3,60	44,35	681,30	36,01	294,13	0,007984	0,052943	0,81932	0,98877	0,92099	1,36407	
	0,75 x 0,93	223,07	4,36	91,84	924,72	43,59	396,04	0,016532	0,071289	0,61790	0,98643	0,83901	1,08282	

Tabela 4.12 - Parâmetros dos vazamentos de óleo considerando a captura de óleo pelo fundo duplo e sem pressão de gás inerte

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Vazamento Médio(m³)		Vazamento Extremo(m³)		Parâmetro Vaz. Médio	Parâmetro Vaz. Extremo	Prob. Vaz. Nulo		IPP			
			Costado	Fundo	Costado	Fundo			Costado	Fundo		Total		
700	9 x 1	0,76 x 0,76	26,08	0,80	10,91	190,88	8,01	81,16	0,014029	0,104350	0,81913	0,98498	0,91864	1,13403
	7 x 2	0,76 x 0,76	15,03	0,29	6,19	105,42	2,88	43,90	0,007955	0,056442	0,81913	0,99643	0,92551	1,35945
	4 x 3	0,76 x 0,76	14,93	0,30	6,15	96,91	3,05	40,59	0,007915	0,052193	0,81913	0,99295	0,92342	1,36977
5000	9 x 1	1,00 x 1,24	252,21	8,60	106,04	1435,33	85,99	625,73	0,019088	0,112634	0,75197	0,98117	0,88949	1,03079
	7 x 2	1,00 x 1,24	148,40	3,37	61,38	848,43	33,66	359,57	0,011049	0,064727	0,75197	0,98989	0,89472	1,23478
	4 x 3	1,00 x 1,24	144,80	5,12	60,99	762,69	51,23	335,81	0,010979	0,060447	0,75197	0,98128	0,88956	1,24779

4.5 **Discussão e análise dos resultados obtidos**

A localização, dimensão dos tanques e os espaçamentos do casco duplo são variáveis que precisam ser levadas em conta quando se pensa em meios de reduzir o risco de vazamento de óleo. A efetividade dessas alternativas foi investigada através da metodologia probabilística de vazamento de óleo, apresentada anteriormente para quatro embarcações.

Como em barcas fluviais o sistema de gás inerte é inexistente, as tabelas 4.10 e 4.12 apresentam os resultados em que a pressão interna dos tanques é a mesma da pressão externa. A ausência da pressão de gás inerte diminui a quantidade de vazamento, mas esse valor não é significativo, representando menos de 1% da quantidade de derramamento de óleo.

O fato de a chata de 700 TPB possuir tanques com volumes menores do que a chata de 5000 TPB, proporcionando menores derramamentos de óleo, não afeta o IPP, porque são adotados os mesmos parâmetros comparativos (ver tabela 3.2), de modo que os parâmetros de vazamento de óleo são determinados por meio da razão da quantidade de óleo derramada pela capacidade de óleo transportado.

Foram determinados para cada embarcação três espaçamentos de casco duplo diferentes, utilizando como referência a MARPOL (1997). A probabilidade de vazamento nulo permaneceu constante para os três arranjos, sendo apenas alterada quando houve variação do espaçamento do casco duplo. No caso das embarcações com 1400 TPB e 5000 TPB (tabela 4.9) manteve-se a mesma probabilidade de vazamento nulo, em decorrência do valor aproximado das relações de costado duplo/boca e fundo duplo/pontal. A probabilidade de vazamento nulo tende a aumentar à medida em que aumentam as relações citadas anteriormente.

No que diz respeito ao porte das embarcações, a chata com 700 TPB mostrou ter um melhor índice de prevenção de poluição, se comparada com as outras embarcações; isso ocorreu em razão de esse tipo de embarcação possuir valores maiores das relações costado duplo/boca e fundo duplo/pontal, como mostram as figuras 4.9 e 4.10.

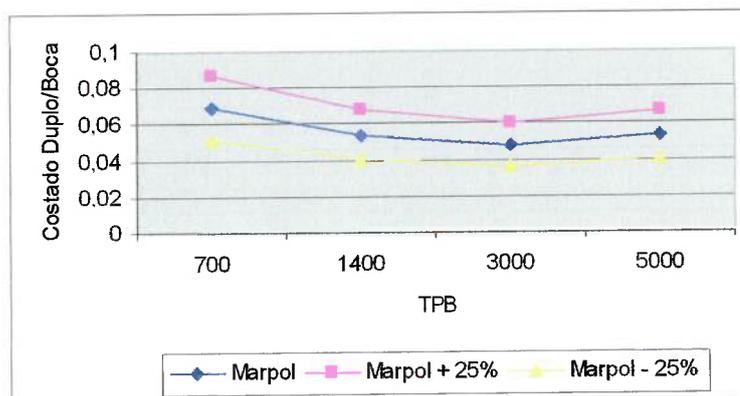


Figura 4.9 – Costado duplo/boca em função do TPB

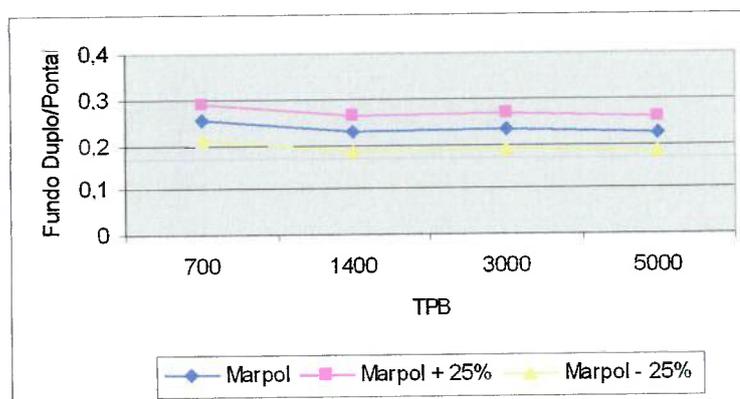


Figura 4.10 – Fundo duplo/pontal em função do TPB

Apesar de os casos de encalhes apresentarem avarias maiores do que os casos de colisões, isso não determinou uma maior quantidade de derramamento de óleo pelo encalhe em relação à colisão. As figuras 4.11 a 4.14 apresentam as proporções de derramamento total de óleo das embarcações de 700 TPB e 5000 TPB em situações de colisão e de encalhe.

As embarcações apresentaram maiores vazamentos de óleo em simulações de colisão. Isso se deve ao fato de que nos casos de encalhes as embarcações tendem a

reter óleo em seus tanques após serem avariadas, e o mesmo não ocorre com os casos de colisão, situações em que a embarcação tem todo o seu óleo considerado derramado.

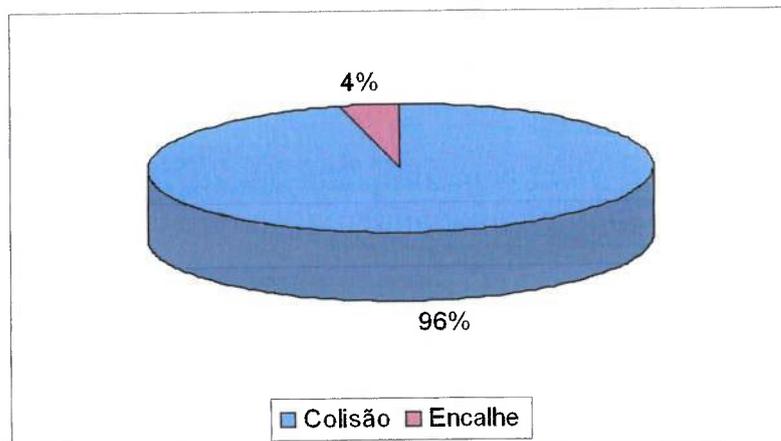


Figura 4.11 - Vazamento médio de óleo de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo

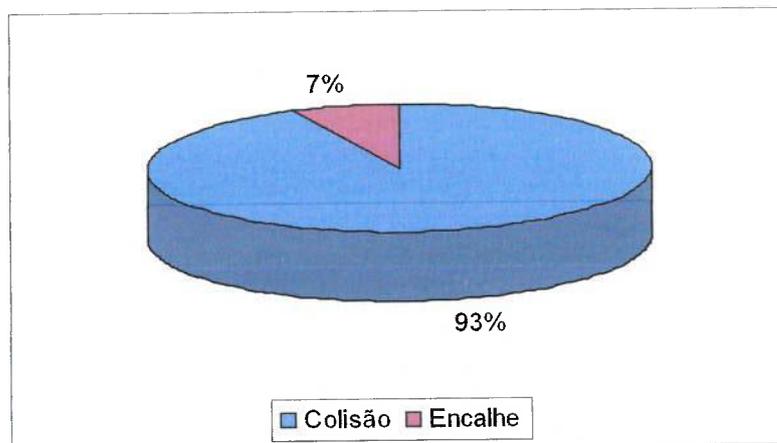


Figura 4.12 - Vazamento extremo de óleo de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo

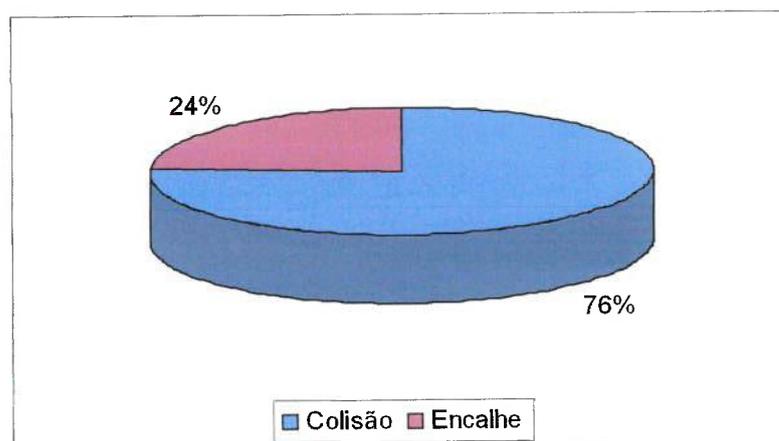


Figura 4.13 - Vazamento médio de óleo de chatas com 5000 TPB, não considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.

