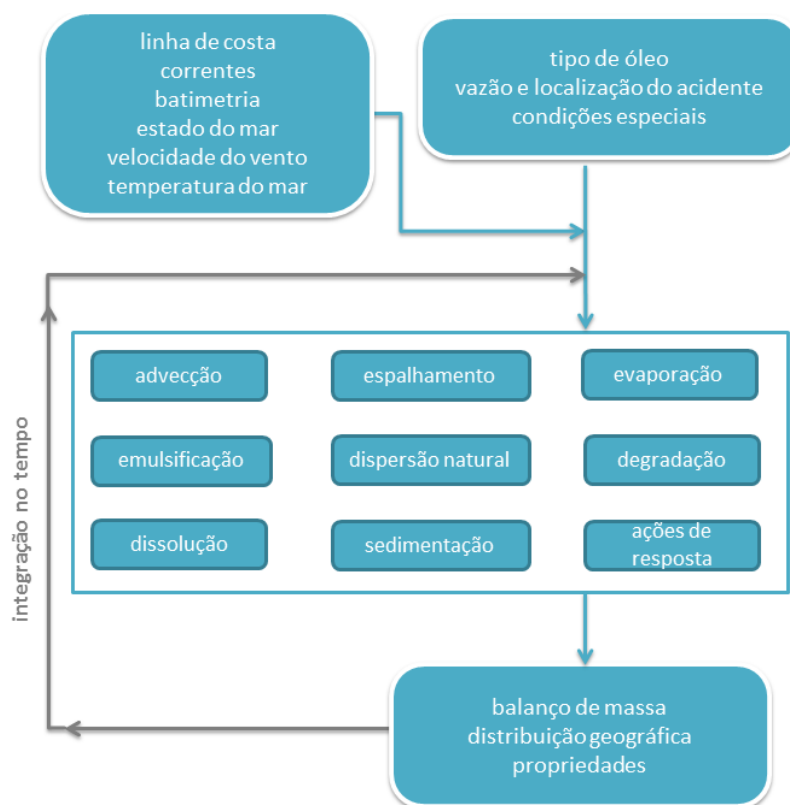


## ANEXO A - Modelo de Dispersão de Óleo Utilizado

As simulações numéricas apresentadas foram feitas com o OSCAR (*Oil Spill Contingency and Response*), modelo desenvolvido pela SINTEF para o cálculo da dispersão de manchas de óleo. O OSCAR é capaz avaliar a evolução de óleo na superfície da água, ao longo de costas, na coluna d'água e no sedimento. Os principais componentes do sistema OSCAR são um modelo de intemperismo, um modelo de trajetória em três dimensões e um modelo de combate a vazamentos acidentais (REED, 2001; REED *et al.* 2004).

Na Figura A-1 é apresentado um esquema ilustrativo das três principais etapas no processo da simulação: os dados de entrada (características do vazamento e condições ambientais), os processos realizados em diferentes intervalos de tempo (intemperismo atuante no óleo) e os resultados (balanço de massa do óleo, distribuição geográfica e propriedades).



**Figura A-1 - Esquema simplificado dos dados de entrada, processos e dados de saída (resultados) usados e obtidos pelo modelo OSCAR. Adaptado de Reed (2001).**

Uma breve descrição dos processos físicos/químicos atuantes no óleo e de como eles são representados no modelo OSCAR, será apresentada a seguir, com base no relatório desenvolvido por Reed (2001).

## ***Processos de Intemperismo***

O modelo OSCAR utiliza a aproximação de multi-componentes. Tal metodologia consiste a especificação de uma número de componentes individuais ou pseudocomponentes para representação da massa de óleo. Cada componente é associado com um conjunto de parâmetros que governam os processos de transformação do óleo.

Os processos de evaporação, dissolução e degradação estão diretamente relacionados com a massa de cada um dos componentes do óleo e são calculados dinamicamente a cada passo de tempo do modelo. Detalhes sobre a formação de multi componentes do OSCAR podem ser vistos em Reed *et al.* (2000).

Outros processos como espalhamento, entranhamento e mistura vertical estão mais diretamente relacionados com “macro-características” do óleo, como densidade e viscosidade.

No entanto, como apresentado a seguir, existe uma inter-relação entre todos os processos de intemperismo.

## **Advecção**

A advecção é calculada a partir da soma de uma velocidade local média e de uma componente turbulenta de base aleatória. A velocidade local média é a soma das velocidades de correntes, ventos e a componente governada pela onda (Stokes). A componente turbulenta ( $w'$ ) é expressa como:

$$w' = \sqrt{6K / \Delta t} \quad (1)$$

onde  $K$  é o coeficiente de dispersão turbulenta, estimado para as direções horizontais e verticais, e  $t$  o tempo.

O coeficiente de dispersão horizontal pode ser calculado a partir de dados aproximados de estudos de dispersão de traçadores (OKUBO, 1971, 1974; BOWDEN, 1983):

$$K_x = 0,0027t^{1,34} \quad (2)$$

para  $K$  em  $\text{cm}^2/\text{s}$  e  $t$  em segundos.

O coeficiente de difusão turbulenta acima da picnoclina relacionado às condições de onda, segundo Ichiye (1967, *apud* REED, 2001), é:

$$K_z = 0,0028 \frac{H^2}{T} \exp(-2Kz) \quad (3)$$

sendo  $H$  a altura de onda,  $T$  o período de onda e  $K$  o número de onda. Abaixo da profundidade da picnoclina,  $K_z$  é assumido como uma constante igual a  $10^{-4} \text{ m/s}^2$  (KULLENBERG, 1984, *apud* REED, 2001). Na ausência da picnoclina, a equação de Ichiye é aplicada da superfície ao fundo.

