

# *Avaliação do Derramamento de Óleo de Chatas-Tanque através do Método Probabilístico*

Sampaio, Cláudio Mueller P.\* e Vasconcellos, Luiz A.\*

\* Depto. Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Av. Prof. Mello Moraes 2231, Butantã  
05508-900 São Paulo, SP, Brasil.  
Tel: +55-11-3091-5350 ; Fax: +55-11-30915717 ; E-Mail: clasamp@usp.br

## ***Resumo***

Após a Segunda Guerra Mundial, o aumento da demanda de energia, o desenvolvimento tecnológico e fatores políticos deram origem a um rápido aumento de capacidade dos navios-tanque e, conseqüentemente, em caso de acidente, o aumento dos efeitos dos acidentes como, por exemplo, o encalhe do navio Exxon Valdez em Prince William Sound, Alasca. Com o objetivo de minimizar a poluição ambiental, a Organização Internacional Marítima (IMO) vem desenvolvendo diversos procedimentos de segurança que, ratificados em acordos internacionais, visam avaliar o desempenho do navio quanto à sua capacidade de minimizar o derramamento de óleo.

O trabalho desenvolvido tem como objetivo verificar os efeitos dos diferentes parâmetros dimensionais de chatas-tanque de casco duplo na estimativa do índice de prevenção à poluição através de uma avaliação sistemática para diferentes deslocamentos e arranjos de tanques. O estudo realizado permite verificar se os valores de espaçamento recomendados correspondem às únicas possibilidades existentes ou se, em função das características das chatas, outros arranjos permitiriam a otimização do arranjo das chatas-tanque. O procedimento emprega funções densidade de probabilidade associadas à localização e à extensão da avaria conforme recomendado pelo regulamento 13F do Anexo I da MARPOL 73/78. Através das funções densidade de probabilidade estabelecem-se parâmetros para as prováveis expectativas de vazamentos de óleo possibilitando quantificação do grau de segurança da embarcação.

## ***Introdução***

Na história do transporte marítimo de petróleo, a ocorrência de acidentes sempre esteve presente. Inicialmente, a maior preocupação estava com a tripulação e a carga,

porém a crescente preocupação com relação a sustentabilidade do meio ambiente acarretou uma maior atenção com os efeitos dos derramamentos de óleo. Segundo a Federação Internacional dos Armadores dos Navios-Tanque (*International Tanker Owners Pollution Federation Limited – ITOPF*) os derramamentos de óleo podem ser classificados de acordo com a quantidade de óleo derramada, isto é,

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

A análise de aproximadamente 10 mil registros de vazamentos de óleo revela que os vazamentos com mais de 700 ton representam menos de 3% do número total dos casos de derramamento e que, desses, mais de 62% são causadas por colisões e encalhes. É importante ressaltar que, apesar de serem poucos os grandes vazamentos, eles representam uma 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).

Até o desastre do navio Exxon Valdez em 1989, os navios-tanque eram, em sua maioria, construídos em casco simples, isto é, os hidrocarbonetos contidos nos tanques de carga estavam separados da água apenas pela envoltória do chapeamento. Assim, caso o casco fosse rompido, o conteúdo dos tanques de carga estaria em contato direto com o meio externo. Um meio eficaz de evitar tal risco é proteger os tanques de carga com um segundo chapeamento, 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.

#### ***Aplicação do método probabilístico para avaliação das condições de sobrevivência***

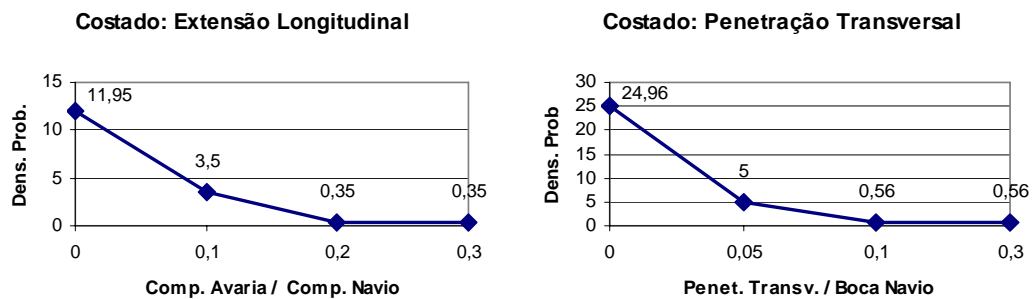
Em 1967, a IMO designou um comitê para desenvolver um procedimento alternativo probabilístico para avaliar a subdivisão e estabilidade de navios que, em 1973, foi aceito como uma regulamentação equivalente, conhecida como resolução A265 (VIII). Esta nova metodologia, considerada mais lógica e consistente, foi inicialmente aplicada aos navios de passageiros e, somente posteriormente, adotada para navios de carga geral (Resolução IMO MSC.19 (58)) e para a avaliação de derramamento de óleo em navios-tanque. A idéia básica 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 dificuldade de informações mais detalhadas das condições de cada evento impossibilitou, entretanto, a inclusão dessa primeira parcela diretamente no procedimento probabilístico. Por outro lado, como sempre existe um risco de avaria, torna-se necessário 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).

