
A Elaboração de Cenários de Acidentes com Derrame de Óleo na Região do Terminal de Angra dos Reis, RJ: Modelagem, Análise e Simulação Computacional

Rosane F. De Oliveira¹,

Departamento de Matemática, ICE–UFRRJ, 23.890-000 – Seropédica, RJ.

João Frederico C. A. Meyer²,

DMA, IMECC–UNICAMP, 13.083-970 – Campinas, SP.

Resumo. Os artigos, publicações e avaliações que existem na literatura dos derrames de óleo, podem ser classificados em três categorias. A primeira apresenta uma visão posterior ao derrame, com dados, relatos e avaliações. A segunda apresenta uma visão durante o derrame, inclusive com testemunhos de técnicos e pesquisadores. Na terceira, na qual se situa este trabalho, está a visão anterior, em que cenários são definidos a priori e resultados são simulados criando um estudo de caso efetivo, em que se prevê o movimento de uma mancha no espaço e no tempo.

Apresentamos a modelagem do comportamento evolutivo de manchas de óleo no período de tempo que sucede um derrame. O tratamento é bidimensional na variável espacial \mathbf{x} , que modela a superfície, e a concentração de óleo $u(t, \mathbf{x})$ é considerada em cada ponto \mathbf{x} e em cada instante t . É utilizada equação de difusão-advecção-reação. Os comportamentos circulatorios de correntes marítimas, são obtidos por equação de Stokes para o domínio escolhido por este estudo, o Canal Central da Baía de Ilha Grande.

Palavras-chave: *Modelagem matemática, simulação de derrames, difusão-advecção, sistemas costeiros.*

1 Introdução

O município de Angra dos Reis, no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro, tem na Baía de Ilha Grande a representação do seu potencial turístico e pesqueiro. A Baía consiste

¹rosanef@ufrj.br

²joni@ime.unicamp.br

de dois corpos aquáticos separados por um canal formado pelo estreitamento entre o continente e uma ilha, a Ilha Grande. Mahiques, citado por Poffo (2000), faz a seguinte divisão fisiográfica da Baía: Porção Oeste, Canal Central e Porção Leste.

O terminal marítimo da PETROBRAS, DTSE/GEBIG ou TEBIG, está localizado no continente (Ponta do Leme), latitude $23^{\circ}03'38''\text{S}$ e longitude $44^{\circ}13'10''\text{W}$, em frente à parte central da Ilha Grande, onde ocorrem operações de carga e descarga de petróleo e derivados. Segundo estatísticas internacionais e nacionais estas são as principais causas de derrames de óleo na água e os responsáveis podem ser os navios, e as falhas no terminal e nos oleodutos. Estas atividades talvez venham a ser intensificadas com a descoberta do superpoço da Bacia de Santos.

Notícias de derrame de pequeno e médio porte, nesta região, são anualmente veiculadas. Segundo Schaeffer-Novelli (*in Poffo, 2000*), a extensão do impacto ambiental nem sempre é proporcional ao volume vazado. Deve-se levar em conta a toxicidade do produto e o grau de sensibilidade dos ecossistemas envolvidos, podendo o dano ser agravado caso haja reincidência no período entre seis meses e dois anos.

O destino do petróleo na água tem sido fonte de pesquisa e de publicação há décadas. De uma forma geral, tais estudos pretendem auxiliar a tomada de decisão das autoridades locais, responsáveis pelas ações de emergência a serem realizadas quando ocorre um derrame de petróleo.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente propôs, através da resolução de número 293, de dezembro de 2001, um conteúdo mínimo de plano de emergência, que deve conter entre outros tópicos a **modelagem matemática** para o monitoramento da mancha de óleo derramado.

2 A modelagem matemática

Segundo Fay (Fay, 1969, 1970), quando óleo é derramado na água há uma tendência de espalhamento resultante da ação das forças gravitacional e de tensão superficial, ajudadas pelo movimento da superfície induzido por ventos, correntes e marés. As forças que resistem a este espalhamento são a de inércia e a de viscosidade.