O deslocamento vertical das gotículas de óleo é calculado pela soma da velocidade turbulenta de base aleatória e uma velocidade vertical (subida ou descida). As velocidades verticais são calculadas usando a média harmônica de dois extremos, sendo o coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds (JOHANSEN, 2000):

$$w_{\text{ascendente}} = 1/(w_1^{-1} + w_2^{-1}) \quad (4)$$

onde,

$$w_1 = d^2 g' / 18\nu, \text{ (para número de Reynolds} < 1000), \text{ e}$$
$$w_2 = \sqrt{3d / |g'|}, \text{ (para número de Reynolds} > 1000),$$

sendo  $g' = g(\rho_\alpha - \rho_0) / \rho_\alpha$  onde  $g$  é a aceleração gravitacional e  $\nu$  a viscosidade cinemática da água ( $\sim 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

O coeficiente de arrasto do vento na deriva superficial do óleo utilizada neste estudo foi 3,5% da intensidade do vento.

## Espalhamento

O espalhamento do óleo na superfície do mar envolve diversas interações entre forças e processos, e alguns estudos (FAY, 1969; *apud* REED, 2001 HOULT, 1972; FANNELØP & WALDMAN, 1972 *apud* REED, 2001) já mostraram que o espalhamento passivo do óleo ocorre devido às forças da gravidade, momento e viscosidade. Para a representação do espalhamento transversal de uma mancha de vazamento contínuo, é utilizada neste modelo uma equação unidimensional:

$$x_{LE} = C_0 \left( \frac{g \Delta \rho}{\rho_w^2} \right)^{1/4} \frac{m^{1/2}}{(\rho_w \mu_w)^{1/8}} t^{3/8} \quad (5)$$

onde  $x_{LE}$  é a largura da mancha de óleo (m),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ),  $\Delta \rho$  é a diferença entre as densidades da água e do óleo ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\rho_w$  é a densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu_w$  é a viscosidade da água (cP),  $m$  é  $\frac{1}{2}$  da taxa de liberação de massa dividido pela corrente superficial ( $\text{kg/m}$ ) e  $C_0$  é a constante de espalhamento.

Esta equação representa o regime de gravidade-viscosidade no processo de espalhamento e somente é utilizado para a parte espessa da mancha de óleo.

## Evaporação

A taxa de evaporação é controlada pela pressão de vapor dos componentes individuais do óleo as suas frações molares em qualquer localização da mancha

superficial, e calculada como. (MACKAY *et al.*, 1980; SEBASTIÃO & SOARES, 1995; REED *et al.*, 1999):

$$dm_i / dt = K_e P_i A M_i F_i / (RT) \quad (6)$$

onde  $m_i$  é a massa associada ao  $i$ -ésimo componente do vazamento;  $t$  é o tempo (s);  $K_e$  é o coeficiente de transferência de massa evaporada (m/s);  $T$  é a temperatura (K);  $P_i$  é a pressão de vapor para o  $i$ -ésimo componente (atm);  $A$  é a área da mancha de óleo (m<sup>2</sup>);  $M_i$  é o peso molecular da  $i$ -ésimo componente (g/mol);  $F_i$  é a fração molar do  $i$ -ésimo componente remanescente na mancha; e  $R$  é a constante universal dos gases,  $8,206 \times 10^{-5}$  atm-m<sup>3</sup>/mol-K.

O coeficiente de transferência de massa,  $K_e$ , depende do vento e é calculado por (AMOROCHO & DEVRIES, 1980, *apud* REED, 2001):

$$K_e = C_d U(t) \quad (7)$$

sendo  $C_d$  o coeficiente de atrito entre a atmosfera e o ar, e  $U(t)$  a velocidade do vento (m/s). O coeficiente de arrasto  $C_d$  é calculado em função da velocidade do vento:

$$C_d = \left( \frac{U^*}{U(t)} \right)^2 \quad (8)$$

em que

$$U^* = CU(t), \text{ quando } U(t) < u_1$$

$$U^* = Cu_1 + (Du_2 - Cu_1) \frac{U(t) - u_1}{u_2 - u_1}, \text{ quando } u_1 \leq U(t) \leq u_2$$

$$U^* = DU(t), \text{ quando } U(t) > u_2$$

sendo  $C$ ,  $D$ ,  $u_1$  e  $u_2$  valores constantes (0,0323; 0,0474, 7 e 20, respectivamente).

## Dispersão Natural

A dispersão de óleo na superfície do mar é obtida por (DELVIGNE & SWEENEY, 1988):

$$Q_{di} = C^* D^{0,57} S F d_i^{0,7} \Delta d \quad (9)$$

onde  $Q_{di}$  é a taxa de dispersão por unidade de área das gotículas de óleo com diâmetros entre  $(d_i - \Delta d)$  e  $(d_i + \Delta d)$  (kg/m<sup>2</sup>s);  $C^*$  é um coeficiente de dispersão derivado empiricamente;  $D$  é a energia da onda dissipada por unidade de área (kg/s<sup>2</sup>);  $S$  é a fração da superfície do oceano coberta por óleo;  $F$  é a fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo (1/s);  $d_i$  é o diâmetro médio das partículas na classe de tamanho  $i$  (m); e  $\Delta d$  é o intervalo do diâmetro das partículas (m).

É importante observar que o tamanho das gotículas de óleo entranhado na coluna d'água não é uma informação que pode ser especificada como dado de entrada do modelo. Observe que as expressões descritas neste item controlam o tamanho e a quantidades das gotículas.

