

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

R.F. OLIVEIRA, Departamento de Matemática, ICE, UFRRJ, 23890-000 Seropédica, RJ, Brasil

J.F.C.A. MEYER, Departamento de Matemática Aplicada, IMECC, UNICAMP, 13083-970 Campinas, SP, Brasil.

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, escolhido em função do importante terminal petrolífero.

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 de dois corpos aquáticos separados por um canal formado pelo estreitamento entre o continente e uma ilha, a Ilha Grande. Mahiques, citado por Corrêa (1994), 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 $23^{\circ}03'38''$ S e longitude $44^{\circ}13'10''$ 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 (citada por [9]), 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 ([3],[4]), 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.

O modelo considera o fenômeno na segunda fase, a de espalhamento viscoso. Ou seja, passadas algumas horas após o início do derrame, 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. Considere-se 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 ([5], [7]).

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-advecção-reação

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \operatorname{div}(-\alpha \nabla u + Wu) + \rho u = f. \quad (2.1)$$

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 (2.1) 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:

$$u|_{\Gamma_2} = 0, \quad -\alpha \frac{\partial u}{\partial \eta}|_{\Gamma_1} = p(W \bullet \eta)u = pW_\eta u \quad \text{e} \quad -\alpha \frac{\partial u}{\partial \eta}|_{\Gamma_0} = 0. \quad (2.2)$$

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 (2.1)-(2.2), 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

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

A discussão sobre a existência e unicidade de solução para o problema em sua formulação variacional pode ser vista em [8].

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

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

para $\forall v_h \in V_h$. Está 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 ([1]), 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 [10] e em [11] e nos levou a considerar, para o modelo de simulação, W_p obtido do problema de Stokes

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

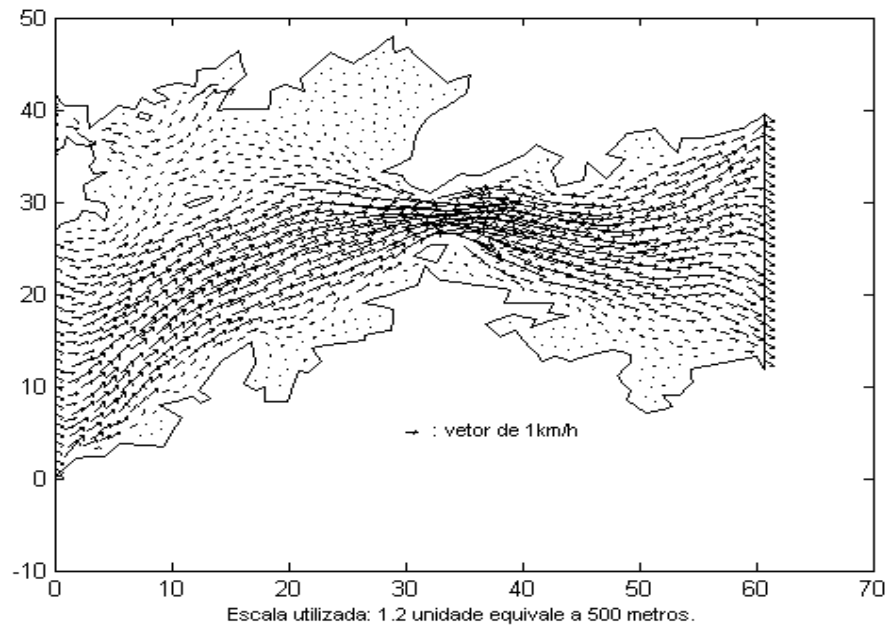


Figura 1: A circulação padrão, com ausência de ventos.

As condições de fronteira foram quase que inteiramente retiradas de [10] e [11]. 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.

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 freqüentes 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.