*(b) Probabilidade da localização e extensão da avaria.*

Essa probabilidade está relacionada à distribuição das características da avaria (localização e extensão) ao longo do casco e de como essas afetam o processo de alagamento do arranjo interno do navio. É interessante observar que a localização e extensão da avaria dependem das características do navio impactante<sup>1</sup> (forma, massa, velocidade, etc.) e do navio impactado (arranjo estrutural). Na análise realizada pelo Comitê de subdivisão da IMO dois aspectos devem ser citados com relação às curvas de distribuição de densidade obtidas: O primeiro está relacionado à adimensionalização da variável independente em função das dimensões principais do navio, enquanto o segundo diz respeito à independência entre eventos (localização e extensão da avaria). Os levantamentos estatísticos permitiram obter distribuições de densidade de probabilidade como as apresentadas na Figura 1.



<sup>1</sup> Navio Impactante ("Striking ship"); que provoca o impacto e navio impactado ("struck ship"); que recebe o impacto.

Figura 1 – Funções densidade de probabilidade (Fonte: MARPOL, 1997).

Finalmente, a probabilidade de sobrevivência (c) na condição alagada depende de diversos fatores entre os quais, a condição intacta do navio (permeabilidade, calado e estabilidade), 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).

***O modelo probabilístico***

A aplicação do método probabilístico requer a obtenção da probabilidade de um determinado evento tornando necessário a obtenção das funções densidade de probabilidade. A função densidade de probabilidade  $f(x)$  representa uma função contínua definida para um domínio de possíveis eventos que, por exemplo, podem variar entre um valor mínimo  $X_1$  e um valor máximo  $X_2$ . A integral da função densidade  $f(x)$  entre esses limites resulta em um valor unitário. A função densidade de probabilidade pode também representar eventos bidimensionais, como apresentado esquematicamente na Figura 2 em que a função densidade de probabilidade  $f(x, y)$  está definida no domínio  $X_1 \leq x \leq X_2$  e  $Y_1 \leq y \leq Y_2$ . O cálculo da probabilidade de um evento específico é obtido, para o intervalo  $[X_3, X_4 : Y_3, Y_4]$ , através da expressão:

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

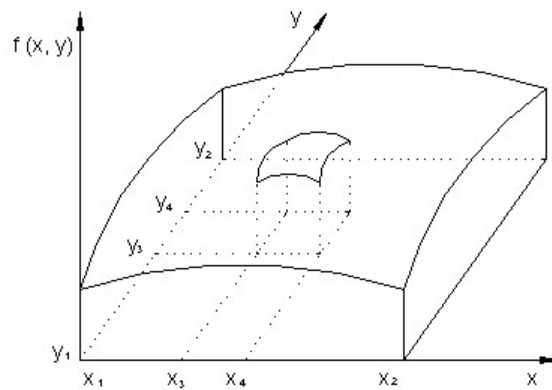


Figura 2 – Probabilidade de um evento bidimensional.

***Critério de prevenção à poluição devido à colisão ou ao 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, são 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 cálculo do volume derramado baseado em princípios hidrostáticos e a determinação de parâmetros característicos (probabilidade de derramamento nulo, volume derramado médio e 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 calculado 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 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 nulo de óleo,  $P_0$*  : Este parâmetro representa a probabilidade de não ocorrer um vazamento de óleo em caso de avaria, ou seja, a avaria (fundo e costado) do casco que não acarreta poluição do mar. Esta probabilidade é dada pela expressão:

$$P_0 = \sum_{i=1}^n p_i K_i \quad (2)$$

em que  $i$  representa cada compartimento/grupo de compartimentos;  $p_i$  corresponde à probabilidade de alagamento do compartimento/grupo de compartimentos e o fator  $K_i$  assume o valor nulo, caso haja vazamento de óleo ou unitário, caso a avaria não provoque vazamento.