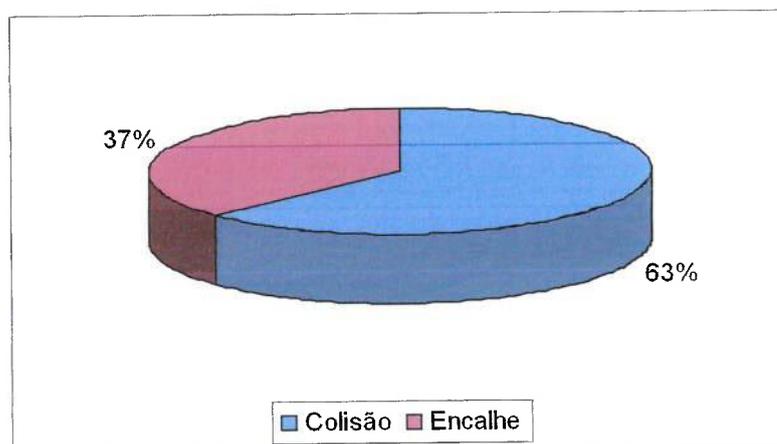


Figura 4.14 - Vazamento extremo de óleo de chatas com 5000 TPB, não considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.

Os arranjos estudados consideram que os compartimentos fundo e o costado duplo não são subdivididos. Nos casos de colisão esse fator não altera a quantidade de óleo derramado, porém no caso de encalhe quanto maior for o volume do fundo duplo, maior será a quantidade de óleo retida, ou seja, se houver compartimentos estanques no casco que impeçam o alagamento total do fundo duplo, isso diminuirá a quantidade de óleo retida, fazendo com que aumente o derramamento de óleo.

Os gráficos das figuras 4.15 a 4.18 ilustram os resultados dos vazamentos de óleo médio e extremo, demonstrados na tabela 4.8. Nessas figuras é possível notar que o arranjo 9 x 1 tem a predisposição de ocasionar um maior derramamento de

óleo, e como a probabilidade de vazamento nulo não é afetada pelo arranjo das embarcações, esse arranjo demonstrou ter um pior índice de prevenção de poluição. É importante ressaltar que no arranjo 9 x 1 o custo inicial de fabricação é bem menor, graças ao menor peso em aço. O arranjo 4 x 3 mostrou ser ligeiramente mais seguro do que o 7 x 2, entretanto haveria inicialmente um custo maior, em razão do maior peso em aço.

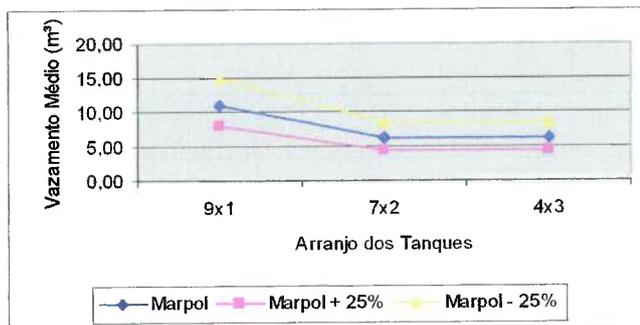


Figura 4.15 – Volume do vazamento médio de óleo de chatas com 700 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.

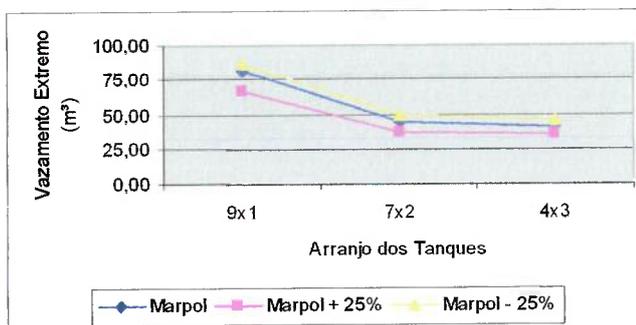


Figura 4.16 – Volume do vazamento extremo de óleo de chatas com 700 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.

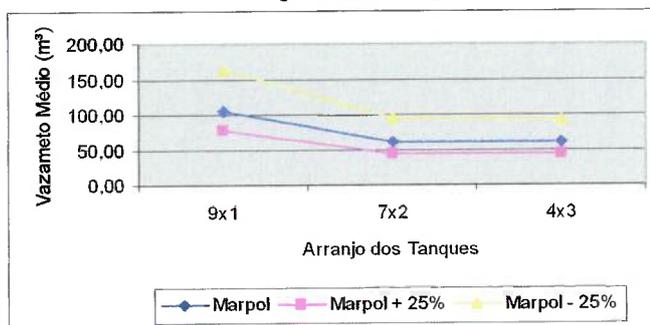


Figura 4.17 – Volume do vazamento médio de óleo de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.

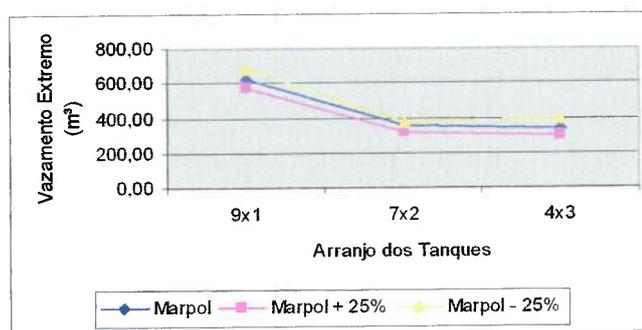


Figura 4.18 – Volume do vazamento extremo de óleo de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.

É importante notar que as embarcações com o arranjo 7 x 2 e espaçamento do casco duplo 25% menor do que o recomendado pela MARPOL demonstraram ser mais leves e seguras se comparadas às embarcações com o arranjo 9 x 1, que tem o espaçamento exigido pela MARPOL. Isso é possível porque, ao diminuir o espaçamento do casco duplo, também pode ser alterada a altura do pontal, o que possibilita o transporte do mesmo volume de óleo com um peso leve menor. Nas simulações efetuadas, as embarcações de arranjo 7 x 2 também apresentaram melhor índice de prevenção, gerando menores vazamentos de óleo médio e extremo, embora as embarcações com o arranjo 9 x 1 apresentem uma maior probabilidade de vazamento nulo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho realizado correspondeu ao desenvolvimento e implementação de um programa de computador que, como sugerido pela versão consolidada de 1997 dos regulamentos internacionais da MARPOL 1973/1978, emprega conceitos do método probabilístico para avaliar a capacidade de embarcações-tanque em atender os requisitos de minimizar o derramamento de óleo nos casos de acidentes envolvendo encalhes e colisões. O método probabilístico emprega funções de densidade de probabilidade relativas à localização longitudinal e vertical da avaria em conjunto com aquelas associadas às dimensões da avaria (longitudinal, transversal e vertical) para caracterizar a probabilidade de determinado compartimento ou grupo de compartimentos ser avariado. O alinhamento dessas probabilidades em conjunto com o volume do compartimento permite a obtenção de três parâmetros fundamentais para a caracterização da capacidade do navio em minimizar os efeitos do rompimento do casco no meio ambiente e que correspondem à probabilidade de não haver vazamento, ao derramamento médio de óleo e ao derramamento extremo. Esses três parâmetros são agrupados em um único índice definido como “Índice de Prevenção à Poluição”. É importante ressaltar que o método probabilístico é um procedimento orientado ao desempenho que, ao contrário das antigas regras prescritivas, permite uma grande flexibilidade na busca de soluções.

A implementação do programa e a variação sistemática de diversos parâmetros de chatas-tanque permitiram que algumas conclusões fossem obtidas:

- Os resultados obtidos com os espaçamentos do fundo e costado duplos sugeridos pelas regras nacionais e internacionais adotados estão em consonância aos valores de referência sugeridos pela IMO;
- Em algumas situações os índices de desempenho de minimização de poluição são satisfeitos mesmo quando as embarcações possuem arranjos alternativos e casco duplo com espaçamentos menores do que aqueles recomendados pela

MARPOL. Essas embarcações transportam o mesmo volume de carga, tem adequado desempenho ambiental e são ainda mais leves.

- Os resultados mostram que colisões provocam um derramamento de óleo maior que os encalhes; a largura do costado duplo afetando significativamente a probabilidade de vazamento nulo e o volume derramado médio sendo caracterizado pelo arranjo interno do espaço de carga;
- A presença de gás inerte (sobre-pressão) aumenta o volume de derramamento de óleo, sua influência sendo, entretanto, pequena.

