



Relatório Técnico [rev.00]

## Referência Técnica

### Ferramenta de Simulação da Deriva de Óleo

---

Preparado para: QUEIROZ GALVÃO EXPLORAÇÃO E  
PRODUÇÃO S.A.

Preparado por: André Luis Santi Coimbra de Oliveira  
Henery Ferreira Garção  
Marcelo Cabral Montenegro

12 de março de 2018

#### **Prooceano**

Av. Rio Branco, 311/1205 – Centro  
CEP 20.040-009 – Rio de Janeiro – RJ  
Tel./Fax + 55 21 2532.5666  
[www.prooceano.com.br](http://www.prooceano.com.br)

© PROOCEANO 2017

The copyright in this document is vested in Prooceano. This document may only be reproduced in whole or in part, or stored in a retrieval system, or transmitted in any form, or by any means electronic, mechanical, photocopying or otherwise, with the prior permission of PROOCEANO.

Os direitos autorais deste documento são propriedade da PROOCEANO. Este documento somente poderá ser reproduzido inteiro ou em partes, ou armazenado, ou transmitido em qualquer forma, ou por quaisquer meios: eletrônico, mecânico, fotocópia ou qualquer outro modo, com a permissão prévia da PROOCEANO.

## Controle de revisão

---

### Revisão nº 01

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 02

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 03

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 04

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

### Revisão nº 05

Data: / /

Descrição:

Responsável:

Empresa: Prooceano

---

---

## Sumário

<b>1. Introdução .....</b>	<b>9</b>
<b>2. Metodologia.....</b>	<b>10</b>
2.1. Modelo langrangiano de partículas.....	11
2.2. Processos físicos-químicos (intemperismo) .....	12
2.3. Ações de Contingência .....	24
<b>3. Operação do sistema .....</b>	<b>51</b>
3.1. Etapa 1.....	51
3.2. Etapa 2.....	55
3.3. Etapa 3.....	59
3.4. Resultados.....	68
3.5. Ferramentas.....	74
<b>4. Bibliografia.....</b>	<b>76</b>

## Índice das imagens

Figura 1: Exemplo de resultado de espessuras do óleo. Conjunto de todas as partículas lançadas junto ao mapa de espessura (esquerda) e a mesma imagem, porém apenas com o mapa de espessura (direita). A escala de cor representa a espessura em $\mu\text{m}$ .....	14
Figura 2: Representação da mancha de óleo em duas partes distintas: porção espessa ( <i>thick portion</i> ) a porção fina ( <i>sheen</i> ou <i>thin film</i> ). Adaptado de Lehr & Simecek-Beatty (2000)..	15
Figura 3: Exemplo de funcionamento da metodologia de linha de costa. Os pontos com o número 0 serão compreendidos como terra pelo modelo, enquanto os pontos de número 1, como mar. ....	22
Figura 4: Formações em J (parte superior) e U (parte inferior). Exemplo de tipo de barreira de contenção. Fonte: Mas & Kitts (2014).....	26
Figura 5: Exemplo de tipo de barreira de contenção. Fonte: Muttin (2015).....	27
Figura 6: Exemplos de tipos de recolhedores de óleo ( <i>skimmers</i> ). Tipo vertedouro à direita e tipo oleofílico à esquerda. Fonte: Siqueira (2015). ....	28
Figura 7: Espessuras limite do óleo em função de diferentes estratégias de resposta. Fonte: API/NOAA/USCG/EPA, 2013, adaptado de Allen & Dale, 1996.....	29
Figura 8: Variações de eficiência de recolhimento em função das condições meteorológicas. Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011). ....	30
Figura 9: Variações de eficiência de recolhimento em função do tipo/condição do óleo. Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011). ....	31
Figura 10: Como os dispersantes funcionam: 1) Óleo e água não se misturam; 2) Dispersantes são aplicados na superfície da camada de óleo e os surfactantes se localizam na interface óleo/água, onde eles atuam; 3) A tensão interfacial é reduzida e o óleo é disperso em pequenas gotículas. Fonte: Modificado de LESSARD; DEMARCO, 2000. ....	32
Figura 11: Esquema do modelo conceitual dos sub-processos envolvidos na dispersão do óleo na superfície do mar. Adaptado de Helfrich <i>et al.</i> (2015). ....	35
Figura 12: Segmento de reta delimitado pelos pontos P e Q. ....	40
Figura 13: Exemplo do algoritmo de cruzamento de barreiras. O segmento vermelho representa a barreira de contenção, os segmentos pretos correspondem aos trechos onde o algoritmo não identificou cruzamento e, por fim, o segmento azul corresponde a um trecho onde o algoritmo detectou que houve o cruzamento de uma barreira. ....	42
Figura 14: Representação numérica da barreira de contenção utilizando 3 retas. Adaptado de Siqueira (2015). ....	42

---

Figura 15: Representação numérica da barreira de contenção com a área de coleta do <i>skimmer</i> . Adaptado de Siqueira (2015). .....	43
Figura 16: Eficiência de Recolhimento em função do estado do mar (ventos/ondas). Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011). .....	45
Figura 17: Eficiência de Recolhimento em função da viscosidade cinemática (cSt). Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011). .....	46
Figura 18: Eficiência do Dispersante em função do estado do mar (ventos/ondas). Adaptado de Genwest Systems (2011). .....	49
Figura 19: Eficiência do Dispersante em função da viscosidade cinemática (cSt). Adaptado de Genwest Systems (2011). .....	50
Figura 20: Menu de seleção de Correntes (esquerda) e Ventos (direita). Por padrão, existem 5 opções disponíveis no sistema. ....	51
Figura 21: Opção de série temporal da Etapa 1. ....	53
Figura 22: Exemplo de arquivo ASCII que pode ser importado como uma série temporal na Etapa 1. ....	53
Figura 23: Seleção das variáveis de um arquivo netCDF na Etapa 1. ....	54
Figura 24: Exemplo de região (retângulo cinza) de dados disponíveis depois de escolher um modelo pré-carregado para correntes e/ou ventos na Etapa 1. ....	55
Figura 25: Exemplo de interface inicial da Etapa 2. ....	56
Figura 26: Calendário usado para selecionar a data e a hora. ....	57
Figura 27: Interface gráfica para inclusão das propriedades do óleo. Tela inicial. ....	58
Figura 28: Interface gráfica para inclusão das características do óleo. Exemplo de notificação de campos incompletos. ....	59
Figura 29: Exemplo de interface inicial da Etapa 3. ....	60
Figura 30: Janela de inserção de barreiras de contenção, <i>skimmers</i> e dispersante químicos. .	60
Figura 31: Interface gráfica para inclusão de barreiras de contenção. ....	61
Figura 32: Exemplo de construção de uma barreira de contenção no modelo. ....	62
Figura 33: Tela com uma barreira já inserida. ....	63
Figura 34: Interface gráfica para inclusão de <i>skimmers</i> . ....	63

---

Figura 35: Tela com um <i>skimmer</i> já inserido. ....	65
Figura 36: Interface gráfica para inclusão de dispersantes químicos. ....	66
Figura 37: Representação do comprimento de varredura (do inglês, <i>swath width</i> ) de uma unidade de aplicação de dispersantes. Adaptado de Genwest Systems (2011). ....	67
Figura 38: Tela com um dispersante já inserido. ....	68
Figura 39: Exemplo da interface principal do modelo após sua execução. ....	69
Figura 40: Exemplo de resultados da modelagem no instante inicial (esquerda) e após 6h de deriva (direita). Os pontos vermelhos representam as partículas da modelagem enquanto a escala de cor é relativa a espessura do óleo. ....	70
Figura 41: Opção para alternar entre os passos de tempo dos resultados da simulação. ....	70
Figura 42: Informação sobre toque na costa. O painel da esquerda é referente ao caso em que não houve toque, enquanto o painel da direita exemplifica um caso com toque na costa. ....	71
Figura 43: Janela com os resultados da modelagem em forma gráfica. Exemplo de um balanço de massa. ....	71
Figura 44: Janela com os resultados da modelagem em forma gráfica. Exemplo da evolução temporal da viscosidade média do óleo. ....	72
Figura 45: Exemplo de mapa de integração dos resultados. ....	73
Figura 46: Escala de cor dos mapas de espessura de óleo ( $\mu\text{m}$ ). ....	73
Figura 47: Barra horizontal para adicionar e alternar entre guias. ....	74
Figura 48: Salvar simulação. ....	74
Figura 49: Carregar simulação. ....	75
Figura 50: Exemplos de simulações salvas. ....	75
Figura 51: Ferramenta para habilitar/desabilitar as camadas. ....	75

---

## Índice das tabelas

Tabela 1: Intervalos geralmente aceitos do efeito da viscosidade do óleo sobre a eficácia do dispersante. ....	38
Tabela 2: Parâmetros de entrada na Etapa 1. ....	51
Tabela 3: Parâmetros do incidente na Etapa 2. ....	55
Tabela 4: Parâmetros da simulação na Etapa 2. ....	55
Tabela 5: Escala de cor dos mapas de espessura do óleo ( $\mu\text{m}$ ). Fonte: Bentz & Genovez (2015) .....	73

---

## Equipe técnica

---

**Nome: André Luis Santi Coimbra de Oliveira**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5967357

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Henery Ferreira Garção**

---

Registro no Conselho de Classe: -

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 3790998

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

**Nome: Marcelo Montenegro Cabral**

---

Registro no Conselho de Classe: 2010110225 - CREA/RJ

---

Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental: 5621594

---

Responsável pela(s) Seção(ões): Todas

---

Assinatura: \_\_\_\_\_

---

---

## 1. Introdução

Este documento apresenta os fundamentos teóricos do desenvolvimento da ferramenta de simulação de deriva de óleo desenvolvida no contexto do Projeto Costa Norte. O projeto tem como um dos objetivos principais avaliar a eficiência da utilização de métodos de modelagem computacional ambiental (hidrodinâmica marinha e dispersão de óleo) em representar o transporte de poluentes nas zonas costeira e estuarina amazônica, particularmente na região que contempla as Bacias Sedimentares Marinhas da Foz do Amazonas e do Pará-Maranhão.

A ferramenta foi desenvolvida buscando-se incorporar a dinâmica básica do óleo derivando no oceano sob a influência de ventos e correntes, os principais fenômenos de intemperismo ao qual está sujeito e diversas ferramentas usadas como ação de contingência no caso de derrames. Esse documento é dividido em duas partes, sendo a primeira uma referência técnica completa descrevendo a física de todos os processos resolvidos pela ferramenta, enquanto na segunda parte é apresentado um manual de operação detalhando e exemplificando todas as etapas de funcionamento do programa.

## 2. Metodologia

Como é de conhecimento, os modelos computacionais de transporte de poluente podem ser do tipo euleriano (com base no referencial de Euler) e do tipo lagrangiano (com base no referencial de Lagrange). Na abordagem euleriana, as variáveis do meio hidrodinâmico são analisadas simultaneamente em pontos fixos no espaço. Em contrapartida, a técnica lagrangiana identifica e acompanha uma parcela do fluido que se move com a velocidade do escoamento.

A estrutura básica de um modelo de dispersão de óleo nos dias atuais é a formulação lagrangiana para os processos de advecção e dispersão e os algoritmos específicos para os processos de intemperismo. Isso é o que aponta Spaulding (2017) em seu trabalho de revisão do estado da arte em modelagem de dispersão de óleo e que traz os conceitos básicos dos modelos atuais mais amplamente utilizados. Os modelos de dispersão de óleo são normalmente estruturados com uma série de algoritmos integrados descrevendo os processos de intemperismo e transporte individualmente.

A abordagem lagrangiana é baseada na representação do fluido por partículas discretas, sendo chamados de métodos de partículas, onde são medidas suas variáveis de estado ao longo de sua trajetória. Pereira (2004) menciona que, dentre as vantagens na utilização da abordagem lagrangiana, pode-se citar a simplicidade computacional e de se necessitar somente das propriedades estatísticas do meio. Em contrapartida, modelos lagrangianos também podem apresentar problemas, como interpolações errôneas de variáveis do escoamento, além de esforço computacional elevado quando se considera um alto número de partículas.

Outra forma de classificação de modelos computacionais é com relação às equações que os governam. Quando as variáveis de estado ou suas mudanças são bem definidas, as relações entre as funções governantes e as variáveis de estado são fixadas e as saídas são únicas, então o modelo desse sistema é chamado de determinístico (FRAGOSO *et al.*, 2009). Porém, se alguma aleatoriedade ou probabilidade é associada com, no mínimo, uma das variáveis de saída do modelo, então o modelo é chamado de estocástico, o qual inclui características estatísticas (FRAGOSO *et al.*, 2009). De acordo com Spaulding (2017), modelos de óleo precisam incorporar a quantificação da incerteza nos algoritmos e coeficientes associados usados no modelo, com previsões não somente representando o valor médio, mas também a incerteza.

De acordo com Spaulding (2017), os processos de intemperismo do óleo são calculados nos modelos a partir da transferência de massa entre os compartimentos ambientais (superfície, atmosfera, coluna d'água, fundo oceânico e linha de costa), ou na mudança das propriedades ou composição do óleo (densidade, viscosidade, etc.). No estado da arte atual, os modelos matemáticos que buscam reproduzir os processos que óleo sofre são aproximações feitas com base em estudos empíricos e experiência do comportamento do óleo (CERKIRGE & PALMER,

2001). Desta forma, há uma inerente limitação a metodologia devido à falta de disponibilidade deste tipo de informação para o uso mais amplo em diferentes situações de vazamento (SPAULDING, 2017).

## 2.1. Modelo lagrangiano de partículas

A ferramenta utiliza um modelo de partículas lagrangianas. A trajetória das partículas é calculada a cada passo de tempo considerando o vetor de deriva eólica e o vetor de correntes oceânicas superficiais da seguinte maneira:

$$\vec{x}(T) - \vec{x}_0 = \int_0^T [\vec{u}_c(t) + \vec{u}_v(t)] dt$$

Onde  $\vec{x}_0$  é o vetor posição inicial do objeto,  $\vec{x}(T)$  é a posição da partícula no tempo  $T$ ,  $\vec{u}_c(t)$  é o vetor de velocidade superficial no local da partícula e  $\vec{u}_v(t)$  é o vetor de deriva eólica. A deriva eólica deve ser entendida como o movimento que o óleo lançado ao mar sofre devido à ação do vento sobre a sua área superficial.

A advecção consiste em um processo de transporte da mancha de óleo por correntes, ondas e vento. Trata-se de um processo físico relacionado à deriva da mancha de óleo na superfície e abaixo dela. É o principal mecanismo que determina o deslocamento do óleo ao longo do tempo, correspondendo à soma vetorial dos componentes de transporte decorrentes da ação de correntes e de ventos sobre a mancha (CEKIRGE & PALMER, 2001).

Os modelos de derramamento de óleo utilizam constantes ou parâmetros variáveis para relacionar velocidade da corrente e do vento à velocidade superficial da mancha de óleo, conhecido como fator de deriva. Na maior parte dos modelos de transporte de óleo, o fator de deriva devido a correntes superficiais assume o valor de 1 (um). Já o fator de deriva do vento, em muitos estudos (WANG *et al.*, 2005; JANEIRO *et al.*, 2008; GUO & WANG, 2009; GUO *et al.*, 2009) consideram que 3% da velocidade do vento é transmitida a velocidade da mancha de óleo. Segundo Chen *et al.* (2007), o fator de deriva do vento pode variar entre 2,8 e 4,2% com base em experimentos de laboratório, enquanto que observações de campo esse fator varia entre 3,5% e 5,2%. No estudo conduzido por Reed *et al.* (1994), o valor de 3,5% do fator de deriva para ventos inferiores a 6 m/s gera bons resultados de simulação de derrames de óleo.

A componente difusiva do transporte do óleo é representada na grande maioria dos modelos pela técnica chamada de passo aleatório (em inglês, *random walk method*). Difusão é um processo sub-grade que representa o transporte turbulento não resolvido pelo modelo hidrodinâmico e que deve ser incorporado ao modelo lagrangiano através de uma perturbação ao campo médio. Essa componente pode utilizar coeficientes de dispersão advindos do modelo hidrodinâmico utilizado para o transporte do óleo ou pode ser configurado diretamente pelo o

usuário (SPAULDING, 2017), ficando a critério do usuário conhecer/atribuir o caráter dispersivo da região de estudo.

Na ferramenta desenvolvida, os dados ambientais (correntes superficiais e ventos) são interpolados na posição de cada partícula através de uma interpolação bilinear no espaço e linear no tempo, a partir das malhas de modelos operacionais de previsão. O vetor de correntes superficiais é composto da seguinte forma:

$$\vec{u}_c(t) = \vec{u}_{adv} + \vec{u}_{dif}$$

Onde  $\vec{u}_{adv}$  é a componente advectiva da velocidade da corrente obtida a partir de interpolação dos dados do modelo hidrodinâmico e  $\vec{u}_{dif}$  é a componente difusiva da velocidade da corrente calculada seguindo o modelo clássico de passo aleatório (FISCHER, 1979), conforme apresentado em Sayol *et al.* (2014).

$$\vec{u}_{dif} = R_j \sqrt{\frac{6 \cdot D}{\Delta t}}, j = 1, 2, \dots$$

onde  $R_j$  é um número aleatório entre -1 e 1 obtido de uma distribuição Gaussiana e especificado a cada passo de tempo  $\Delta t$ .  $D$  é a difusividade horizontal determinada através de um modelo de fechamento turbulento, descrito abaixo.

Foram utilizadas as formulações propostas por Smagorinsky (1963). Inicialmente, calcula-se o campo de deformação ( $D_e$ ) para cada passo de tempo do modelo hidrodinâmico, dado por:

$$D_e = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{V}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U}}{\partial y}\right)^2}$$

Então, a difusividade horizontal é dada por;

$$D = (0.28\Delta x)^2 D_e$$

onde  $\Delta x$  é o espaçamento horizontal da malha do modelo hidrodinâmico.

O vetor de deriva eólica  $\vec{L}(t)$  é calculado a cada passo de tempo e é dependente da velocidade do vento. Tradicionalmente, o percentual de influência do vento utilizado é de 3,5%.

## 2.2. Processos físicos-químicos (intemperismo)

O transporte e intemperismo do óleo derramado no mar são governados por processos físico-químicos e biológicos complexos que dependem das propriedades do óleo, condições hidrodinâmicas e ambientais (REED *et al.*, 1999; WANG *et al.*, 2005; JANEIRO *et al.*, 2008;

WANG *et al.*, 2008; SPAULDING, 2017). Imediatamente após a introdução do óleo no oceano, a advecção e espalhamento fazem com que haja um rápido aumento na área exposta do óleo, que posteriormente passará por processos de intemperismo incluindo a evaporação, dispersão, emulsificação e óleo na costa. Em cada um destes processos estão envolvidos os fatores químicos, determinados pela composição específica do petróleo derramado.

### 2.2.1 Cálculo da espessura de óleo

Na modelagem numérica computacional, o óleo é representado por partículas que derivam ao serem forçadas por correntes e ventos. A cada passo de tempo do modelo, faz-se necessário traduzir o posicionamento das partículas em espessura de óleo presente na superfície do oceano. Cada partícula deve, portanto, ser capaz de representar um determinado volume de óleo que possa ser convertido em espessura.

O volume de óleo do vazamento é fornecido como entrada para o modelo pelo usuário. Esse volume é, então, dividido pelo número total de partículas que serão utilizadas na modelagem e o resultado passa a ser o valor de volume representado por cada partícula, seguindo a equação:

$$v_{part} = \frac{v_{total}}{N}$$

onde  $v_{part}$  corresponde ao volume representado por cada partícula,  $v_{total}$  o volume total do vazamento modelado e  $N$  ao número total de partículas lançadas no modelo lagrangiano.

As partículas são então distribuídas em uma grade com número de elementos fixo, no caso, 20x20 pontos. Esse tipo de grade, conhecida como malha adaptativa, usa as coordenadas mínimas e máximas do conjunto de todas as partículas, e cria uma grade uniforme. Logo, a cada passo de tempo é possível que a resolução da grade varie, de acordo com o espalhamento das partículas.

Por último, são verificadas quais partículas estão presentes em cada elemento de grade. Para a obtenção da espessura, o volume total calculado em cada ponto é dividido pela área do elemento, conforme:

$$esp = \frac{v_{ele}}{A_{ele}}$$

onde  $esp$  equivale a espessura daquele elemento da grade,  $v_{ele}$  corresponde ao volume total presente no elemento e  $A_{ele}$  representa a área do elemento de grade. A Figura 1 apresenta um exemplo da imagem gerada a partir da metodologia que foi descrita. O painel da esquerda apresenta o mapa de espessuras conjuntamente com todas as partículas que foram lançadas

no modelo lagrangiano, enquanto o painel direito exibe apenas o mapa para melhor visualização.

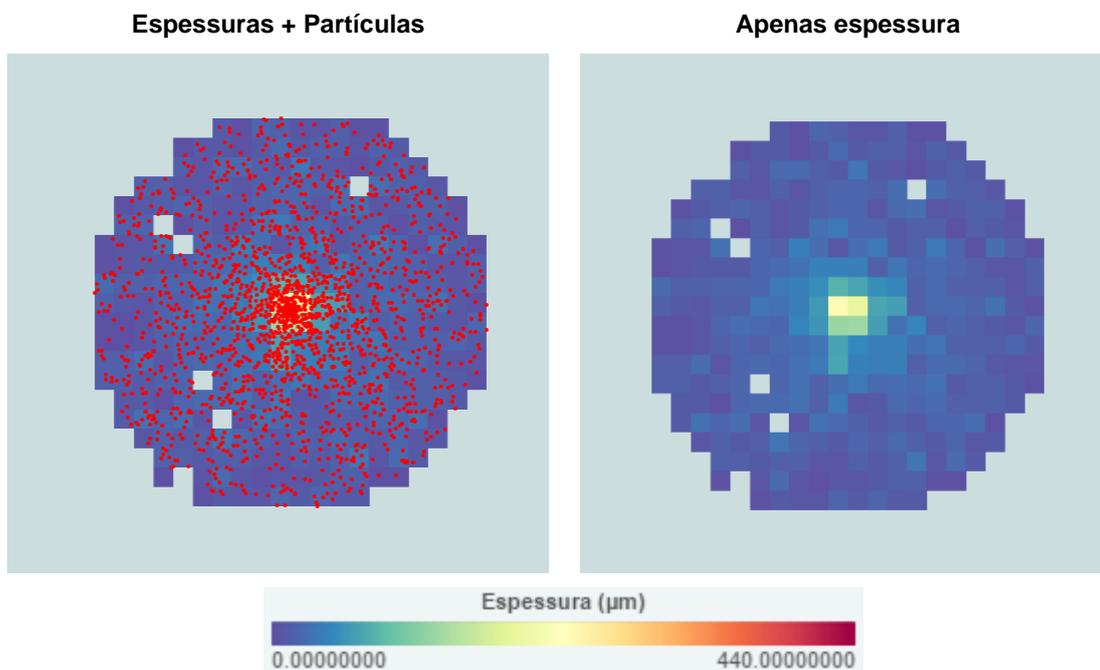


Figura 1: Exemplo de resultado de espessuras do óleo. Conjunto de todas as partículas lançadas junto ao mapa de espessura (esquerda) e a mesma imagem, porém apenas com o mapa de espessura (direita). A escala de cor representa a espessura em  $\mu\text{m}$ .

## 2.2.2 Espalhamento

O espalhamento, também conhecido por espalhamento mecânico, trata-se do movimento da mancha sobre si mesma, horizontalmente, devido às forças inerciais, gravitacionais e viscosas, aumentando a área da mancha.

De acordo com Lehr & Simecek-Beatty (2000), o óleo inicia o espalhamento imediatamente quando ele é derramado e que este espalhamento não ocorre uniformemente. Segundo estes autores, qualquer tensão sobre a superfície causa um alongamento na mancha, sendo que na maior parte dos derramamentos esta mancha de óleo rapidamente adquire uma forma de cometa onde a pequena região escura é seguida por uma grande porção brilhosa (Figura 2). Estes autores ainda acrescentam que esta região mais escura possui o maior volume do óleo derramado, enquanto que a porção fina brilhosa não possui mais que 10% do volume.

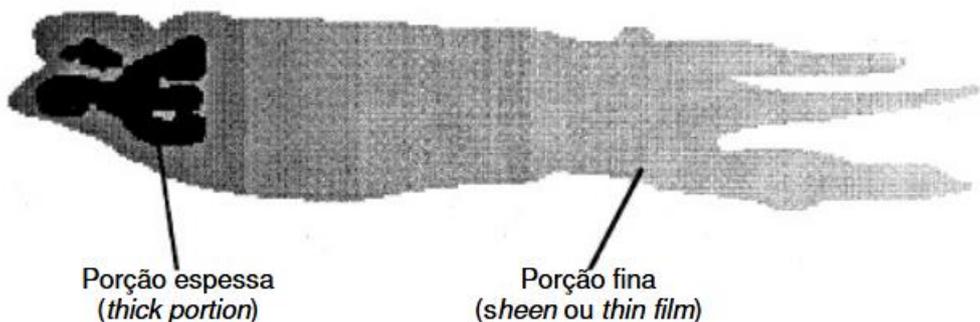


Figura 2: Representação da mancha de óleo em duas partes distintas: porção espessa (*thick portion*) a porção fina (*sheen* ou *thin film*). Adaptado de Lehr & Simecek-Beatty (2000).