- *Vazamento médio de óleo,  $O_M$* : O vazamento médio de óleo corresponde à soma-tória do produto entre o volume vazado e a respectiva probabilidade de ruptura do compartimento ou grupo de compartimentos.

$$O_M = \sum_{i=1}^n \frac{p_i O_i}{C} \quad (3)$$

em que  $O_i$  é a quantidade de óleo derramado ( $m^3$ ) em consequência da ruptura do compartimento ou grupo de compartimentos e  $C$  corresponde à 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. Para sua obtenção considera-se a somatória do produto do volume derramado e da respectiva probabilidade relativa aos 10% superiores da distribuição de probabilidade acumulada.

$$O_E = 10 \left( \sum \frac{P_{ie} O_{ie}}{C} \right) \quad (4)$$

em que  $P_{ie}$  é a probabilidade do compartimento/grupo de compartimento ser rompido relativa 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 e o parâmetro  $O_{ie}$  é o volume de óleo derramado ( $m^3$ ) a partir da ruptura de compartimento ou grupo de compartimentos que acarretam situações extremas.

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:

$$E = k_1 \frac{P_0}{P_{OR}} + k_2 \frac{0,01 + O_{MR}}{0,01 + O_M} + k_3 \frac{0,025 + O_{ER}}{0,025 + O_E} \geq 1,0 \quad (5)$$

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 configurações de navios que representavam a tecnologia mais recente em casco duplo; a Tabela 1 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).

Tabela 1 – Referência dos navios de casco duplo

TPB	Parâmetros Vazamento Óleo		
	$P_{OR}$	$O_{MR}$	$O_{ER}$
5.000	0,81	0,017	0,127
60.000	0,81	0,014	0,104
150.000	0,79	0,016	0,113
283.000	0,77	0,013	0,085

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 são consideradas. Adicionalmente, a IMO estabeleceu que todo óleo armazenado nos tanques é perdido no caso de colisões, enquanto que em avarias devido a encalhe, o volume derramado é obtido através do equilíbrio hidrostático considerando uma pressão de 0,05 bar devido ao sistema de gás inerte.

Os parâmetros de derramamento das equações 3, 4 e 5 podem ser mais facilmente avaliados através da curva de distribuição acumulada de derramamento de óleo. 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 permite o cálculo do derramamento médio através da área acima da curva da função acumulada. Com relação às regras da IMO, tanto Sinkar (1997) como Pawlowski (1996) afirmam que os coeficientes da expressão do índice de prevenção à poluição (Eq. 5) tem gerado intensa discussão em

relação à escolha dos coeficientes de ponderação que deveriam ter uma base racional associada aos benefícios obtidos pela redução dos impactos ambientais e econômicos em função das 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 (“mid-deck”).

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. Por sua vez, Sinkar (1997) sugere que os coeficientes da equação 5 sejam determinados através de uma avaliação dos custos associados ao derramamento de óleo. O procedimento proposto consideraria que, para cada caso de avaria, existisse uma probabilidade associada à dimensão do derramamento e que, em função dessa dimensão, os custos do vazamento de óleo pudessem ser estimados.

### ***Procedimento de avaliação das avarias***

O procedimento sugerido pela IMO requer a realização de três etapas: a avaliação das probabilidades de avarias, a estimativa dos parâmetros de vazamento de óleo e a obtenção do Índice de Prevenção à Poluição. O primeiro passo é a definição dos casos de avaria do costado e do fundo. Essa definição foi implementada segundo o procedimento proposto no apêndice 8 da MARPOL (1997) que sugere a avaliação através do método incremental. Esse método supõe que a localização da avaria (longitudinal vertical e transversal) esteja associada a variações igualmente espaçadas ao longo do casco e que, conhecendo-se a extensão máxima da avaria (longitudinal, vertical e transversal), defina-se um incremento que, a partir da avaria mínima, aumente sistematicamente as dimensões da avaria. A cada localização e dimensão da avaria associa-se a correspondente probabilidade, bem como o volume derramado. Esse processo é realizado tanto para o costado, como para o fundo adotando-se uma ponderação de 40% e 60% para agrupar os efeitos decorrentes dessas avarias. Finalmente estimam-se os parâmetros de vazamento e calcula-se o índice de prevenção à poluição.

De acordo com a metodologia recomendada pela MARPOL (1997), desenvolveu-se um programa em linguagem C++ que estabelece os parâmetros em função dos prováveis

vazamentos de óleo de uma embarcação-tanque. Os dados de entrada do programa consistem das características principais da embarcação (comprimento total, comprimento entre perpendiculares, boca, pontal, etc.), número de posições de localizações e dimensões das avarias e coordenadas dos compartimentos da embarcação. Adicionalmente, o usuário deverá fornecer a geometria da embarcação em que a origem do sistema de coordenadas (x, y, z) está localizada na popa da embarcação e no bordo de boreste na linha de base. Cada tanque é definido por oito pontos, iniciando-se pelos quatro pontos de ré (sentido anti-horário) e, então, definindo-se os quatro pontos de vante. O número de divisões especificadas na entrada de dados permite a definição da avaria mínima que terá suas dimensões incrementadas até o limite definido pela MARPOL (1997). Esta avaria percorrerá sistematicamente o casco da embarcação tanto para o caso de colisão, como para o caso de encalhe.