O método probabilístico aplicado à avaliação de derramamento de óleo de chatas-tanque de casco duplo mostrou ser uma ferramenta eficiente para a avaliação e aprimoramento do arranjo do espaço de carga. Como sugestões futuras ao trabalho desenvolvido pode-se citar:

- As funções densidade de probabilidade adotadas pela IMO não são as ideais para a análise de derramamento de óleo de embarcações-tanque de pequeno porte, pois foram obtidas a partir de estatísticas de avarias de colisões e encalhes de navios tanque marítimos. Portanto, seria interessante verificar a existência de estatísticas de acidentes com embarcações fluviais e iniciar um processo de criação de um banco de dados nacional dos acidentes;
- A aplicação de normas internacionais marítimas deve ser avaliada com cuidado uma vez que seria importante verificar a influência da navegação em águas restritas do padrão de derramamento de óleo uma vez que modificações do padrão de velocidades são significativas;
- Como descrito no trabalho, as funções densidade de probabilidade são adimensionalizadas em relação às dimensões do navio. Estudos recentes mostraram que esse procedimento não é totalmente correto e, portanto, seria

interessante verificar como essas recomendações afetariam os parâmetros de desempenho quanto à poluição;

- Os parâmetros de referência foram estimados para embarcações marítimas de 5.000 TPB ou maiores tornando necessário obter valores compatíveis para a realidade de embarcações de menor porte bruto (700 TPB, 1.4000 TPB, etc.);
- Finalmente, seguindo tendências internacionais, seria interessante desenvolver e colaborar com os estudos de inclusão dos custos de um derramamento que, assim, reduziria o empirismo do índice de prevenção à poluição;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, R. M.: Combinatória e probabilidades, São Paulo-1971.

BARBOSA, R. M.: Grupos e combinatória, IBILCE-UNESP, 1979.

BROWN, A.J., Chen, D.: Probabilistic Method for Predicting Ship Collision Damage, *Ocean Engineering International Journal*, Vol. 6 No. 1, 2002, pp. 54-65.

CAMARGO, A. J.: Sistema de gestão ambiental em terminais hidroviários e comboios fluviais: contribuições para o desenvolvimento sustentável na Hidrovia Tietê-Paraná, Tese de doutorado – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista – Rio Claro, 2000.

COHEN, M. J.: Technological disasters and natural resource damage assessment: an evaluation of the Exxon Valdez oil spill, *Land economy*, 1995.

COMSTOCK, J. P. & ROBERTSON, J. B.; Survival of Collision Damage Versus the 1960 Convention on Safety of Life at Sea, *SNAME Transactions*, Vol. 69, 1961; pp.: 461-522.

COMSTOCK, J. P.: Principles of naval architecture. Society of Naval Architects and Marine Engineers (U.S.), 1967.

DAIDOLA, J. C., REYLING, J. C., AMEER, P. G.: Oil Outflow Estimates for Tankers and Barges, *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol 4, N° 2, 1997, pp 89 – 98.

Dickins Associates Ltd (Editor); The Double Hull Issue and Oil Spill Risk on the Pacific West Coast; Salt Spring Island, British Columbia; October 1995.

ETKIN, D. S.: International oil spill statistics, *Oil spill intelligence report*, 1997.

FERREIRA, A. N.: Estudo do efeito de acidentes na Hidrovia Tietê-Paraná: aspectos preventivos. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

GIDDENS, A.: As consequências da modernidade. Trad. Raul Fiker, São Paulo 1991.

HANSEN, P. F., DITLEVSEN, O.: Nature preservation acceptance model applied tanker oil spill simulations, Structural Safety 25, 2003, pp 1–34.

HANSEN, P. F., SIMONSEN, B. C.: GRACAT: software for grounding and collision risk analysis, Marine Structures 15, 2002, pp 383–401.

HARRALD, J. R., MAZZUCHI, T.A., SPAHN, J., DORP, R. V., MERRICK J., SHRESTHA, S., GRABOWSKI, M.: Using system simulation to model the impact of human error in a maritime system, Safety Science 30, 1998, pp 235 - 247.

HIRATA, K.: Hidrodinâmica, FATEC – Jahu, 1991.

HOEL, P. G.: Introdução a teoria da probabilidade. Rio de Janeiro, 1971.

HOOK, J. P.: The inadequacies of the current approach to minimising oil outflow from damaged tankers – a proposed alternative, Trans. SNAME, vol 99, 1991, pp 421-461.

ITOPF: Response marine oil spill, Whitherby & The International Tanker Owners Pollution Federation, London, 1986.

LUPORINI, G.: Um sistema de vigilância marítima aplicado a poluição marítima por petróleo no Brasil. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo – São Paulo, 1996.

Marine pollution and safer ships: implications for the tanker industry. DrewryShipping Consultants. London, 1992.

MARPOL 73/78: Regulation for the Prevention of Pollution by Oil. International Maritime Organization – IMO, 1997.

MEYER, P. L.: Probabilidade: aplicações à estatística. Trad. Rui C. B. Lourenço. Rio de Janeiro, 1978.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.): Enviromental performance of tanker design in collision and grounding: method for comparison / Committee for Evaluating Double Hull Tanker Design Alternatives, 2001.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.): Tanker spills: prevention by design/Committee on Tank Vessel Design, 1991.

PADOVEZI, C. D.: Conceito de embarcações adaptadas à via aplicado à navegação fluvial no Brasil. Tese de doutorado – Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, 2003.

PAIK, J. K.: Innovative structural designs of tankers against ship collision and grounding: A recent state-of-the-art review. Marine Technology, Vol. 40, 2003, pp 25-33.

PARSONS, M. G.; Informal Ship Design Course Notes; Dept. Naval Architecture and Marine engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI; September 1999.

PAWLOWSKI, M.: Probabilistic concept of tanker subdivision. Trans. SNAME, vol. 104, 1996, pp. 329-355.

PEDERSEN, P. T., ZHANG, S.: Effect of ship structure and size on grounding and collision damage distributions. Ocean Engineering 27, 2000, pp 1161–1179.

POFFO, I. R. F.: Vazamentos de óleo no litoral Norte do Estado de São Paulo: análise histórica (1974 a 1990). Dissertação de mestrado – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, 2000.

POMPEU, C. T.: Águas doces no Brasil. - Águas doces no direito brasileiro. São Paulo, 1999.

RICHMOND, A. C.: 1960 International Conference on Safety of Life at Sea; SNAME Transactions, Vol. 68, 1960; pp.: 879-884.

RIVA, J. C.: Embarcações fluviais – Desenvolvimento do projeto, FATEC – Jahu, 93

ROBERTSON, J. B.; NICKUM, G. C.; PRICE; The New Equivalent International Regulation on Subdivision and Stability of Passenger Ships; SNAME Transactions, Vol. 82, 1974; pp.: 344-381.

SALATI, E.: Águas doces no Brasil. – Água e o desenvolvimento sustentável. São Paulo, 1999.

SEKINE, T., KIMURA, T., TANAKA, K., SAKATA, S.: Damage stability calculation program for dry cargo ships, NK Tech Bulletin, 1991, pp 76-94.

SIMONSEN, C.: Ship Grounding on Rock II. Validation and Application, Marine Structures 10, 1997, pp 563-584.

SIRKAR, J.: A framework of assessing the environmental performance of tankers in accidental groundings and collisions. Trans. SNAME, vol 105, 1997, pp 253-295.

SOLAS: Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, International Maritime Organization – IMO 1997.

TAGG, R.: Damage survivability of cargo ships, Trans. SNAME, vol 90, 1982, pp 26-40.

VENTIKOS, N. P., PSARAFTIS, H. N.: Spill accident modeling: a critical survey of the event-decision network in the context of IMO's formal safety assessment, Journal of Hazardous Materials 107, 2004, pp 59–66.

WANG, G., ARITA, K., LIU, D.: Behavior of a double hull in a variety of stranding or collision scenarios, Marine Structures 13, 2000, pp 147 – 187.

WENDEL, K.: Die Wahrscheinlichkeit des Überstehens von Verletzungen, Schiffstechnik, 1947, p. 47.