O coeficiente empírico  $C^*$  é uma função da viscosidade do óleo:

$$C^* = 4450 \nu^{-0,4} \quad (10)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo (m<sup>2</sup>/s). A energia dissipada da quebra da onda  $D$ , é aproximadamente:

$$D = 0,0034 \rho_w g H_b^2 \quad (11)$$

onde  $\rho_w$  é a densidade da água do mar (kg/m<sup>3</sup>);  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>); e  $H_b$  é altura de quebra da onda (m). A fração  $F$  de superfície do oceano coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo é, aproximadamente:

$$F = 3 \cdot 10^{-6} U(t)^{3,5} \quad (12)$$

onde  $U(t)$  é a velocidade do vento (m/s). O tamanho das partículas é dado por:

$$d_0 = \frac{C_0 \nu^{0,34}}{\sqrt{e}} \quad (13)$$

sendo  $\nu$  é a viscosidade cinemática do óleo ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $e$  é a taxa de dissipação de energia (geralmente  $1000 \text{ J/m}^3\text{s}$ );  $C_0$  é, aproximadamente, 500 para o menor tamanho de partícula e 3400 para o maior tamanho de partícula. As gotículas são divididas em intervalos entre os tamanhos, mínimo e máximo, encontrados.

## Emulsificação

A emulsificação  $W(t)$  é calculada a partir de uma regressão exponencial:

$$W(t + \Delta t) = W_m(t) - [W_m(t) - W(t)] 0,5^{\frac{\Delta t}{t_{1/2}}} \quad (14)$$

onde  $W_m(t)$  é o teor máximo de água (%);  $\Delta t$  é o passo de tempo (s);  $t_{1/2}$  é o tempo de meia-vida dependente do vento para emulsificação (s).

O valor  $t_{1/2}$  e a função  $W_m(t)$  são derivados de dados de laboratório e, correlacionam a taxa de emulsificação e o teor máximo de água pela fração evaporada. A partir desses dados, a meia-vida de referência  $t_{ref}$  para um vento de 10 m/s de velocidade, é encontrada em:

$$t_{ref} = C t_{lab} \quad (15)$$

onde,  $t_{lab}$  é a média de valores de meia-vida encontrados em laboratório para amostras de óleo artificialmente intemperizados (s), e  $C$  é uma constante empírica. Esses dados são baseados no estudo de Cormack (1983, *apud* REED, 2001):

$$t_{1/2} = \left[ \frac{1 + U_{ref}}{1 + U(t)} \right]^2 t_{ref} \quad (16)$$

onde  $U_{ref}$ , é de 10 (m/s), e  $U(t)$  é a velocidade do vento (m/s).  $W_m$  como função da fração evaporada é obtida a partir de dados de laboratório, assumindo-se que a quantidade máxima de água é linearmente dependente da fração evaporada.

## Dissolução

Como a evaporação, a dissolução, é dependente da fração molar de cada componente em uma mancha de óleo.

$$dm_i / dt = K_d A (F_i S_i - C_i) \quad (17)$$

onde  $K_d$  é o coeficiente de transferência de massa por difusão (m/s);  $A$  é a área superficial da mancha de óleo (m<sup>2</sup>);  $F_i$  é a fração molar do componente  $i$  remanescente na mancha;  $S_i$  é a solubilidade do componente  $i$  (g/m<sup>3</sup>, ppm); e  $C_i$  é a concentração ambiente do componente  $i$  (g/m<sup>3</sup>).

Para uma mancha de óleo, o coeficiente de transferência de massa  $K_d$  é calculado (THIBODEAUX, 1979, *apud* REED, 2001):

$$K_d = Sh_i D_i / L \quad (18)$$

Para manchas na superfície, é feita a correlação de superfície plana para o Número de Sherwood ( $Sh_i$ ):