O estudo desenvolvido por Fay (1969) forma a base do entendimento deste processo. Fay (1971) dividiu o espalhamento do óleo em 3 etapas de acordo com as principais forças atuando no fenômeno. A primeira fase (gravidade-inercial) é influenciada pela gravidade, que causa o espalhamento lateral da mancha (LEHR, 2001). A segunda, denominada fase gravidade-viscosidade, é relativa ao momento quando a viscosidade da água começa a atuar e atenuar o efeito da gravidade. Finalmente, a terceira etapa (tensão superficial-viscosidade) se inicia quando a mancha já está bem fina e a força principal torna-se a tensão interfacial entre o óleo e a água (LYNCH *et al.*, 2015). A primeira etapa termina muito rapidamente, e ocorre numa escala de tempo muito mais rápida que outros processos (LYNCH *et al.*, 2015). Dessa forma o instante final dessa fase, em sua transição para a segunda, é usado comumente como ponto de partida para modelos lagrangianos. O cálculo da área da fase 1 é dado por:

$$A = \pi K_i^2 (\beta g V)^{1/2} t$$

onde  $K_i$  é o coeficiente de proporcionalidade da fase 1,  $V$  é o volume do vazamento ( $m^3$ ) e  $\beta = (\rho_a - \rho_o)/\rho_a$ . O instante de término da fase 1 ( $t_{iv}$ ) é dado por:

$$t_{iv} = \left(\frac{K_v}{K_i}\right)^4 \left(\frac{V}{\beta g v_a}\right)^{1/3}$$

com  $K_v$  sendo o coeficiente de proporcionalidade da fase 2 e  $v_a$  é a viscosidade cinemática da água ( $m^2/s$ ). Substituindo o tempo na equação da área, tem-se:

$$A = \pi \frac{K_v^4}{K_i^2} \left(\frac{\beta g V^5}{v_a^{1/2}}\right)^{1/6}$$

Com  $K_i = 1,14$  e  $K_v = 1,45$ , segundo Fay (1971).

### 2.2.3 Evaporação

Dentre os processos de intemperismo ocorrentes em derrames de óleo, a evaporação é o mais importante em termos de balanço de massa. Dentro de alguns dias, por exemplo, óleos leves e óleos médios podem perder até 75% e 40% do seu volume inicial, respectivamente. Já para óleos mais pesados, essa perda pode não ultrapassar 10% do seu volume (ASCE, 1996).

No trabalho de revisão de processos que ocorrem no óleo realizado por Reed *et al.* (1999), afirmam que existem basicamente dois métodos de cálculo da evaporação:

- Método da exposição evaporativa, desenvolvido por Stiver & Mackay (1984).
- Método de pseudo-componentes, desenvolvido por Payne *et al.* (1987);

O método da exposição evaporativa é baseado na hipótese simplista da relação linear entre o ponto de ebulição da fase líquida e a fração perdida. Esta abordagem trata o óleo como um composto único com taxas empiricamente derivadas.

O método dos pseudo-componentes considera os óleos crus e seus derivados como uma mistura independente de diversos componentes (pseudo-componentes), onde cada um é tratado como uma mistura singular associada a uma pressão de vapor. Os chamados pseudo-componentes são evaporados de acordo com o algoritmo de exposição evaporativa, onde o fluxo para atmosfera é específico para o volume molar, pressão de vapor e peso molecular do componente (SPAULDING, 2017).

O modelo utilizado na ferramenta é o da representação do óleo através de pseudo-componentes. O volume representado por cada partícula é então dividido entre cada pseudo-componente do óleo. O método foi implementado seguindo a descrição de Jones (1997). A evaporação de cada pseudo-componente é dada por:

$$\frac{dV_i}{dt} = - \frac{K_i \cdot A \cdot P_i \cdot V_i}{R \cdot T \cdot \sum_{j=1}^{nc} \frac{V_j}{\bar{V}_j}}$$

onde  $V_i$  é o volume do  $i$ -ésimo pseudo-componente,  $K_i$  é a taxa de transferência de massa,  $A$  é a área da mancha,  $P_i$  é a pressão de vapor do componente,  $R$  é a constante dos gases ideais,  $T$  é a temperatura da água,  $\bar{V}_j$  é o volume molar do componente e  $nc$  o número total de componentes.

O volume molar de um componente é dado pela aproximação:

$$\bar{V}_i = 7.000 \cdot 10^{-5} - (2.102 \cdot 10^{-7} \cdot BP_i) + (1.000 \cdot 10^{-9} \cdot (BP_i)^2)$$

com  $BP_i$  sendo o ponto de ebulição do  $i$ -ésimo componente.

A pressão de vapor é dada pela equação de Antoine:

$$\ln \frac{P_i}{P^o} = \frac{\Delta S_i (BP_i - C)^2}{R \cdot BP_i} \left[ \frac{1}{BP_i - C} - \frac{1}{T - C} \right]$$

onde,  $C = (0.19 \cdot BP_i) - 18$  e  $\Delta S_i = 8.75 + 1.987 \log BP_i$ .

$P^o$  corresponde a pressão atmosférica.

A taxa de transferência de massa é obtida pela equação:

$$K_i = 0.0048 \cdot U^{7/9} \cdot Z^{-1/9} \cdot Sc^{-2/3}$$

onde  $U$  é a velocidade do vento,  $Z$  é o comprimento da mancha na direção do vento e  $Sc$  é o número de Schmidt, obtido através de:

$$Sc = \frac{\nu_{ar}}{D_i}$$

com  $\nu_{ar}$  sendo a viscosidade cinemática do ar e  $D_i$  a difusividade molecular do  $i$ -ésimo componente, dada por:

$$D_i = D_{\text{água}} \sqrt{\frac{MW_{\text{água}}}{MW_i}}$$

onde,  $MW_i = 0.04132 - (1.985 \cdot 10^{-4} \cdot BP_i) + (9.494 \cdot 10^{-7} \cdot (BP_i)^2)$  é a massa molecular do  $i$ -ésimo componente.

O equacionamento apresentado revela que a única dependência para o cálculo da taxa de evaporação de cada componente é o conhecimento dos pontos de ebulição e a fração volumétrica de cada pseudo-componente. O usuário deverá, portanto, fornecer informações sobre as características do óleo a ser modelado. Essas informações podem ser fornecidas de duas maneiras diferentes, descritas abaixo:

- 1) Curva de destilação:** O usuário pode passar diretamente os valores de fração volumétrica e pontos de ebulição de cada componente separado ao longo da caracterização da curva de destilação do óleo.
- 2) Grau API:** Se o usuário não possuir a curva de destilação do óleo, a segunda possibilidade é uma aproximação dos pseudo-componentes a partir do grau API do óleo. Essa metodologia é utilizada no modelo ADIOS, desenvolvido pela NOAA, sendo bem representativa apenas para óleos crus. O número de pseudo-componentes é estimado como 10 e o volume total de óleo é dividido igualmente entre todos os pseudo-componentes. Os pontos de ebulição são dados por:

$$BP_i = T_0 + dT \cdot \left( \frac{i - 0.5}{nc} \right)$$

onde,  $T_0 = 457.16 - 3.3447 \cdot API$  e  $dT = 1356.7 - 247.36 \log API$ .

## 2.2.4 Dispersão

A dispersão, também denominada somente dispersão vertical, é um processo físico em que as gotículas de óleo são transportadas a partir da superfície do mar para a coluna de água. Essas gotículas podem ter dimensões variáveis, estando sujeitas à ação de turbulência natural da água.

Os primeiros modelos de dispersão simplesmente assumiam uma taxa de dispersão constante como porcentagem da mancha de óleo por dia, baseado no estado do mar. Estas taxas tendiam a ser muito grande, entre 10 a 60% por dia.

Mackay *et al.* (1980), de acordo com Reed *et al.* (1999) e Lehr (2001), construíram uma fórmula baseada na estimativa da fração da superfície do mar sujeita a dispersão por unidade de tempo, complementada por uma estimativa da fração de óleo entranhado com o tamanho suficiente para permanecer dispersa na coluna d'água.

O modelo de dispersão baseado no trabalho experimental de Delvigne & Sweeney (1988 apud REED *et al.*, 1999) é o mais comum nos modelos de derrames de óleo. Estes autores desenvolveram uma série de estudos laboratoriais acerca da dispersão natural do óleo, resultando em uma relação empírica para a taxa de dispersão do óleo para a coluna de água devida à rebentação das ondas:

$$Q_d = C^* \cdot D_d^{0.57} \cdot S \cdot F \cdot d^{0.7} \cdot \Delta d$$

onde  $Q_d$  é a taxa de dispersão (kg/m<sup>2</sup>.s) para um diâmetro de gotícula  $d$  (m).  $C^*$  é uma constante de dispersão empírica que depende do tipo de óleo e estado do intemperismo,  $D_d$  é a energia dissipada devido a quebra de ondas por unidade de área (J/m<sup>2</sup>),  $S$  é a fração da superfície coberta por óleo,  $F$  é a fração da superfície atingida por ondas quebrantes e é o intervalo de diâmetro das gotículas de óleo (m).

Para obtenção da constante de dispersão, os dados empíricos obtidos por Delvigne e Hulsen (1984) foram ajustados por French-McCay (2004) para as equações:

$$C^* = \exp[-0,1023 \ln(v) + 7,5 \ 72] \quad \text{se } v < 132 \text{ cSt}$$

$$C^* = \exp[-1,8927 \ln(v) + 16,313] \quad \text{se } v \geq 132 \text{ cSt}$$

onde  $v$  é a viscosidade cinemática do óleo (cSt).  $D_d$  é dado por:

$$D_d = 0,0034 \cdot \rho_a \cdot g \cdot H_b^2$$

Onde  $\rho_a$  é a densidade da água e  $H_b$  é a altura das ondas quebrantes. Em Liungman e Mattsson (2011) é apresentada a relação de  $H_b$  com  $H_{sig}$  (altura significativa de onda):

$$H_b = 1,5H_{sig}$$

CERC (1984) desenvolve o cálculo da altura significativa:

$$H_{sig} = \frac{0,243U_*^2}{g}$$

$$U_*^2 = 0,71U^{1,23}$$

Onde  $U$  é a velocidade do vento (m/s). A fração da superfície coberta por óleo ( $S$ ) é utilizada como 1 visto que o cálculo de área da mancha será feito em relação à presença de partículas no modelo, ou seja, o cálculo da dispersão é realizado sempre em uma área totalmente coberta por óleo. A fração de superfície atingida por ondas quebrantes foi parametrizado em função de um valor de vento limite ( $U_{LIM}$ ) com o qual se inicia a formação da quebra de ondas (utilizado como 5 m/s):

$$F = 3,0 \times 10^{-6} \left( \frac{U^{3,5}}{T_w} \right) \quad \text{se } U \leq U_{LIM}$$

$$F = 3,0 \times 10^{-2} \left( \frac{U - U_{LIM}}{T_w} \right) \quad \text{se } U > U_{LIM}$$

com  $T_w$  sendo o período de onda significante, obtido de CERC (1984):

$$T_w = 8,13 \left( \frac{U}{g} \right)$$

As classes de diâmetro de gotícula ( $d$ ) foram incorporadas segundo Reed *et al.* (1994), que definiram o tamanho mínimo e máximo com base em valores observados (de 1 a 1600  $\mu\text{m}$ ). A distribuição de diâmetros discutida em Delvigne e Sweeney (1988) se dá por:

$$d = C_0 \cdot E^{-0,5} \nu^{0,34}$$

onde  $E$  é a taxa de dissipação de energia ( $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ) e  $\nu$  a viscosidade cinemática do óleo. As classes de menor e maior tamanho foram então estimadas com um valor de  $C_0$  500 e 3400, respectivamente. O intervalo de diâmetros ( $\Delta d$ ) é obtido de:

$$\Delta d = \frac{d_{MAX} - d_{MIN}}{n_{classes}}$$

utilizando  $n_{classes}$  como 10, segundo Berry (2012).

## 2.2.5 Emulsificação

Em muitos modelos, de acordo com Spaulding (2017), a emulsificação é calculada com base nas formulações propostas por Mackay et al. (1980), no qual consiste em um algoritmo mais simples, que pode ser expresso em forma diferencial. O algoritmo apoia-se em dois parâmetros: a taxa de assimilação de água e o teor máximo de água do óleo. Segundo Spaulding (2017), ambos os parâmetros podem ser derivados de experiências de laboratório, porém o parâmetro taxa de assimilação de água deve ser ponderado para diferentes condições de campo e de estados do mar.

As formulações propostas por Mackay *et al.* (1980) para o fenômeno de emulsificação de óleo em água consistem numa lei de primeira ordem dada por:

$$\frac{dY}{dt} = k_{em} U^2 \left( 1 - \frac{Y}{Y_{max}} \right)$$

onde  $Y$  e  $Y_{max}$  são a fração de água e a fração máxima de água no óleo,  $k_{em}$  é o parâmetro de emulsificação (da ordem de 1 a 2  $\mu\text{s}/\text{m}^2$ ) e  $U$  é a velocidade do vento. Como discutido em Lehr (2001) e Lehr *et al.* (2002), não somente a fração de água, mas também o tamanho da gotícula de água na emulsão é relevante na viscosidade do óleo. Com o passar do tempo e com a agitação, o tamanho das gotículas diminui enquanto a fração de água se mantém constante (LEHR *et al.*, 2002). Com isso, a área interfacial aumenta, conduzindo a um óleo de maior viscosidade. Dessa forma, a lei descrita por Eley *et al.* (1988) foi escolhida para a incorporação do processo de emulsificação de água em óleo na ferramenta de modelagem de óleo. Essa lei é dada por:

$$\frac{dS}{dt} = k_s \left( 1 - \frac{S}{S_{max}} \right)$$

onde  $S$  e  $S_{max}$  são a área interfacial e a área interfacial máxima de água-óleo, respectivamente, e  $k_s$  é o parâmetro de emulsificação relativo a área interfacial. A fração de água é relacionada com a área interfacial pela equação:

$$Y = \frac{S \cdot d_w(t)}{6 + S \cdot d_w(t)}$$

com  $d_w(t)$  sendo o diâmetro médio das gotículas de água variando ao longo do tempo.

Para a utilização do modelo com o processo de emulsificação incorporada, o usuário deverá fornecer novos parâmetros do óleo a ser modelado. Abaixo é feita uma listagem desses parâmetros:

1) **Fração de água máxima ( $Y_{max}$ ):** O usuário pode passar diretamente o valor da fração de água máxima que pode ser atingida na simulação, com base em resultados de ensaios de emulsificação. Na falta dessa informação, é possível deixar o campo em branco, e o modelo irá assumir um valor aproximado, seguindo a formulação utilizada no OilWx (GALT, 2009), modelo de intemperismo incorporado dentro do modelo ROC (GENWEST SYSTEMS, 2011):

a) Se a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) for inferior a 0,05 Pa.s:

$$Y_{max} = 0.9 - 0.0952 \ln \frac{\mu}{0.05}$$

b) Se a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) for superior ou igual a 0,05 Pa.s:

$$Y_{max} = 0.9$$

2) **Início da emulsificação:** O usuário pode informar de duas maneiras diferentes o momento em que se dá início ao processo de emulsificação do óleo. A primeira possibilidade é informar o tempo de vida do óleo para que o processo ocorra. A segunda é relativa à fração de óleo que deve ser evaporada para que o processo ocorra. Na falta dessas informações, é possível deixar o campo em branco e o modelo irá estimar automaticamente a fração evaporada necessária para dar início ao processo.

Ao início da simulação, a fração de água no óleo é zero, conseqüentemente, o mesmo vale para área interfacial. A partir do valor de  $Y_{max}$ , o modelo calcula  $S_{max}$  e, ao chegar ao instante ou fração evaporada necessária ao início do processo de emulsificação, o modelo começa o cálculo, segundo a equação:

$$S(t + 1) = S_{max} - (S_{max} - S(t)) \cdot \exp \left[ \frac{-k_s \cdot dt}{S_{max}} \right]$$

$$k_s = \frac{6 \cdot k_{em} U^2}{d_{Max}}$$

$$k_{em} = 2.042 \times 10^{-6} \text{ s/m}^2$$

onde  $d_{max}$  foi avaliado em 10  $\mu\text{m}$  (MACKAY *et al.*, 1981).

## 2.2.6 Óleo na Costa

O modelo foi desenvolvido para usar uma malha com zeros (0) e uns (1) para representar, respectivamente, pontos (ou células) de terra e de mar. Essa metodologia de linha de costa necessita de um desenvolvimento prévio do arquivo com a malha, que pode ter qualquer

resolução espacial conforme à necessidade da região onde será utilizada. A Figura 3 apresenta um exemplo do funcionamento dessa metodologia, com zeros (0) representando os pontos considerados como terra pelo modelo, e uns (1) representando a terra. É importante ressaltar que a imagem se trata apenas de um esquema exemplificativo, mas que para o uso do sistema podem ser usadas malhas de costa com altíssimas resoluções.

Uma vez estabelecido a malha, em cada passo de tempo durante a execução do modelo, as partículas são advectadas suas coordenadas finais são obtidas, assim como a respectiva representação de terra/mar. Caso seja identificado um ponto de terra, aquela partícula não se moverá mais durante a simulação e permanecerá “presa” à costa.

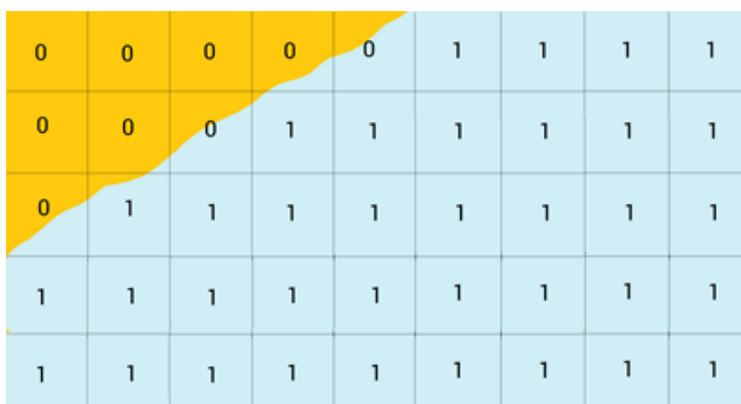


Figura 3: Exemplo de funcionamento da metodologia de linha de costa. Os pontos com o número 0 serão compreendidos como terra pelo modelo, enquanto os pontos de número 1, como mar.

Conforme as partículas atingem os pontos definidos como terra na grade de costa do modelo, as partículas encerram suas derivas e todo o óleo presente nelas é considerado como “Óleo na Costa”. Nesse momento, todos os processos de intemperismo e de contingência são interrompidos para essas partículas, com exceção do fenômeno de evaporação. Com isso, a única forma de remoção de óleo da costa implementada é o próprio fenômeno de evaporação, que é amplamente atenuado pela redução da área da mancha ao atingir a costa.

## 2.2.7 Variação das Propriedades do Óleo

Outro aspecto importante relativo ao processo de intemperismo são as variações causadas por esses processos nas propriedades do óleo. Como o óleo não é um constituinte químico puro, mas sim uma mistura de diversos compostos orgânicos, suas características vão evoluir ao longo do tempo. Dentre elas, duas se destacam devido à sua importância e impacto nos próprios fenômenos de intemperismo, assim como nas estratégias de contingência: a densidade e a viscosidade. Estas duas propriedades são dependentes tanto da temperatura,

quanto dos processos de evaporação (perda dos componentes leves) e emulsificação (gotículas de água estabilizam no óleo), já implementados na ferramenta de simulação de deriva de óleo. O equacionamento utilizado para cada uma é detalhado nos próximos subitens.

### 2.2.7.1 Densidade

Inicialmente, o usuário deve informar a densidade do óleo ( $\rho_{ref}$ ) a uma determinada temperatura de referência ( $T_{ref}$ ). Na falta dessas informações, o grau API pode ser utilizado em substituição. Nesses casos, considera-se que a temperatura de referência equivale a 15,6 °C (definição de grau API) e a densidade pode ser obtida a partir de:

$$\rho_{ref} = \frac{141.5}{131.5 + API}$$

Em seguida, a densidade do óleo é reajustada em função da temperatura da água (informada pelo usuário). Esse novo valor será considerado como a densidade inicial de todas as partículas lançadas na modelagem. A variação ocorre segundo:

$$\rho_0 = \rho_{ref}(1 - C_t(T_{\acute{a}gua} - T_{ref}))$$

onde  $T_{\acute{a}gua}$  e  $T_{ref}$  são a temperatura da água e a temperatura de referência da densidade do óleo, respectivamente. A constante  $C_t$  equivale a  $8 \times 10^{-4}$  (MACKAY *et al.*, 1983).

Ao longo da simulação, a densidade será afetada pelos processos de evaporação e de emulsificação. A abordagem adotada no modelo foi proposta em Mackay *et al.* (1980) com uma modificação para contabilizar a emulsificação (BUCHANAN & HURFORD, 1988).

$$\rho = Y\rho_{\acute{a}gua} + (1 - Y)\rho_0(1 + C_e f_{evap})$$

onde  $f_{evap}$  é a fração de óleo evaporada da macha. A constante  $C_e$  equivale a 0,18 (MACKAY *et al.*, 1983).

### 2.2.7.2 Viscosidade

Inicialmente, o usuário deve informar a viscosidade cinemática do óleo ( $\nu_{ref}$ ) a uma determinada temperatura de referência ( $T_{ref}$ ). Em seguida, esse valor é reajustado em função da temperatura da água (informada pelo usuário). Esse novo valor será considerado como a viscosidade inicial de todas as partículas lançadas na modelagem. A variação ocorre segundo:

$$\nu_0 = \nu_{ref} \exp \left[ C_{\nu t} \left( \frac{1}{T_{\acute{a}gua}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]$$

onde  $T_{\text{água}}$  e  $T_{\text{ref}}$  são a temperatura da água e a temperatura de referência da viscosidade do óleo, respectivamente. A constante  $C_{vt}$  equivale a  $5000 \text{ K}^{-1}$  (LEHR, 2001).

Ao longo da simulação, a viscosidade será afetada pelos processos de evaporação e de emulsificação. A variação com a evaporação foi proposta em Mackay *et al.* (1980), enquanto a variação com o processo de emulsificação vem da equação de Mooney (1951).

$$v = v_0 \exp \left( C_{ve} f_{evap} + \frac{C_{vem1} Y}{1 - C_{vem2} Y} \right)$$

onde  $f_{evap}$  é a fração de óleo evaporada da macha. A constante  $C_{ve}$  equivale a 5 (ADIOS), a constante  $C_{vem1}$  equivale a 2,5 (LEHR, 2001) e  $C_{vem2}$  é dado por:

$$C_{vem2} = \frac{0.65 d_{min}}{d_w}$$

onde  $d_{min}$  foi avaliado em  $1 \mu\text{m}$  (MACKAY *et al.*, 1981) e  $d_w$  é o diâmetro médio das gotículas de água.

## 2.2.8 Remoção de partículas sem massa

O modelo faz a remoção de partículas que já estejam sem massa de óleo devido aos processos de intemperismo e/ou recolhimento/dispersão.

O sistema trabalha com um limiar percentual para decidir se a partícula já pode ser considerada como “sem massa de óleo”, do contrário é possível que a partícula nunca alcance de fato o valor zero devido a precisão numérica. Foram estabelecidos dois critérios que devem ser igualmente satisfeitos para a remoção da partícula:

- 1) Seu volume atingiu um valor menor que 1% do seu volume inicial;
- 2) Seu volume representa menos que  $0,001 \text{ m}^3$  de óleo.

## 2.3. Ações de Contingência

A Lei Federal Nº 9.966 de 2000 traz em seus artigos 5º, 7º e 8º a obrigatoriedade de plano de emergência para portos organizados, instalações portuárias, plataformas e instalações de apoio os quais serão submetidos à aprovação do órgão ambiental competente, além de dispor dos meios adequados para o combate da poluição.

Atualmente, a resolução CONAMA Nº398 de 2008, que promulgou a resolução CONAMA Nº293 de 2001, estabelece o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual (PEI) para

incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional. Embora esta resolução abranja o uso de diferentes estratégias de resposta, grande ênfase é dada à contenção e recolhimento, para a qual são fornecidas precisas orientações de dimensionamento (SIQUEIRA, 2015).

Assim sendo, a resolução institui que o PEI deve englobar informações relacionadas à identificação da instalação, cenários acidentais, sistema de alerta e comunicação do incidente, equipamentos, como barreiras de contenção, e procedimentos operacionais de resposta, dentre outros (SIQUEIRA, 2015).

Nesse item são discutidos, primeiramente, aspectos práticos sobre o funcionamento de ações de contingência para casos de vazamento de óleo no mar, abordando as barreiras de contenção, *skimmers* e o uso de dispersantes químicos. Em seguida, são apresentados os algoritmos e métodos com os quais essas ações foram implementadas na ferramenta de deriva de óleo.