ANEXO I - CRITÉRIO DE SUBDIVISÃO – SOLAS (CONSOLIDATED 1997)

Tabela I.1 – Fator de Subdivisão – SOLAS / USCG - Navios de Passageiros

FÓRMULAS DE SUBDIVISÃO	
SOLAS 1960	USCG
Permeabilidade do espaço da praça de máquinas: $\mu = 85 + 10 \cdot \frac{a-c}{v}$	
a – Volume dos espaços de passageiros abaixo da linha marginal e dentro dos limites do espaço de praça de máquinas excluídos bagagens, provisões e áreas de correio (postagem). Incluídos, entretanto, espaços da tripulação e todos os outros espaços que, na condição de carregamento total (“full load condition”), normalmente não contem quantidades substanciais de carga, carvão, óleo combustível, bagagem, provisões ou correio;	
c – Volume dos espaços entre conveses, abaixo da linha marginal e dentro dos limites do espaço da praça de máquinas, que são designados para carga, carvão ou depósito, com exceção aos listados em (a)	
v - Volume total do espaço de praça de máquinas abaixo da linha marginal.	
Permeabilidade das porções do navio avante e a ré do espaço de praça de máquinas: $\mu = 63 + 35 \cdot \frac{a}{v}$	
a – Volume dos espaços de passageiros que estão situados abaixo da linha marginal, avante e a ré do espaço da praça de máquinas, e que, de outro modo, estão definidos acima;	
v – Volume total da porção do navio abaixo da linha marginal avante e a ré do espaço de praça de máquinas.	
$L \geq 430 \text{ pés}$ $A = \frac{190}{L-198} + 0,18$	$L \geq 260 \text{ pés}$ $B = \frac{100}{L-138} + 0,18$
$L \geq 392 \text{ pés}$ $A = \frac{190}{L-160} + 0,18$	$L \geq 200 \text{ pés}$ $B = \frac{94}{L-85} + 0,18$
(Eq. 1) $C_s = 72 \cdot \left[\frac{M + 2 \cdot P_1}{V + P_1 - P} \right]$	(Eq.2) $C_s = 72 \cdot \left[\frac{M + 2 \cdot P}{V} \right]$
em que: M Volume do espaço de praça de máquinas mais qualquer óleo combustível permanente que esteja acima do topo do fundo duplo ou fora deste espaço; V Volume total do navio abaixo da linha marginal; N Número de passageiros para o qual o navio é certificado; P Volume dos espaços de passageiros e tripulação abaixo da linha marginal; $P_1 = K \cdot N$, em que $K = 0,06 \cdot L$ em que o valor de $K \cdot N$ é maior do que P mais o volume total os espaços de passageiros.	em que: M Mesmo parâmetro do adotado pela SOLAS 1960 L Comprimento medido entre perpendiculares nas extremidades da linha de carga de subdivisão; P, V e N Mesmos parâmetros dos adotados pela expressão da SOLAS 1960.
Obs: Acima da linha marginal o valor a ser adotado para P_1 e a soma ou $(2/3 K \cdot N)$ qualquer que seja o maior.	

Uso: Eq-1 qdo. $P_1 > P$ e Eq.-2, outros casos	
--	--

Tabela AI.2 – Fator de Subdivisão – SOLAS / USCG - Navios de Passageiros

CONDIÇÕES
1) Se o comprimento for menor que 260 pés (200 pés) $F_s = 1,0$
2) Se o número de passageiros exceder 12, mas inferior ao valor dado por $L^2/50$ ou a 50 $F_s = 1,0$
3) Se o comprimento estiver entre 260 e 430 pés (200 e 392 pés) e $C_s \leq S = \frac{4691 - 10 \cdot L}{17} \quad , \quad \left(S = \frac{10904 - 25 \cdot L}{48} \right)$ então: $F_s = 1,0$
4) Se o comprimento estiver entre 260 e 430 pés (200 e 392 pés) e $C_s \geq S$, F é definido através da fórmula auxiliar, $F_s = 1 - \frac{(1 - B) \cdot (C_s - S)}{123 - S}$
5) Se o comprimento for maior do que 430 pés (392 pés) e $C_s \leq 23$ $F_s = A$
6) Se o comprimento for maior do que 430 pés (392 pés) e $C_s \geq 123$ $F_s = B$
7) Se o comprimento for maior do que 430 pés (392 pés) e $23 < C_s < 123$, F é obtido através da seguinte expressão interpoladora $F_s = A - \frac{(A - B) \cdot (C_s - 23)}{123}$

ANEXO II – FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE – MARPOL 73/78 (CONSOLIDATED 1997).

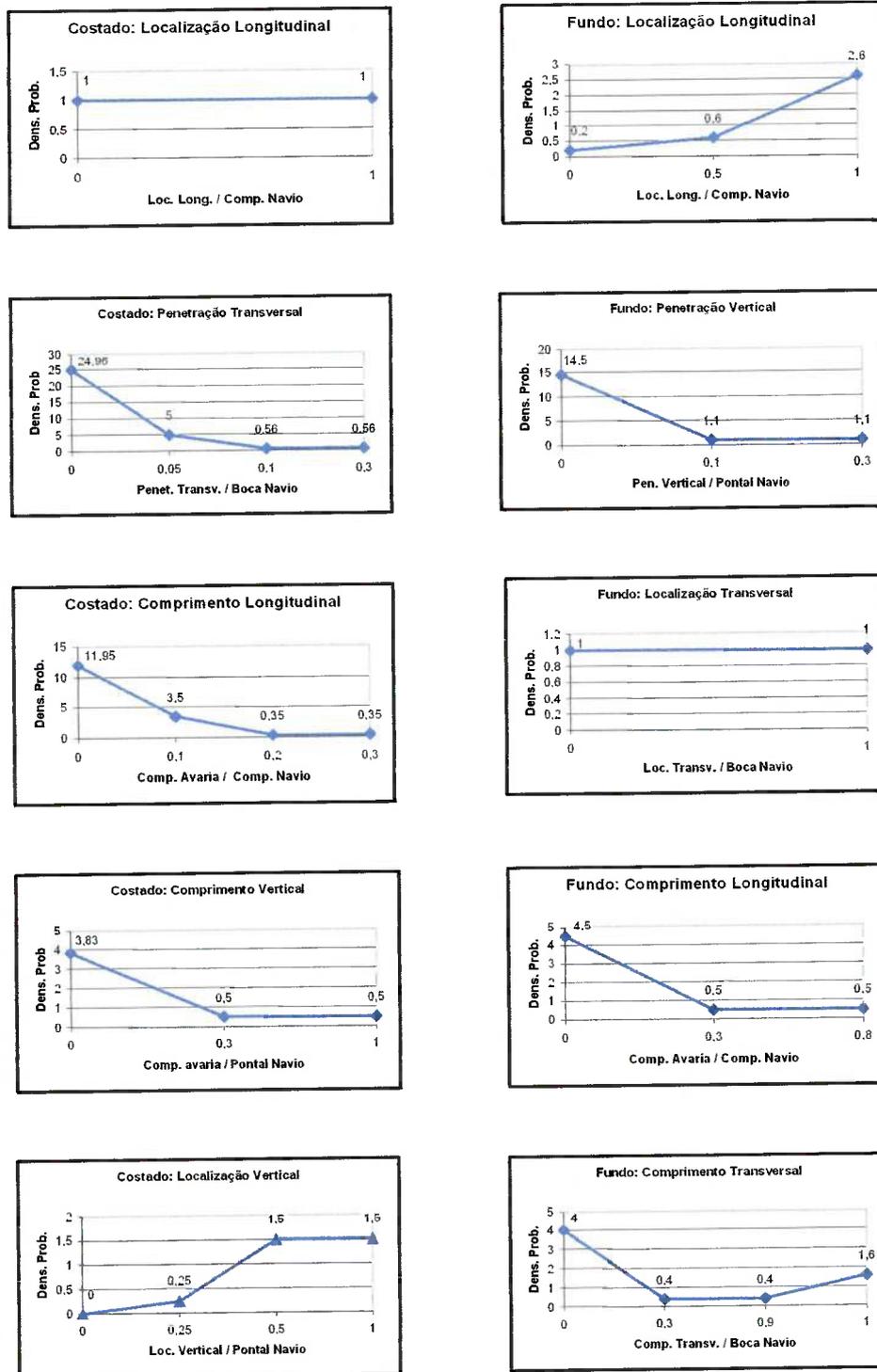


Figura AII.1 – Funções densidade de probabilidade.