$$Sh_i = 0,578 Re^{0,5} Sc_i^{0,33} \quad (19)$$

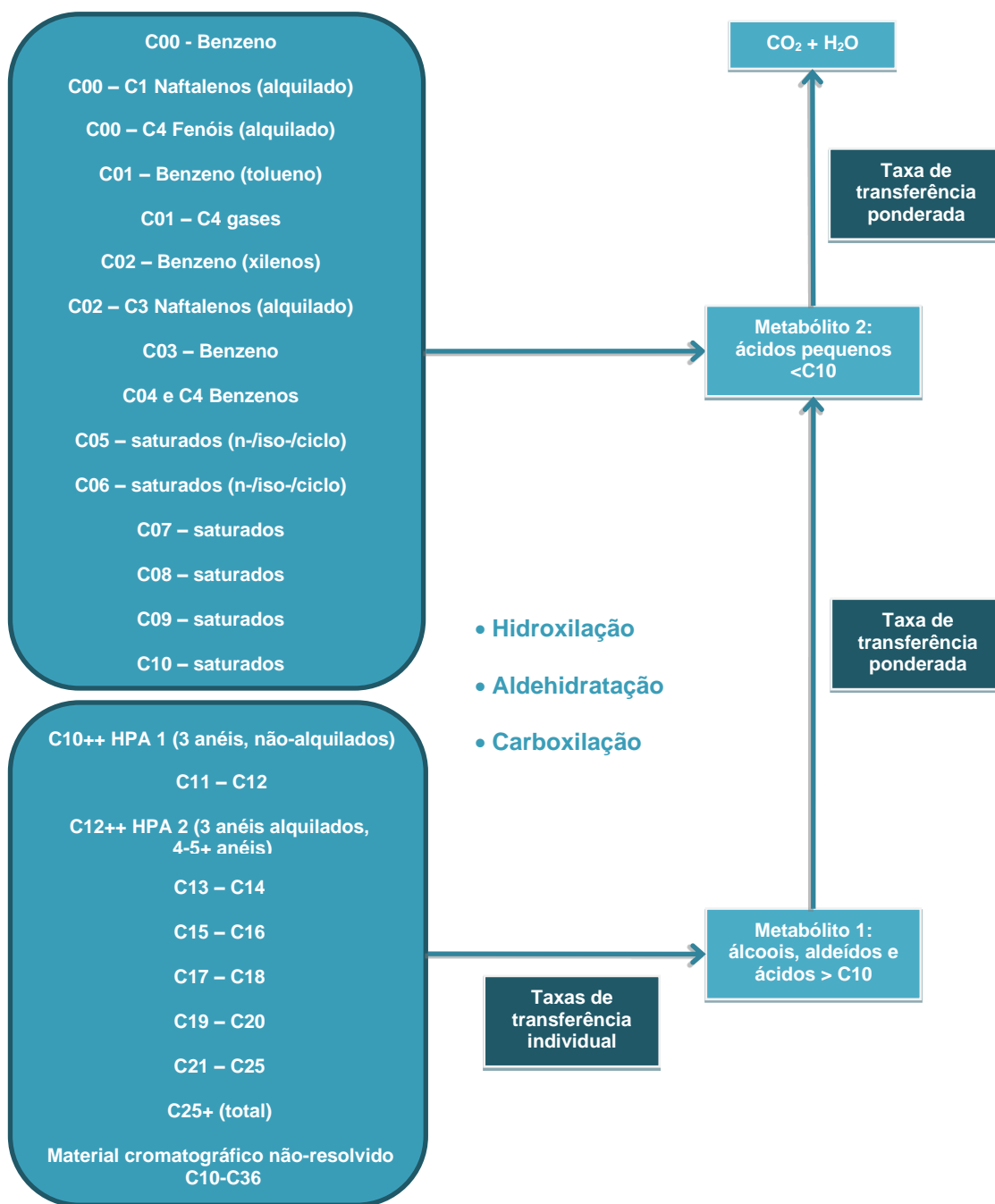
onde  $Re$  é o número de Reynolds;  $Sc_i$  é o número de Schmidt;  $U_{rel}$  é a velocidade relativa entre o óleo e a água (m/s);  $L$  é a extensão da mancha (m);  $\nu_w$  é a viscosidade cinemática da água ( $\sim 8,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $25^\circ\text{C}$ ) e  $D_i$  a difusividade molecular do componente  $i$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Para as partículas de óleo, a correlação da transferência de massa para esferas é usada para o número de Sherwood:

$$Sh = 2 + 0,347 Re^{0,62} Sc_i^{0,31i} \quad (20)$$

## Degradação

O cálculo da degradação do óleo no modelo OSCAR é feita através da soma da transformação de cada componente do óleo por diferentes formas de degradação. A Figura A-2 mostra o esquema de transformação dos componentes considerados no modelo OSCAR.



**Figura A-2 - Esquema da degradação dos principais componentes do óleo.**  
*Adaptado de Reed (2001).*

## Sedimentação

No OSCAR a separação entre a fase dissolvida e particulada/adsorvida é calculada com base na teoria de equilíbrio linear. A fração de óleo particulada, ou

adsorvida em material particulado, é passível de sedimentação no fundo, misturando-se aos sedimentos, e podendo ser dissolvida novamente para a coluna d'água (REED *et al.*, 1996).

A relação entre a concentração de equilíbrio de um poluente na fase aquosa ( $C_w$ ) e a concentração de equilíbrio na fase sólida ( $C_s$ ) pode ser obtida a uma determinada temperatura. Existem várias teorias que descrevem as isotermas de adsorção, tais como as isotermas de Langmuir (Equação 20) e de Freundlich (Equação 21) (REED, 2001).

$$C_s = \frac{K_1 K_2 C_w}{1 + K_1 C_w} \quad (21)$$

$$C_s = K_f C_w^{1/n} \quad (22)$$

Segundo Reed (2001), em ambiente aquático, o valor da fase aquosa do poluente,  $C_w$ , é geralmente baixo, e em consequência, o termo  $n$  na equação 21 é geralmente igual a 1 e o termo  $K_1 C_w$  na equação 20 é muito menor do que 1. Dessa forma, as equações podem ser reduzidas a uma equação linear

$$C_s = K_p C_w C_{ss} \quad (23)$$

onde  $C_{ss}$  é a concentração de sedimentos suspensos. O coeficiente de partição de uma substância química,  $K_p$ , é dependente da temperatura, do pH e das características físicas e químicas do sólido adsorvido. Através de estudo do comportamento de compostos orgânicos, principalmente os hidrofóbicos não-iônicos, observou-se que o carbono orgânico é o fator predominante no processo de adsorção (REED, 2001). Assim, se  $K_p$  é normalizado pela fração de carbono orgânico do sólido ( $f_{oc}$ )

$$K_{oc} = \frac{K_p}{f_{oc}} \quad (24)$$

então  $K_{oc}$  torna-se independente de sorventes. Somado a isso, o coeficiente de partição baseado no carbono orgânico apresenta ótima correlação tanto com  $K_{ow}$  (coeficiente de partição octanol/água) como com a solubilidade em água ( $S$ ) (Equações 24 e 25, respectivamente).

$$\log K_{oc} = A \log K_{ow} + B \quad (25)$$

$$\log K_{oc} = a \log S + b \quad (26)$$

Assim, é possível determinar  $K_{oc}$  tanto do valor de  $K_{ow}$  como da solubilidade, sendo que as constantes de correlação ( $A$ ,  $B$ ,  $a$  e  $b$ ) são normalmente dependentes da estrutura do composto. A Tabela A-1 mostra algumas equações de correlação entre  $K_{oc}$ ,  $K_{ow}$  e  $S$  usados no modelo.