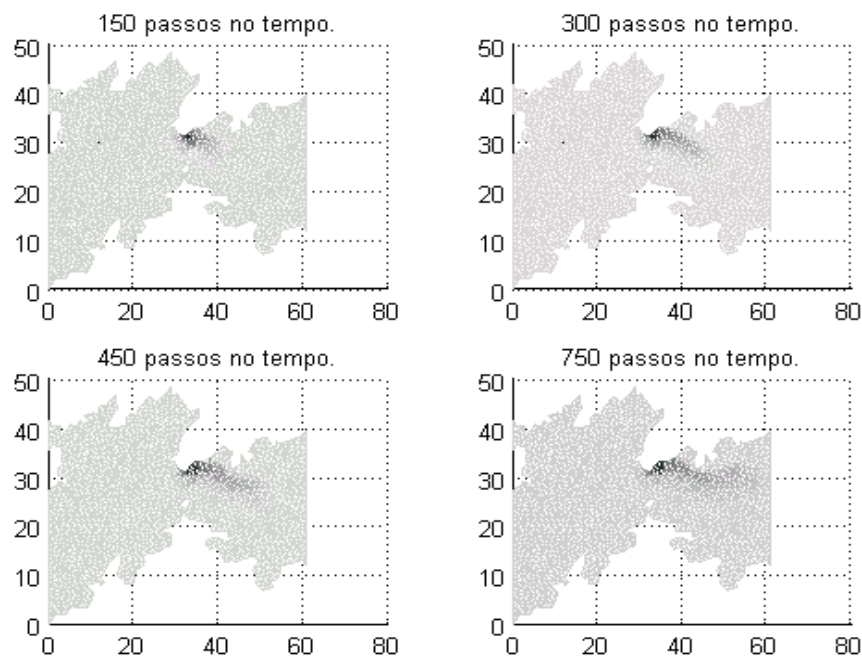


Figura 2: Fonte no Terminal e Calmaria

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

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.

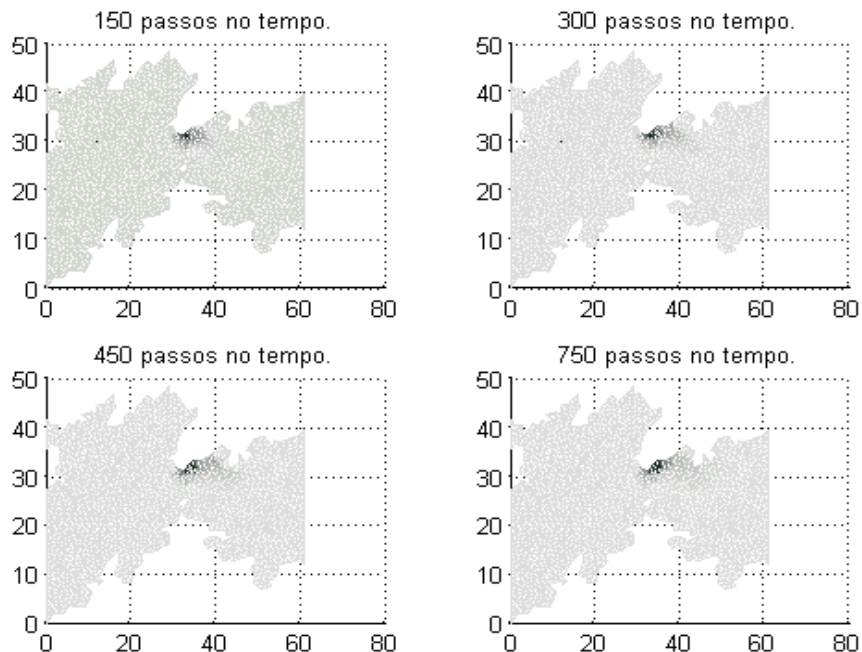


Figura 3: Fonte no Terminal e Vento de Sudeste

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. O vento foi suposto de sudoeste, ocorrência comum na 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.