ANEXO III – EXEMPLO DE UM CASO ANALISADO

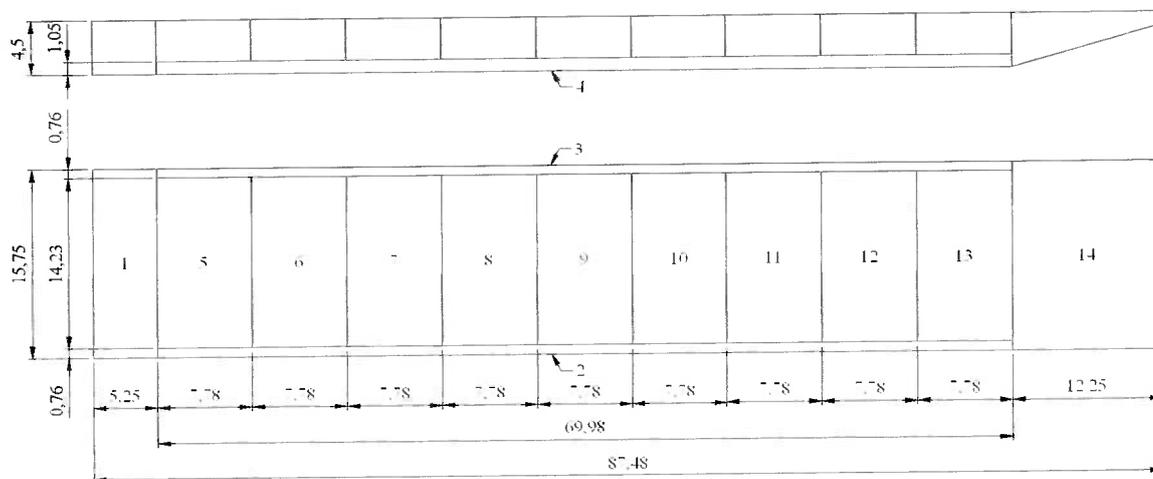


Figura AIII.1 – Dimensões de uma embarcação analisada

AIII.1 Arquivo de entrada

87.48

85.61

4.5

15.75

2.86

617.75

1.05

0.76

1

0.90

14

20 20 20 20 20

20 20 20 20 20

1 0 0

0.00 0.00 4.50

0.00 15.75 0.00

0.00 0.00 0.00

0.00 15.75 4.50

5.25 0.00 0.00

5.25 0.00 4.50	75.23 15.75 0.00	8 370.35 0
5.25 15.75 4.50		28.58 0.76 1.05
5.25 15.75 0.00	5 370.35 0	28.58 0.76 4.50
	5.25 0.76 1.05	28.58 14.99 4.50
2 0 0	5.25 0.76 4.50	28.58 14.99 1.05
5.25 0.00 1.05	5.25 14.99 4.50	36.35 0.76 1.05
5.25 0.00 4.50	5.25 14.99 1.05	36.35 0.76 4.50
5.25 0.76 4.50	13.03 0.76 1.05	36.35 14.99 4.50
5.25 0.76 1.05	13.03 0.76 4.50	36.35 14.99 1.05
75.23 0.00 1.05	13.03 14.99 4.50	
75.23 0.00 4.50	13.03 14.99 1.05	9 370.35 0
75.23 0.76 4.50		36.35 0.76 1.05
75.23 0.76 1.05	6 370.35 0	36.35 0.76 4.50
	13.03 0.76 1.05	36.35 14.99 4.50
3 0 0	13.03 0.76 4.50	36.35 14.99 1.05
5.25 14.99 1.05	13.03 14.99 4.50	44.13 0.76 1.05
5.25 14.99 4.50	13.03 14.99 1.05	44.13 0.76 4.50
5.25 15.75 4.50	20.80 0.76 1.05	44.13 14.99 4.50
5.25 15.75 1.05	20.80 0.76 4.50	44.13 14.99 1.05
75.23 14.99 1.05	20.80 14.99 4.50	
75.23 14.99 4.50	20.80 14.99 1.05	10 370.35 0
75.23 15.75 4.50		44.13 0.76 1.05
75.23 15.75 1.05	7 370.35 0	44.13 0.76 4.50
	20.80 0.76 1.05	44.13 14.99 4.50
4 0 0	20.80 0.76 4.50	44.13 14.99 1.05
5.25 0.00 0.00	20.80 14.99 4.50	51.90 0.76 1.05
5.25 0.00 1.05	20.80 14.99 1.05	51.90 0.76 4.50
5.25 15.75 1.05	28.58 0.76 1.05	51.90 14.99 4.50
5.25 15.75 0.00	28.58 0.76 4.50	51.90 14.99 1.05
75.23 0.00 0.00	28.58 14.99 4.50	
75.23 0.00 1.05	28.58 14.99 1.05	11 370.35 0
75.23 15.75 1.05		51.90 0.76 1.05

51.90 0.76 4.50	67.45 0.76 1.05	75.23 14.99 1.05
51.90 14.99 4.50	67.45 0.76 4.50	
51.90 14.99 1.05	67.45 14.99 4.50	14 0 0
59.68 0.76 1.05	67.45 14.99 1.05	75.23 0.00 0.00
59.68 0.76 4.50		75.23 0.00 4.50
59.68 14.99 4.50	13 370.35 0	75.23 15.75 4.50
59.68 14.99 1.05	67.45 0.76 1.05	75.23 15.75 0.00
	67.45 0.76 4.50	87.48 0.00 3.38
12 370.35 0	67.45 14.99 4.50	87.48 0.00 4.50
59.68 0.76 1.05	67.45 14.99 1.05	87.48 15.75 4.50
59.68 0.76 4.50	75.23 0.76 1.05	87.48 15.75 3.38
59.68 14.99 4.50	75.23 0.76 4.50	
59.68 14.99 1.05	75.23 14.99 4.50	

AIII.2 Arquivo de saída

Nome do arquivo: 3000 9x1 0.76x1.05

Comprimento total= 87.48m
Comprimento entre perpendiculares= 85.61m
Pontal= 4.50m
Boca= 15.75m
Calado= 2.86m
Altura do fundo duplo= 1.05m
Largura do costado duplo= 0.76m
Capacidade dos tanques de óleo= 3333.15m³
Toneladas de Porte Bruto= 2999.83tpb
Peso leve= 617.75t
Deslocamento= 3617.58t
Densidade d'água= 1.000t/m³
Densidade do óleo= 0.90t/m³
Número de tanques= 14

Espaçamentos da avaria do costado devido a colisão
Número de espaçamentos da localização longitudinal= 20
Número de espaçamentos da extensão longitudinal= 20
Número de espaçamentos da penetração transversal= 20
Número de espaçamentos da extensão vertical= 20
Número de espaçamentos da localização vertical= 20

Espaçamentos da avaria do fundo devido o encalhe
Número de espaçamentos da localização longitudinal= 20
Número de espaçamentos da extensão longitudinal= 20
Número de espaçamentos da penetração vertical= 20
Número de espaçamentos da extensão transversal= 20
Número de espaçamentos da localização transversal= 20

TABELA DO COSTADO

Compartimento(s)	Óleo	Probab.	Cumul.	Médio	Pie	Extremo
1	0.00	0.02824	0.02824	0.00	0.00000	0.00
1 4	0.00	0.00070	0.02894	0.00	0.00000	0.00
1 2 4	0.00	0.00813	0.03707	0.00	0.00000	0.00
1 2	0.00	0.04369	0.08076	0.00	0.00000	0.00
4	0.00	0.00706	0.08782	0.00	0.00000	0.00
2 4	0.00	0.08228	0.17010	0.00	0.00000	0.00
2	0.00	0.44227	0.61237	0.00	0.00000	0.00
4 14	0.00	0.00075	0.61312	0.00	0.00000	0.00
2 4 14	0.00	0.00873	0.62185	0.00	0.00000	0.00
2 14	0.00	0.04691	0.66876	0.00	0.00000	0.00
14	0.00	0.08425	0.75301	0.00	0.00000	0.00
1 2 4 5	370.35	0.00252	0.75552	0.93	0.00000	0.00
1 2 5	370.35	0.01352	0.76904	5.01	0.00000	0.00
2 4 5	370.35	0.00136	0.77040	0.50	0.00000	0.00
2 5	370.35	0.00730	0.77770	2.70	0.00000	0.00
2 4 6	370.35	0.00169	0.77938	0.62	0.00000	0.00
2 6	370.35	0.00907	0.78845	3.36	0.00000	0.00
2 4 7	370.35	0.00160	0.79005	0.59	0.00000	0.00
2 7	370.35	0.00862	0.79867	3.19	0.00000	0.00
2 4 8	370.35	0.00144	0.80011	0.53	0.00000	0.00
2 8	370.35	0.00773	0.80783	2.86	0.00000	0.00
2 4 9	370.35	0.00144	0.80927	0.53	0.00000	0.00
2 9	370.35	0.00773	0.81700	2.86	0.00000	0.00
2 4 10	370.35	0.00160	0.81860	0.59	0.00000	0.00
2 10	370.35	0.00862	0.82722	3.19	0.00000	0.00
2 4 11	370.35	0.00140	0.82862	0.52	0.00000	0.00
2 11	370.35	0.00752	0.83614	2.78	0.00000	0.00
2 4 12	370.35	0.00136	0.83750	0.50	0.00000	0.00
2 12	370.35	0.00730	0.84479	2.70	0.00000	0.00
2 4 13	370.35	0.00123	0.84603	0.46	0.00000	0.00
2 13	370.35	0.00663	0.85265	2.45	0.00000	0.00
2 4 13 14	370.35	0.00270	0.85536	1.00	0.00000	0.00

2	13	14	370.35	0.01452	0.86988	5.38	0.00000	0.00
1	2	4	740.70	0.00055	0.87043	0.40	0.00000	0.00
1	2	5	740.70	0.00294	0.87337	2.18	0.00000	0.00
2	4	5	740.70	0.00176	0.87513	1.31	0.00000	0.00
2	5	6	740.70	0.00947	0.88460	7.02	0.00000	0.00
2	4	6	740.70	0.00170	0.88630	1.26	0.00000	0.00
2	6	7	740.70	0.00915	0.89545	6.78	0.00000	0.00
2	4	7	740.70	0.00177	0.89723	1.31	0.00000	0.00
2	7	8	740.70	0.00954	0.90677	7.07	0.00677	50.13
2	4	8	740.70	0.00208	0.90885	1.54	0.00208	15.39
2	8	9	740.70	0.01117	0.92001	8.27	0.01117	82.70
2	4	9	740.70	0.00177	0.92179	1.31	0.00177	13.14
2	9	10	740.70	0.00954	0.93132	7.07	0.00954	70.66
2	4	10	740.70	0.00170	0.93303	1.26	0.00170	12.61
2	10	11	740.70	0.00915	0.94218	6.78	0.00915	67.78
2	4	11	740.70	0.00205	0.94423	1.52	0.00205	15.18
2	11	12	740.70	0.01102	0.95525	8.16	0.01102	81.62
2	4	12	740.70	0.00210	0.95735	1.56	0.00210	15.57
2	12	13	740.70	0.01130	0.96865	8.37	0.01130	83.69
2	4	12	740.70	0.00059	0.96924	0.44	0.00059	4.39
2	12	13	740.70	0.00319	0.97243	2.36	0.00319	23.61
1	2	4	1111.05	0.00011	0.97254	0.13	0.00011	1.27
1	2	5	1111.05	0.00062	0.97316	0.68	0.00062	6.84
2	4	5	1111.05	0.00042	0.97357	0.46	0.00042	4.63
2	5	6	1111.05	0.00224	0.97581	2.49	0.00224	24.88
2	4	6	1111.05	0.00053	0.97635	0.59	0.00053	5.92
2	6	7	1111.05	0.00286	0.97921	3.18	0.00286	31.82
2	4	7	1111.05	0.00055	0.97976	0.61	0.00055	6.09
2	7	8	1111.05	0.00294	0.98270	3.27	0.00294	32.71
2	4	8	1111.05	0.00055	0.98325	0.61	0.00055	6.09
2	8	9	1111.05	0.00294	0.98620	3.27	0.00294	32.71
2	4	9	1111.05	0.00053	0.98673	0.59	0.00053	5.92
2	9	10	1111.05	0.00286	0.98959	3.18	0.00286	31.82
2	4	10	1111.05	0.00042	0.99001	0.46	0.00042	4.63
2	10	11	1111.05	0.00224	0.99225	2.49	0.00224	24.88
2	4	11	1111.05	0.00042	0.99267	0.47	0.00042	4.66