Nas horas iniciais de um derrame, a gravidade e a inércia dominam, havendo um espalhamento horizontal e vertical, até uma certa altura, que é função do volume de óleo derramado, e formando um piscinão de óleo. Esta é, ainda de acordo com Fay, a primeira fase do fenômeno e o espalhamento é chamado de inercial. O espalhamento horizontal continua, ampliando a área superficial da mancha, a espessura diminui e atinge um valor crítico a partir do qual a viscosidade domina a inércia. Esta é a denominada segunda fase de Fay, cujo espalhamento é chamado de viscoso e pode durar semanas. Com a camada

de óleo já bem fina, a atuação da gravidade é dominada pela tensão superficial. Estamos na terceira fase de Fay, em que o óleo tem suas propriedades físico-químicas bastante alteradas ocasionando a interrupção do espalhamento e evidenciando um comportamento majoritariamente advectivo.

Estaremos modelando o fenômeno na segunda fase, a de espalhamento viscoso. Ou seja, passaram-se algumas horas após o início do derrame e a mancha pode ser vista como um conjunto conexo de espessura aproximadamente homogênea e de poucos centímetros ou milímetros, que começará a ser influenciada e a se movimentar pela ação dos ventos, correntes e marés. Consideramos também o movimento difusivo, que não deve ser confundido com a difusão apenas molecular e sim considerado como uma difusão efetiva, relacionada a tensão superficial e turbulência (Marchuk, 1986; Okubo, 1980).

Por intemperismo, o óleo irá sofrer alteração em suas características físico-químicas e a mancha vai sofrer perdas em sua massa. As perdas principais são aquelas oriundas da evaporação e dispersão na coluna d'água, além daquela ocasionada pelo encalhe.

Para a modelagem procedemos de modo clássico, baseados em lei de conservação para a concentração u e trabalhamos com a equação de difusão-advectação-reação

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(-\alpha \nabla u + Wu) + \rho u = f. \quad (1)$$

Consideramos a variável espacial $\mathbf{x} = (x, y)$ bidimensional, indicando coordenadas superficiais. Assim, $u(t, \mathbf{x})$ representa a concentração de óleo no instante $t \in [0, T]$ e na posição \mathbf{x} do domínio Ω , uma discretização do Canal Central, cuja fronteira é dada por $\partial\Omega$.

O fluxo difusivo foi modelado por $-\alpha \nabla u$, com a difusividade dada por α . O fluxo advectivo é dado por Wu com

$$W = 0.03W_v + W_p,$$

sendo W_v o vetor de vento a 10 metros acima da superfície do mar e W_p a circulação superficial padrão do Canal Central.

Para a contabilização das perdas, exceto as causadas por encalhe, foi usada uma única parcela ρu , isto é, uma aproximação linear para os vários processos de degradação. A fonte poluente está em (1) representada por f .

A condição inicial é dada por $u(0, \mathbf{x}) = u_0(\mathbf{x})$ e as condições de fronteira são, para $\partial\Omega = \Gamma_0 \cup \Gamma_1 \cup \Gamma_2$, de três tipos:

$$u|_{\Gamma_2} = 0, \quad -\alpha \frac{\partial u}{\partial \eta} \Big|_{\Gamma_1} = p(W \cdot \eta)u = pW_\eta u \quad \text{e} \quad -\alpha \frac{\partial u}{\partial \eta} \Big|_{\Gamma_0} = 0. \quad (2)$$

O parâmetro p representa um percentual de passagem e η é o vetor normal exterior unitário ao redor de $\partial\Omega$.