**Tabela A-1 – Equações de regressão para estimativa dos parâmetros  $K_{oc}$  e  $K_{ow}$  para diferentes componentes químicos. Fonte: Reed, 2001.**

Equação	R <sup>2</sup>	Classe
<b>Parâmetro: <math>K_{ow}</math></b>		
$\log 1/S = 1.113 \log K_{ow} - 0.926$	0,935	Álcool
$\log 1/S = 1.229 \log K_{ow} - 0.720$	0,960	Cetona
$\log 1/S = 1.013 \log K_{ow} - 0.520$	0,980	Éster
$\log 1/S = 1.182 \log K_{ow} - 0.935$	0,880	Éter
$\log 1/S = 1.294 \log K_{ow} - 1.043$	0,908	Alcino
$\log 1/S = 1.294 \log K_{ow} - 0.248$	0,970	Alceno
$\log 1/S = 0.996 \log K_{ow} - 0.339$	0,951	Aromático
$\log 1/S = 1.237 \log K_{ow} - 0.248$	0,908	Alcano
<b>Parâmetro: <math>K_{oc}</math></b>		
$\log K_{oc} = 0.937 \log K_{ow} - 0.006$	0,950	Aromático
$\log K_{oc} = 0.544 \log K_{ow} + 1.377$	0,740	Todos os outros

Embora seja possível especificar um valor constante de concentração de sedimentos suspensos nas simulações, neste estudo adotou-se um valor nulo de concentração de sedimentos suspensos. Dessa forma, se objetiva uma abordagem mais conservadora que não permite a retirada de óleo da superfície e da coluna d'água por esse processo. Os valores de sedimentação apresentados

nas simulações são referentes ao óleo na coluna d'água que toca diretamente o fundo marinho.

Para avaliação da presença de óleo no fundo oceânico foi utilizado o seguinte procedimento: a partir do cruzamento dos mapas de probabilidade de presença de óleo na coluna d'água em diversas profundidades com o mapa de batimetria utilizado no estudo, foram obtidos mapas de probabilidade de presença de óleo no fundo oceânico. É importante observar que existe uma diferença entre este procedimento e a especificação de um limiar de concentração de óleo no fundo marinho. Enquanto a concentração de óleo no fundo marinho leva em consideração um efeito cumulativo de adsorção de óleo nos sedimentos, o critério utilizado no mapa de probabilidade leva em consideração apenas o fato do óleo tocar no fundo marinho com concentrações superiores a 20 ppb.

### ***Propriedades físicas do óleo (Macro-características)***

As principais propriedades do óleo utilizadas pelo modelo são a densidade e a viscosidade do óleo. Essas propriedades variam de acordo com curvas obtidas em laboratório em função da fração de óleo evaporado. A seguir são apresentadas as equações das curvas obtidas em laboratório para os cálculos das propriedades do óleo (JOHANSEN, 1991 *apud* REED, 2001):

$$\text{Densidade (g/L)} \quad \rho_0 = a_p + b_p f \quad (27)$$

$$\text{Viscosidade (cP)} \quad \mu_0 = e^{(a\mu + b\mu f)} \quad (28)$$

sendo  $f$  a fração evaporada (%) e  $a$  e  $b$  fatores de regressão. Os parâmetros de ajuste  $a$  e  $b$  fazem parte do banco de dados da SINTEF que integra o modelo OSCAR e são obtidas através de ensaios laboratoriais. A densidade da emulsão  $\rho(t)$  é calculada:

$$\rho(t) = \frac{W(t)\rho_w + [100 - W(t)]\rho_o(t)}{100} \quad (29)$$

sendo  $W(t)$  a porcentagem de água (%),  $\rho_w$  a densidade da água do mar, e  $\rho_o(t)$  a densidade do óleo livre de água (g/L).

A equação de Mooney, de 1951, é usada para calcular a viscosidade de emulsão  $\mu(t)$ :

$$\mu(t) = \mu_o(t)e^{\frac{aW(t)}{100-bW(t)}} \quad (30)$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes empíricas.

## Concentração na coluna d'água

O modelo resolve a seguinte equação de transporte advectivo-difusivo:

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} \cdot D_k \vec{\nabla} C_i + \sum_{j=1}^n r_j C_i + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n r_{ij} C_i \quad (31)$$

onde  $C_i$  é a concentração do  $i$ -ésimo constituinte químico do vazamento;  $t$  é o tempo;  $\vec{V}$  é o vetor do transporte advectivo; e  $D_k$  é o coeficiente de difusão turbulenta para  $k = x, y$  e  $z$ .

O primeiro termo da equação é a taxa de variação temporal da concentração de um determinado constituinte em uma determinada localização espacial. Esta taxa de variação é calculada através da determinação dos outros termos da equação utilizando partículas lagrangeanas para representar o campo de concentração. Os termos  $r_j$  são taxas de vários processos, tais como a evaporação, emulsificação e espalhamento das manchas superficiais e volatilização dos compostos do óleo.

Os termos de degradação  $r_{ij}$  aparecem no modelo para determinar os subprodutos da degradação como transferência de massa de um componente à outro.

Para mapeamento das concentrações de óleo disperso/dissolvido na coluna d'água foi utilizada a concentração de 20 ppb como limite para apresentação dos resultados. A especificação de um valor limiar deve ser baseada em critérios que levem em conta a toxicidade dos compostos presentes no óleo.