2 11 12 13	1111.05	0.00226	0.99492	2.51	0.00226	25.06
2 4 11 12 13 14	1111.05	0.00012	0.99504	0.13	0.00012	1.28
2 11 12 13 14	1111.05	0.00062	0.99566	0.69	0.00062	6.89
2 4 5 6 7 8	1481.40	0.00010	0.99576	0.15	0.00010	1.53
2 5 6 7 8	1481.40	0.00055	0.99632	0.82	0.00055	8.21
2 4 6 7 8 9	1481.40	0.00009	0.99641	0.14	0.00009	1.37
2 6 7 8 9	1481.40	0.00050	0.99691	0.74	0.00050	7.37
2 4 7 8 9 10	1481.40	0.00011	0.99701	0.16	0.00011	1.56
2 7 8 9 10	1481.40	0.00057	0.99758	0.84	0.00057	8.39
2 4 8 9 10 11	1481.40	0.00009	0.99767	0.14	0.00009	1.37
2 8 9 10 11	1481.40	0.00050	0.99817	0.74	0.00050	7.37
2 4 9 10 11 12	1481.40	0.00011	0.99828	0.17	0.00011	1.70
2 9 10 11 12	1481.40	0.00062	0.99890	0.91	0.00062	9.12
2 4 10 11 12 13	1481.40	0.00011	0.99901	0.17	0.00011	1.70
2 10 11 12 13	1481.40	0.00062	0.99963	0.91	0.00062	9.12
2 4 5 6 7 8 9	1851.75	0.00001	0.99964	0.02	0.00001	0.21
2 5 6 7 8 9	1851.75	0.00006	0.99970	0.11	0.00006	1.14
2 4 6 7 8 9 10	1851.75	0.00002	0.99973	0.04	0.00002	0.42
2 6 7 8 9 10	1851.75	0.00012	0.99985	0.23	0.00012	2.28
2 4 7 8 9 10 11	1851.75	0.00002	0.99987	0.04	0.00002	0.42
2 7 8 9 10 11	1851.75	0.00012	1.00000	0.23	0.00012	2.28

Zero
0.75301

Médio
151.61m³

Extremo
860.17m³

Tabela do Fundo
(maré=0.00m)

Compartimento(s)	Óleo	Probab.	Cumul.	Médio	Pie	Extremo
1	0.00	0.00186	0.00186	0.00	0.00000	0.00
1 4	0.00	0.04796	0.04982	0.00	0.00000	0.00
4	0.00	0.41907	0.46889	0.00	0.00000	0.00
4 14	0.00	0.35228	0.82117	0.00	0.00000	0.00
14	0.00	0.10516	0.92633	0.00	0.02633	0.00
2 4 10	150.57	0.00013	0.92645	0.02	0.00013	0.19

4 10	150.57	0.00037	0.92683	0.06	0.00037	0.56
2 3 4 10	150.57	0.00000	0.92683	0.00	0.00000	0.01
3 4 10	150.57	0.00013	0.92696	0.02	0.00013	0.19
2 4 6	150.57	0.00005	0.92701	0.01	0.00005	0.07
4 6	150.57	0.00014	0.92715	0.02	0.00014	0.21
2 3 4 6	150.57	0.00000	0.92715	0.00	0.00000	0.00
3 4 6	150.57	0.00005	0.92720	0.01	0.00005	0.07
2 4 8	150.57	0.00013	0.92733	0.02	0.00013	0.20
4 8	150.57	0.00039	0.92772	0.06	0.00039	0.59
2 3 4 8	150.57	0.00000	0.92772	0.00	0.00000	0.01
3 4 8	150.57	0.00013	0.92785	0.02	0.00013	0.20
2 4 12	150.57	0.00021	0.92806	0.03	0.00021	0.31
4 12	150.57	0.00062	0.92868	0.09	0.00062	0.94
2 3 4 12	150.57	0.00001	0.92869	0.00	0.00001	0.01
3 4 12	150.57	0.00021	0.92890	0.03	0.00021	0.31
2 4 7	150.76	0.00006	0.92896	0.01	0.00006	0.09
4 7	150.76	0.00017	0.92913	0.03	0.00017	0.26
2 3 4 7	150.76	0.00000	0.92913	0.00	0.00000	0.00
3 4 7	150.76	0.00006	0.92919	0.01	0.00006	0.09
1 2 4 5	150.76	0.00019	0.92938	0.03	0.00019	0.29
1 4 5	150.76	0.00057	0.92995	0.09	0.00057	0.86
1 2 3 4 5	150.76	0.00001	0.92996	0.00	0.00001	0.01
1 3 4 5	150.76	0.00019	0.93015	0.03	0.00019	0.29
2 4 5	150.76	0.00004	0.93019	0.01	0.00004	0.06
4 5	150.76	0.00012	0.93031	0.02	0.00012	0.19
2 3 4 5	150.76	0.00000	0.93031	0.00	0.00000	0.00
3 4 5	150.76	0.00004	0.93036	0.01	0.00004	0.06
2 4 9	150.76	0.00015	0.93051	0.02	0.00015	0.23
4 9	150.76	0.00045	0.93096	0.07	0.00045	0.68
2 3 4 9	150.76	0.00000	0.93096	0.00	0.00000	0.01
3 4 9	150.76	0.00015	0.93111	0.02	0.00015	0.23
2 4 11	150.76	0.00018	0.93130	0.03	0.00018	0.27
4 11	150.76	0.00054	0.93184	0.08	0.00054	0.82
2 3 4 11	150.76	0.00001	0.93184	0.00	0.00001	0.01
3 4 11	150.76	0.00018	0.93202	0.03	0.00018	0.27
2 4 13	150.76	0.00026	0.93229	0.04	0.00026	0.40

4 13	150.76	0.00079	0.93308	0.12	0.00079	1.19
2 3 4 13	150.76	0.00001	0.93309	0.00	0.00001	0.01
3 4 13	150.76	0.00026	0.93335	0.04	0.00026	0.40
2 4 13 14	150.76	0.00214	0.93548	0.32	0.00214	3.22
4 13 14	150.76	0.00639	0.94187	0.96	0.00639	9.63
2 3 4 13 14	150.76	0.00007	0.94194	0.01	0.00007	0.11
3 4 13 14	150.76	0.00214	0.94408	0.32	0.00214	3.22
2 4 6 7	301.33	0.00019	0.94427	0.06	0.00019	0.57
4 6 7	301.33	0.00057	0.94484	0.17	0.00057	1.71
2 3 4 6 7	301.33	0.00001	0.94484	0.00	0.00001	0.02
3 4 6 7	301.33	0.00019	0.94503	0.06	0.00019	0.57
2 4 9 10	301.33	0.00032	0.94535	0.10	0.00032	0.95
4 9 10	301.33	0.00094	0.94629	0.28	0.00094	2.85
2 3 4 9 10	301.33	0.00001	0.94630	0.00	0.00001	0.03
3 4 9 10	301.33	0.00032	0.94662	0.10	0.00032	0.95
2 4 10 11	301.33	0.00051	0.94713	0.15	0.00051	1.54
4 10 11	301.33	0.00153	0.94866	0.46	0.00153	4.60
2 3 4 10 11	301.33	0.00002	0.94867	0.01	0.00002	0.05
3 4 10 11	301.33	0.00051	0.94918	0.15	0.00051	1.54
1 2 4 5 6	301.33	0.00013	0.94932	0.04	0.00013	0.40
1 4 5 6	301.33	0.00040	0.94971	0.12	0.00040	1.20
1 2 3 4 5 6	301.33	0.00000	0.94972	0.00	0.00000	0.01
1 3 4 5 6	301.33	0.00013	0.94985	0.04	0.00013	0.40
2 4 5 6	301.33	0.00014	0.94999	0.04	0.00014	0.43
4 5 6	301.33	0.00043	0.95043	0.13	0.00043	1.30
2 3 4 5 6	301.33	0.00000	0.95043	0.00	0.00000	0.01
3 4 5 6	301.33	0.00014	0.95057	0.04	0.00014	0.43
2 4 7 8	301.33	0.00021	0.95078	0.06	0.00021	0.63
4 7 8	301.33	0.00062	0.95140	0.19	0.00062	1.87
2 3 4 7 8	301.33	0.00001	0.95141	0.00	0.00001	0.02
3 4 7 8	301.33	0.00021	0.95162	0.06	0.00021	0.63
2 4 8 9	301.33	0.00024	0.95186	0.07	0.00024	0.73
4 8 9	301.33	0.00073	0.95259	0.22	0.00073	2.20
2 3 4 8 9	301.33	0.00001	0.95260	0.00	0.00001	0.02
3 4 8 9	301.33	0.00024	0.95284	0.07	0.00024	0.73
2 4 11 12	301.33	0.00063	0.95347	0.19	0.00063	1.90