O passo seguinte do procedimento corresponde à determinação dos efeitos da avaria, isto é, na verificação de quais compartimentos foram atingidos. Para tanto, elaborou-se um rotina que verifica a interseção entre o paralelogramo que caracteriza a avaria e as superfícies que definem os tanques e porões do arranjo da embarcação, calculando-se simultaneamente a probabilidade, indicando-se o compartimento ou grupo de compartimentos avariados e a quantidade de óleo contida nos tanques. Como é provável que algumas avarias sejam redundantes, isto é, atingem o mesmo compartimento ou grupo de compartimentos, o programa mantém a quantidade de óleo derramada e soma as probabilidades. Após determinar as probabilidades e as respectivas quantidades de óleo derramadas, o programa ordena os 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, assim como calcula a probabilidade acumulada.

### ***Casos estudados***

A metodologia proposta é aplicada para uma série de projetos de chatas-tanque, abrangendo uma ampla faixa de dimensões, arranjos de tanques de carga e espaçamentos do fundo e costado duplo da embarcação. O estudo foi realizado para chatas-tanque de quatro portes bruto (700, 1400, 300 e 5000 TPB) que, em se tratando de chatas, corresponde basicamente à carga transportada. Por sua vez, o comprimento foi definido tomando-se por base embarcações típicas (Tabela 2), enquanto a boca foi obtida a partir da

relação L/B recomendadas por Hirata (1991). Adicionalmente, adotando-se as dimensões do casco duplo sugeridas pela MARPOL, considerou-se um volume de carga pré-definido e obteve-se a estimativa do pontal. Para cada porte bruto, isto é, volume de óleo transportado, definiu-se três arranjos de tanques (Fig. 3). O primeiro arranjo (9 x 1)<sup>2</sup> possui tanques definidos de bordo a bordo; o número de divisões transversais sendo definido pela regra n<sup>o</sup>. 24 do Anexo I da MARPOL (1997).

Tabela 2 – Característica gerais de chatas empregadas na hidrovia (L, comprimento; B, boca e D, Pontal)

Nome	L (m)	B (m)	D (m)
Hidrovia Araguaia	45,0	8,0	2,5
Hidrovia Madeira	56,0	13,7	3,6
Hidrovia Tietê	58,0	11,0	3,0
Hidrovia Paraná	58,5	8,0	4,0
Hidrovia Tapajós	60,0	12,0	4,2

Por sua vez, para o estabelecimento dos espaçamentos do casco duplo (costado e fundo) foi utilizada a regulamentação 13F do Anexo 1 da MARPOL (1997), que estabelece:

- Para o espaçamento do costado duplo,  $cd$  (m), de barcaças de 5000 toneladas ou maiores, a relação

$$1,00 \leq cd \leq \min \left\{ 0,5 + \frac{TPB}{20.000}; 2,00 \right\} \quad (6)$$

enquanto para barcaças com menos de 5000 toneladas,

$$0,76 \leq cd \leq 0,4 + \frac{2,4 TPB}{20.000} \quad (7)$$

desde que o volume de cada tanque não exceda 700 m<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> (a x b): A variável a está relacionada ao número de tanques na direção longitudinal e b ao numero de divisões na direção transversal.