Trabalhamos com a formulação variacional do problema (1)-(2), no intuito de nos beneficiarmos do enfraquecimento de exigências para parâmetros, soluções e fronteira. Para Ω limitado com fronteira localmente Lipschitziana, consideramos o espaço de funções teste

$$V = \{v \in H^1(\Omega) \mid v|_{\Gamma_2=0}\}.$$

Com a notação usual para o produto interno em $L^2(\Omega)$, obtemos a seguinte formulação

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}, v\right) + (\alpha \nabla \mathbf{u} \parallel \nabla v) + (W \bullet \nabla \mathbf{u}, v) + (\rho \mathbf{u}, v) + (pW_\eta \mathbf{u}, v)_{\Gamma_1} = (\mathbf{f}, v).$$

A discussão sobre a existência e unicidade de solução para o problema em sua formulação variacional pode ser vista em De Oliveira (2003).

Em busca de uma solução aproximada, via elementos finitos, consideramos $\bar{\Omega} = \cup_{e=1}^{NT} \Omega_e$, com $\{\Omega_e\}_{e=1}^{NT}$ uma família finita de NT triângulos Ω_e , dois a dois disjuntos ou tendo como interseção um vértice ou uma aresta. Introduzimos o subespaço V_h de V de elementos finitos. O método de Galerkin tradicional consiste em encontrar $U_h \in L^2(0, T; V_h)$ satisfazendo

$$\left(\frac{\partial U_h}{\partial t}, v_h\right) + (\alpha \nabla \mathbf{U}_h \parallel \nabla v_h) + (W \bullet \nabla \mathbf{U}_h, v_h) + (\rho \mathbf{U}_h, v_h) + (pW_\eta \mathbf{U}_h, v_h)_{\Gamma_1} = (\mathbf{f}, v_h),$$

para $\forall v_h \in V_h$. Esta equação é então discretizada no tempo, via diferenças finitas, por Crank-Nicolson.

O termo advectivo, sendo muito superior ao difusivo, causa oscilações nas soluções obtidas por Galerkin. Aplicamos o método SUPG (Brooks e Hughes, 1982), que tenta contornar o problema das oscilações. Em linhas gerais, é inserida uma perturbação descontínua nas funções teste, perturbação que está relacionada ao campo de velocidades W e ao número de Peclet.

3 Simulação

O caráter quasi-estacionário de W_p , com pouca influência das marés, pode ser comprovado em Signorini (1980a), Signorini (1980b) e nos levou a considerar, para o modelo de simulação, W_p obtido do problema de Stokes

$$\begin{aligned} -div(\nabla W_p) + \nabla P &= g, & \text{em } \Omega \\ div W_p &= 0, & \text{em } \Omega \\ W_p &= W_0, & \text{em } \partial\Omega. \end{aligned}$$

As condições de fronteira foram quase que inteiramente retiradas de Signorini (1980a) e Signorini (1980b). Com elementos finitos de segunda ordem, a solução numérica do problema de Stokes gerou a circulação padrão dada na figura 1.

Esta modelagem de fato cumpre o comportamento padrão, no sentido médio, da circulação na região, que ocorre no sentido horário ao redor da Ilha Grande: entra pela porção oeste, passa pelo canal central e sai pela porção leste.

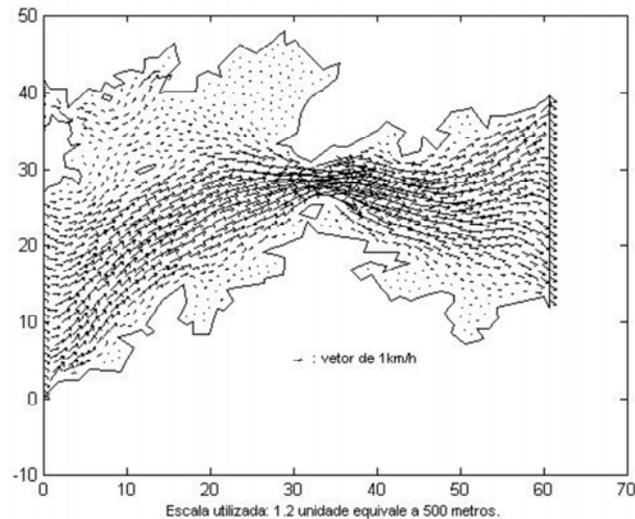


Figura 1: A circulação padrão, com ausência de ventos.