4 11 12	301.33	0.00189	0.95536	0.57	0.00189	5.69
2 3 4 11 12	301.33	0.00002	0.95538	0.01	0.00002	0.06
3 4 11 12	301.33	0.00063	0.95601	0.19	0.00063	1.90
2 4 12 13	301.33	0.00085	0.95686	0.26	0.00085	2.56
4 12 13	301.33	0.00254	0.95941	0.77	0.00254	7.67
2 3 4 12 13	301.33	0.00003	0.95944	0.01	0.00003	0.08
3 4 12 13	301.33	0.00085	0.96029	0.26	0.00085	2.56
2 4 12 13 14	301.33	0.00135	0.96164	0.41	0.00135	4.07
4 12 13 14	301.33	0.00405	0.96568	1.22	0.00405	12.19
2 3 4 12 13 14	301.33	0.00004	0.96573	0.01	0.00004	0.13
3 4 12 13 14	301.33	0.00135	0.96708	0.41	0.00135	4.07
2 4 6 7 8	451.90	0.00013	0.96721	0.06	0.00013	0.59
4 6 7 8	451.90	0.00039	0.96760	0.18	0.00039	1.77
2 3 4 6 7 8	451.90	0.00000	0.96761	0.00	0.00000	0.02
3 4 6 7 8	451.90	0.00013	0.96774	0.06	0.00013	0.59
2 4 8 9 10	451.90	0.00018	0.96792	0.08	0.00018	0.81
4 8 9 10	451.90	0.00054	0.96846	0.24	0.00054	2.44
2 3 4 8 9 10	451.90	0.00001	0.96846	0.00	0.00001	0.03
3 4 8 9 10	451.90	0.00018	0.96864	0.08	0.00018	0.81
2 4 10 11 12	451.90	0.00037	0.96902	0.17	0.00037	1.69
4 10 11 12	451.90	0.00112	0.97013	0.50	0.00112	5.04
2 3 4 10 11 12	451.90	0.00001	0.97014	0.01	0.00001	0.06
3 4 10 11 12	451.90	0.00037	0.97052	0.17	0.00037	1.69
1 2 4 5 6 7	452.10	0.00011	0.97062	0.05	0.00011	0.48
1 4 5 6 7	452.10	0.00031	0.97094	0.14	0.00031	1.42
1 2 3 4 5 6 7	452.10	0.00000	0.97094	0.00	0.00000	0.02
1 3 4 5 6 7	452.10	0.00011	0.97105	0.05	0.00011	0.48
2 4 5 6 7	452.10	0.00011	0.97116	0.05	0.00011	0.51
4 5 6 7	452.10	0.00033	0.97149	0.15	0.00033	1.51
2 3 4 5 6 7	452.10	0.00000	0.97150	0.00	0.00000	0.02
3 4 5 6 7	452.10	0.00011	0.97161	0.05	0.00011	0.51
2 4 9 10 11	452.10	0.00033	0.97194	0.15	0.00033	1.48
4 9 10 11	452.10	0.00098	0.97292	0.44	0.00098	4.44
2 3 4 9 10 11	452.10	0.00001	0.97293	0.00	0.00001	0.05
3 4 9 10 11	452.10	0.00033	0.97326	0.15	0.00033	1.48
2 4 7 8 9	452.10	0.00016	0.97341	0.07	0.00016	0.70

4 7 8 9	452.10	0.00047	0.97388	0.21	0.00047	2.10
2 3 4 7 8 9	452.10	0.00001	0.97388	0.00	0.00001	0.02
3 4 7 8 9	452.10	0.00016	0.97404	0.07	0.00016	0.70
2 4 11 12 13	452.10	0.00050	0.97454	0.22	0.00050	2.25
4 11 12 13	452.10	0.00149	0.97602	0.67	0.00149	6.73
2 3 4 11 12 13	452.10	0.00002	0.97604	0.01	0.00002	0.07
3 4 11 12 13	452.10	0.00050	0.97654	0.22	0.00050	2.25
2 4 11 12 13 14	452.10	0.00087	0.97740	0.39	0.00087	3.92
4 11 12 13 14	452.10	0.00260	0.98000	1.17	0.00260	11.74
2 3 4 11 12 13 14	452.10	0.00003	0.98003	0.01	0.00003	0.13
3 4 11 12 13 14	452.10	0.00087	0.98090	0.39	0.00087	3.92
1 2 4 5 6 7 8	602.67	0.00009	0.98099	0.05	0.00009	0.54
1 4 5 6 7 8	602.67	0.00027	0.98126	0.16	0.00027	1.63
1 2 3 4 5 6 7 8	602.67	0.00000	0.98126	0.00	0.00000	0.02
1 3 4 5 6 7 8	602.67	0.00009	0.98135	0.05	0.00009	0.54
2 4 5 6 7 8	602.67	0.00005	0.98140	0.03	0.00005	0.32
4 5 6 7 8	602.67	0.00016	0.98157	0.10	0.00016	0.97
2 3 4 5 6 7 8	602.67	0.00000	0.98157	0.00	0.00000	0.01
3 4 5 6 7 8	602.67	0.00005	0.98162	0.03	0.00005	0.32
2 4 6 7 8 9	602.67	0.00010	0.98172	0.06	0.00010	0.58
4 6 7 8 9	602.67	0.00029	0.98201	0.17	0.00029	1.74
2 3 4 6 7 8 9	602.67	0.00000	0.98201	0.00	0.00000	0.02
3 4 6 7 8 9	602.67	0.00010	0.98211	0.06	0.00010	0.58
2 4 7 8 9 10	602.67	0.00010	0.98221	0.06	0.00010	0.62
4 7 8 9 10	602.67	0.00031	0.98251	0.18	0.00031	1.84
2 3 4 7 8 9 10	602.67	0.00000	0.98252	0.00	0.00000	0.02
3 4 7 8 9 10	602.67	0.00010	0.98262	0.06	0.00010	0.62
2 4 8 9 10 11	602.67	0.00009	0.98271	0.06	0.00009	0.56
4 8 9 10 11	602.67	0.00028	0.98299	0.17	0.00028	1.67
2 3 4 8 9 10 11	602.67	0.00000	0.98299	0.00	0.00000	0.02
3 4 8 9 10 11	602.67	0.00009	0.98308	0.06	0.00009	0.56
2 4 9 10 11 12	602.67	0.00014	0.98323	0.09	0.00014	0.87
4 9 10 11 12	602.67	0.00043	0.98366	0.26	0.00043	2.61
2 3 4 9 10 11 12	602.67	0.00000	0.98367	0.00	0.00000	0.03
3 4 9 10 11 12	602.67	0.00014	0.98381	0.09	0.00014	0.87
2 4 10 11 12 13	602.67	0.00024	0.98405	0.14	0.00024	1.44

4 10 11 12 13	602.67	0.00072	0.98477	0.43	0.00072	4.31
2 3 4 10 11 12 13	602.67	0.00001	0.98477	0.00	0.00001	0.05
3 4 10 11 12 13	602.67	0.00024	0.98501	0.14	0.00024	1.44
2 4 10 11 12 13 14	602.67	0.00075	0.98577	0.45	0.00075	4.54
4 10 11 12 13 14	602.67	0.00226	0.98802	1.36	0.00226	13.59
2 3 4 10 11 12 13 14	602.67	0.00002	0.98805	0.01	0.00002	0.15
3 4 10 11 12 13 14	602.67	0.00075	0.98880	0.45	0.00075	4.54
2 4 5 7 8 9 10	753.24	0.00003	0.98883	0.03	0.00003	0.26
4 6 7 8 9 10	753.24	0.00010	0.98894	0.08	0.00010	0.76
2 3 4 6 7 8 9 10	753.24	0.00000	0.98894	0.00	0.00000	0.01
3 4 6 7 8 9 10	753.24	0.00003	0.98897	0.03	0.00003	0.26
2 4 8 9 10 11 12	753.24	0.00006	0.98903	0.04	0.00006	0.44
4 8 9 10 11 12	753.24	0.00017	0.98920	0.13	0.00017	1.30
2 3 4 8 9 10 11 12	753.24	0.00000	0.98920	0.00	0.00000	0.01
3 4 8 9 10 11 12	753.24	0.00006	0.98926	0.04	0.00006	0.44
1 2 4 5 6 7 8 9	753.43	0.00011	0.98938	0.09	0.00011	0.86
1 4 5 6 7 8 9	753.43	0.00034	0.98972	0.26	0.00034	2.57
1 2 3 4 5 6 7 8 9	753.43	0.00000	0.98972	0.00	0.00000	0.03
1 3 4 5 6 7 8 9	753.43	0.00011	0.98983	0.09	0.00011	0.86
2 4 5 6 7 8 9	753.43	0.00003	0.98986	0.02	0.00003	0.22
4 5 6 7 8 9	753.43	0.00009	0.98995	0.07	0.00009	0.66
2 3 4 5 6 7 8 9	753.43	0.00000	0.98995	0.00	0.00000	0.01
3 4 5 6 7 8 9	753.43	0.00003	0.98998	0.02	0.00003	0.22
2 4 7 8 9 10 11	753.43	0.00004	0.99002	0.03	0.00004	0.30
4 7 8 9 10 11	753.43	0.00012	0.99014	0.09	0.00012	0.89
2 3 4 7 8 9 10 11	753.43	0.00000	0.99014	0.00	0.00000	0.01
3 4 7 8 9 10 11	753.43	0.00004	0.99018	0.03	0.00004	0.30
2 4 9 10 11 12 13	753.43	0.00010	0.99028	0.08	0.00010	0.78
4 9 10 11 12 13	753.43	0.00031	0.99059	0.23	0.00031	2.32
2 3 4 9 10 11 12 13	753.43	0.00000	0.99059	0.00	0.00000	0.03
3 4 9 10 11 12 13	753.43	0.00010	0.99070	0.08	0.00010	0.78
2 4 9 10 11 12 13 14	753.43	0.00056	0.99126	0.43	0.00056	4.26
4 9 10 11 12 13 14	753.43	0.00169	0.99295	1.27	0.00169	12.73
2 3 4 9 10 11 12 13 14	753.43	0.00002	0.99297	0.01	0.00002	0.14
3 4 9 10 11 12 13 14	753.43	0.00056	0.99353	0.43	0.00056	4.26
1 2 4 5 6 7 8 9 10	904.00	0.00009	0.99362	0.08	0.00009	0.80