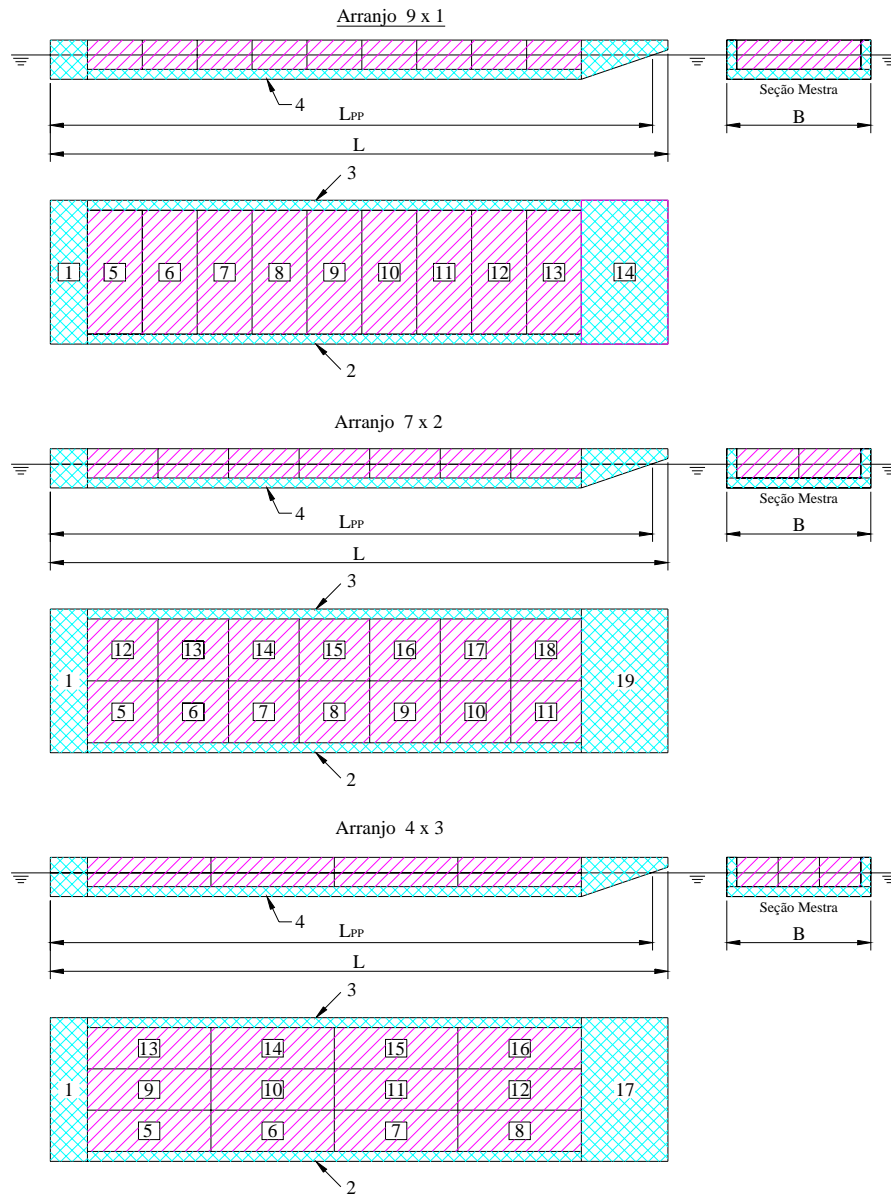


Figura 3 – Simulação das dimensões e posições da avaria do costado durante a execução do programa.

- Para o espaçamento do fundo duplo,  $fd$  (m), de barcaças de 5000 toneladas ou maiores a relação

$$1,00 \leq fd \leq \left\{ \frac{B}{15}; 2,00 \right\} \quad (8)$$

enquanto para barcaças com menos de 5000 toneladas,

$$0,76 \leq fd \leq \frac{B}{15} \quad (9)$$

A partir das dimensões obtidas foi estipulado um aumento e uma redução de 25% nas dimensões do casco duplo a fim de avaliar o efeito dos espaçamentos. Por sua vez, o peso leve de uma chata é constituído basicamente pelo peso do chapeamento, anteparas, cavernamentos, elementos de ligação e enrijecedores. Para obter uma estimativa do peso leve foi utilizada a formulação proposta por Riva (1993) que expressa o peso leve em função das dimensões principais da barcaça, isto é, comprimento, boca e pontal:

$$W_C(t) = K * L^{1,2} * B^{0,8} D^{0,5} \quad (10)$$

em que  $K$  é um coeficiente a se determinar. Uma vez que apenas o arranjo interno muda, o valor de  $K$  deve representar a influência dos diferentes arranjos. O coeficiente para o arranjo (9 x 1) foi estimado comparando-o com o peso leve calculado por Riva (1993), a partir do qual obteve-se o valor 0,150. A determinação do coeficiente  $K$  para os outros dois arranjos foi realizada estimando-se o peso adicional de aço requerido das anteparas supondo-se uma espessura de 6,00 mm. Os valores obtidos para os arranjos (7 x 2) e (4 x 3) foram, respectivamente, 0,155 e 0,160. As principais características das chatas-tanque estudadas são apresentadas na Tabela 3.

### **Resultados**

O primeiro passo corresponde à escolha do incremento, ou seja, a definição do número de divisões mais adequado para a localização e a dimensão das avarias. A Tabela 5 mostra os parâmetros de vazamento de óleo de uma chata-tanque de 5000 TPB em função dos espaçamentos/posições: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40. Após uma avaliação do efeito do número de divisões sobre os parâmetros de definição do derramamento de óleo e tendo em conta as limitações de capacidade de “hardware”, decidiu-se que o valor mais adequado corresponderia a vinte, ou seja, o número de avaliações numéricas sendo da ordem de  $6,4 \cdot 10^6$ .