Para fins práticos é comum a adoção de um valor restritivo que possa ser utilizado de maneira mais geral. Um bom exemplo disso é o critério de presença de óleo baseado na espessura de óleo na superfície. O valor de 20 ppb foi adotado considerando que este valor é aproximadamente 0,1 % da concentração de óleo e graxas permitida para descarte de água produzida de acordo com a resolução CONAMA 393/2007. Esta resolução estabelece que “o descarte de água produzida deverá obedecer a concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L”.

Dessa forma, se baseando em 0,1% de 29 mg/L temos aproximadamente 29 ppb. O valor de 0,1% foi arbitrado levando em consideração que este valor tem a mesma ordem de grandeza das diluições necessárias para que não sejam observados efeitos tóxicos adversos em descartes de água de produção, conforme observado em GABARDO (2007).

Apesar da concentração de óleo de 20 ppb ser um valor arbitrado em função do estudo de Gabardo (2007), ao compararmos os limiares ambientais a pares internacionais, é observado que o valor selecionado está na mesma ordem de grandeza. Por exemplo, no documento de Oskar Commission (2014) é recomendado o valor de PNEC (do inglês, Predicted No Effect Concentration ou Concentração Sem Efeito Previsível) de 70,5 ppb, que cita como referência o estudo de Smit et al. (2009). Esse valor equivale ao descritor HC5 (concentração de risco com efeito adverso para 5% das espécies) que protege 95% das espécies em uma curva de Distribuição de Sensibilidade das Espécies, baseada em 30 valores de CENO (Concentração de Efeito Não Observado) crônicos para 17 espécies marinhas.

Ainda citando exemplo, no documento de Rye et al. (2004) onde se discute a criação de um Fator de Impacto Ambiental (em inglês, Environment Impact Factor – EIF) em concordância entre operadores de óleo e gás na Noruega, o valor de PNEC adotado para o cálculo do EIF é de 40,4 ppb. Dessa forma, observa-se

aderência do valor adotado para o presente estudo com publicações internacionais.

Vale ressaltar que o valor de 20 ppb utilizado como limiar para apresentação dos resultados não está diretamente relacionado com o risco de efeitos tóxicos adversos. Apenas foi utilizado um valor que, em ordem de grandeza, permitisse o mapeamento da pluma de óleo disperso/dissolvido na coluna d'água.

## **Óleo na costa**

Apesar do grande número de publicações sobre a interação do óleo na costa, ainda existem consideráveis lacunas na compreensão do processo dinâmico de acumulação de óleo na costa. Uma relativamente recente revisão (ETKIN *et al.*, 2007) do “estado da arte” da modelagem da interação entre manchas de óleo e a costa foi elaborada por especialistas sobre o tema para o MMS (*Minerals Management Service*), órgão ligado ao departamento americano do interior. Tal publicação representa uma excelente referência sobre o tema.

A PROOCEANO reconhece a importância da compreensão das interações do óleo com a linha de costa e da incorporação desses processos nos estudos de modelagem de óleo. No entanto, reconhece também que a incorporação desses processos de maneira acurada depende de diversos fatores que são difíceis de serem introduzidos nos modelos, especialmente quando a linha de costa do domínio de modelagem tem centenas de quilômetros, como é o caso desse estudo.

O comportamento do óleo quando é depositado na costa é complexo e depende dos seguintes fatores inter-relacionados:

- » Características físico-químicas do óleo
- » A espessura do óleo que encalha na costa
- » Tempo de toque
- » Instante da maré no momento da chegada da mancha de óleo na costa



- » Morfologia da linha de costa
- » Clima no momento do toque.
- » Energia de ondas na costa

Um modelo que incorpore todos esses fatores pode ser útil para algumas finalidades, como por exemplo, experimentos de laboratório ou campo como parte de projetos de pesquisa. No entanto é impraticável para simulações probabilísticas de vazamentos de óleo em regiões offshore. O grande número de simulações determinísticas e as grandes dimensões do domínio inviabilizam qualquer tentativa nesse sentido. Além disso, muitos desses fatores não são resolvidos pelos modelos disponíveis para este tipo de estudo. O parágrafo seguinte foi retirado do relatório da MMS do item de Lacunas de informações e recomendações para futuros trabalhos:

- » *“Um modelo que simule de maneira acurada essas iterações levando em consideração todas as características do óleo, as ondas na costa e outros fatores ambientais, embora seja útil para alguns propósitos, é impraticável para uma aplicação de modelagem de análise de risco de vazamentos de óleo simulada de maneira probabilística”.*

Para modelagens probabilísticas de vazamentos em áreas *offshore*, a prática atual é fazer uma aproximação de acumulação de óleo na costa através de uma estimativa das capacidades de armazenamento e remoção de óleo na costa derivadas empiricamente. Tal procedimento é utilizado na maioria dos modelos de transporte de óleo que incluem algum tipo de algoritmo de interação do óleo com a costa. (GUNDALACH & REED, 1986; GUNDALACH, 1987; FRENCH *et al.*, 1996; REED *et al* 1999, 2000; CHENG *et al.*, 2000; FRENCH MCCAY, 2004 *apud* ETKIN *et al.*, 2007).

O modelo OSCAR incorpora uma dinâmica, relativamente simples, para simular as interações óleo-costa. Estes procedimentos representam uma

simplificação dos conjuntos desenvolvidos para um modelo de derramamento de óleo em uma zona costeira mais complexa.