1	4	5	6	7	8	9	10	904.00	0.00026	0.99389	0.24	0.00026	2.38			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	904.00	0.00000	0.99389	0.03			
1	3	4	5	6	7	8	9	10	904.00	0.00009	0.99398	0.08	0.80			
2	4	5	6	7	8	9	10	904.00	0.00003	0.99401	0.03	0.00003	0.27			
4	5	6	7	8	9	10	904.00	0.00009	0.99410	0.99410	0.08	0.00009	0.82			
2	3	4	5	6	7	8	9	10	904.00	0.00000	0.99410	0.00	0.00000	0.01		
3	4	5	6	7	8	9	10	904.00	0.00003	0.99413	0.03	0.00003	0.27			
2	4	6	7	8	9	10	11	904.00	0.00004	0.99416	0.03	0.00004	0.32			
4	6	7	8	9	10	11	904.00	0.00011	0.99427	0.99427	0.10	0.00011	0.96			
2	3	4	6	7	8	9	10	11	904.00	0.00000	0.99427	0.00	0.00000	0.01		
3	4	6	7	8	9	10	11	904.00	0.00004	0.99431	0.03	0.00004	0.32			
2	4	7	8	9	10	11	12	904.00	0.00005	0.99435	0.04	0.00005	0.42			
4	7	8	9	10	11	12	904.00	0.00014	0.99449	0.99449	0.12	0.00014	1.24			
2	3	4	7	8	9	10	11	12	904.00	0.00000	0.99449	0.00	0.00000	0.01		
3	4	7	8	9	10	11	12	904.00	0.00005	0.99454	0.04	0.00005	0.42			
2	4	8	9	10	11	12	13	904.00	0.00007	0.99460	0.06	0.00007	0.59			
4	8	9	10	11	12	13	904.00	0.00020	0.99480	0.99480	0.18	0.00020	1.78			
2	3	4	8	9	10	11	12	13	904.00	0.00000	0.99480	0.00	0.00000	0.02		
3	4	8	9	10	11	12	13	904.00	0.00007	0.99487	0.06	0.00007	0.59			
2	4	8	9	10	11	12	13	14	904.00	0.00033	0.99519	0.29	0.00033	2.94		
4	8	9	10	11	12	13	14	904.00	0.00097	0.99616	0.88	0.00097	8.79			
2	3	4	8	9	10	11	12	13	14	904.00	0.00001	0.99618	0.01	0.00001	0.10	
3	4	8	9	10	11	12	13	14	904.00	0.00033	0.99650	0.29	0.00033	2.94		
2	4	6	7	8	9	10	11	12	1054.57	0.00004	0.99654	0.04	0.00004	0.40		
4	6	7	8	9	10	11	12	1054.57	0.00011	0.99665	0.12	0.00011	1.20			
2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	1054.57	0.00000	0.99665	0.01	0.00000	0.01	
3	4	6	7	8	9	10	11	12	1054.57	0.00004	0.99669	0.04	0.00004	0.40		
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	1054.76	0.00007	0.99676	0.08	0.00007	0.76	
1	4	5	6	7	8	9	10	11	1054.76	0.00022	0.99698	0.23	0.00022	2.28		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1054.76	0.00000	0.99698	0.02	0.00000	0.02
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1054.76	0.00007	0.99706	0.08	0.00007	0.76	
2	4	5	6	7	8	9	10	11	1054.76	0.00003	0.99709	0.03	0.00003	0.35		
4	5	6	7	8	9	10	11	1054.76	0.00010	0.99719	0.10	0.00010	1.04			
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1054.76	0.00000	0.99719	0.01	0.00000	0.01	
3	4	5	6	7	8	9	10	11	1054.76	0.00003	0.99722	0.03	0.00003	0.35		
2	4	7	8	9	10	11	12	13	1054.76	0.00006	0.99728	0.06	0.00006	0.59		

4 7 8 9 10 11 12 13	1054.76	0.00017	0.99744	0.18	0.00017	1.76
2 3 4 7 8 9 10 11 12 13	1054.76	0.00000	0.99744	0.00	0.00000	0.02
3 4 7 8 9 10 11 12 13	1054.76	0.00006	0.99750	0.06	0.00006	0.59
2 4 7 8 9 10 11 12 13 14	1054.76	0.00019	0.99769	0.20	0.00019	2.04
4 7 8 9 10 11 12 13 14	1054.76	0.00058	0.99827	0.61	0.00058	6.11
2 3 4 7 8 9 10 11 12 13 14	1054.76	0.00001	0.99828	0.01	0.00001	0.07
3 4 7 8 9 10 11 12 13 14	1054.76	0.00019	0.99847	0.20	0.00019	2.04
1 2 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1205.33	0.00005	0.99852	0.06	0.00005	0.58
1 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1205.33	0.00014	0.99867	0.17	0.00014	1.73
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1205.33	0.00000	0.99867	0.00	0.00000	0.02
1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1205.33	0.00005	0.99871	0.06	0.00005	0.58
2 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1205.33	0.00004	0.99876	0.05	0.00004	0.53
4 5 6 7 8 9 10 11 12	1205.33	0.00013	0.99889	0.16	0.00013	1.60
2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1205.33	0.00000	0.99889	0.00	0.00000	0.02
3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1205.33	0.00004	0.99894	0.05	0.00004	0.53
2 4 6 7 8 9 10 11 12 13	1205.33	0.00004	0.99898	0.05	0.00004	0.53
4 6 7 8 9 10 11 12 13	1205.33	0.00013	0.99911	0.16	0.00013	1.59
2 3 4 6 7 8 9 10 11 12 13	1205.33	0.00000	0.99911	0.00	0.00000	0.02
3 4 6 7 8 9 10 11 12 13	1205.33	0.00004	0.99916	0.05	0.00004	0.53
2 4 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1205.33	0.00009	0.99925	0.11	0.00009	1.07
4 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1205.33	0.00027	0.99951	0.32	0.00027	3.20
2 3 4 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1205.33	0.00000	0.99952	0.00	0.00000	0.03
3 4 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1205.33	0.00009	0.99960	0.11	0.00009	1.07
1 2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	1356.10	0.00002	0.99962	0.02	0.00002	0.24
1 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	1356.10	0.00005	0.99968	0.07	0.00005	0.72
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	1356.10	0.00000	0.99968	0.00	0.00000	0.01
1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	1356.10	0.00002	0.99969	0.02	0.00002	0.24
2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	1356.10	0.00004	0.99973	0.05	0.00004	0.52
4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	1356.10	0.00011	0.99985	0.15	0.00011	1.55
2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	1356.10	0.00000	0.99985	0.00	0.00000	0.02
3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	1356.10	0.00004	0.99988	0.05	0.00004	0.52
2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1356.10	0.00002	0.99991	0.03	0.00002	0.31
4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1356.10	0.00007	0.99998	0.09	0.00007	0.93
2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1356.10	0.00000	0.99998	0.00	0.00000	0.01
3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14	1356.10	0.00002	1.00000	0.03	0.00002	0.31

Maré	Zero	Médio	Extremo
0.00	0.92633	30.84m ³	308.44m ³
Combinação	0.92633	30.84m ³	308.44m ³
Combinação do costado e do fundo	costado(0.40)	fundo(0.60)	Combinação
Probabilidade de vazamento nulo (Po)	0.753005	0.926330	0.857000
Vazamento de óleo médio	151.61m ³	30.84m ³	79.15m ³
Vazamento de óleo extremo	860.17m ³	308.44m ³	529.13m ³
Parâmetro de vazamento médio (Om)	0.023747		
Parâmetro de vazamento extremo (Oe)	0.158749		

Parâmetros MARPOL 73/78 (Quando não é considerada a sobrevivência do navio)
 Por=0.810000 Omr=0.017000 Oer=0.127000

Índice de Prevenção de Poluição=0.931766