Tabela 3 – Característica gerais de chatas

	Arranjo tanques	CD x FD (m)	D (m)	d (m)	Δ (t)	Peso leve (t)
<b>TPB</b> 700 <b>L<sub>oA</sub></b> 47,19 m <b>B</b> 11,00 m	9x1	0,76 x 0,76	3,00	1,85	880,46	180,46
		0,95 x 0,95	3,28	1,86	888,70	188,67
		0,57 x 0,57	2,72	1,84	871,83	171,83
	7x2	0,76 x 0,76	3,00	1,86	886,41	186,46
		0,95 x 0,95	3,28	1,87	894,92	194,99
		0,57 x 0,57	2,72	1,85	877,49	177,56
	4x3	0,76 x 0,76	3,00	1,87	892,44	192,49
		0,95 x 0,95	3,28	1,87	901,23	201,28
		0,57 x 0,57	2,72	1,85	883,24	183,29
<b>TPB</b> 1400 <b>L<sub>oA</sub></b> 59,48 m <b>B</b> 14,00 m	9x1	0,76 x 0,80	3,50	2,24	1712,00	312,08
		0,95 x 1,00	3,79	2,25	1724,68	324,76
		0,57 x 0,60	3,22	2,22	1699,26	299,34
	7x2	0,76 x 0,80	3,50	2,25	1722,49	322,49
		0,95 x 1,00	3,79	2,26	1735,37	335,58
		0,57 x 0,60	3,22	2,23	1709,31	309,32
	4x3	0,76 x 0,80	3,50	2,26	1732,29	332,89
		0,95 x 1,00	3,79	2,27	1746,31	346,41
		0,57 x 0,60	3,22	2,24	1719,20	319,30
<b>TPB</b> 3000 <b>L<sub>oA</sub></b> 87,48 m <b>B</b> 15,75 m	9x1	0,76 x 1,05	4,50	2,86	3617,58	617,75
		0,95 x 1,31	4,86	2,87	3641,81	641,98
		0,57 x 0,79	4,15	2,85	3593,07	593,24
	7x2	0,76 x 1,05	4,50	2,87	3638,15	638,34
		0,95 x 1,31	4,86	2,89	3663,19	663,38
		0,57 x 0,79	4,15	2,85	3612,82	613,01
	4x3	0,76 x 1,05	4,50	2,89	3658,74	658,93
		0,95 x 1,31	4,86	2,90	3684,59	684,78
		0,57 x 0,79	4,15	2,87	3632,60	632,79
<b>TPB</b> 5000 <b>L<sub>oA</sub></b> 101,21 m <b>B</b> 18,60 m	9x1	1,00 x 1,24	5,50	3,43	5929,18	929,29
		1,25 x 1,55	5,94	3,45	5965,64	965,75
		0,75 x 0,93	5,07	3,41	5892,11	892,22
	7x2	1,00 x 1,24	5,50	3,45	5959,95	960,27
		1,25 x 1,55	5,94	3,47	5997,62	997,94
		0,75 x 0,93	5,07	3,43	5921,64	921,96
	4x3	1,00 x 1,24	5,50	3,46	5991,21	991,24
		1,25 x 1,55	5,94	3,48	6030,10	1030,13
		0,75 x 0,93	5,07	3,44	5951,68	951,71

CD - Costado Duplo      FD - Fundo Duplo

Os resultados para os parâmetros de derramamento são apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8 e que correspondem, respectivamente, aos casos de encalhe com captura do óleo pelo duplo fundo e pressão interna estabelecida pelo sistema de gás inerte, de captura com pressão interna dos tanques igual à pressão atmosférica e de pressão estabelecida pelo sistema de gás inerte, porém sem a captura de óleo pelo duplo fundo.

Tabela 5 – Parâmetros de vazamento de óleo em função da quantidade de avarias

N	Quant. Avarias	Vaz. Médio (m <sup>3</sup> )	O <sub>M</sub>	P <sub>0</sub>
5	6,25E+03	84,80	0,01526	0,87907
10	2,00E+05	68,09	0,01226	0,88899
15	1,52E+06	56,13	0,01010	0,90394
20	6,40E+06	58,45	0,01052	0,90170
25	1,95E+07	58,52	0,01053	0,90046
30	4,86E+07	55,15	0,00993	0,90518
35	1,05E+08	56,10	0,01010	0,90394
40	2,05E+08	56,69	0,01020	0,90246

### *Discussão e análise dos resultados*

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 de cada uma dessas alternativas foi investigada através da metodologia probabilística de vazamento de óleo.