## 2.3.1 Aspectos Fundamentais

### 2.3.1.1 Barreiras de Contenção

De acordo com Siqueira (2015), a estratégia de contenção e recolhimento representa aquela mais frequentemente empregada no Brasil para combate a derramamentos de óleo no mar, uma vez que uma das poucas técnicas conhecidas que efetivamente remove o óleo do meio ambiente. A técnica consiste no uso de barreiras de contenção para concentrar o óleo derramado, seguida do emprego de equipamentos recolhedores (*skimmers*) para remover o óleo presente na camada superficial da coluna d'água (SIQUEIRA, 2015). Assim, o arranjo mais comumente empregado em ações de contingência é o uso duas embarcações, acompanhado de um carretel de barreira de contenção e um *skimmer*.

Nesse arranjo, é estabelecida primeiramente uma formação em “U” a fim de conter a mancha e concentra-la até que se obtenha espessura de óleo suficiente para um recolhimento eficiente. Em seguida, uma das embarcações avança em relação à posição da outra, de modo a caracterizar uma formação em “J” para que a embarcação mais próxima da mancha de óleo posicione o *skimmer* na região de maior espessura (Figura 4).

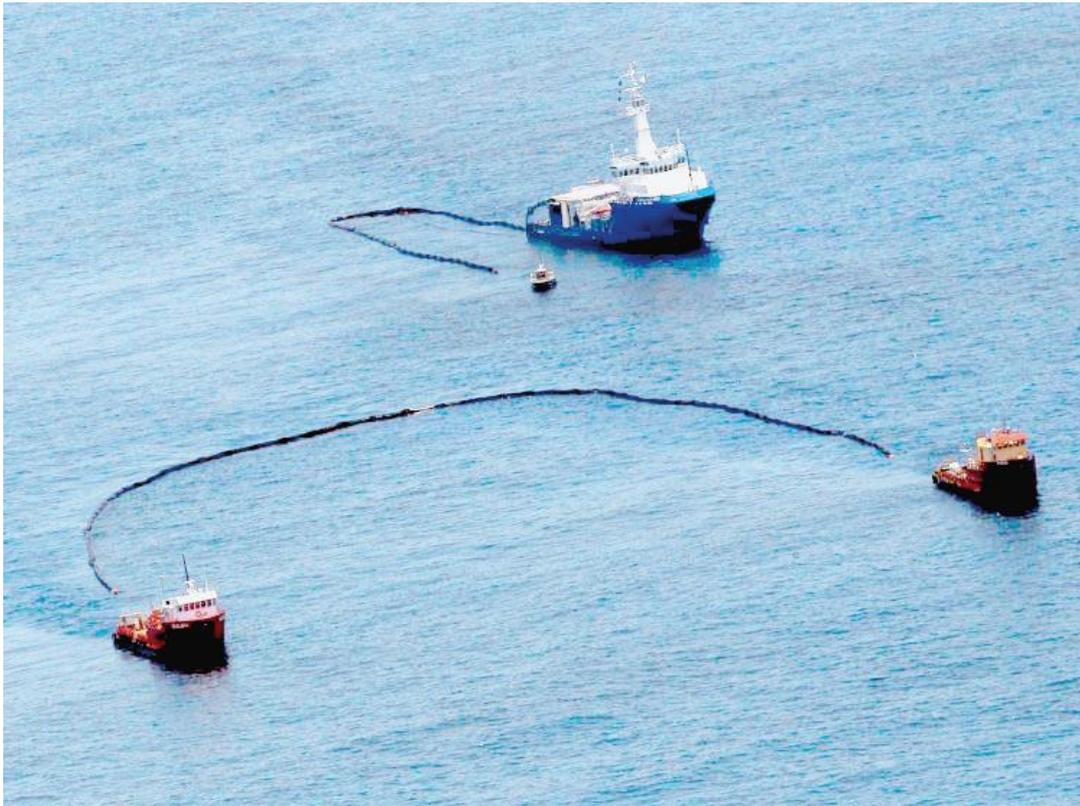


Figura 4: Formações em J (parte superior) e U (parte inferior). Exemplo de tipo de barreira de contenção. Fonte: Mas & Kitts (2014).

É válido ressaltar que operações de contenção e recolhimento estão relacionadas às condições ambientais (Figura 5). A depender das condições de corrente e vento, há perda de eficiência da estratégia de resposta, além dos riscos operacionais (SIQUEIRA, 2015).

De acordo com Siqueira (2015), as diferenças entre os diversos tipos de barreiras de contenção ocorrem através de variações dos parâmetros borda livre, calado, fluabilidade e tensão limite. Quando os valores desses parâmetros são baixos, as barreiras são indicadas para região costeira, enquanto valores mais elevados indicam barreiras para região oceânica.



Figura 5: Exemplo de tipo de barreira de contenção. Fonte: Muttin (2015).

A geometria e posicionamento das formações de contenção e recolhimento representam aspectos importantes no sucesso das operações. Em situações reais de resposta, tais aspectos são determinados em função da localização da mancha e do seu estado de espalhamento (SIQUEIRA, 2015). Normalmente as barreiras são dispostas nas regiões de maior volume do óleo determinado pela observação visual.

Dentre as diferentes características da geometria estabelecida (J ou U), destaca-se a abertura da formação (*swath* em inglês) em função da sua relação com a quantidade de óleo que é interceptada pelas barreiras (SIQUEIRA, 2015). Este parâmetro é determinado em função do

comprimento de barreira sendo utilizada e da distância estabelecida entre as embarcações envolvidas no reboque da mesma.

### 2.3.1.2 *Skimmers*

Segundo Siqueira (2015), dentre os diferentes tipos de recolhedores (*skimmers*), a composição básica desse equipamento é uma cabeça recolhedora e um sistema de transferência de fluido recolhido. Os principais modelos existentes no mercado são do tipo vertedouro e oleofílico.

O funcionamento dos recolhedores do tipo vertedouro (Figura 6 – à esquerda) se dá através do uso da gravidade para drenar o óleo da camada superficial da água. Desse modo, o equipamento é posicionado em meio à mancha, sendo a borda do vertedouro mantida na altura da linha d'água através de flutuadores, permitindo o escoamento do óleo para o interior do recolhedor (SIQUEIRA, 2015). As vantagens desse tipo de *skimmer* é trabalhar em um amplo espectro de viscosidades de óleo, opera com altas taxas de recolhimento e serem produzidos em diferentes tamanhos.

Já os recolhedores oleofílicos (Figura 6 – à direita) funcionam através da utilização de materiais específicos que possuem maior afinidade por óleo do que por água, disponibilizados na forma de esfregões, cordas, escovas, discos e tambores. Uma vez aderido ao material oleofílico pelo contato direto com a mancha, o óleo é raspado/retirado e enviado ao sistema de transferência (SIQUEIRA, 2015). As principais vantagens desses equipamentos consistem na alta eficiência de recolhimento obtida, porém com baixas vazões de recolhimento e a pequena abrangência de viscosidade de óleo.

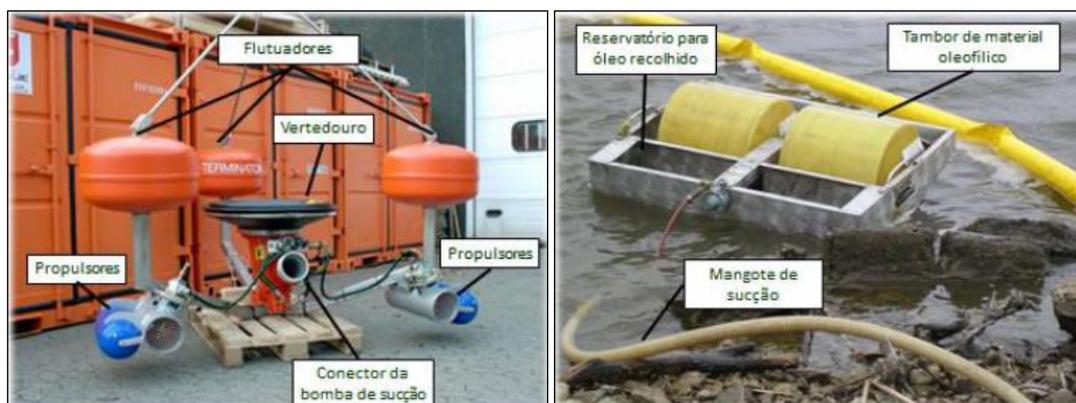


Figura 6: Exemplos de tipos de recolhedores de óleo (*skimmers*). Tipo vertedouro à direita e tipo oleofílico à esquerda. Fonte: Siqueira (2015).

Para que ações de recolhimento sejam implementadas, é preciso que a espessura de óleo seja tal que permita eficiência na operação. Na Figura 7, é observado o limite mínimo para que sejam possíveis as operações de recolhimento (*mechanical cleanup*), além de outras práticas, como dispersante químico e queima *in-situ*.

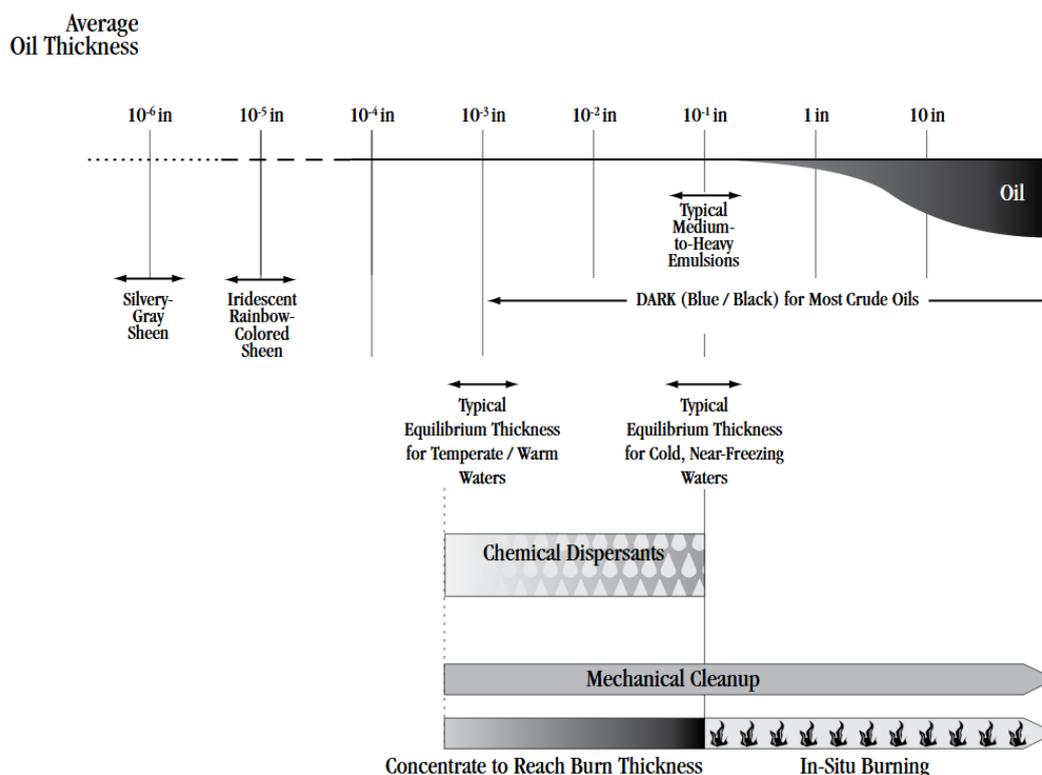


Figura 7: Espessuras limite do óleo em função de diferentes estratégias de resposta. Fonte: API/NOAA/USCG/EPA, 2013, adaptado de Allen & Dale, 1996.

A vazão e a eficiência de recolhimento representam parâmetros de extrema significância em operações de recolhimento, estando ambos diretamente associados ao funcionamento do *skimmer* e conseqüentemente com a capacidade de remoção de óleo promovida pelo mesmo (SIQUEIRA, 2015). A vazão de recolhimento reflete a taxa com a qual o efluente oleoso é bombeado pelo recolhedor do meio aquático para as estruturas de armazenamento, enquanto a eficiência de recolhimento representa a razão entre o óleo e a totalidade dos efluentes recolhidos.

A seguir (Figura 8 e Figura 9) são apresentadas, de forma resumida, as variações de eficiência de recolhimento para diferentes tipos de recolhedores, em função das condições meteoceanográficas e do tipo/estado do óleo. Observa-se que a eficiência de recolhimento pode sofrer grandes variações diante destas variáveis, assumindo valores entre 20% a 95% dependendo do tipo de recolhedor.

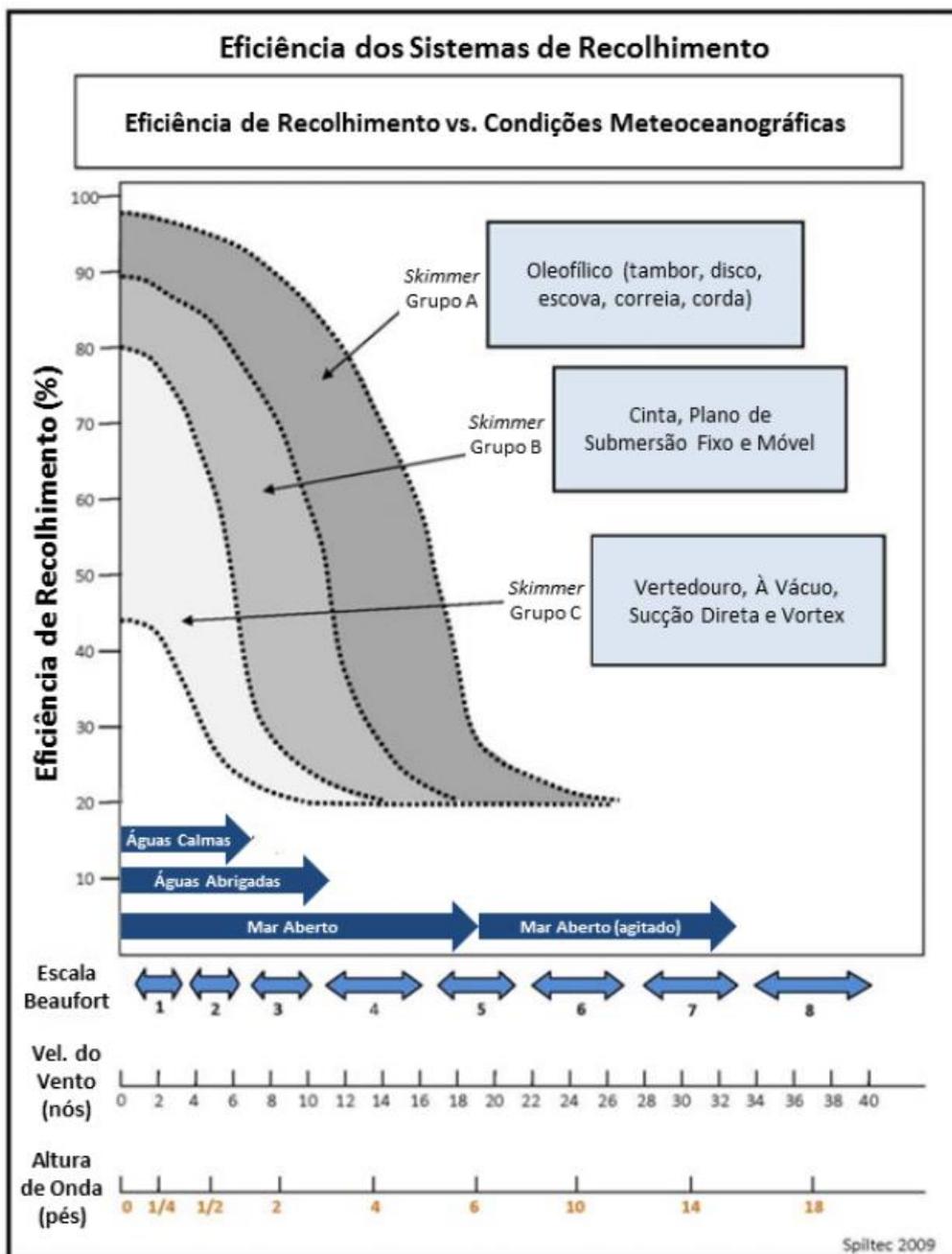


Figura 8: Variações de eficiência de recolhimento em função das condições meteoceanográficas.  
Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011).

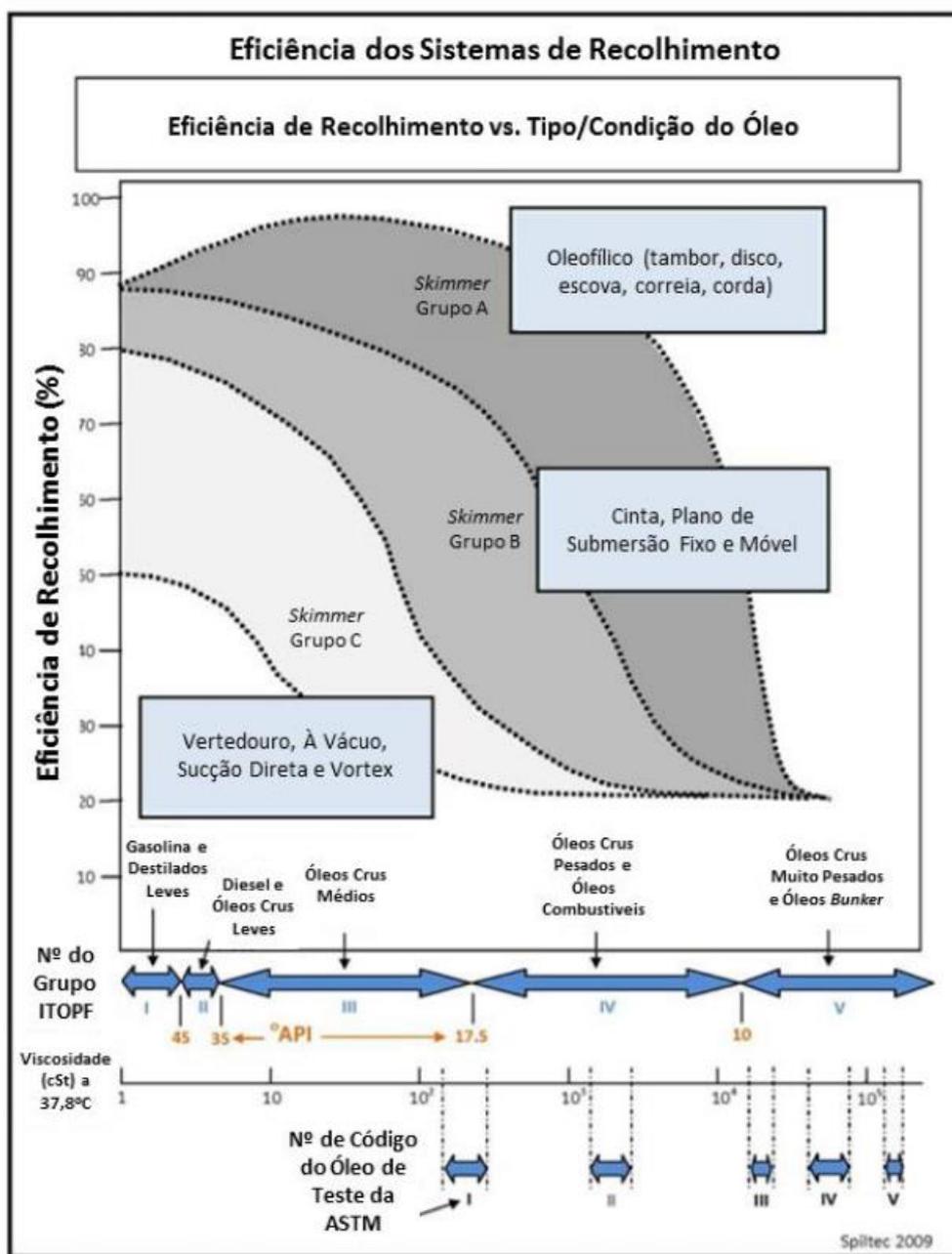


Figura 9: Variações de eficiência de recolhimento em função do tipo/condição do óleo. Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011).

ITOPF (2012 apud Siqueira, 2015) destaca outro fator relevante que deve ser levado em consideração a fim de caracterizar a real eficiência obtida por um sistema de recolhimento. Este parâmetro consiste na taxa de encontro (*encounter rate*), que é definido por ASTM F1780 como simplesmente a taxa (m<sup>3</sup>/h) em que o sistema encontra a mancha de óleo. Essa taxa é determinada em função da velocidade de avanço da configuração, sua abertura e a espessura

local da mancha de óleo. A equação que descreve a taxa de encontro é dada por (IPIECA, 2012 apud SIQUEIRA, 2015):

$$EnR = v \times swath \times \mu$$

Sendo  $EnR$  a taxa de encontro,  $v$  a velocidade de avanço da configuração,  $swath$  a abertura da formação de barreira e  $\mu$  a espessura local da mancha de óleo.

### 2.3.1.3 Dispersantes Químicos

Uma das técnicas possíveis de serem utilizadas é o uso de dispersantes químicos, tanto em vazamentos de superfície quanto em vazamentos de sub-superfície. Como mostraremos, o principal efeito do uso de dispersantes químicos em vazamentos de óleo no mar é a intensificação do processo de dispersão natural do óleo na coluna d'água.

Os dispersantes são compostos de substâncias surfactantes dissolvidas em um ou mais solventes. As moléculas dos surfactantes possuem uma parte lipofílica (com afinidade pelo óleo) e outra parte hidrofílica (com afinidade pela água). Dessa forma, a parte hidrofílica do surfactante se liga às moléculas de água e a parte lipofílica se liga às moléculas de óleo, o que diminui a tensão interfacial água-óleo e permite a formação de pequenas gotículas de óleo que se dispersam na coluna d'água (LESSARD; DEMARCO, 2000) (Figura 10).

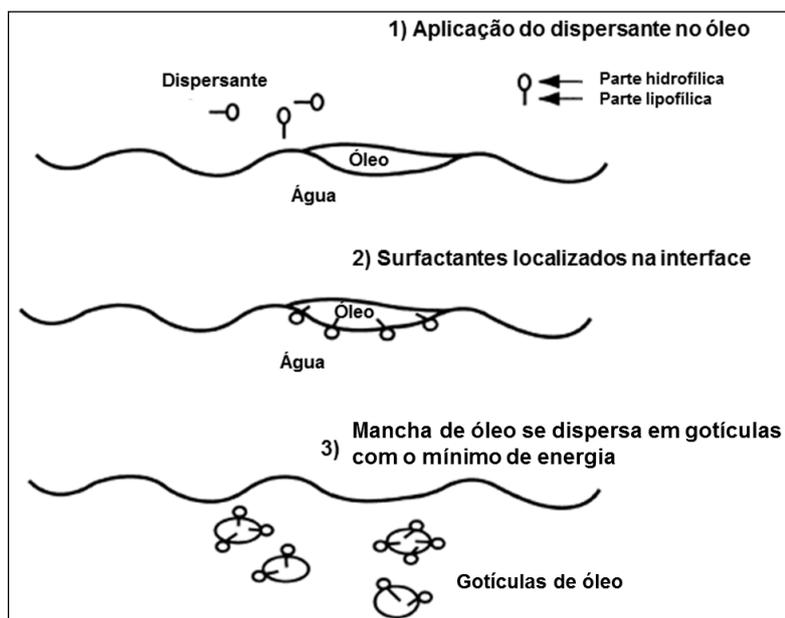


Figura 10: Como os dispersantes funcionam: 1) Óleo e água não se misturam; 2) Dispersantes são aplicados na superfície da camada de óleo e os surfactantes se localizam na interface óleo/água, onde eles atuam; 3) A tensão interfacial é reduzida e o óleo é disperso em pequenas gotículas.

Fonte: Modificado de LESSARD; DEMARCO, 2000.

Alguns dos efeitos dos dispersantes químicos são (IPIECA, 2015a):

- Este processo aumenta a biodisponibilidade do óleo para as bactérias que degradam os hidrocarbonetos, aumentando assim a assimilação do óleo no ambiente;
- O seu uso minimiza danos em longo prazo, perturbações aos animais selvagens sensíveis, habitats costeiros, e recursos socioeconômicos que podem ocorrer se o dispersante não for usado e o óleo ou permanecer na superfície ou alcançar águas costeiras e a costa;
- A necessidade de uma potencial operação de limpeza de larga escala e prolongada na costa é reduzida;
- E evita a criação de grandes volumes de materiais de lixo comumente associados com operações de limpeza de linha de costa. Estes lixos geram grandes desafios ambientais durante manipulação, armazenamento e eliminação.

A dispersão do óleo na água do mar é resultado de múltiplos processos simultâneos e esses processos podem agir em conjunto ou contra o efeito um do outro.