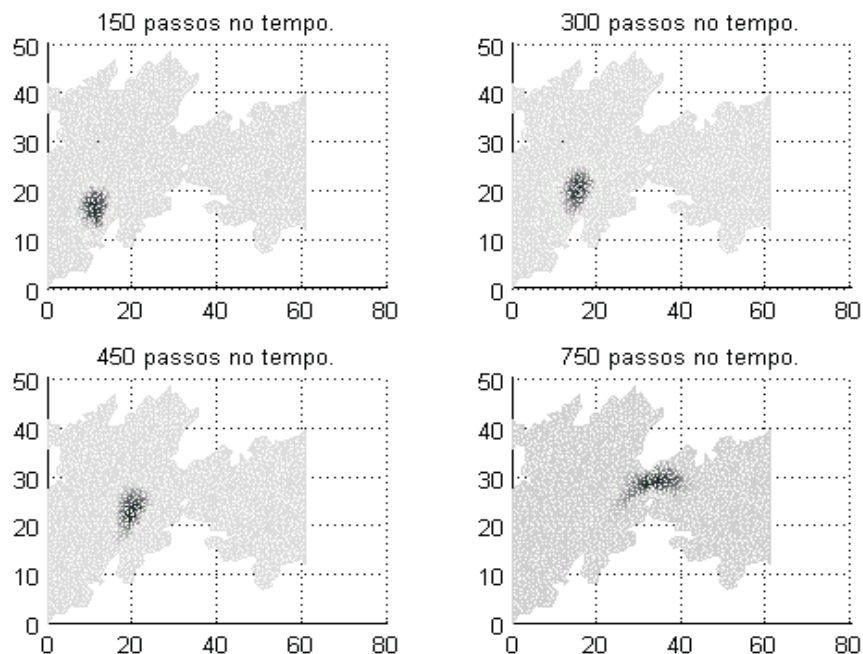


Figura 4: Mancha Inicial e Vento de Sudoeste

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 ([9]).

Os motivos para se aceitar qualitativamente os resultados do programa não se devem apenas a resultados teóricos de convergência, obtidos em [8], mas também a ensaios anteriores em outros cenários ([2], [6]).

Abstract. Most of the published work in the realm of the oil spills can be generally divided into three great categories. The first one considers the oil after it has occurred, describing movement, causes and effects, besides elaborating on available data. The second group is that of oil spill description during the fact, including descriptive and analytical testimonies of the fact. In the third group, in which we can insert this present paper, an a priori modelling effort is generally presented, with the definition of possible or probable scenarios, simulating the movement of oil slicks in space and time. This is what we present in this paper: an evolutionary model of oil slick movement considering both space variables x and y , as well as the time

variable t , modelling the oil concentration $u = u(t, \mathbf{x})$. The chosen mathematical instruments are the Stokes equation in describing local circulation maps, and the diffusion-advection-reaction partial differential equation for dispersal and movement. The chosen domain is that of the central channel in Ilha Grande Bay, located on the southern Brazilian coast, and where an important oil terminal is located.

Referências

- [1] A.N. Brooks, J.R. Hughes, Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the Navier-Stokes equations, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **32** (1982), 199-259.
- [2] R.F. Cantão, R.F. De Oliveira e J.F.C.A. Meyer, *Numerical simulation of an oil spill accident in Guanabara*, "Environmental Coastal Regions III", WITpress Southampton, Boston, 2000.
- [3] J.A. Fay, The spread of oil slicks on a calm sea, "Oil on the sea", ed. D.P. Hoult. Plenum Press, New York, pp. 53-63, 1969.
- [4] J.A. Fay, Physical processes in the spread oil slick on a water surface, "Proceedings of Conference on Prevention and Control of Oil Spills", API, Washington, DC, pp. 463-467, 1970.
- [5] G.I. Marchuk, "Mathematical Models in Environmental Problems", Studies in Mathematics and its Applications, vol. 16, North-Holland, 1986.
- [6] J.F.C.A. Meyer, R.F. Cantão e I.R.F. Poffo, Oil spill movement in coastal seas: modelling and numerical simulations, "Oil and Hydrocarbon Spills, Modelling, Analysis and Control", pp. 23-32, WITpress, Computational Mechanics Publications, 1998.
- [7] A. Okubo, "Diffusion and Ecological Problems: Mathematical Models", Berlin Heidelberg New York: Springer, 1980.
- [8] R.F. Oliveira, "O Comportamento Evolutivo de Uma Mancha de Óleo na Baía de Ilha Grande, RJ: Modelagem, Análise Numérica e Simulações", Tese de Doutorado, IMECC, UNICAMP, 2003.
- [9] I.R.F. Poffo, "Vazamentos de Óleo no Litoral Norte do Estado de São Paulo: Análise Histórica", Tese de Doutorado, USP, 2000.
- [10] S.R. Signorini, 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*, USP, São Paulo, **29**, No. 1 (1980), 41-55.
- [11] S.R. Signorini, 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*, USP, São Paulo, **29**, No. 1 (1980), 57-68.