Dados de vento coletados na estação meteorológica de Angra dos Reis, entre os anos de 1931 a 1970, foram fornecidos pela Diretoria de Geografia e Estatística da Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro, em publicação de 1978. Balisados por estas informações e pela assessoria, em comunicação verbal, de um morador local, escolhemos direções e intensidades de ventos mais frequentes e efetivas em Angra dos Reis e, a partir destas informações, geramos alterações no padrão de circulação da Baía de Ilha Grande, isto é, geramos cenários distintos de circulação. Devemos frisar que em 55% do período das medições não houve presença de ventos significativos.

Os mais recentes e amplamente noticiados acidentes ocorridos em Angra foram causados por falhas em operações de carga e descarga no terminal; por este motivo temos em um dos cenários uma fonte posicionada no terminal. Por exemplo, o vazamento ocorrido em maio de 2002 em Angra dos Reis, decorrente de um furo no tanque do navio ancorado no terminal, foi descoberto e estancado três horas depois, de acordo com as notícias ve-

iculadas nos principais órgãos de imprensa nacional (O Globo, Folha de São Paulo, JB, e outros).

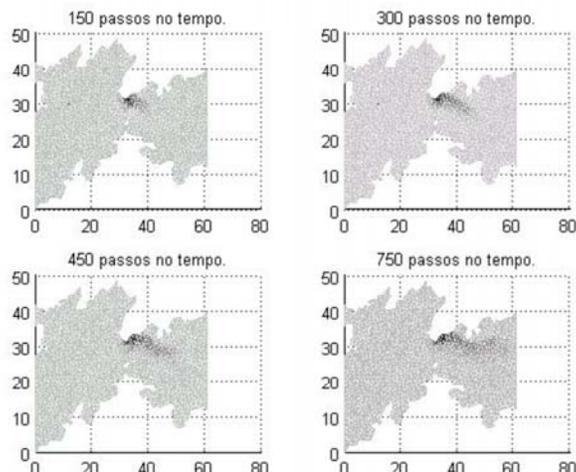


Figura 2: Fonte no Terminal e Calmaria

Na Baía de Ilha Grande existem inúmeros locais considerados perigosos na orientação dada pelo TEBIG aos petroleiros em manobra ; em um cenário de derrame, podemos utilizá-los como localização de uma provável condição inicial ou de uma provável fonte de poluição.

Para fins de implementação a difusividade, o percentual de perdas e o fator de proporcionalidade p , relacionado à fronteira Γ_1 , são considerados constantes.

4 Cenários e Conclusões

Na figura 2 reproduzimos o que é mais provável de acontecer, isto é, um acidente no terminal com vento pouco significativo. A mancha atinge uma região de costões rochosos, as praias localizadas em uma região de muitos condomínios e avança para Mangaratiba.

No acidente de maio de 2002, relatado anteriormente, o vento era de sudeste e a mancha ficou retida nos costões. A simulação deste cenário reproduz bem o ocorrido, figura 3.

No próximo cenário, figura 4, foi simulado um acidente na Laje Branca, que produziu uma mancha inicial. Supomos o vento de sudoeste, comum com a chegada de frente fria.

O que fizemos não se concretiza em pacote para uso *on line*, antes é um manual de suporte para as decisões e procedimentos num plano de contingência.