O entranhamento inicial do óleo é uma etapa importante, sem o qual nenhuma dispersão pode ocorrer. É o processo no qual o óleo fica suspenso na coluna d'água pelo efeito das ondas que empurram localmente porções da mancha de óleo para baixo da superfície da água. Esse processo determina a quantidade de óleo disponível para outros processos como a dissolução dos componentes mais hidrofílicos. O entranhamento de óleos muito viscosos ou emulsificações resultam em formação de grandes placas, que ficam submersas temporariamente. Já óleos menos viscosos e, portanto, menos resistentes a deformação, são quebrados em gotículas menores pela turbulência e pelo cisalhamento do movimento das ondas (HELFRICH *et al* 2015).

No caso da aplicação dos dispersantes na mancha superficial, as gotículas formadas são misturadas ou distribuídas na camada de mistura, na qual um balanço existe entre a quebra e a coalescência das gotículas, que é a tendência do encontro entre gotículas e formação de gotículas maiores. A quebra e a coalescência das gotículas são o balanço entre as forças hidrodinâmicas externas deformando as gotículas e as forças internas em oposição, a primeira é determinada pela energia de mistura e a outra depende das características do óleo. A taxa de ocorrência desses dois processos determina a distribuição de tamanho das gotículas do óleo dispersado, e o tamanho influencia na sua flutuabilidade, como nos processos de dissolução e biodegradação (HELFRICH *et al* 2015). Em geral, dispersantes químicos diminuem as tensões interfaciais, o que permite e aumenta a quebra do óleo em gotículas menores, mas não impede a coalescência (STERLING *et al.*, 2004).

Quando suspensas as gotículas são transportadas pela turbulência, correntes locais e pela tendência a subir. A maioria dos tipos de óleo são menos densos do que a água do mar e,

portanto, gotículas maiores tendem a subir para a superfície e as menores permanecem mais tempo em suspensão. Algumas gotículas são tão pequenas que são semi-estáveis e a turbulência local as mantém em suspensão.

O benefício da dispersão é baseado na mudança do transporte do óleo e na dissolução resultante. Aumentando o transporte vertical também altera o transporte do óleo na horizontal. O transporte vertical determina o tempo de residência das gotículas na coluna d'água, por consequência o seu movimento horizontal diferencial da mancha em superfície. As correntes locais influenciam tanto as gotículas em suspensão quanto a mancha de óleo em superfície, o arrasto do vento que é a principal diferença no movimento entre esses dois. Portanto, a diferença do destino do óleo em suspensão para o óleo em superfície vai depender de quanto tempo a parcela de óleo em suspensão permanecer na coluna d'água, antes de ressuspender (HELFRICH *et al* 2015).

As gotículas que permanecem submersas por um período mais longo podem ressuspender fora da mancha de óleo que se moveu com o vento, formando um fino rastro da mancha. Além disso, elas podem ressuspender próximo à mancha e coalescer com ela, como também podem ressuspender por debaixo da mancha em superfície podendo aumentar a emulsificação, o que pode dificultar uma futura dispersão em função do aumento da viscosidade das emulsificações de óleo e água em comparação com apenas o óleo (HELFRICH *et al* 2015).

Quando as gotículas estão em suspensão na água outros processos acontecem, como a dissolução de componentes de óleo mais solúveis, interação das gotículas de óleo com o material particulado e biodegradação. Isso pode alterar as propriedades das gotículas de óleo, que podem afundar até o fundo marinho.

A dispersão química altera as propriedades do óleo afetando o comportamento deste em processos distintos. O efeito do dispersante depende da logística de resposta e do quanto de óleo é tratado, incorporação de dispersante na interface óleo-água e o efeito do dispersante nas propriedades do óleo.

A Figura 11 mostra um esquema de um modelo conceitual dos sub-processos envolvidos na dispersão do óleo na superfície do mar.

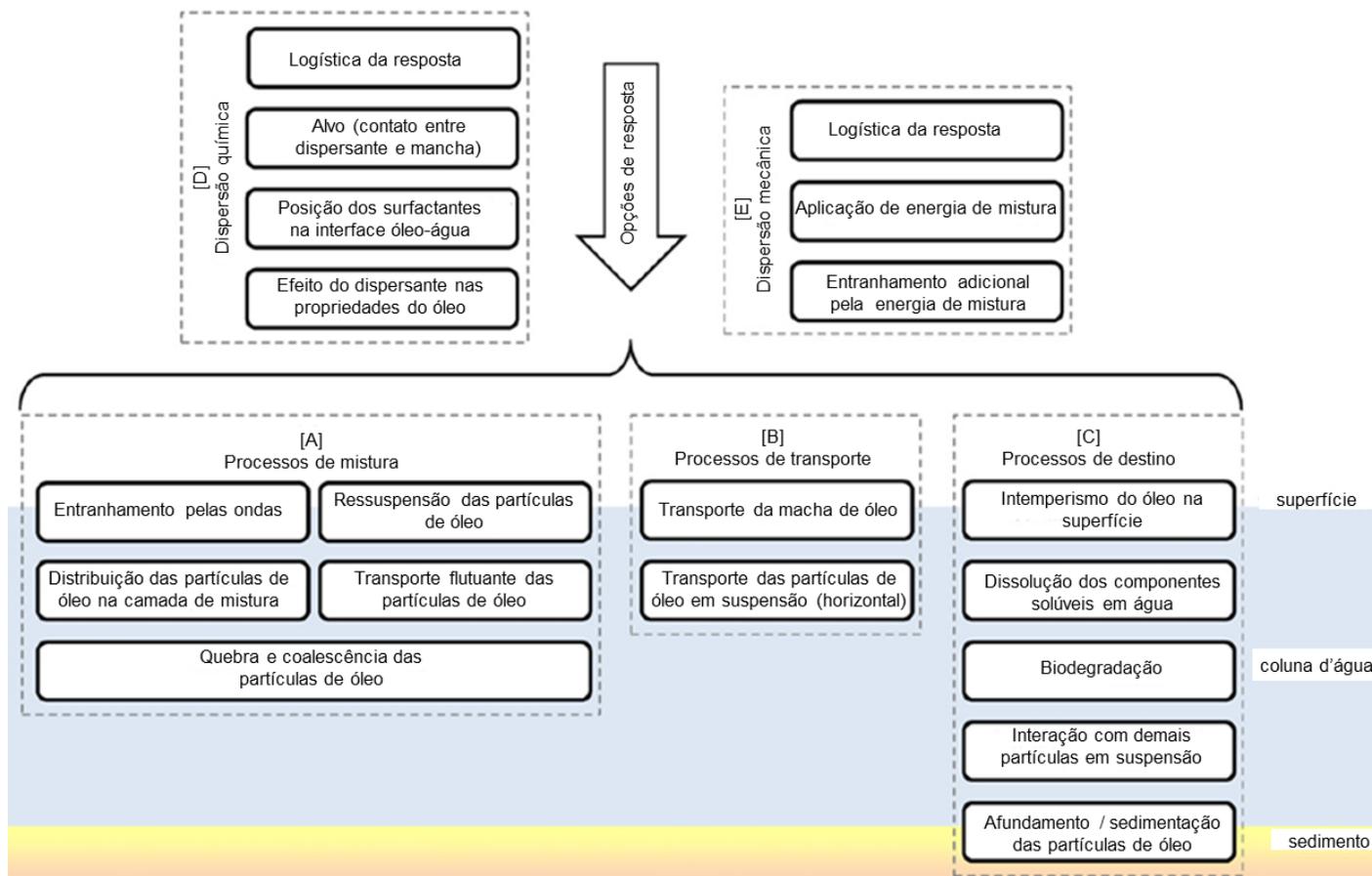


Figura 11: Esquema do modelo conceitual dos sub-processos envolvidos na dispersão do óleo na superfície do mar. Adaptado de Helfrich *et al.* (2015).

Contudo, transferir óleo da superfície para a coluna d'água em forma de pequenas gotículas de óleo pelo uso de dispersantes faz com que o óleo esteja biologicamente mais disponível para os organismos marinhos e seja eventualmente biodegradado pelos microrganismos que já estão presentes no mar. Alguns componentes do óleo são solúveis em água e potencialmente tóxicos aos organismos marinhos.

A magnitude de qualquer toxicidade observada vai depender da exposição (concentração e duração) dos organismos marinhos ao óleo disperso e aos componentes do óleo solúveis em água e pode variar de efeitos sub-letais (narcose temporária, alterações na reprodução ou alimentação) que normalmente são reversíveis, até letais para alguns indivíduos da população afetada. No entanto alguns desses componentes serão transferidos para a coluna d'água, com ou sem o uso de dispersantes (IPIECA, 2015a).

A situação mais favorável para a biodegradação é quando o óleo é disperso offshore. O processo de biodegradação para gotículas de óleo geralmente começa entre o 1 e 2 dias e é completado em poucas semanas (IPIECA, 2015a).

Alguns estudos (e.g. ALMEDA et al., 2014) demonstram que dispersantes químicos são tóxicos para organismos marinhos planctônicos e que o óleo dispersado quimicamente é mais tóxico do que o óleo cru. Portanto, a utilização dos dispersantes deve passar por avaliação comparativa entre os danos ambientais causados pela utilização dos dispersantes e os danos causados sem a utilização de dispersantes. Este tipo de estudo comparativo é amplamente utilizado em nível internacional utilizando o conceito de NEBA (*Net Environmental Benefit Analysis*, ver: BACA et al., 2005). NEBA é uma avaliação que permite que os envolvidos numa ação de resposta a derrames de óleo avaliem qual a ação de resposta resultará no menor impacto ambiental, admitindo que, uma vez que o óleo é derramado no mar, impactos negativos serão esperados, não importa qual ação de resposta seja empregada.

### 2.3.1.3.1 Uso de dispersantes em superfície

O uso de dispersantes na superfície do mar pode ser aplicado a partir de embarcações, helicópteros e aeronaves de asa fixa, e comparando com outras estratégias de resposta pode ser uma técnica mais rápida e eficiente para a remoção do óleo flutuante devido a diversos fatores (IPIECA, 2015a):

- A aplicação de dispersantes a partir de aeronave permite a dispersão do óleo flutuante presente em amplas áreas no mar em um tempo relativamente curto.
- A capacidade de aplicação aérea pode ser uma resposta relativamente rápida em localidades remotas.

- Dispersantes podem ser usados em condições de mar mais severas, quando é incompatível o uso efetivo de estratégias de contenção e recolhimento no mar.

- Proporciona uma exposição e risco de segurança reduzido para a equipe de resposta, uma vez que pode reduzir os vapores potencialmente nocivos nas proximidades de um vazamento, com benefício em especial para a equipe de resposta em atividades baseadas em embarcações nas áreas próximas, assim como minimiza a exposição da equipe e da comunidade local ao óleo de maneira geral.

No entanto, existe um risco potencial do óleo dispersado deixar os organismos que habitam a camada mais superficial da coluna d'água expostos brevemente a uma nuvem difusa de gotículas de óleo dispersado, com componentes do óleo solúveis em água, em uma maior extensão do que se dispersantes não fossem usados. Essa exposição ao óleo disperso pode ter efeitos potencialmente tóxicos nos organismos marinhos.

E assim como para qualquer outra ação de resposta, existem capacidades e limitações do uso de dispersantes em superfície, e estas abrangem diversos aspectos (IPIECA, 2015a):

**Profundidade do local:** O uso de dispersante deve ocorrer em águas mais profundas que 10 ou 20 metros uma vez que o potencial de benefícios é maior e o potencial de dano é menor, devido à rápida diluição do óleo dispersado em um grande volume de água. Quando o vazamento de óleo ocorre em águas menores que 10 ou 20 metros de profundidade, deve-se examinar a adequação do uso de dispersante de forma mais aprofundada.

**Taxa de encontro:** A taxa de encontro, que é a taxa em que o óleo pode ser tratado por uma técnica de resposta, do uso de dispersantes é de longe a maior de todas as técnicas de resposta. Aplicações a partir de aeronaves de asas fixas podem dar altas taxas de encontro, assim como a resposta e o tempo de deslocamento são geralmente mais rápidos que os de embarcações. No entanto em alguns cenários, embarcações podem permanecer no local por mais tempo e ter um carregamento maior de dispersante.

**Estado ambiental (condições de vento e mar):** Uma rápida dispersão do óleo tratado com dispersante começa com uma velocidade de vento de aproximadamente 7 nós (3 m/s) com ondas de altura de 0,2 a 0,3 metros. No entanto, dispersantes podem ser aplicados em óleo flutuante em condições de calmaria, e a dispersão irá começar quando as condições de mar e vento necessárias, citadas anteriormente, ocorrerem. Intensidade de ventos acima de 35 nós (18 m/s) e altura de ondas de 5 metros são geralmente os limites máximos para aplicação de dispersantes a partir de aeronaves. Em condições de muito vento, acertar a aplicação do dispersante no alvo se torna um desafio, e o óleo flutuante pode ser encoberto e submerso em situações de mar grosso. Por essas mesmas razões, as condições limitantes para a aplicação de dispersantes a partir de embarcações serão menores em condições de muito vento. Condição de mar grosso pode ser um limitante para qualquer ação de resposta de interface

ar/mar. No entanto, essas condições podem causar uma extensa dispersão natural para óleos leves.

**Salinidade:** A maioria dos dispersantes disponíveis comercialmente é formulada para serem mais efetivos em águas com salinidade entre 30 e 35 psu. A eficiência diminui em água salobra (salinidades entre 5 a 10 psu) e pode ser bem baixa em água doce. Apesar de dispersantes para águas doces serem disponíveis, a dispersão do óleo nessas águas não é recomendada na maioria das circunstâncias porque há volume de água insuficiente em rios e em lagos que permita a diluição do óleo dispersado em baixas concentrações.

**Ponto de fluidez do óleo:** Essa informação é importante para métodos de recuperação mecânica e para métodos de limpeza de costa, mas também indica se provavelmente o uso de dispersante terá sucesso, uma vez que ele não pode penetrar em um óleo semi-sólido e será lavado para fora da mancha.

**Viscosidade do óleo:** A viscosidade do óleo muda com o tempo e com o intemperismo através da evaporação e emulsificação, influenciando na eficiência do dispersante. À medida que a viscosidade aumenta, a provável eficiência do uso de dispersante diminui pela redução da habilidade de penetrar no óleo para chegar à interface óleo-água, que é onde o dispersante trabalha para quebrar o óleo em pequenas gotículas. Isso é geralmente conhecido como janela de oportunidade para o uso de dispersantes, que é dependente da temperatura. Na Tabela 1 são apresentadas as faixas de viscosidade comparadas com a eficiência dos dispersantes (IPIECA, 2014).

Tabela 1: Intervalos geralmente aceitos do efeito da viscosidade do óleo sobre a eficácia do dispersante.

<b>Combustíveis destilados (gasolina, querosene, óleo diesel)</b>	O uso de dispersante não é aconselhável. Esses óleos vão evaporar e dispersar naturalmente e se espalhar rapidamente em camadas finas na maioria das condições.
<b>Óleos com viscosidade até 5.000 cSt</b>	O uso de dispersantes provavelmente será eficaz.
<b>Óleos com viscosidade entre 5.000 e 10.000 cSt</b>	O uso de dispersantes pode ser eficaz.
<b>Óleos com viscosidade acima de 10.000 cSt</b>	O uso de dispersantes é provavelmente ineficaz.

Em relação à aplicação dos dispersantes, aspectos como tamanho das gotículas de dispersantes, taxa de aplicação e velocidade dos meios de transportes devem ser considerados (IPIECA, 2015a):

**Tamanho das gotículas:** o sistema de aplicação deve depositar gotículas de dispersante com de diâmetro de 0,4 a 0,7 mm, semelhante à chuva leve. Gotículas de dispersantes menores são suscetíveis a serem sopradas para fora da mancha de óleo pelo vento e gotículas maiores que 1 mm de diâmetro podem passar por camadas de óleo finas e serem perdidas na água.

**Taxa de aplicação:** a recomendação para dispersante em superfície é usualmente 1 parte de dispersante para 20 ou 25 partes de óleo, mas pode ser difícil de ser alcançada na prática, uma vez que não é possível ter precisamente a espessura do óleo flutuante. Uma espessura média para a camada de óleo geralmente assumida é de 0,1 mm, no entanto esta pode variar muito (de menos de 0,0001 mm até mais que 1 mm) em pequenas distâncias. A aplicação de doses superestimadas e subestimadas em algumas regiões é inevitável.

**Velocidade dos meios de transportes:** esta terá um impacto direto na concentração do dispersante aplicado no óleo. A velocidade ótima para uma embarcação vai depender de uma série de fatores, mas geralmente fica no intervalo entre 1 e 10 nós, e uma taxa típica de aplicação é de 5-20m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Já a aplicação de dispersante a partir de aeronaves de asas fixas, deve acontecer em baixas altitudes para assegurar a aplicação na mancha de óleo. No entanto, a velocidade deve ser baixa condizente com a segurança de voo.

### 2.3.1.3.2 Legislação brasileira para o uso de dispersantes

As diretrizes brasileiras para o uso de dispersantes químicos em incidentes de poluição por óleo no mar estão expostas na Resolução CONAMA Nº 472/2015, de 27 de novembro de 2015.

De acordo com essa resolução, a aplicação de dispersantes químicos em ações de resposta a incidentes de poluição por óleo no mar deverá ser previamente comunicada ao IBAMA e somente poderá ser utilizada quando a não intervenção ou a aplicação de técnicas mecânicas de contenção, recolhimento e dispersão se mostrarem não efetivas, inaplicáveis ou insuficientes, ou então nas seguintes hipóteses:

I - situações nas quais a mancha de óleo estiver se deslocando ou puder se deslocar, conforme indicação meteoceanográfica ou dados pretéritos locais, para áreas designadas como ambientalmente sensíveis;

II - incidentes com vazamento contínuo ou volumes relevantes, quando as demais técnicas de resposta se mostrarem não efetivas ou insuficientes;

III - aplicação subaquática somente para possibilitar os procedimentos necessários para a interrupção de vazamento de um poço de petróleo em descontrole;

IV - óleo emulsionado, ou intemperizado quando o dispersante químico se mostrar efetivo, com base em testes de campo.

Existem também algumas áreas com restrição ao uso de dispersantes químicos, que são áreas que apresentam distâncias inferiores a 2.000 m da costa, inclusive de ilhas, de unidades de conservação marinhas, de recifes de corais, de bancos de algas ou de baixios expostos pela maré ou áreas com profundidades menores que 20 metros.

Uma requisição também é que a aplicação de dispersantes químicos em superfície deve ser acompanhada de monitoramento aéreo e de monitoramento marítimo, visando maximizar a efetividade de seu emprego e evitar a contaminação de áreas não afetadas pelo óleo. Esse monitoramento deverá, simultaneamente, identificar posição, extensão, largura e aspecto das manchas, registrar os dados de distância da costa, informando sobre as condições meteorológicas e oceanográficas; e verificar a tendência do deslocamento das manchas visando orientar a aplicação dos dispersantes químicos.

## 2.3.2 Implementação

### 2.3.2.1 Barreiras de Contenção

O algoritmo utilizado para a inserção de barreiras de contenção no modelo tem base em equacionamentos de álgebra linear para identificação do cruzamento de retas, usando as definições abaixo:

#### Segmento de Reta

Um segmento delimitado pelos pontos P e Q (Figura 12), define uma reta a partir de um de seus pontos e do vetor  $\underline{PQ}$ .

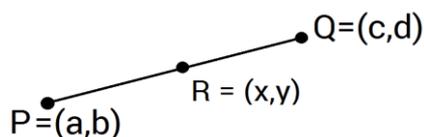


Figura 12: Segmento de reta delimitado pelos pontos P e Q.

Qualquer ponto R, cuja direção do vetor  $\underline{PR}$  seja a mesma de  $\underline{PQ}$ , está contido nessa reta. Logo, a reta pode ser definida a partir de uma equação paramétrica, com t como parâmetro:

$$R = P + t * PQ$$

Ou seja, os pontos x e y que definem R, são dados por:

$$x = a + t * (c - a) ; y = b + t * (d - b)$$

Ressalta-se que, qualquer ponto dessa reta que esteja dentro do segmento delimitado pelos pontos P e Q, possui um parâmetro  $t$ , tal que:  $0 \leq t \leq 1$ .

### Intersecção de Retas

Duas retas ( $r_1$  e  $r_2$ ) vão se intersectar se possuírem um ponto em comum. Para isso, fazem-se necessárias as seguintes condições:

$$x_1(t) = x_2(t) ; y_1(t) = y_2(t)$$

Esse sistema de equações terá:

- a) Nenhuma solução se as retas são paralelas e não coincidentes;
- b) Infinitas soluções se as retas são paralelas e coincidentes.
- c) Solução única se as retas são concorrentes.

### Aplicação no Modelo Lagrangiano

Para a aplicação desse equacionamento no modelo lagrangiano, a cada passo de tempo, são calculados os segmentos de reta definidos pela posição anterior e atual de cada partícula ( $r_1$ ), com os segmentos definidos pelas barreiras presentes na modelagem ( $r_2$ ).

Verifica-se, então, a intersecção entre esses segmentos. Para os casos “a” e “b” citados no item anterior, a hipótese de cruzamento é descartada automaticamente. No caso de um resultado do tipo “c”, verifica-se se o ponto de intersecção entre as duas retas se encontra dentro de ambos os segmentos, o que confirmaria que a partícula passou por dentro da barreira. Para isso, os parâmetros  $t$  associados a ambas as retas de estar contido nos respectivos segmentos, ou seja:

$$0 \leq t_1 \leq 1 ; 0 \leq t_2 \leq 1.$$

A Figura 13 apresenta um diagrama exemplificando essa nova metodologia, onde os pontos pretos representam coordenadas fictícias de uma partícula, a linha vermelha uma barreira de contenção, e os segmentos tracejados a trajetória desenvolvida. Os segmentos pretos representam trechos sem cruzamento de barreiras e os segmentos azuis onde foram identificados cruzamentos com o novo algoritmo.

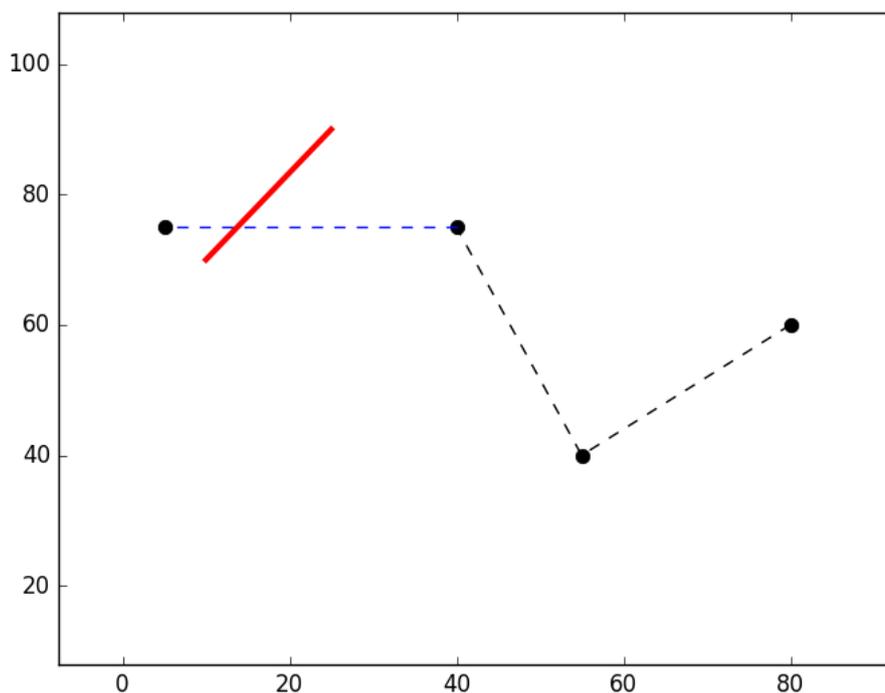


Figura 13: Exemplo do algoritmo de cruzamento de barreiras. O segmento vermelho representa a barreira de contenção, os segmentos pretos correspondem aos trechos onde o algoritmo não identificou cruzamento e, por fim, o segmento azul corresponde a um trecho onde o algoritmo detectou que houve o cruzamento de uma barreira.

O sistema conta com 2 opções de barreiras, a do tipo “Absorvente”, que retêm definitivamente as partículas após o contato, ou do tipo “Não-absorvente”, que apenas rebate a partícula, sem a reter. No modelo, é necessário a introdução de 3 retas (Figura 14) para a representação de uma barreira de contenção, seguindo a metodologia discutida em Siqueira (2015). Essa metodologia serve a criar uma representação numérica das formações em “U” ou “J” apresentadas no item 2.3.1.2.

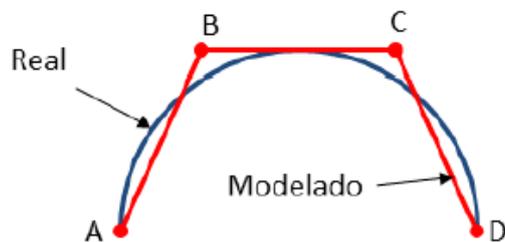


Figura 14: Representação numérica da barreira de contenção utilizando 3 retas. Adaptado de Siqueira (2015).