A partir de trabalhos científicos, grupos de capacidade máxima de absorção de óleo foram estimados juntamente com uma série de taxas de remoção (ETKIN *et al.*, 2007). As capacidades de absorção destinam-se a refletir tanto a inclinação da costa como a sua permeabilidade, e em alguns casos, a exposição às ondas e aos ventos.

O volume máximo de óleo,  $V_{\max}$  ( $m^3$ ), quando há o encontro da mancha de óleo com a linha de costa, pode ser expresso como:

$$V_{\max} = \delta_i L W_i \quad (32)$$

Onde  $\delta_i$  é a máxima capacidade de retenção por tipo de costa  $i$ ,  $L$  é o comprimento da célula de praia e  $W_i$  é a largura da região de deposição por tipo de costa

Durante as simulações computacionais, se este volume máximo já estiver sido atingido, a massa de óleo que chega à costa não é mais depositada e o óleo continua a ser transportado pelos ventos e correntes para outras regiões:

O modelo também considera que ao longo da simulação uma quantidade de óleo vai sendo removida através da seguinte equação:

$$\Delta m = m_i (1 - \exp[-r_i \Delta t]) \quad (33)$$

Onde  $\Delta m$  é a massa removida no passo de tempo  $\Delta t$ ,  $m_i$  é a massa na célula de costa  $i$ , e  $r_i$  é a taxa de remoção de por tipo de costa  $i$ .

Para configurar o limiar de óleo na costa, que é determinado pela unidade toneladas por quilômetro (t/km), é considerado o volume equivalente de óleo em uma célula de água totalmente preenchida por um filme superficial de óleo com 0,3  $\mu m$  de espessura. Este volume é então distribuído ao longo da linha de costa, em que o tamanho da linha de costa de cada ponto de grade é a sua diagonal.

## Massa Máxima de Óleo na Costa

Para obter a massa máxima de óleo na costa, os elementos de grade são monitorados ao longo de toda a simulação. São armazenadas as informações de massa máxima de óleo que atingiram cada elemento de grade ao longo das  $n$  simulações. Ao final, têm-se um mapa das massas máximas por unidade de área que atingiram os elementos de grade que representam a costa.

Em seguida, é calculada a distribuição de massa ao longo da linha de costa considerando que o tamanho da linha de costa de cada ponto de grade é a sua diagonal. Assim se tem a quantidade de massa por unidade de comprimento (Ex: toneladas por quilômetro).

## Resumo dos parâmetros físicos e numéricos

Os parâmetros físicos utilizados no modelo de dispersão de óleo são apresentados na Tabela A-2, enquanto as constantes são apresentadas na Tabela A-3.

**Tabela A-2 – Parâmetros físicos e químicos utilizados no modelo de óleo.**

Parâmetro	Descrição
$w'$	componente turbulenta
$K$	coeficiente de dispersão turbulenta
$Kx$	coeficiente de dispersão horizontal
$H$ e $H_b$	altura de onda
$T(1)$	período de onda
$x_{le}$	largura da mancha de óleo
$\Delta\rho$	diferença entre as densidades da água e do óleo
$m$	1/2 da taxa de liberação de massa dividido pela corrente superficial
$m_i$	massa associada ao $i$ -ésimo componente de vazamento
$K_e$	coeficiente de transferência de massa evaporada
$T(2)$	Temperatura do óleo
$P_i$	pressão de vapor para o $i$ -ésimo componente
$F_i$	fração molar do $i$ -ésimo componente remanescente na mancha
$C_d$	coeficiente de atrito entre a atmosfera e o ar
$U(t)$	velocidade do vento
$Q_{di}$	taxa de dispersão por unidade de área das gotículas de óleo
$C^*$	coeficiente de dispersão derivado empiricamente

<b><math>D</math></b>	energia da onda dissipada por unidade de área
<b><math>S</math></b>	fração da superfície do oceano coberta por óleo
<b><math>F</math></b>	fração da superfície do mar coberta pela arrebentação de ondas por unidade de tempo
<b><math>d_i</math></b>	diâmetro média das partículas na classe de tamanho $i$
<b><math>\Delta d</math></b>	intervalo do diâmetro das partículas
<b><math>\nu</math></b>	viscosidade cinemática do óleo
<b><math>e</math></b>	taxa de dissipação de energia
<b><math>W(t)</math></b>	emulsificação
<b><math>W_m(t)</math></b>	teor máximo de água no óleo
<b><math>t_{1/2}</math></b>	tempo de meia-vida dependente do vento para emulsificação
<b><math>t_{ref}</math></b>	tempo de meia-vida de referência
<b><math>t_{lab}</math></b>	média de valores de meia-vida encontrados em laboratório
<b><math>K_d</math></b>	coeficiente de transferência de massa por difusão
<b><math>A</math></b>	área superficial da mancha de óleo
<b><math>S_i</math></b>	solubilidade do componente $i$
<b><math>C_i</math></b>	concentração ambiente do componente $i$
<b><math>Sh_i</math></b>	Número de Sherwood
<b><math>Re</math></b>	Número de Reynolds
<b><math>Sc_i</math></b>	Número de Schmidt
<b><math>U_{rel}</math></b>	velocidade relativa entre o óleo e a água
<b><math>L</math></b>	extensão da mancha
<b><math>D_i</math></b>	difusividade molecular do componente $i$
<b><math>C_w</math></b>	concentração de equilíbrio de um poluente na fase aquosa
<b><math>C_s</math></b>	concentração de equilíbrio na fase sólida
<b><math>C_{ss}</math></b>	concentração de sedimentos suspensos
<b><math>K_p</math></b>	parâmetro dependente da temperatura, pH e das características físico-químicas do sólido adsorvido
<b><math>A, B, a, b</math></b>	constantes de correlação dependentes da estrutura do composto
<b><math>a'_{\mu, \rho, p}</math></b>	fatores de regressão
<b><math>b'_{\mu, \rho, p}</math></b>	fatores de regressão
<b><math>\rho_o</math></b>	densidade da água do óleo
<b><math>D_k</math></b>	coeficiente de difusão turbulenta para $k = x, y$ e $z$ .
<b><math>\rho_w</math></b>	densidade da água
<b><math>\mu_w</math></b>	viscosidade dinâmica da água
<b><math>\nu</math></b>	viscosidade cinemática da água