A Tabela 6 apresenta a avaliação para as quatro chatas-tanque. O primeiro aspecto que deve ser ressaltado é a independência da probabilidade de vazamento nulo devido às colisões em relação ao arranjo interno da área de carga. Por outro lado, a probabilidade de vazamento nulo devida ao encalhe é influenciada pelo arranjo da área de carga, aumentando a probabilidade com o aumento da subdivisão. É importante ressaltar que no estudo realizado a área de captura do duplo fundo é considerada livre, isto é, as estruturas de suporte longitudinais não são estanques.

Observando-se a tabela, nota-se que o arranjo (9x1) possui índices de prevenção menores do que os arranjos (7x2) e (4x3), entretanto, o ganho em prevenção à poluição obtida pelo arranjo (4x3) é marginal em relação ao arranjo (7x2). Deve-se acrescentar que essa vantagem seria anulada em se considerando os custos adicionais em aço e complexidade do sistema de transferência. Ainda com relação a essa tabela verifica-se que, com exceção do arranjo (9x1), a adoção de espaçamentos menores do que aqueles sugeridos pela MARPOL ainda apresentam índices de prevenção superiores aos limites estabelecidos pelas regras. Finalmente, a chata-tanque apresenta um desempenho superior às outras, provavelmente, em função da limitação do espaçamento mínimo requerido imposto pelas regras e dos volumes de óleo transportados.

Tabela 6 – Parâmetros de vazamento de óleo considerando a captura de óleo pelo duplo-fundo.

TPB	Arranjo dos tanques	CD x FD (m)	Vazamento Médio(m³)			Vazamento Extremo(m³)			Parâmetro	Parâmetro	Prob. Vaz. Nulo			IPP
			Costado	Fundo	Total	Costado	Fundo	Total	Vaz. Médio	Vaz. Extremo	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	0,104485	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	0,086414	0,86503	0,99630	0,94380	1,25379
		0,57 x 0,57	35,87	1,01	14,95	199,46	10,06	85,82	0,019225	0,110342	0,75119	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	0,81913	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	0,86503	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	0,75119	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	0,81913	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	0,86503	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	0,75119	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	0,75197	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	0,81932	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	0,61790	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	0,064336	0,75197	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	0,81932	0,99387	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	0,61790	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	0,75197	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	0,81932	0,99693	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	0,61790	0,98643	0,83901	1,08527

Tabela 6 – Parâmetros de vazamento de óleo considerando a captura de óleo pelo duplo-fundo (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	Total	Costado	Fundo	Total			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 7 – Parâmetros de vazamento de óleo considerando a captura de óleo pelo duplo-fundo com pressão interna igual à atmosférica .

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	Total	Costado	Fundo	Total			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

Tabela 8 – Parâmetros de vazamento de óleo não considerando a captura de óleo pelo duplo-fundo, porém incluindo pressão do sistema 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	Total	Costado	Fundo	Total			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
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	0,95662	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	0,95662	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	144,80	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	0,95662	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

A Tabela 7 apresenta o efeito da pressão interna nos tanques de carga. Uma vez que o sistema de gás inerte não é normalmente utilizado em chatas considerou-se que a pressão interna fosse igual à pressão atmosférica. Comparando-se os resultados das Tabelas 6 e 7 pode-se notar uma pequena redução do volume derramado e, conseqüentemente, nos parâmetros de vazamento médio e extremo. A tabela seguinte apresenta os resultados não se considerando a captura de óleo pelo duplo-fundo verificando-se a importância desse mecanismo para a redução do volume derramado em encalhes. Deve-se, entretanto, observar que mesmo com essa consideração, a maioria dos casos que satisfazem as dimensões estabelecidas pela MARPOL possuem índices de prevenção suficientes segundo as regras, exceção sendo o arranjo (9x1).

Os gráficos das Figuras 5 e 6 ilustram os resultados dos vazamentos de óleo médio e extremo. 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.

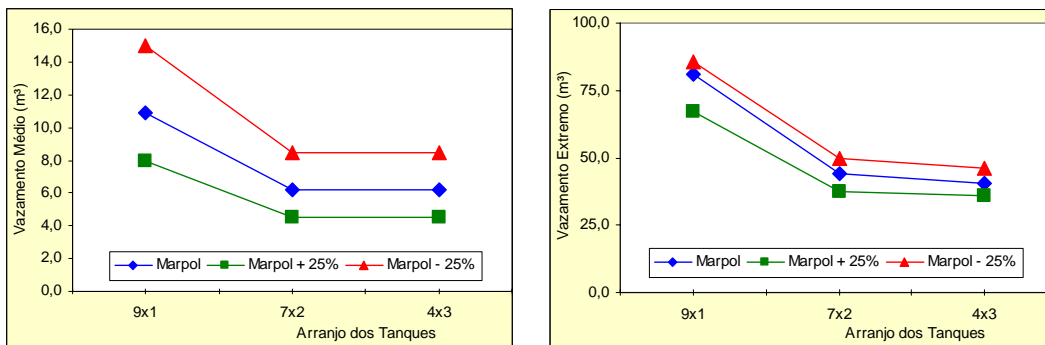


Figura 4 – Volume do vazamento médio de óleo e do vazamento extremo de óleos de chatas com 700 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.