### 2.3.2.2 Skimmers

A área de coleta do *skimmer* é vinculada ao posicionamento das barreiras de contenção, como ocorre de fato na prática. Dentro da formação, a quantidade de óleo disponível para retirada pelo *skimmer* corresponde ao volume total de todas as partículas que estejam dentro da área interna à barreira delimitada pela mediana das linhas laterais, conforme Figura 15. A distância conectando as medianas dos dois lados da barreira representa a chamada “abertura da formação” (do inglês, *swath*), que será utilizada também nos cálculos do *skimmer*.

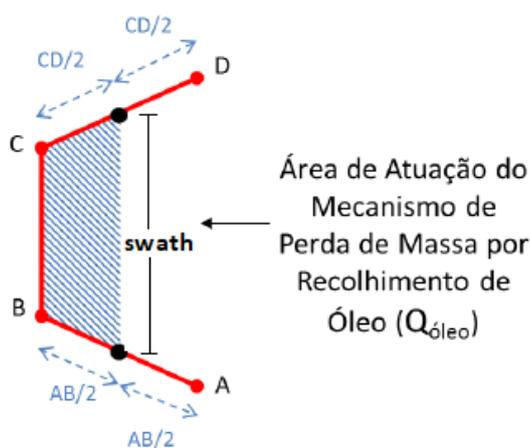


Figura 15: Representação numérica da barreira de contenção com a área de coleta do *skimmer*. Adaptado de Siqueira (2015).

É importante ressaltar que o *skimmer* só iniciará sua operação após sua chegada na área da barreira, calculada a partir de sua velocidade de cruzeiro e da distância entre sua coordenada inicial e a barreira.

A taxa de recolhimento de óleo (*TRO*) é dada por:

$$TRO = EnR * TE$$

onde *TE* é a eficiência de transferência e *EnR* é a Taxa de Encontro (*Encounter Rate*) de óleo pela configuração dada por:

$$EnR = Th * w * vo$$

onde *Th* é a espessura média do óleo que será coletado, *w* a abertura da formação (*swath*) e *vo* a velocidade de avanço da configuração.

A taxa de recolhimento de fluido total (*TRFT*) equivale a:

$$TRFT = TRO * RE$$

onde  $RE$  é a eficiência de recolhimento. Se a  $TRFT$  for superior a bomba nominal do *skimmer* ( $BN$ ), o  $TRO$  é recalculado usando a bomba nominal:

$$TRO = BN * RE$$

Para verificar se a capacidade de armazenamento já foi atingida, a cada passo de tempo, o volume coletado de fluido total vai sendo armazenado ao longo da simulação. Quando a capacidade for atingida, o equipamento encerra sua operação.

As duas eficiências citadas são definidas por:

**a) Eficiência de Transferência (*Throughput Efficiency*):** Essa eficiência retrata o volume de óleo que é efetivamente recolhido pela embarcação em relação ao óleo que é encontrado.

**b) Eficiência de Recolhimento (*Recovery Efficiency*):** Essa eficiência retrata o volume de óleo que é efetivamente recolhido em relação ao volume total de fluido que é recolhido. Esse parâmetro é função tanto do estado do mar (ventos/ondas) quanto da viscosidade do óleo a ser coletado e varia para cada tipo de equipamento. A Figura 16 e a Figura 17 apresentam essa eficiência em função de cada parâmetro citado. Após verificar o valor da eficiência de recolhimento em cada curva (estado do mar e viscosidade), o menor valor é utilizado para fins de cálculos.

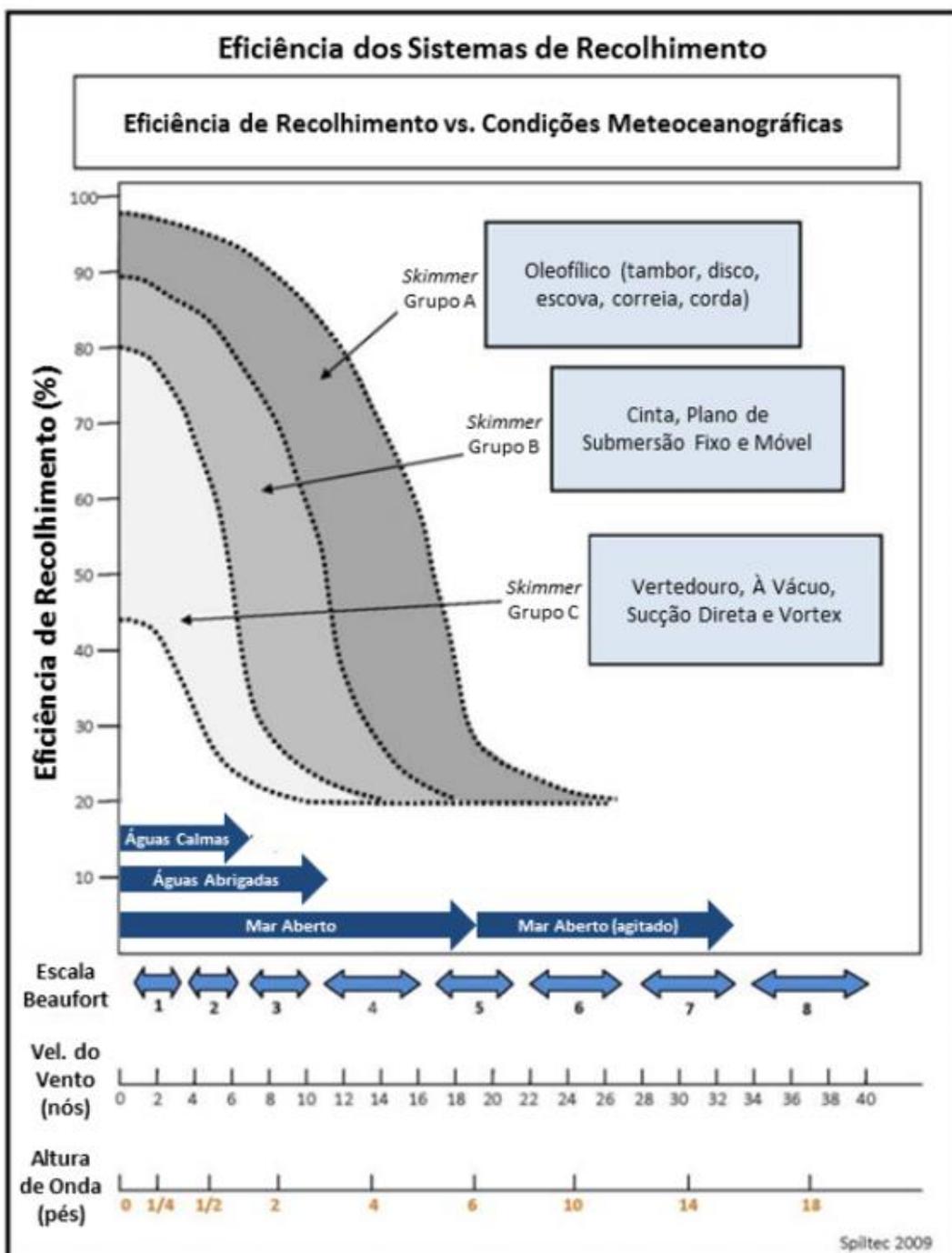


Figura 16: Eficiência de Recolhimento em função do estado do mar (ventos/ondas). Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011).

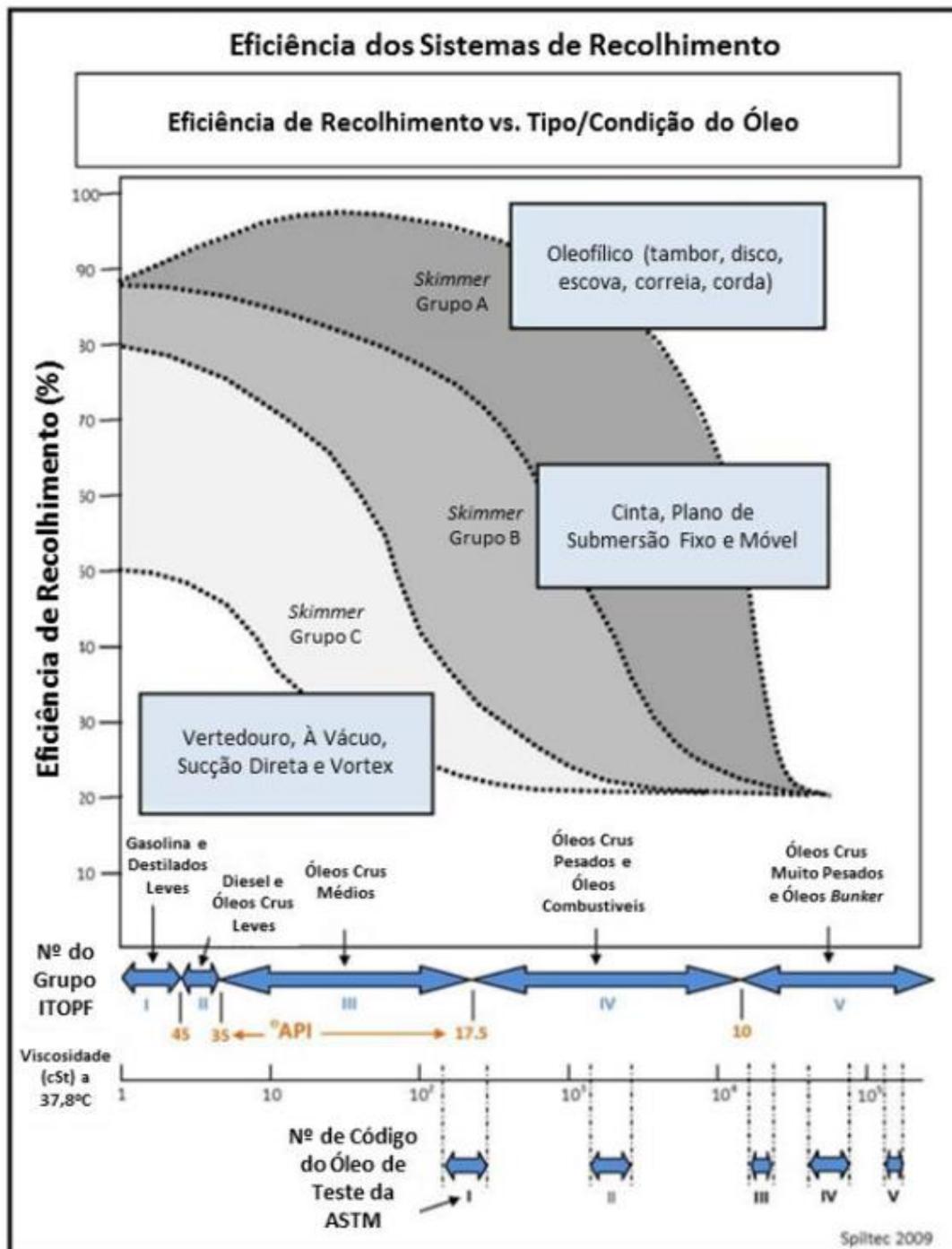


Figura 17: Eficiência de Recolhimento em função da viscosidade cinemática (cSt). Fonte: Siqueira (2015), adaptado de Genwest Systems (2011).

Por fim, foram introduzidas 3 restrições operacionais:

**a) Espessura mínima:** No caso de uma espessura média de óleo inferior a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 0,02 mm, retirado de Allen & Dale (1996).

**b) Velocidade do vento:** No caso de ventos superiores a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 19 nós.

**c) Viscosidade cinemática:** Se a viscosidade cinemática média do óleo a ser recolhido for superior a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 50.000 cSt.

Os valores das duas últimas restrições são referentes aos limites das curvas de eficiência de recolhimento apresentadas anteriormente.

### 2.3.2.3 Dispersantes Químicos

Para a aplicação de dispersantes químicos, o modelo define como premissa de que o composto será lançado ao longo de toda a extensão da mancha, com exceção de possíveis partes que tenham chegado à costa.

A unidade de aplicação inicia a operação após sua chegada na região da mancha, calculada a partir de sua velocidade de cruzeiro e da distância entre sua coordenada inicial e a macha de óleo. O primeiro parâmetro a ser calculado é a Dosagem Requerida (*DR*) para a dispersão do óleo, dado por:

$$DR = 2,717 \times 10^4 \cdot DOR \cdot Th \text{ [gal/acre]}$$

onde *Th* é a espessura média da macha de óleo (polegadas) e *DOR* é a taxa dispersante-óleo. Em seguida, obtêm-se a Taxa de Cobertura de Área (*TCA*):

$$TCA = \frac{vo \cdot w}{430} \text{ [acres/min]}$$

onde *w* é o comprimento de varredura (pés) e *vo* a velocidade de avanço da configuração (nós).

Com isso é calculada a Taxa de Bombeamento Desejada (*TBS*) para a realização da operação, através de:

$$TBS = DR \cdot TCA \text{ [gal/min]}$$

Esse valor é comparado aos limites operacionais mínimo e máximo de forma a tornar a operação praticável pelo equipamento. No caso de uma *TBS* maior que o valor máximo de bombeamento (*BMáx*), a *TBS* é substituída por *BMáx*. O mesmo vale para valores inferiores ao mínimo de bombeamento (*BMín*), onde a *TBS* é substituída por *BMín*.

O modelo então calcula o tempo necessário para a aplicação (*TA*), dado por:

$$TA = \frac{Cd}{TBS} \text{ [min]}$$

onde  $Cd$  é a carga de dispersante disponível (gal).

Por fim, o volume de óleo efetivamente tratado ( $VolTra$ ) por leva de aplicação equivale a:

$$VolTra = \frac{DE \cdot Cd}{DOR} [gal]$$

onde  $DE$  corresponde a eficiência do dispersante, definida por:

**Eficiência do Dispersante (*Dispersant Efficiency*):** Essa eficiência reflete o volume de óleo que é efetivamente disperso após a aplicação em relação ao volume total de fluido que foi submetido ao dispersante. Esse parâmetro é função tanto do estado do mar (ventos/ondas) quanto da viscosidade do óleo a ser disperso. A Figura 18 e Figura 19 apresentam essa eficiência em função de cada parâmetro citado. Após verificar o valor da eficiência de recolhimento em cada curva (estado do mar e viscosidade), o menor valor é utilizado para fins de cálculos.

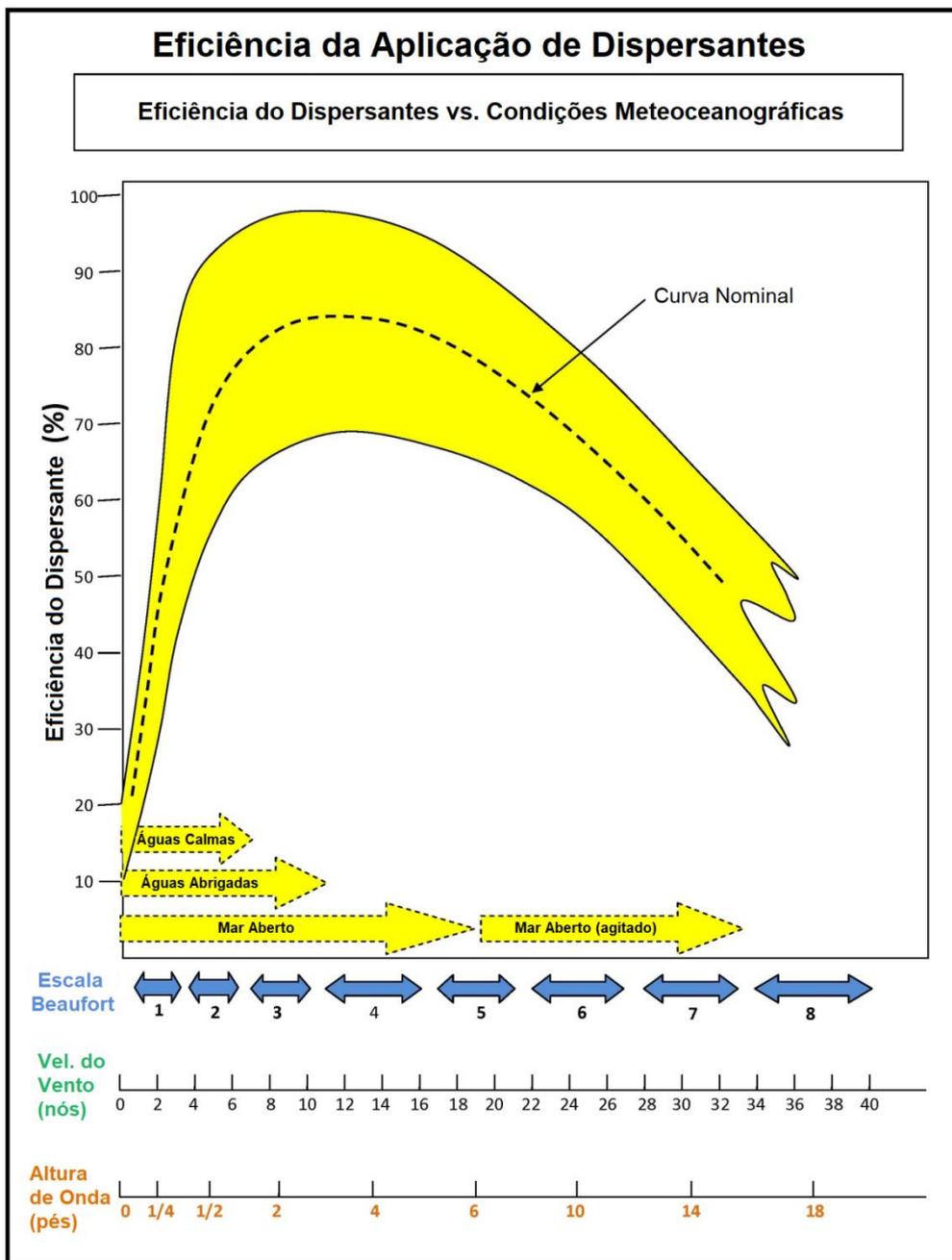


Figura 18: Eficiência do Dispersante em função do estado do mar (ventos/ondas). Adaptado de Genwest Systems (2011).

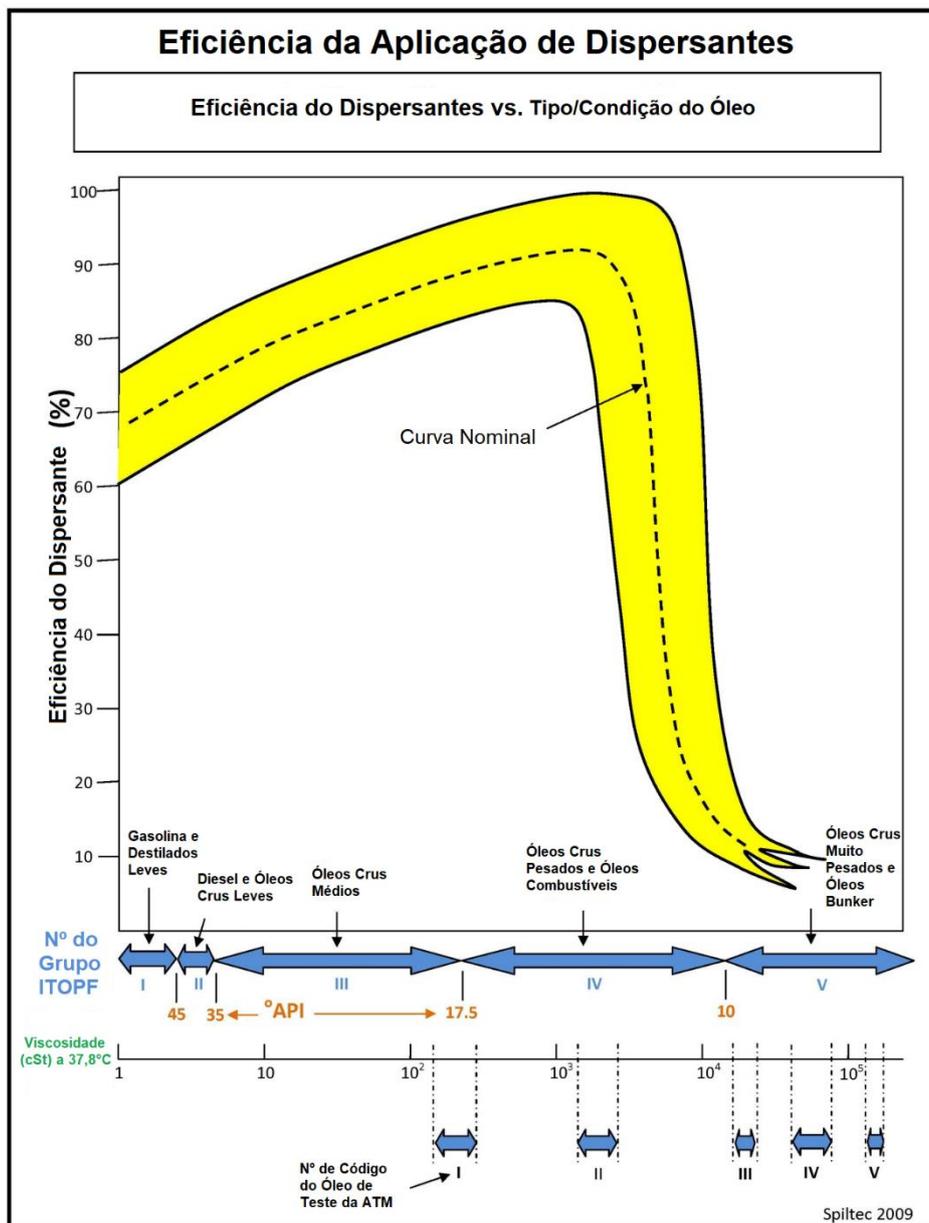


Figura 19: Eficiência do Dispersante em função da viscosidade cinemática (cSt). Adaptado de Genwest Systems (2011).

Por fim, foram introduzidas 2 restrições operacionais:

- a) **Velocidade do vento:** No caso de ventos superiores a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 36 nós.
- b) **Viscosidade cinemática:** Se a viscosidade cinemática média do óleo a ser disperso for superior a um determinado valor, a operação é pausada. O valor padrão é de 100.000 cSt.

## 3. Operação do sistema

O procedimento básico para operação do sistema consiste em três etapas. A primeira é onde são inseridos os campos de corrente e vento a serem utilizados na simulação. Na sequência, a segunda etapa consiste na introdução dos parâmetros e informações sobre a modelagem de dispersão de óleo e, por último, a terceira etapa disponibiliza as ações de contingência. Todas as etapas serão detalhadas nos próximos itens.

Para iniciar o sistema, o usuário deve acessar o domínio contendo o programa, fazer o login com seu usuário e senha e, no menu superior, clicar sobre o botão:  .

### 3.1. Etapa 1

Após inicializar o sistema, o primeiro passo é a escolha de dados meteorológicos e oceanográficos que serão usados durante a modelagem. O usuário possui cinco opções disponíveis, listadas na Tabela 2 e apresentadas na Figura 20.

Tabela 2: Parâmetros de entrada na Etapa 1.

Opção	Descrição
a) Modelo pré-carregado	Modelo de previsão operacional diretamente vinculado à ferramenta
b) Sem dados	Considera 0 m/s para o dado correspondente (corrente/vento)
c) Dados constantes	Valor constante no espaço e no tempo
d) Série temporal	Valor constante no espaço, porém variável no tempo
e) Arquivo local	Utiliza um arquivo netCDF local



Figura 20: Menu de seleção de Correntes (esquerda) e Ventos (direita). Por padrão, existem 5 opções disponíveis no sistema.

Cada uma dessas opções será explicada em detalhes nos próximos subitens.

### 3.1.1 Modelo pré-carregado

A ferramenta pode ser diretamente vinculada a um modelo de previsão operacional meteorológico ou oceanográfico. Desta forma, é possível usar esses dados sem a necessidade de criar um arquivo netCDF ou qualquer outro tipo de intervenção do usuário. Isso resulta em uma maneira mais rápida de obter os primeiros resultados.

Depois de escolher esta opção (usando o botão "Próximo passo"), aparecerá, sobre o mapa, um retângulo sombreado cinza. Este polígono refere-se à região onde os dados estão disponíveis para modelagem. Qualquer coordenada dentro deste retângulo pode ser clicada e usada como posição inicial para modelagem.

### 3.1.2 Sem dados

Esta é a opção mais simples e permite que o usuário não use um campo de corrente ou vento. Neste caso, o modelo irá considerá-lo como 0 m/s em qualquer ponto do espaço e do tempo. Geralmente é usado para comparações e compreensão da influência de cada forçante.

### 3.1.3 Dados constantes

Esta opção permite ao usuário inserir manualmente o valor de intensidade e de direção para ventos ou correntes. Ambos os valores serão utilizados em todos os pontos do espaço e durante toda a simulação. A direção considera a convenção internacional que diz que as correntes "vão" a uma direção e os ventos "vêm" de uma direção.

### 3.1.4 Série Temporal

Como na opção de dados constantes, esta permite ao usuário inserir manualmente valores de intensidade e de direção para ventos ou correntes. Ambos os valores serão utilizados em todos os pontos do espaço. No entanto, desta vez é possível criar valores que mudam ao longo da simulação. A direção considera a convenção internacional que diz que as correntes "vão" a uma direção e os ventos "vêm" de uma direção. Finalmente, é importante observar que todas as **datas e horários estão em UTC**.