**Tabela A-3 – Constantes físicas utilizadas no modelo de óleo.**

Constante	Valor	Descrição
$K_z$	$10^{-4} \text{ m/s}^2$	coeficiente de dispersão vertical
$g$	$9,81 \text{ m/s}^2$	aceleração gravitacional
$\nu$	$1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	viscosidade cinemática da água
$R$	$8,206 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$	constante universal dos gases
$C$	0,0323	constante
$D$	0,0474	constante
$u_1$	7	constante
$u_2$	20	constante
$C_o(2)$	500 a 3400	constante
$a$	2,5	constante empírica
$b$	0,654	constante empírica

## ***Bibliografia***

- BRANDVIK, P., JOHANSEN, Ø., LEIRVIK, F., FAROOQ, U. and DALING, P. (2012). Droplet breakup in sub-surface oil releases - Part 1: Experimental study of droplet breakup and effectiveness of dispersant injection, Submitted to Marine Pollution Bulletin October 2012 .
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2007. Resolução Conama nº 393. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/port/conama/> > Acesso em 07/04/2021.
- DELVIGNE G.A.L.; SWEENEY C.E.. Natural dispersion of Oil. Oil & Chemical Pollution 4 (1988) 281-310.
- ETKIN, D.S., FRENCH-MCCAY, D.; MICHEL, J. 2007. Review of the State-of-the-Art on Modeling Interactions between Spilled Oil and Shorelines for the Development of Algorithms for Oil Spill Risk Analysis Modeling. Available from BOEM Environmental Division, Branch of Environmental Sciences. OCS Study MMS 2007-063. 161 p.
- GABARDO. I. T., 2007. Caracterização Química e Toxicológica da água Produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e seu comportamento dispersivo no mar. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande Norte. UFRN.
- HOULT, D. P. Oil spreading on the sea. Annual Review of Fluid Mechanics, p. 341-367, 1972.
- JOHANSEN, Ø. 2000. DeepBlow – A Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts. Spill Science & Technology Bulletin. Vol. 6, No. 2: 103 – 111.
- JOHANSEN, Ø. and DURGUT, I. (2006). Implementation of the near-field module in theERMS model, Technical report, SINTEF.
- LINDERSEN, P, J, B, 2013. Modelling of Subsurface Releases of Oil and Gas. Master's Thesis. Norwegian University of Science and Technology. Department of Chemical Engineering. Trondheim, Norway.
- MACKAY, D., I. BUIST, R. MASCARENHAS & S. PATERSON. 1980. Oil Spill Processes and Models. Environmental Protection Service. Canada. Report EE-8.

- OSPAR COMMISSION. 2014. Background document. Establishment of a list of Predicted No Effect Concentration (PNECs) for naturally occurring substances in produced water. OSPAR Agreement 2014-05.
- REED, M. 2001. Technical Description and Verification Tests of OSCAR 2000, a Multi-Component 3-Dimensional Oil Spill Contingency And Response Model. SINTEF Report. 52p.
- REED, M., AAMO, O. M., DOWNING, K. (1996): Calibration and Testing of IKU's Oil Spill Contingency and Response (OSCAR) Model System. Proceedings of the 1996 Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP) Technical Seminar, pp.689-726.
- REED, M.; DALING, P.; LEWIS, A.; DITLEVSEN, M. K.; BRØRS, B.; CLARK, J.; AURAND, D. 2004. Modelling of dispersant application to oil spills in shallow coastal waters. Environmental Modelling & Software, v. 19, p. 681-690.
- REED, M. 2000; SINGSAAS, I.; DALING, P.S; FAKNES, L; BRAKSTAD, O.G.; HETLAND, B. A.; HOKSTAD, J. 2000. Modeling the Water-Accommodated Fraction in OSCAR2000. In: 2001 International Oil Spill Conference. Computer Technology and Oil Spills. SINTEF Report. pp.1083-1091.
- REED, M.; JOHANSEN, Ø.; BRANDVIK, P. J.; DALING, P.; LEWIS, A.; FIOCCO, R.; MACKAY, D.; PRENTKI, R. 1999. Oil Spill Modelling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art. Spill Science and Technology Bulletin, 5 (1): pp 3-16.
- RYE, H.; REED, M.; DITLEVSEN, M.K.; BERNTSEN, S. The "Environment Impact Factor" (EIF) for produced water discharges – a tool for reducing environmental impacts. In: Development and Application of Computer Techniques to Environmental Studies. WIT Press, 2004.
- SEBASTIÃO, P.; SOARES, C. G. 1995. Modeling the Fate of Oil Spills at Sea. Spill Science and Technology Bulletin, 2 (2): pp 121-131.
- SMIT, M.G.; BECHMANN, R.K.; HENDRIKS, A.J.; SKADSHEIM, A.; LARSEN, B.K.; BAUSSANT, T.; SHAW, B.; SANNI, S. 2009. Relating biomarkers to whole-organisms effects using species sensitivity distributions: A pilot study for marine species exposed to oil. Environmental Toxicology and Chemistry, vol. 28, no. 5, pp. 1104-1109.