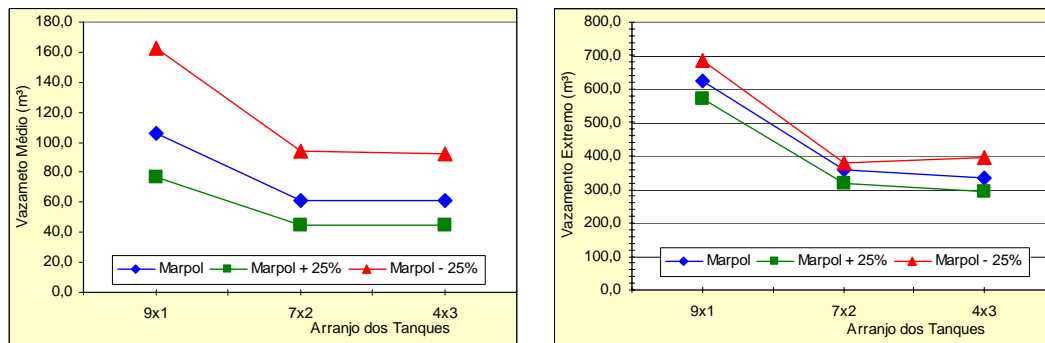


Figura 5 – Volume do vazamento médio de óleo e do vazamento extremo de óleos de chatas com 5000 TPB, considerando a captura de óleo pelo fundo duplo.

É importante notar que as embarcações com o arranjo (7 x 2) e com espaçamento do casco duplo 25% menor do que o recomendado pela MARPOL mostraram ser mais leves (Tabela 3) e tão seguras quando comparadas à embarcação com o arranjo (9 x 1) e que possui o espaçamento exigido pela MARPOL. Isso é possível porque, ao diminuir o espaçamento do casco duplo, alterou-se o pontal possibilitando o transporte do mesmo volume de óleo com um menor peso leve.

### ***Conclusões***

O método aplicado para avaliar o derramamento de óleo nos casos de acidentes envolvendo encalhes e colisões, através de probabilidades de localização e de dimensões das avarias, emprega uma metodologia que define certos parâmetros característicos de vazamento de óleo. Por meio da avaliação desses, pode-se concluir que:

- Os valores dos espaçamentos do fundo e costado duplo adotados pela IMO e das Normas da Autoridade Marítima não correspondem às únicas possibilidades existentes, logo que embarcações com arranjos alternativos e casco duplo com espaçamento menor do que o recomendados pela MARPOL podem transportar o mesmo volume de carga, terem melhor desempenho ambiental e ainda serem mais leves.
- Em simulações de colisões e encalhes; o efeito devido às colisões é mais significativo, entretanto, deve-se ressaltar que, em condições de navegação fluvial, nas quais as características do escoamento dependem dos efeitos de águas restritas, um estudo mais detalhado deve ser realizado.
- As funções densidade de probabilidade adotadas pela IMO correspondem a análise de dados estatísticos obtidos da navegação marítima. Em função da inexistência de dados específicos para a situação fluvial, essas funções foram adotadas, entretanto, os resultados devem ser tratados com certo cuidado. Adicionalmente, as curvas de densidade de probabilidade apresentam-se invariáveis em função das dimensões da embarcação, fato esse que, recentemente, foi observado não ser totalmente adequado.
- Finalmente, o índice de prevenção à poluição emprega parâmetros de navios de referência não incluem embarcações na faixa entre 700 TPB e 5000 TPB.

### ***Referências Bibliográficas***

MARPOL 73/78 Consolidated Edition , 1997.

Pawlowki, M.; “Probabilistic concept of tanker subdivision”; Trans. SNAME, vol. 104, 1996, pp. 329-355.

Sirkar, J.; “A framework of assessing the environmental performance of tankers in accidental groundings and collisions”. Trans. SNAME, Vol. 105, 1997, pp 253-295.

Hirata, K.; Hidrodinâmica; FATEC-Jahu, 1991.

Riva, J. C.; Embarcações fluviais – Desenvolvimento do projeto, FATEC – Jahu, 1993.