O usuário tem 2 opções para inserir esses dados:

- a) Inserir manualmente:

Conforme visto na Figura 21, ao clicar no botão **+**, é possível adicionar novas linhas às séries temporais e depois escrever os valores manualmente.

Figura 21: Opção de série temporal da Etapa 1.

b) Importar arquivo ASCII (txt,dat):

É possível usar um arquivo ASCII com qualquer extensão (ex: .dat, .txt) e importá-lo diretamente na ferramenta. O arquivo deve ter valores **separados por espaço** e a ordem e as unidades das colunas devem ser:

*ano mês dia hora (minuto) direção (graus °) intensidade (m/s)*

O "minuto" é opcional e pode ser removido. A Figura 22 mostra dois exemplos de arquivos, um com o campo minutos (painel esquerdo) e o outro sem ele (painel direito).

Com minutos		Sem minutos	
timeseries01.txt		timeseries02.dat	
1	2017 01 02 02 00 225 2	1	2017 01 02 02 225 2
2	2017 01 02 04 00 225 2	2	2017 01 02 04 225 2
3	2017 01 02 06 00 225 2	3	2017 01 02 06 225 2
4	2017 01 02 08 00 225 2	4	2017 01 02 08 225 2
5	2017 01 02 10 00 225 2	5	2017 01 02 10 225 2
6	2017 01 02 12 00 225 2	6	2017 01 02 12 225 2

Figura 22: Exemplo de arquivo ASCII que pode ser importado como uma série temporal na Etapa 1.

### 3.1.5 Arquivo local

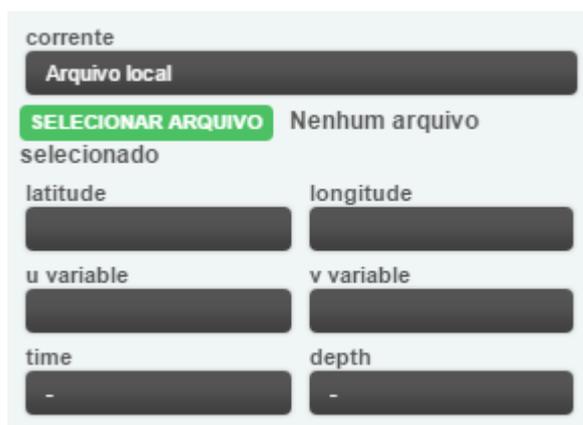
Essa opção é usada quando o usuário deseja fornecer um arquivo netCDF para a ferramenta. Os arquivos netCDF para correntes e ventos possuem 5 campos obrigatórios:

a) **Longitude** em graus decimais;

- b) **Latitude** em graus decimais;
- c) **Tempo** em qualquer dessas unidades:
  - day(s) since XXXX-XX-XX
  - hour(s) since XXXX-XX-XX
  - minute(s) since XXXX-XX-XX
  - second(s) since XXXX-XX-XX
- d) **Componente zonal (U) da velocidade** em m/s;
- e) **Componente meridional (V) da velocidade** em m/s.

Para o caso de correntes, a ferramenta permite o uso de campos 2D ou 3D, mas sempre selecionará o menor nível (menos profundo) disponível para extrair U e V.

O usuário deve escolher o arquivo netCDF usando o botão **SELECIONAR ARQUIVO**. Depois de carregá-lo, o usuário deve informar ao sistema o nome de cada variável dentro do netCDF, como visto na Figura 23. No caso de um modelo de correntes 2D, o campo "profundidade" deve ser usado com a opção vazia que vem selecionada como padrão.



corrente

Arquivo local

**SELECIONAR ARQUIVO** Nenhum arquivo selecionado

latitudo

longitude

u variable

v variable

time

depth

Figura 23: Seleção das variáveis de um arquivo netCDF na Etapa 1.

Como na opção Modelo pré-carregado, depois de clicar em **PRÓXIMO PASSO**, aparecerá, sobre o mapa, um retângulo sombreado cinza (Figura 24). Este polígono refere-se à região onde os dados estão disponíveis para modelagem. Qualquer coordenada dentro deste retângulo pode ser clicada e usada como posição inicial para modelagem.

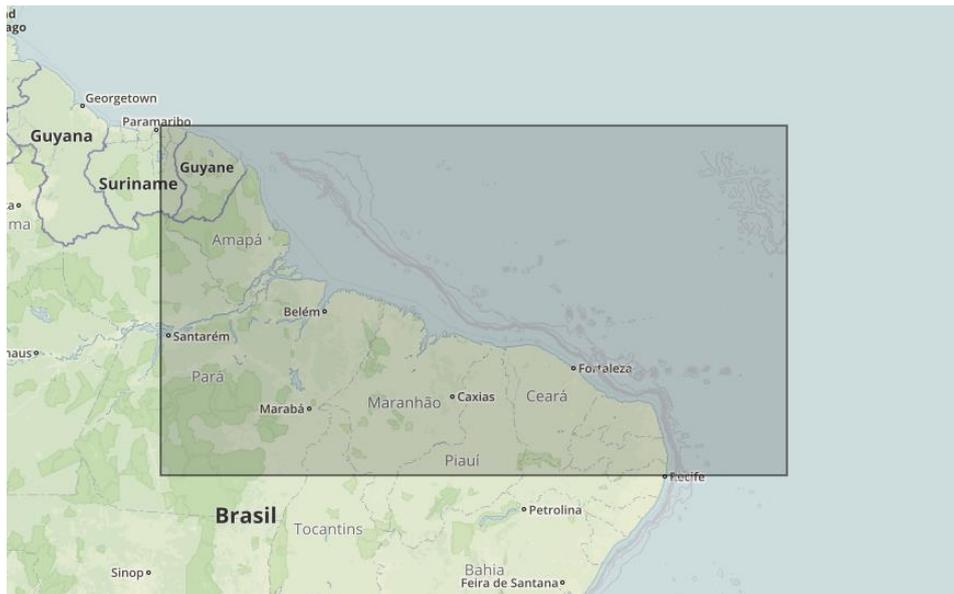


Figura 24: Exemplo de região (retângulo cinza) de dados disponíveis depois de escolher um modelo pré-carregado para correntes e/ou ventos na Etapa 1.

## 3.2. Etapa 2

A segunda etapa consiste na inserção, pelo usuário, dos dados relativos ao incidente, aos parâmetros de simulação e às propriedades do óleo vazado. As informações necessárias para esta etapa estão listadas na Tabela 3 e na Tabela 4.

Tabela 3: Parâmetros do incidente na Etapa 2.

<b>Parâmetros do Incidente</b>
Coordenadas geográficas (lon/lat)
Data e Hora (UTC)
Temperatura da água (°C)
Volume (m <sup>3</sup> )
Duração do vazamento (h)

Tabela 4: Parâmetros da simulação na Etapa 2.

<b>Parâmetros da Simulação</b>
Nome da rodada
Número de partículas
Duração da simulação (h)
Contribuição do vento (%)

A Figura 25 representa a tela inicial da interface do modelo, onde o usuário deve preencher cada um dos campos. Os próximos três subitens descrevem cada um dos parâmetros que devem ser introduzidos. Para encerrar a etapa, basta selecionar o botão **PRÓXIMO PASSO**.

Clique no mapa para selecionar o ponto desejado, preencha o formulário abaixo e clique no botão "Próximo passo".

nome da rodada

latitude  longitude

travar coordenadas

data / hora  número de partículas

duração do vazamento (h)  volume (m<sup>3</sup>)

duração da simulação (h)

contribuição do vento (%)  temperatura da água (°c)

óleo

**PRÓXIMO PASSO**

Figura 25: Exemplo de interface inicial da Etapa 2.

### 3.2.1 Parâmetros do Incidente

**Coordenadas geográficas (lon/lat):** Este campo corresponde à longitude e latitude do incidente. O usuário tem a opção de clicar em qualquer ponto do mapa para selecionar suas coordenadas automaticamente. Os valores estão em **graus decimais**. Exemplo: lon: -37.7445 / lat: -4.0701. O usuário pode utilizar a caixa de seleção “travar coordenadas”, para que qualquer novo clique no mapa não substitua o ponto atualmente escolhido.

**Data e Hora:** A data e hora do incidente. O usuário tem a opção de preenchê-lo manualmente no formato: *dd/mm/aa hh:mm* ou usar o calendário (Figura 26) para selecionar ambos os valores. **Atenção: todas as datas e horários no modelo estão em UTC.**

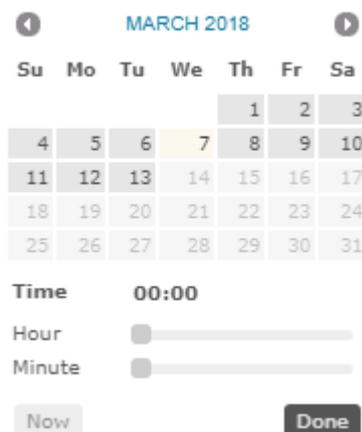


Figura 26: Calendário usado para selecionar a data e a hora.

**Temperatura da água:** Estimativa da temperatura da água no local do incidente. Esse valor é usado para a correção de densidade e viscosidade iniciais do óleo. O valor é em **graus Celsius (°C)**.

**Volume:** Quantidade de óleo a ser modelada no vazamento. O valor é em **metros cúbicos (m³)**.

**Duração do vazamento:** Esse parâmetro reflete o tempo no qual o vazamento ficou ocorrendo. O número total de partículas da simulação será dividido ao longo dessa duração. O valor é em **horas**.

### 3.2.2 Parâmetros da Simulação

**Nome da rodada:** Nome da simulação para facilitar a identificação. O caractere “espaço” não é permitido para este parâmetro.

**Número de partículas:** O número de partículas utilizadas na modelagem. Um alto número de partículas é importante para assegurar uma boa representação da simulação estocástica. No entanto, quanto maior o número de partículas, mais longa será a simulação. Recomendação: 2000 partículas.

**Duração da simulação:** A extensão temporal da simulação a ser executada. O valor é em **horas**.

**Contribuição do vento:** Porcentagem da energia (velocidade) do vento que é transferida efetivamente às partículas na modelagem. O valor é em **% (por cento)**.

### 3.2.3 Propriedades do óleo

Ao clicar no campo em preto “óleo” disponível na parte inferior dessa etapa, o usuário será conduzido a uma nova janela (Figura 27).

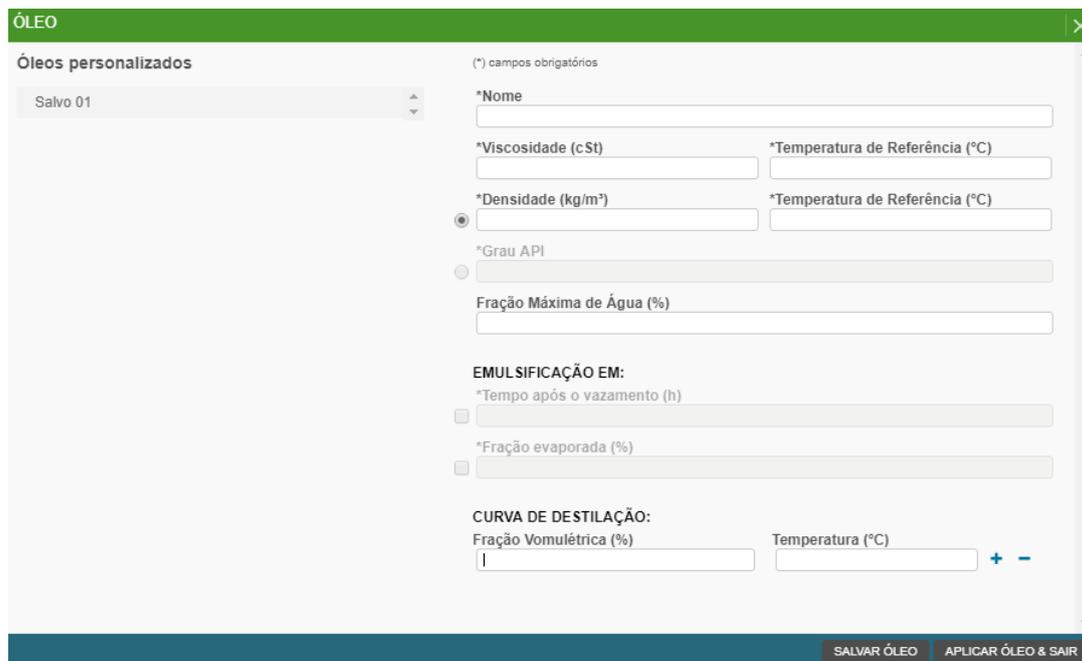


Figura 27: Interface gráfica para inclusão das propriedades do óleo. Tela inicial.

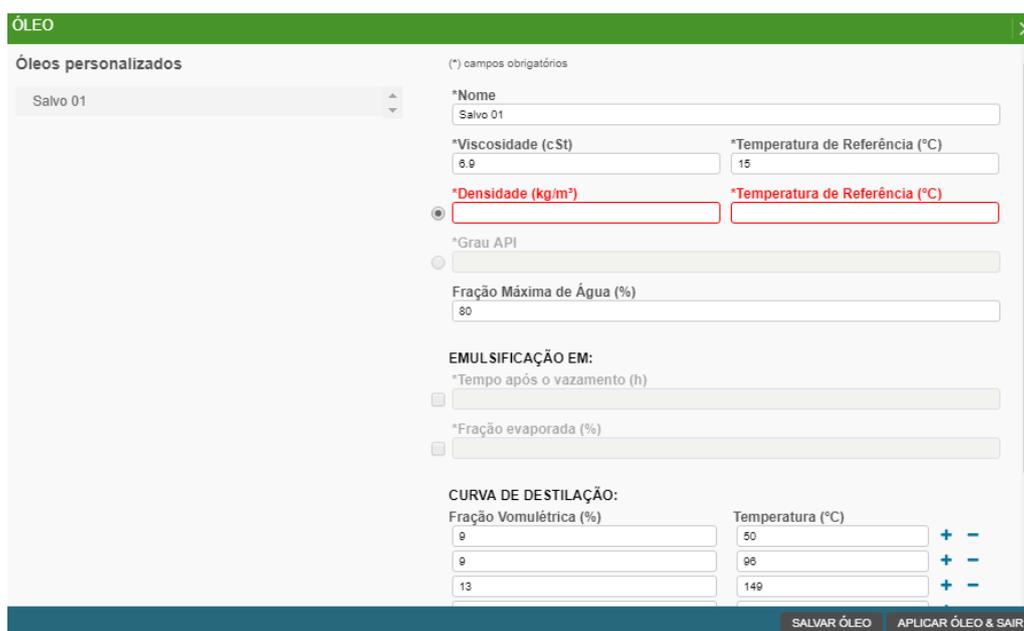
Na parte inferior direita dessa janela, são encontrados dois botões de acionamento. O botão à esquerda ( **SALVAR ÓLEO** ) permite gravar o óleo que foi preenchido no bando de dados do sistema. Dessa forma, ele estará listado na parte esquerda da interface (Óleos personalizados) e poderá ser utilizado em modelagens futuras. Ao clicar nesse botão, o sistema já considera também que esse óleo será utilizado na presente modelagem. Já o botão à direita ( **APLICAR ÓLEO & SAIR** ), tem a mesma função, porém ele não salva o óleo no banco de dados, e após a modelagem ele será removido do sistema.

As informações a serem preenchidas nessa etapa são listadas abaixo. Na interface, os campos com \* são de preenchimento obrigatório.

- Nome;
- Viscosidade (cSt) e temperatura de referência (°C);
- Densidade (kg/m<sup>3</sup>) e temperatura de referência (°C) **OU** Grau API;
- Fração máxima de água (%) (**OPCIONAL**);

- e) Início da Emulsificação (**OPCIONAL**) – Tempos após o vazamento (h) **OU** fração evaporada (%);
- f) Curva de Destilação – Fração Volumétrica (%) e Temperatura Correspondente (°C).

No caso de algum dos campos obrigatórios não serem preenchidos, o sistema faz uma verificação no instante que o usuário seleciona qualquer um dos botões de conclusão. Se existirem campos incompletos, eles serão destacados em vermelho de forma a sinalizar ao usuário a necessidade de preenchimento (Figura 28).



ÓLEO

Óleos personalizados

Salvo 01

(\*) campos obrigatórios

\*Nome  
Salvo 01

\*Viscosidade (cSt) 0.0

\*Temperatura de Referência (°C) 15

\*Densidade (kg/m<sup>3</sup>)

\*Temperatura de Referência (°C)

\*Grau API

Fração Máxima de Água (%) 80

EMULSIFICAÇÃO EM:

\*Tempo após o vazamento (h)

\*Fração evaporada (%)

CURVA DE DESTILAÇÃO:

Fração Volumétrica (%)	Temperatura (°C)	
9	50	+ -
9	98	+ -
13	149	+ -

SALVAR ÓLEO APLICAR ÓLEO & SAIR

Figura 28: Interface gráfica para inclusão das características do óleo. Exemplo de notificação de campos incompletos.

### 3.3. Etapa 3

Ao clicar sobre o botão **PRÓXIMO PASSO**, o usuário será direcionado à Etapa 3. Nessa etapa é possível adicionar as ações de contingência que serão testadas na modelagem. A Figura 29 representa a tela inicial dessa etapa. Ressalta-se que não é necessária a inclusão de nenhuma dessas ferramentas de contingência, sendo uma etapa completamente opcional na ferramenta de modelagem da deriva de óleo. Nesse caso, basta um clique novamente sobre o botão

**PRÓXIMO PASSO**



Figura 29: Exemplo de interface inicial da Etapa 3.

Na parte superior, todos os campos preenchidos na Etapa 2 são resumidos para que o usuário tenha acesso à essas informações. Na parte inferior, aparece o botão **AÇÕES DE CONTINGÊNCIA** que conduz o usuário à uma interface para inserção de barreiras de contenção, *skimmers* e aplicadores de dispersantes químicos (Figura 30).

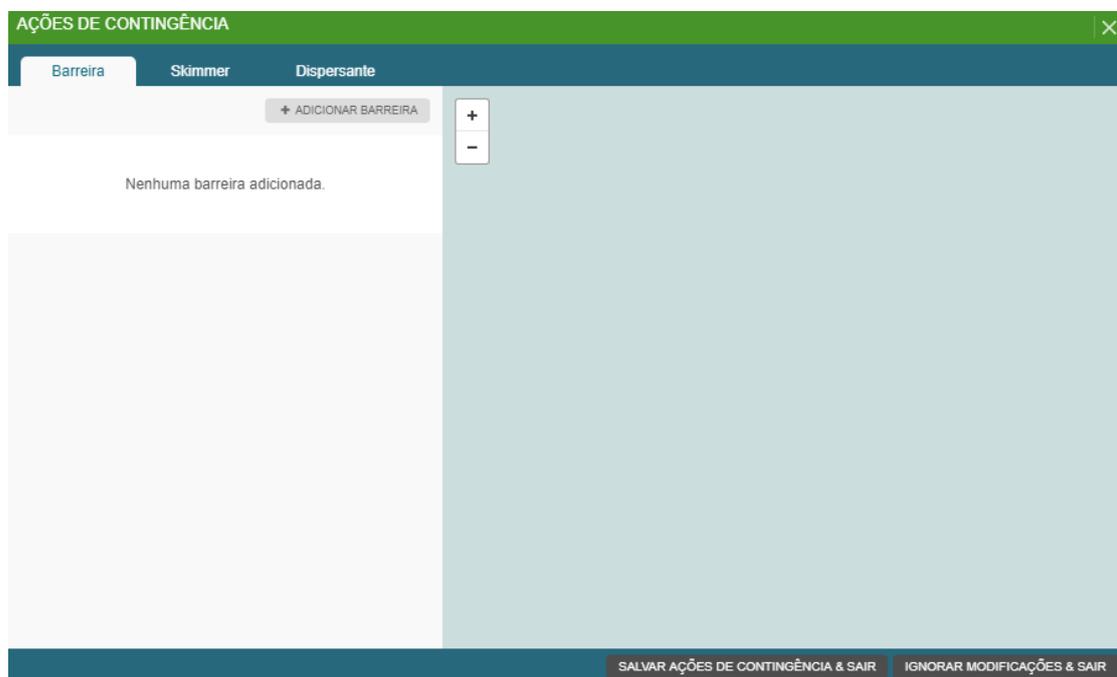


Figura 30: Janela de inserção de barreiras de contenção, *skimmers* e dispersante químicos.

Na parte superior é possível alternar entre cada ação de contingência. Para adicionar um desses itens, é necessário clicar no botão “+ Adicionar Ação” onde Ação é igual a Barreira, *Skimmer* ou Dispersante. Os próximos três subitens detalham cada um dos equipamentos.

### 3.3.1 Barreiras de Contingência

Para adicionar uma barreira de contingência, o usuário deve clicar sobre o botão **+ ADICIONAR BARREIRA**. Uma nova interface aparecerá abaixo do mapa na parte direita da janela (Figura 31), habilitando os campos para o preenchimento das informações relativas a barreira.

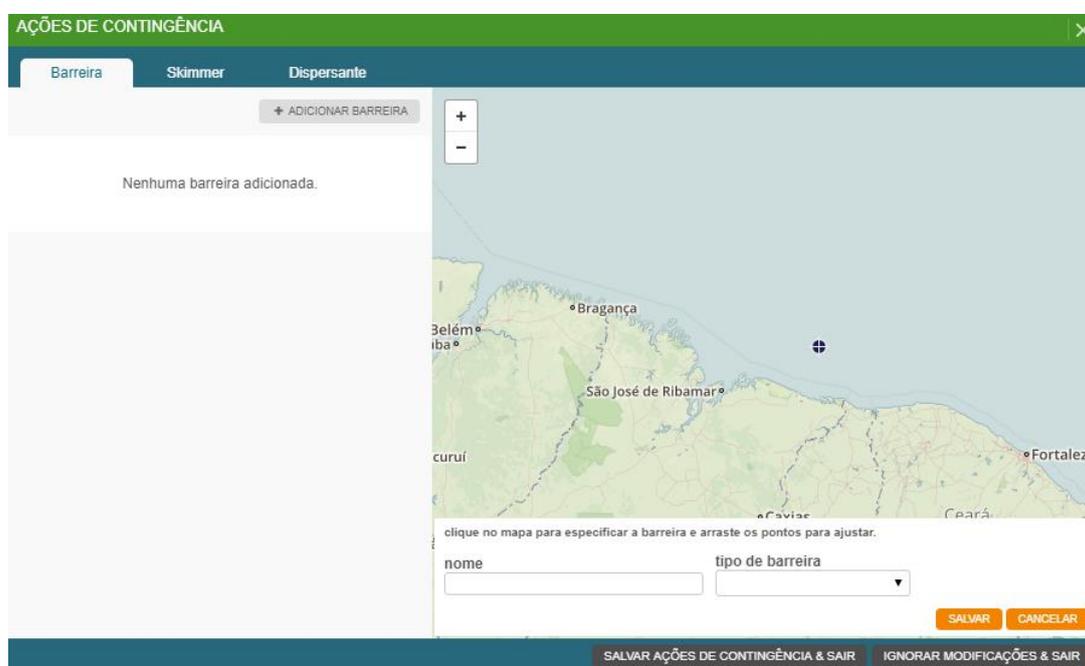


Figura 31: Interface gráfica para inclusão de barreiras de contenção.

Na parte inferior direita dessa janela, são encontrados dois botões de acionamento na cor laranja. O botão à esquerda (**SALVAR**) permite adicionar a barreira com as características que foram preenchidas à modelagem de óleo. Já o botão à direita (**CANCELAR**) cancela tudo que foi preenchido e volta ao estado anterior.

Primeiramente é necessário desenhar a barreira no mapa da parte direita da interface. Para isto, basta o usuário clicar 4 vezes no mapa de forma a adicionar os vértices que compõe os limites das retas usadas para aproximar a formação da barreira. A Figura 32, abaixo, detalha um exemplo com a inserção sequencial de 4 pontos para a definição da barreira.