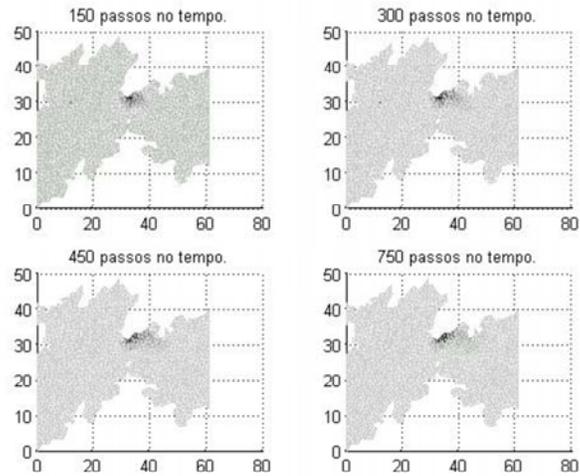


Figura 3: Fonte no Terminal e Vento de Sudeste

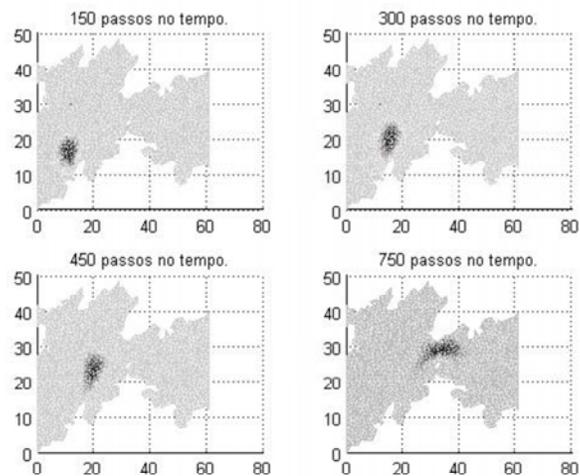


Figura 4: Mancha Inicial e Vento de Sudoeste

Apesar de serem os modelos bidimensionais, e não tri, eles apoiam-se em um largo espectro de informações locais e, portanto, de confiabilidade para os possíveis usuários.

A escolha dos cenários tem suporte em dados de vento de 40 anos de medição em Angra, em uma circulação padrão que representa a circulação local e na escolha de incidentes

representativos do que ocorreu ou poderá ocorrer, conforme estatísticas oficiais (Poffo, 2000).

Os motivos para se aceitar qualitativamente os resultados do programa não se devem apenas a resultados teóricos de convergência, obtidos em De Oliveira (2003), mas também a ensaios anteriores em outros cenários (Cantão et al., 2000; Meyer et al., 1998).

Referências

- Brooks, A. N. e Hughes, T. J. R. (1982). Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on incompressible Navier-Stokes equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Eng.*, 32:199–259.
- Cantão, R. F., De Oliveira, R. F., e Meyer, J. F. C. A. (2000). *Numerical simulation of an oil spill accident in Guanabara*. In Environmental Coastal Regions III, páginas ??–?? WITpress Southampton, Boston.
- De Oliveira, R. F. (2003). *O comportamento evolutivo de uma mancha de óleo na Baía de Ilha Grande/RJ: modelagem, análise numérica e simulações*. Tese de Doutorado, IMECC–Unicamp, Campinas/SP.
- Fay, J. A. (1969). *The spread of oil slicks on a calm sea*. In Oil on the sea, páginas 53–63. D. P. Hoult (ed.), Plenum Press, N. York.
- Fay, J. A. (1970). *Physical processes in the spread oil slick on a water surface*. In Proceedings of Conference on Prevention and Control of Oil Spills, páginas 463–467. API, Washington, DC.
- Marchuk, G. I. (1986). *Mathematical models in environmental problems*, volume 16 of *Studies in Mathematical and its Applications*. North-Holland, Amsterdam.
- Meyer, J. F. C. A., Cantão, R. F., e Poffo, I. R. F. (1998). *Oil spill movement in coastal seas: modelling and numerical simulations*. In Oil and Hydrocarbon Spills, Modelling, Analysis and Control, páginas 23–32. Computational Mechanics Publications, WITpress.
- Okubo, A. (1980). *Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models*. Springer, Berlin.
- Poffo, I. R. F. (2000). *Vazamentos de Óleo no Litoral Norte do Estado de São Paulo: Análise Histórica*. Tese de Doutorado, USP, São Paulo/SP.

Signorini, S. R. (1980a). A study of the circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba. Part I: A survey of the circulation in based on experimental field data. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 29(1):41–55.

Signorini, S. R. (1980b). A study of the circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba. Part II: An assessment to the tidally and wind-driven circulation using a finite element numerical model. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 29(1):57–68.