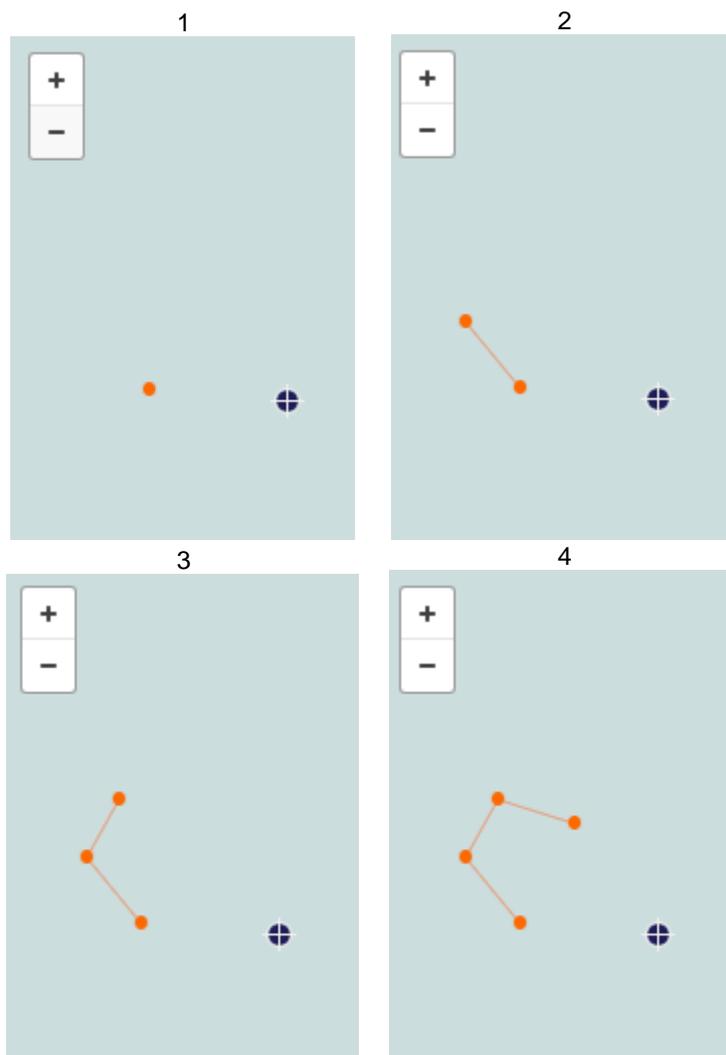


Figura 32: Exemplo de construção de uma barreira de contenção no modelo.

A qualquer momento durante o desenho da barreira é possível arrastar e reposicionar os pontos já colocados. Para a caracterização da barreira, é necessário preencher:

**a) Nome:** Este campo corresponde a um nome identificador da barreira. Em especial, a utilização de *skimmers* necessita da presença de uma barreira associada. Com isso, ao incluir um recolhedor, o usuário pode vincular a barreira a partir do nome definido previamente.

**b) Tipo de barreira:** Seleção do tipo de barreira. **Absorvente** ou **Não Absorvente**.

Após adicionado, um resumo do equipamento ficará disponível na parte da esquerda da janela, onde também é possível editá-lo ou removê-lo (Figura 33).

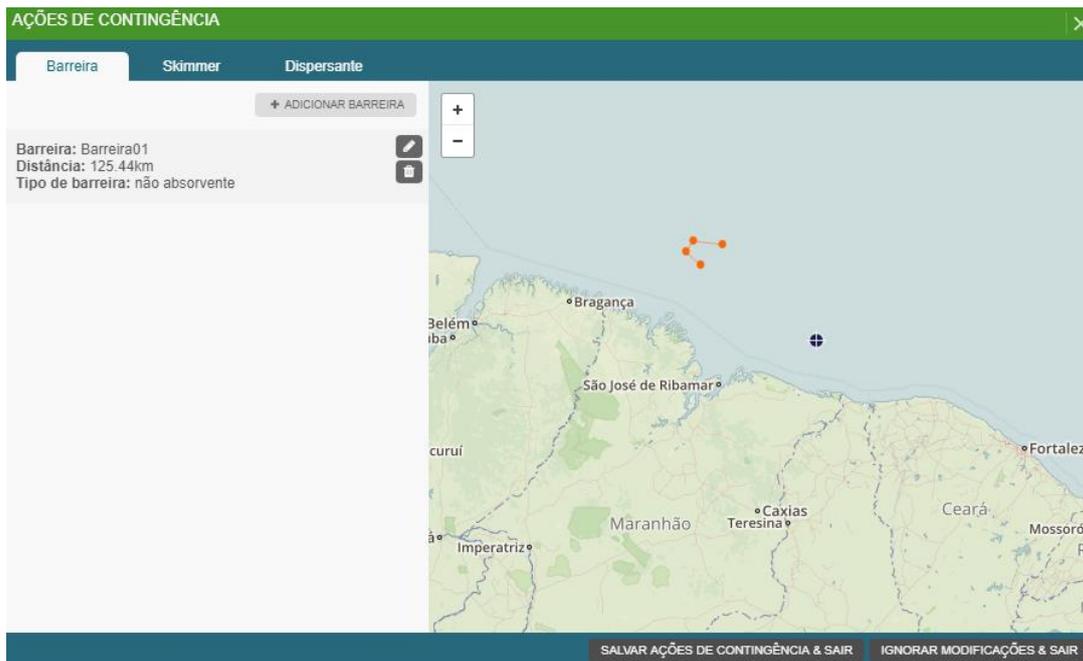


Figura 33: Tela com uma barreira já inserida.

### 3.3.2 Skimmers

O usuário tem a opção de vincular um ou mais recolhedores (*skimmers*) a uma determinada barreira de contenção. Ao clicar no botão **+ ADICIONAR SKIMMER**, uma nova interface aparecerá abaixo do mapa na parte direita da janela (Figura 34), habilitando os campos para o preenchimento das informações relativas a um recolhedor (*skimmer*).

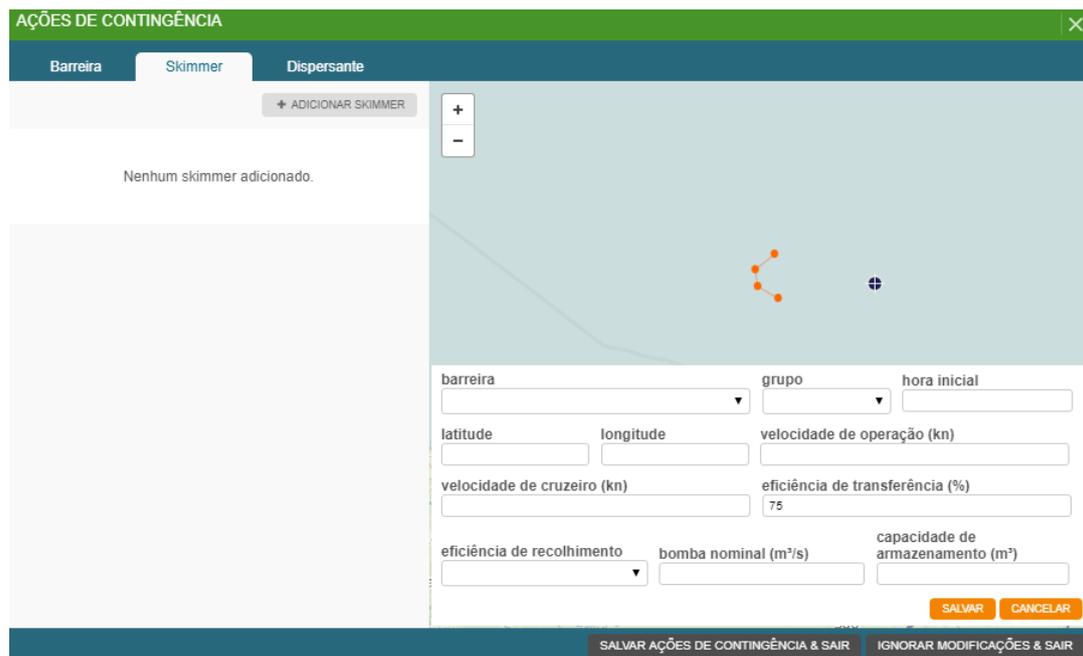


Figura 34: Interface gráfica para inclusão de *skimmers*.

Na parte inferior direita dessa janela, são encontrados dois botões de acionamento na cor laranja. O botão à esquerda ( **SALVAR** ) permite adicionar a barreira com as características que foram preenchidas à modelagem de óleo. Já o botão à direita ( **CANCELAR** ) cancela tudo que foi preenchido e volta ao estado anterior.

Primeiramente o usuário deve realizar uma simulação sem nenhum mecanismo de contingência, para determinar a trajetória esperada do óleo. A partir dos resultados dessa primeira simulação, pode ser realizado o planejamento das operações de contingência, introduzindo então a posição das barreiras de contenção e os *skimmers*.

Para a utilização dos *skimmers*, o usuário deverá entrar com uma série de informações relativas ao equipamento, à embarcação que irá realizar a operação e às suas condições de operação. A seguir, são listados os parâmetros necessários:

- a) **Barreira associada:** Obrigatoriamente, um *skimmer* deve estar associado à uma barreira de contenção para realizar sua operação. Nesse campo o usuário deve informar qual a barreira, dentre as que foram previamente posicionadas, em que será feita a coleta.
- b) **Grupo:** Categoria do *skimmer*, sendo A os do tipo Oleofílico, B os dos tipos Cinta e Plano de Submersão Fixo e Móvel, e C os dos tipos Vertedouro, À Vácuo, Sucção Direta e Vórtex.
- c) **Data e Hora:** A data e hora em que a embarcação estará apta para partir. O usuário tem a opção de preenchê-lo manualmente no formato: *dd/mm/aa hh:mm* ou usar o calendário para selecionar ambos os valores. **Atenção: todas as datas e horários no modelo estão em UTC.**
- d) **Coordenadas geográficas (lon/lat):** Este campo corresponde à longitude e latitude de onde a embarcação irá partir para iniciar a operação. O usuário tem a opção de clicar em qualquer ponto do mapa para selecionar suas coordenadas automaticamente. Os valores estão em **graus decimais**. Exemplo: longitude: -37.7445 / latitude: -4.0701.
- e) **Velocidade de operação:** Velocidade que será desenvolvida pela embarcação durante a operação de coleta com o *skimmer*. O valor é em **nós**.
- f) **Velocidade de cruzeiro:** Velocidade que será desenvolvida pela embarcação entre sua coordenada inicial e a coordenada onde será realizada a operação. O valor é em **nós**.
- g) **Eficiência de Transferência (*Throughput Efficiency*):** No modelo, foi escolhido um valor padrão de 75%. Entretanto o usuário pode mudar esse valor se desejado.
- h) **Eficiência de Recolhimento (*Recovery Efficiency*):** Cada grupo de *skimmer* em 3 faixas de eficiência: **Baixa, Média e Alta**. As curvas dos limites inferiores e superiores de cada grupo correspondem às eficiências baixa e alta, respectivamente. Já a eficiência média corresponde a curva média entre a baixa e alta. O usuário seleciona qual o grupo do *skimmer* que será utilizado e estima sua eficiência entre as categorias disponíveis. Dessa

forma o sistema automaticamente verifica os valores de eficiência em função do vento e da viscosidade.

- i) **Bomba nominal:** Vazão nominal da bomba do *skimmer* especificada pelo fabricante. O valor é em **metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s)**.
- j) **Capacidade de armazenamento:** Volume total de fluido recuperado que pode ser armazenado na embarcação. O valor é em **metros cúbicos (m<sup>3</sup>)**.

Após adicionado, um resumo do equipamento ficará disponível na parte da esquerda da janela, onde também é possível editá-lo ou removê-lo (Figura 35).

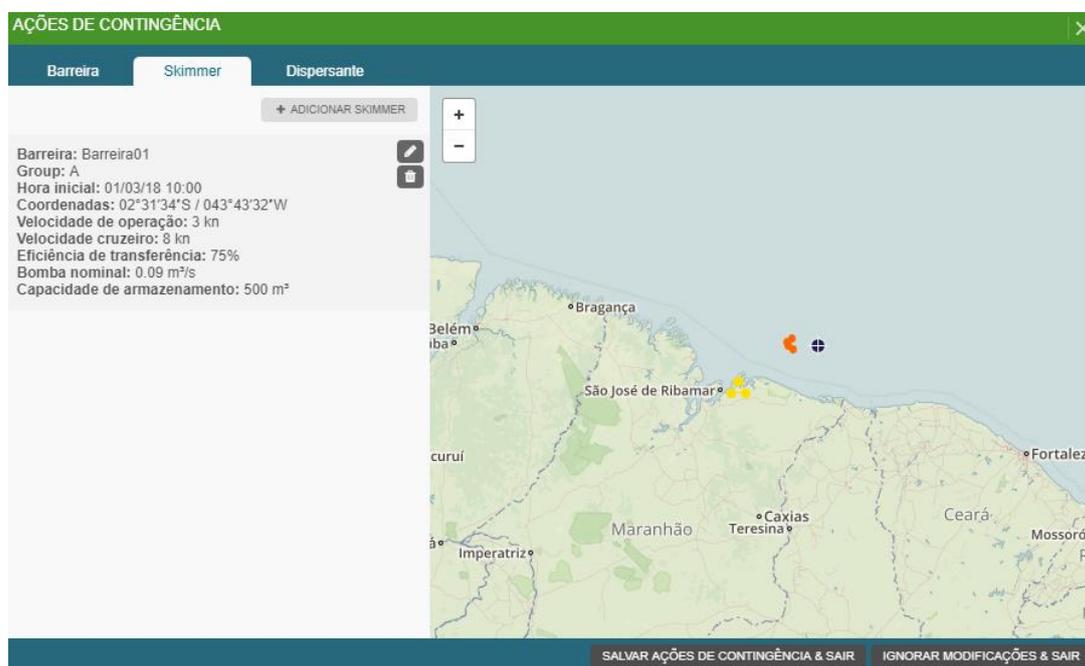


Figura 35: Tela com um *skimmer* já inserido.

### 3.3.3 Dispersantes Químicos

Ao clicar no botão **+ ADICIONAR DISPERSANTE**, uma nova interface aparecerá abaixo do mapa na parte direita da janela (Figura 36), habilitando os campos para o preenchimento das informações relativas a um dispersante químico.

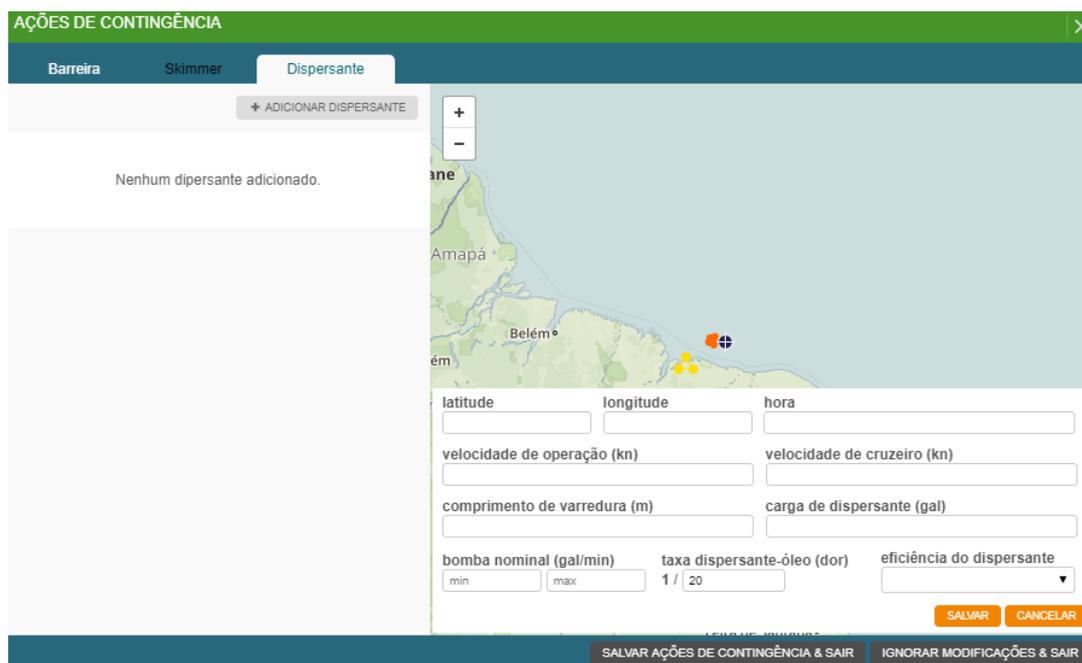


Figura 36: Interface gráfica para inclusão de dispersantes químicos.

Na parte inferior direita dessa janela, são encontrados dois botões de acionamento na cor laranja. O botão à esquerda (**SALVAR**) permite adicionar o dispersante com as características que foram preenchidas à modelagem de óleo. Já o botão à direita (**CANCELAR**) cancela tudo que foi preenchido e volta ao estado anterior.

Para a utilização dos dispersantes químicos na simulação de deriva de óleo, o usuário deverá entrar com uma série de informações relativas à embarcação (ou avião) que irá realizar a operação e às suas condições de operação. A seguir, são listados os parâmetros necessários:

- c) **Coordenadas geográficas (lon/lat):** Este campo corresponde à longitude e latitude de onde a unidade de aplicação irá partir para iniciar a operação. O usuário tem a opção de clicar em qualquer ponto do mapa para selecionar suas coordenadas automaticamente. Os valores estão em **graus decimais**. Exemplo: longitude: -37.7445 / latitude: -4.0701.
- d) **Data e Hora:** A data e hora em que a unidade estará apta para partir. O usuário tem a opção de preenchê-lo manualmente no formato: *dd/mm/aa hh:mm* ou usar o calendário para selecionar ambos os valores. **Atenção: todas as datas e horários no modelo estão em UTC.**
- e) **Velocidade de operação:** Velocidade que será desenvolvida pela unidade durante a operação de aplicação do dispersante. O valor é em **nós**.
- f) **Velocidade de cruzeiro:** Velocidade que será desenvolvida pela unidade entre sua coordenada inicial e a coordenada onde será realizada a operação. O valor é em **nós**.

- g) Comprimento de varredura:** Comprimento da zona de aplicação de dispersante da unidade, representado pela letra W da Figura 37, abaixo. O valor é expresso em **metros (m)**.

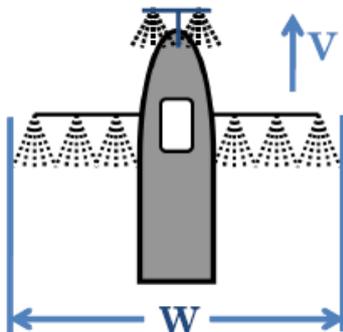


Figura 37: Representação do comprimento de varredura (do inglês, swath width) de uma unidade de aplicação de dispersantes. Adaptado de Genwest Systems (2011).

- h) Carga de dispersante:** Volume total de dispersante carregado pela unidade a cada ciclo de operação. O valor é em **galões (gal)**.
- i) Taxa de bombeamento mínima e máxima:** Vazões mínimas e máximas possíveis para a bomba de aplicação de dispersante. O valor é em **galões por minuto (gal/min)**.
- j) Taxa Dispersante-Óleo (*Dispersant-to-Oil Rate - DOR*):** Proporção de dispersante necessário para tratar uma parte de óleo. Valor usualmente recomendado pelo fabricante do composto. Assumiu-se o valor padrão de **1:20**, porém o usuário tem a opção de trocar esse valor.
- k) Eficiência do Dispersante (*Dispersant Efficiency*):** Os dispersantes foram divididos em 3 faixas de eficiência: **Baixa, Média e Alta**. As curvas dos limites inferiores e superiores da Figura 18 correspondem às eficiências baixa e alta, respectivamente. Já a eficiência média corresponde a curva média entre a baixa e alta. Dessa forma o sistema automaticamente verifica os valores de eficiência em função do vento e da viscosidade.

Após adicionado, um resumo do equipamento ficará disponível na parte da esquerda da janela, onde também é possível editá-lo ou removê-lo (Figura 38).

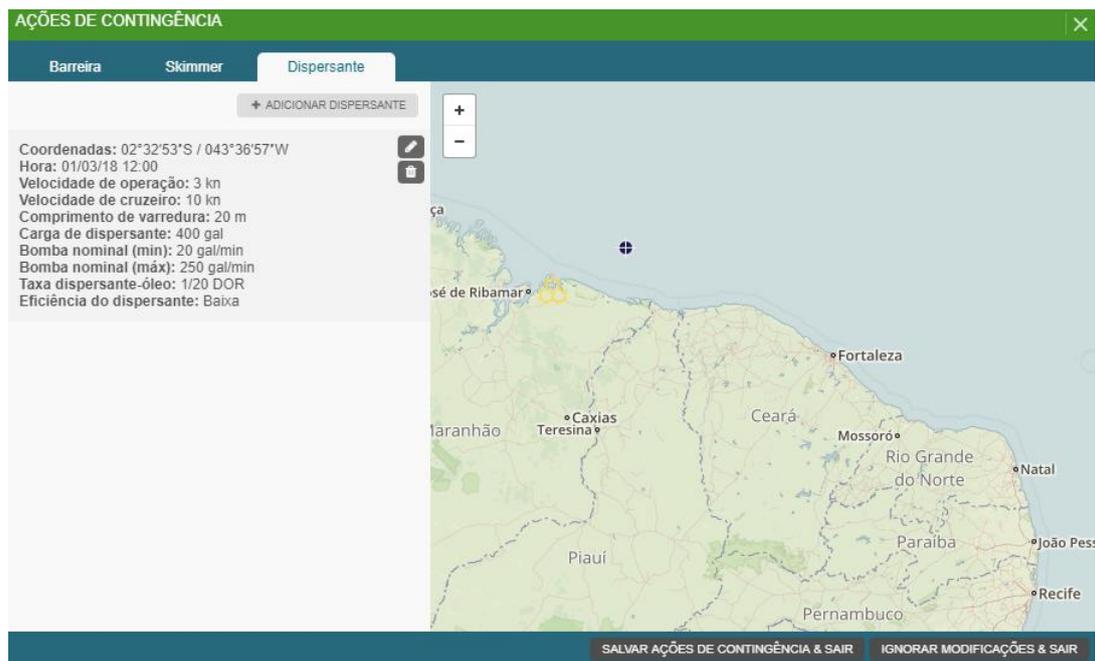


Figura 38: Tela com um dispersante já inserido.

### 3.4. Resultados

Depois de preencher todos os campos e clicar no botão **PRÓXIMO PASSO** da Etapa 3, o software efetivamente executará o modelo de partículas e processará seus resultados. Ao terminar a execução, o usuário poderá ver que foram acrescentadas diversas camadas na interface principal (Figura 39).



Figura 39: Exemplo da interface principal do modelo após sua execução.

Já no mapa, é possível visualizar as partículas (pontos vermelhos), os mapas de espessura (polígonos em escala de cor) e a posição média (centro de massa) das partículas, conforme exemplo na Figura 40.

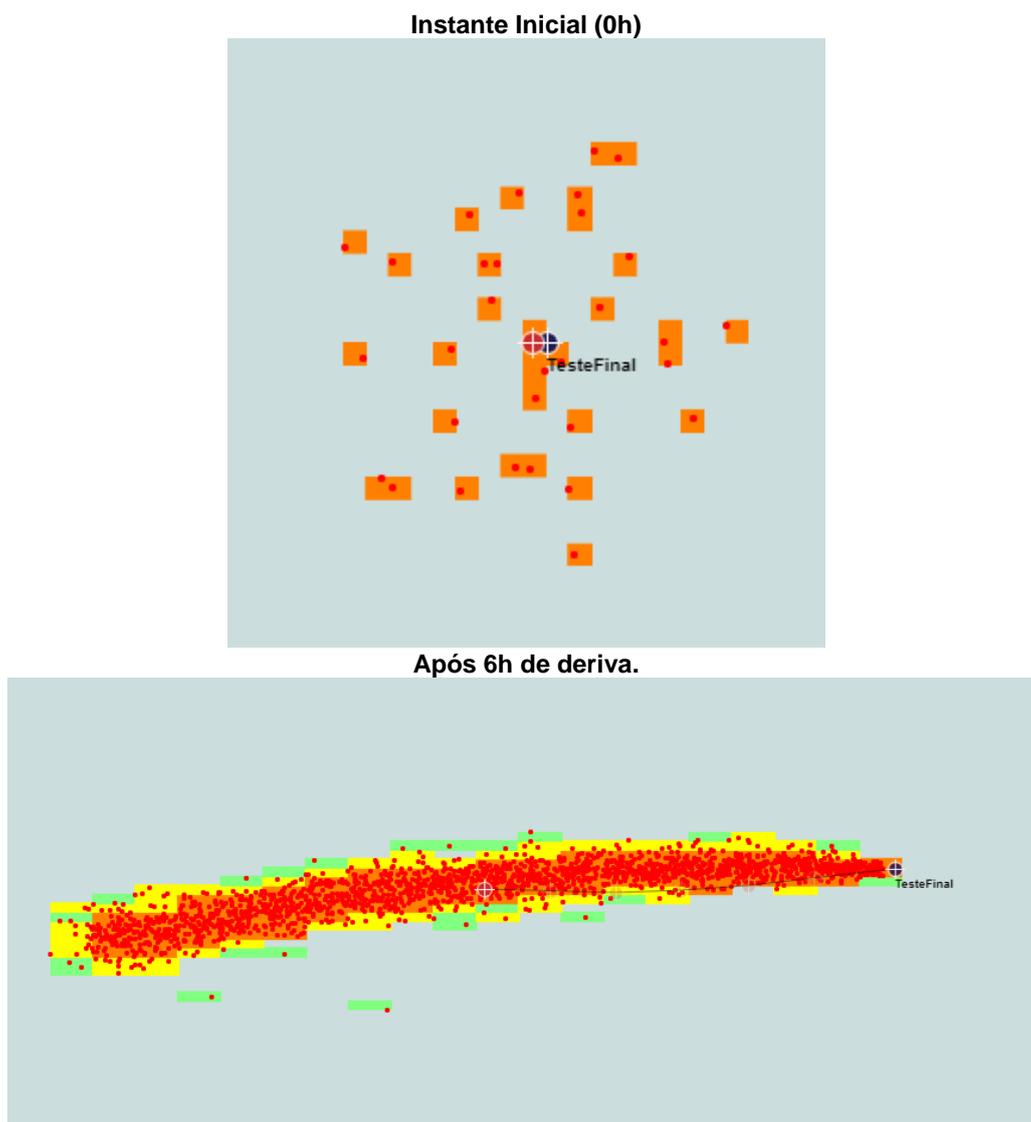


Figura 40: Exemplo de resultados da modelagem no instante inicial (esquerda) e após 6h de deriva (direita). Os pontos vermelhos representam as partículas da modelagem enquanto a escala de cor é relativa a espessura do óleo.

A nova interface se inicia com um resumo do que foi preenchido nas etapas 1, 2 e 3. Na sequência, a próxima camada permite trocar entre cada passo de tempo modelado e observar a evolução espaço-temporal da simulação. Isso pode ser feito clicando nas setas para cima ou para baixo exibidas na Figura 41, digitando diretamente a hora na caixa branca ou usando a função calendário ao clicar sobre a data/hora.



Figura 41: Opção para alternar entre os passos de tempo dos resultados da simulação.

Abaixo desse menu, é exibida a informação sobre toque na costa, conforme a Figura 42. Nos casos onde ocorre toque na costa, o modelo fornece automaticamente o instante do primeiro toque.

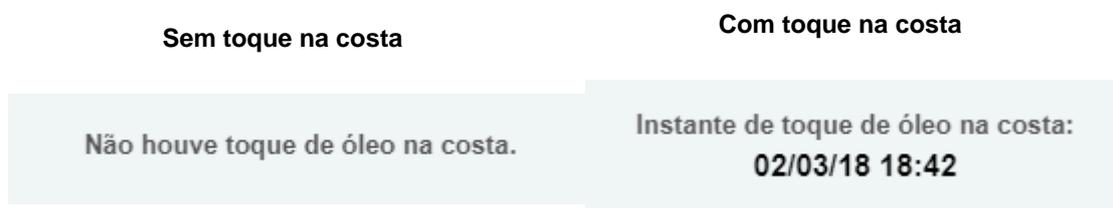


Figura 42: Informação sobre toque na costa. O painel da esquerda é referente ao caso em que não houve toque, enquanto o painel da direita exemplifica um caso com toque na costa.

Na sequência, a próxima caixa exibe um botão chamado: **GRÁFICOS**. Ao clicar sobre esse botão, uma nova janela é aberta no centro da tela com ao menos duas subguias que podem ser alternadas usando o menu superior: Balanço de Massa (Figura 43) e Intemperismo que conta com gráficos da evolução temporal da viscosidade médias, densidade média e conteúdo de água da mancha de óleo (Figura 44). Nos casos de simulações com *skimmers* e/ou dispersantes químicos, novas guias apareceram detalhando como foi a atividade dessas ações de contingência.

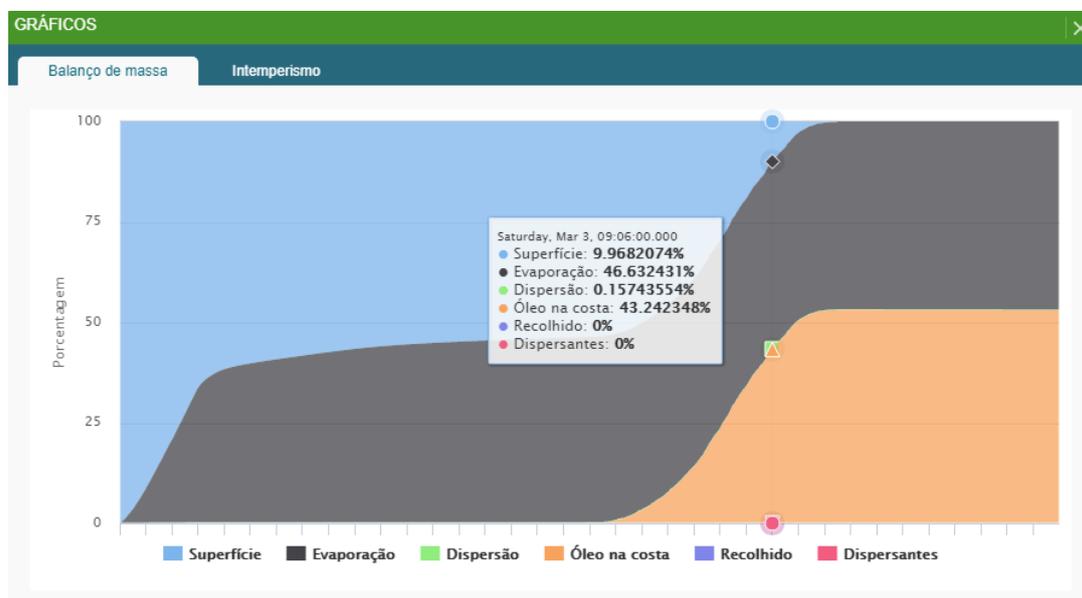


Figura 43: Janela com os resultados da modelagem em forma gráfica. Exemplo de um balanço de massa.

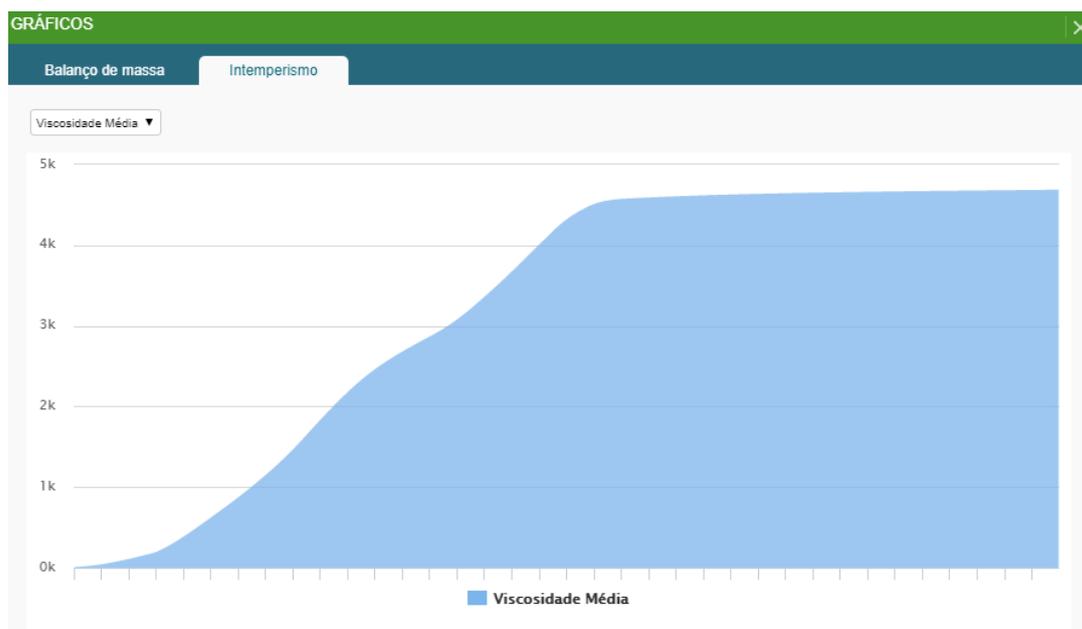


Figura 44: Janela com os resultados da modelagem em forma gráfica. Exemplo da evolução temporal da viscosidade média do óleo.

Para o balanço de massa, o eixo das abscissas representa as horas de simulação, a partir do instante inicial do vazamento, enquanto o eixo das ordenadas é relativo à porcentagem volumétrica de cada um dos constituintes do balanço de massa, totalizando 100 % a cada instante. Os constituintes são:

- a) Superfície: fração de óleo remanescente na superfície, ainda não retirado da simulação por nenhum processo de intemperismo ou recolhimento;
- b) Evaporação: fração de óleo que foi removido pelo processo de evaporação;
- c) Dispersão: fração de óleo que foi removido pelo processo de dispersão;
- d) Óleo na costa > fração do óleo que chegou sobre a costa.
- e) Recolhido: fração de óleo removida através de *skimmers*.
- f) Dispersante: fração de óleo removida através da aplicação de dispersantes químicos.

Ao passar o mouse sobre o gráfico, é possível ver um detalhamento de cada instante em uma janela, com as frações de cada constituinte.

O próximo item disponibilizado nos resultados é a  **Integração**. Ao marcar essa caixa de seleção, uma nova camada é inserida sobre o mapa. Essa camada representa a área impactada pelo óleo ao longo de toda a simulação. Além disso, a escala de cor nesse caso representa a maior espessura que passou por cada célula independente do instante em que isso ocorreu, como visto na Figura 45.

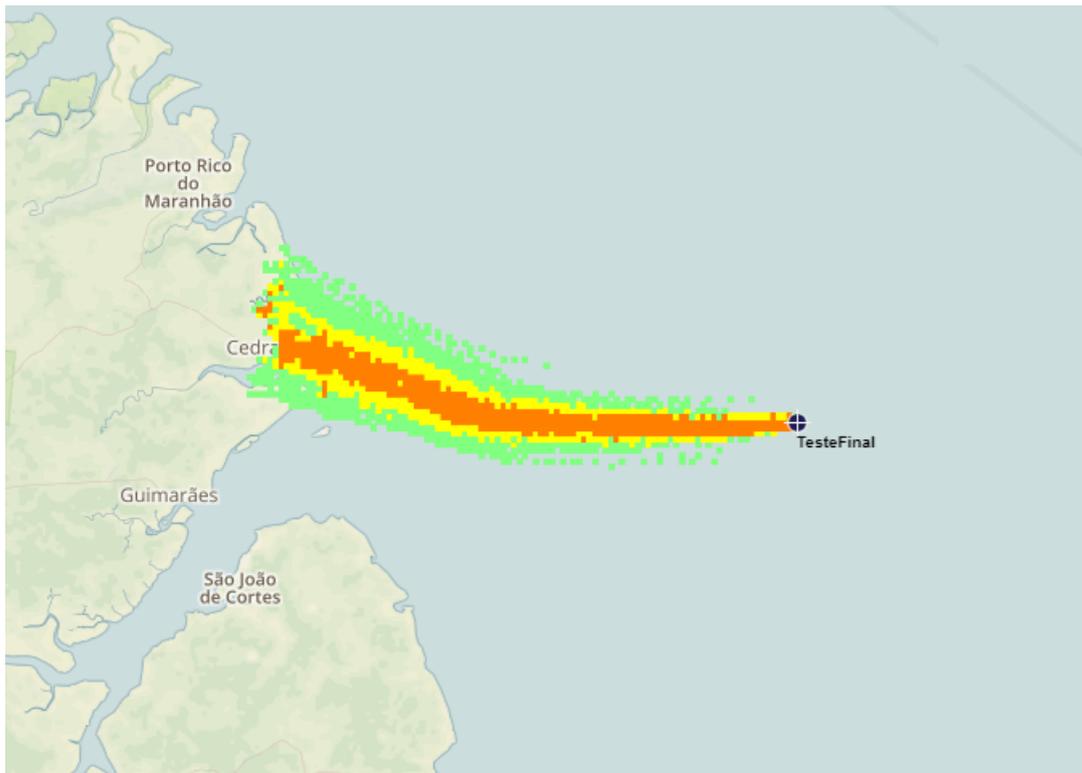


Figura 45: Exemplo de mapa de integração dos resultados.

A escala de cor de todos os mapas de espessura é relativa ao aspecto visual da mancha de óleo e é detalhada na Tabela 5 e exibido na Figura 46.

Tabela 5: Escala de cor dos mapas de espessura do óleo ( $\mu\text{m}$ ). Fonte: Bentz & Genovez (2015)

Limite Inferior ( $\mu\text{m}$ )	Limite Superior ( $\mu\text{m}$ )	Cor	Classificação
0,04	0,3	Azul	Brilho Prateado
0,3	5	Azul Claro	Arco-íris
5	50	Verde	Metálico
50	200	Amarelo	Cor de óleo descontínuo
200	-	Laranja	Cor de óleo contínuo

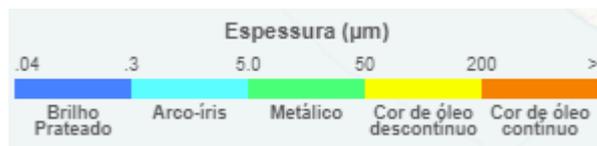


Figura 46: Escala de cor dos mapas de espessura de óleo ( $\mu\text{m}$ ).

## 3.5. Ferramentas

A ferramenta de deriva de óleo possui diversas utilidades que permitem melhorar a experiência do usuário em sua interface. Essa seção é dedicada a explicar o funcionamento de cada uma delas.

### 3.5.1 Plataforma Multi-Guias

Na parte superior da interface do modelo de óleo há uma barra horizontal exibindo as guias usadas para modelagem (Figura 47). O botão **+** permite adicionar uma nova guia.

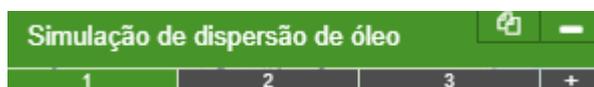


Figura 47: Barra horizontal para adicionar e alternar entre guias.

Cada uma das guias é completamente independente das outras e é representada por um nome. Para alternar entre elas, simplesmente clique sobre a desejada.

Por fim, para fechar uma simulação, o usuário deve clicar no botão , presente da parte direita da interface, e confirmar a mensagem de exclusão.

### 3.5.2 Salvar/Carregar

O modelo permite gravar uma simulação de forma a poder carrega-la novamente na interface em outro momento. Para isso, deve-se clicar sobre o botão  presente na parte direita da interface (Figura 48). Por padrão, o nome da simulação salva será o mesmo do “Nome da Rodada”, caso já esteja definido. Entretanto, o usuário pode trocar esse nome se desejado.



Figura 48: Salvar simulação.

Para carregar uma simulação previamente salva, deve-se clicar sobre o botão , presente na parte superior da interface, como exibido na Figura 49. Uma janela pop-up será aberta com a lista de todas as simulações salvas para que o usuário possa escolher qual deseja carregar (Figura 50). Nessa janela também é possível excluir qualquer simulação previamente salva.

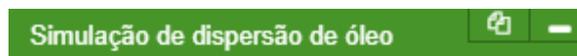


Figura 49: Carregar simulação.



Figura 50: Exemplos de simulações salvas.

### 3.5.3 Camadas

No modelo, é possível habilitar/desabilitar cada uma das camadas que aparecem sobre o mapa durante as etapas da simulação. Elas são:

- Ponto de vazamento
- Centro de massa
- Partículas
- Mapa de espessura

Para fazer a seleção de quais se deseja ligar/desligar, basta marcar/desmarcar as caixas de seleção presentes na parte inferior da interface (Figura 51).

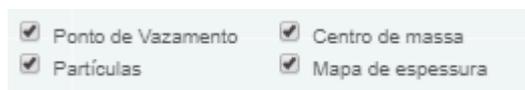


Figura 51: Ferramenta para habilitar/desabilitar as camadas

## 4. Bibliografia

- ALLEN, A., DALE, D. 1996. Computerized Mission Planners: Useful tools for the planning and implementation of oil spill response operations. Proceedings of the Prevention is the Key: A Symposium on Oil Spill Prevention and Readiness, Valdez, AK, pp 24.
- ALMEDA, R., HYATT, C., BUSKEY, E.J. 2014. Toxicity of dispersant Corexit 9500A and crude oil to marine microzooplankton. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Elsevier, 106, 76–85.
- ASCE Task Committee on Modeling Oil Spills of the Water Resources Engineering Division. 1996. State-of-the-Art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. *Journal of Hydraulic Engineering*, 122 (11), Nov., 594 – 609.
- ASTM F-1870 - Standard Guide for Estimating Oil Spill Recovery System Effectiveness: F 1780-97, pp. 1-6, 2002 (Reapproved).
- BACA B., WARD, G.A., LANE, C.H, SCHULER, P.A. 2005. NET ENVIRONMENTAL BENEFIT ANALYSIS (NEBA) OF DISPERSED OIL ON NEARSHORE TROPICAL ECOSYSTEMS DERIVED FROM THE 20 YEAR “TROPICS” FIELD STUDY. *International Oil Spill Conference Proceedings: May 2005*, 2005 (1), 453-456.
- BENTZ, C.M., GENOVEZ, P.C. 2015. Sensoriamento remoto para derramamento de óleo. In: *Sensoriamento Remoto para desastres*, Oficina de Textos, São Paulo.
- BERRY, A., DABROWSKI, T., LYONS, K. 2012. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 64, pp. 2489-2501.
- BUCHANAN, I., HURFORD, N. 1988. Methods for Predicting the Physical Changes in Oil Spill at Sea. *Oil & Chemical Pollution*, 4, pp. 311-328.
- CEKIRGE, H. M., PALMER, S. L. 2001. Mathematical modeling of oil spilled into marine waters. In: *Oil Spill Modelling and Processes*. WITpress, Londres.
- CERC. 1984. Shore Protection Manual Volume I. Coastal Engineering Research Centre, Dept. of the Army, Waterways Experiment Station, USACE, Vicksburg, MS, USA.
- CHEN, H., LI, D., LI, X. 2007. Mathematical modeling of oil spill on the sea and application of the modeling in Daya Bay. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 19, 282-291.
- DELVIGNE, G.A.L., SWEENEY, C.E. 1988. Natural dispersion of oil. *Oil & Chemical Pollution*, 4, pp. 281-310

- DELVIGNE, G.A.L., HULSEN, L.J.M. 1994. Simplified laboratory measurements of oil dispersion coefficients – application in computations of natural oil dispersion. In: Proceedings of the Seventeenth AMOP Technical Seminar, Environment Canada, Ontario, pp. 173-187.
- ELEY, D.D., HEY, M.J., SYMONDS, J.D. 1988. Emulsions of Water in Asphaltene-Containing Oils 1. Droplet Size Distribution and Emulsification Rates. *Colloids and Surface*, 32, pp. 87-101.
- FAY, J.A. 1969. The Spread of oil slicks on a calm sea. *Oil on the Sea*, Plenum Press, New York, pp. 53-63.
- FAY, J.A. 1971. Physical processes in the spread of oil on a water surface. In: Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spill, American Petroleum Institute, Washington, DC, pp. 463-467.
- FISHER, H.B., LIST, E.J., KOH, R.C.Y., IMBERGER, J., BROOKS, N.H. 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press Inc., New York, 483 pp.
- FRAGOSO JR, C.R., FERREIRA, T.F., MARQUES, D.M. 2009. *Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos*. Oficina de textos, São Paulo, 304 pp.
- FRENCH-MCCAY, D.P. 2004. Oil spill impact modelling: development and validation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23, pp. 2441-2456.
- GALT, J.A. 2009. *Oil Weathering – Technical Documentation and Recommended Use Strategies*. Genwest Systems, Inc.
- GENWEST SYSTEMS, INC. 2011. *Response Options Calculator (ROC) - Technical Documentation*, Washington, USA.
- GUO, W. J., WANG, Y.X. 2009. A numerical oil spill model based on a hybrid method. *Marine Pollution Bulletin*, 58, 726-734.
- GUO, W. J., WANG, Y.X., XIE, M.X., CUI, Y.J. 2009. Modeling oil spill trajectory in coastal waters based on fractional Brownian motion. *Marine Pollution Bulletin*, 58, 1339-1346.
- HELFRICH, M.Z., KROOPS, W., MURK, A.J. 2015. The NET effect of dispersants – a critical review of testing and modelling of surface oil dispersion. In: *Marine Pollution Bulletin*, 100, 102-111.
- IPIECA, 2014. At-sea monitoring of surface dispersant effectiveness. IPIECA\_IOGP Final Report. Oil Spill Response Joint Industry Project.
- IPIECA, 2015a. Dispersants: surface application. Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel. IOGP Report 532.

- IPIECA, 2015b. Dispersants: subsea application. Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel. IOGP Report 533.
- JANEIRO, J., FERNANDES, E., MARTINS, F., FERNANDES, R. 2008. Wind and freshwater influence over hydrocarbon dispersal on Patos Lagoon, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 56, 650-665.
- JONES, R.K. 1997. A Simplified Pseudo-Component Oil Evaporation Model. Proceedings of the 20<sup>th</sup> Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, Canada, pp 43-61.
- LEHR, W.J. 2001. Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior. In: BREBBIA, C.A. (Ed.). *Oil Spill Modelling and Processes*. Southampton: WIT Pres, pp 51-90.
- LEHR, W.J., JONES, R., EVANS, M., SIMECEK-BEATTY, D., OVERSTREET, R. 2002. Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environmental Modelling & Software* 17, pp 191-199.
- LEHR, W.J., SIMECEK-BEATTY, D. 2000. The relation of Langmuir circulation processes to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms. *Spill Science & Technology Bulletin*, 6, pp. 247-253.
- LESSARD, R.R., DEMARCO, G. 2000. The Significance of Oil Spill Dispersants. In: *Spill Science & Technology Bulletin*, 6 (1), 59-68.
- LIUNGMAN, O., MATTSSON, J. 2011. Scientific documentation of SeatrackWeb; physical processes, algorithms and references. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 32.
- LYNCH, D.R., GREENBERG, D.A., BILGILI, A., MCGILLICUDDY JR., D.J., MANNING, J.P., ARETXABALETA, A.L. 2015. Oil – Chemically Active Particles. In: *Particles in the Coastal Ocean*, Cambridge University Press, pp. 337- 388.
- MACKAY, D., BUIST, I., MASCARENHAS, R., PATTERSON, S. 1980. *Oil Spill Processes and Models*. Environment Canada, Ottawa, Canada.
- MACKAY, D., ZAGORSKI, W. 1981. Studies of the Formation of Water-In-Oil-Emulsions. Proceedings of the Fourth AMOP Technical Seminar, Environment Canada, Ottawa, pp. 75-86.
- MACKAY, D., SHIU, W.Y., HOSSAIN, K., STIVER, W., MCCURDY, D., PATTERSON, S., TEBEAU, P.A. 1983. Development and Calibration of an Oil Spill Behavior Model. Report No. CG-D-27-83, United States Coast Guard Office of Research and Development, Groton, Conn., USA.

- MAS, I., KITTS, C. 2014. Cooperative Tasks Using Teams of Mobile Robots. Lecture Notes in Electrical Engineering, 247, 83-99.
- MOONEY, M. 1951. The Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles. Journal of Colloidal Science, 10, pp. 162-170.
- MUTTIN, F. 2015. Structural Analysis of Oil-Spill Booms. In: Mathematical Modelling and Numerical Simulation of Oil Pollution Problems. Ehrhardt, M. (Ed.), 141-166.
- PAYNE, J.R., KIRSTEIN, B.E., CLAYTON, J.R., CLARY, C., REDDING, R., MCNABB, D., FARMER, G. 1987. Integration of Suspended Particulate Matter and Oil Transportation Study. Final Report, Report No. MMS 87-0083, U.S. Minerals Management Service, Anchorage, Alaska, USA.
- PEREIRA, M. M. R. 2004. Estudo do Transporte Local de Poluentes em Iperó por Meio de um Modelo Lagrangiano de Partículas. Tese (Doutorado em Ciências – Área: Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- REED, M., TURNER, C., ODULO, A. 1994. The role of wind and emulsification in modelling oil spill and surface drifter trajectories. Spill Science & Technology Bulletin, 1 (2), 143-15.
- REED, M., JOHANSEN, É., BRANDVIK, P. J., DALING, P., LEWIS, A., FIOCCO, R., MACKAY, D., PRENTKI, R. 1999. Oil Spill Modeling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. Spill Science & Technology Bulletin, 5, 3-16.
- SAYOL, J.M., ORFILA, A., SIMARRO, G., CONTI, D., RENAULT, L., MOLCARD, A.A. 2014. Lagrangian Model for Tracking Surface Spills and SAR Operations in the Ocean. Environmental Modelling & Software, 52, 74-82.
- SIQUEIRA, L.F.G. 2015. Sobre a Eficiência de Operações de Recolhimento de Derramamentos de Óleo com e sem Técnica de Decantação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Rio de Janeiro.
- SMAGORINSKY, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment. Monthly Weather Review, 91, pp. 99-164.
- SPAULDING, M.L. 2017. State of the art review and future directions in oil spill modeling. Marine Pollution Bulletin, 115, 7-19.
- STERLING, M., BONNER, J., ERNEST, A. 2004. Chemical dispersant effectiveness testing: influence of droplet coalescence. In: Marine Pollution Bulletin, 48, 969–977.
- STIVER, W., MACKAY, D. 1984. Evaporation rate of spills of hydrocarbon and petroleum mixtures. Environ. Sci. Technol. 18 (11) 834-840.

WANG, S.D., SHEN, Y.M., ZHENG, Y.H. 2005. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. Ocean Engineering, 32, 1556-1571.

WANG, S.D., SHEN, Y.M., GUO, Y., TANG, J. 2008. Three-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. Ocean Engineering, 35, 503-510.