

ESTIMATIVA DO DIÂMETRO DAS GOTÍCULAS RESULTANTES DO BLOWOUT DE UM POÇO DE PETRÓLEO – ESTUDO DE SENSIBILIDADE**DIAMETER ESTIMATION FOR DROPLETS RESULTING FROM AN OIL WELL BLOWOUT – SENSITIVITY STUDY**

Jader Lugon Junior¹
Pedro Mello Paiva²
Antônio José da Silva Neto³

Resumo. O blowout de um poço de petróleo lança hidrocarbonetos para o ambiente marinho sob a forma de gotículas de óleo e bolhas de gás. Como foi possível observar no acidente da Deepwater Horizon, no Golfo do México, em 2010, parâmetros como a profundidade do vazamento, as propriedades físico-químicas do óleo, as correntes oceânicas e a dimensão das gotículas de óleo, podem impor deslocamentos horizontais significativos à pluma. O diâmetro das gotículas é fator de extrema relevância para as simulações da trajetória da pluma em subsuperfície. Porém, é um parâmetro muito difícil de ser estimado. Este trabalho é relativo a um estudo de caso empregando o módulo Water da plataforma MOHID (MOdelagem HIDrodinâmica) na região da Bacia de Campos, sendo gerados e analisados os resultados das soluções lagrangianas de vazamentos de óleo em águas profundas, para cenários de diferentes diâmetros de gotículas. Utilizando uma análise de sensibilidade, o espalhamento da mancha de óleo foi identificado como uma possível variável para estimativa do diâmetro das gotículas.

Palavras-chave: Modelagem Hidrodinâmica, Blowout, Diâmetro das Gotículas, Análise de Sensibilidade.

Abstract. *The blowout of an oil well launches hydrocarbons into the marine environment in the form of oil droplets and gas bubbles. As can be seen in the Deepwater Horizon leakage in the Gulf of Mexico in 2010, parameters such as depth*

¹ Doutor, Instituto Federal Fluminense – Macaé, RJ, Brazil, jlugonjr@gmail.com

² Mestre, Instituto Federal Fluminense – Macaé, RJ, Brazil, pedromellopaiva@gmail.com

³ Doutor, Instituto Politécnico UERJ – Nova Friburgo, RJ, Brazil, ajsneto@iprj.uerj.br

of leakage, physico-chemical properties of oil, ocean currents and oil droplet size may impose significant horizontal drift. The diameter of the droplets is extremely relevant for simulations of the trajectory of the plume in subsurface. However, it is a very difficult parameter to estimate. This work corresponds to a case study with the MOHID computational platform Water module in the Campos Basin region, being the results of the lagrangian solutions of oil leakage in deep waters analyzed for different droplet diameters scenarios. Using a sensitivity analysis, the spreading of the oil spot was identified as a possible variable to be used in the particle diameter estimation.

Keywords: *Hydrodynamic Modeling, Blowout, Droplet Diameter, Sensitivity Analysis.*

1. INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo caminha para águas cada vez mais profundas, e, mesmo com o avanço das tecnologias, os riscos de acidentes e derramamentos de óleo fazem parte da realidade desta atividade. Neste cenário, nos últimos anos, é possível observar um aumento significativo da demanda por estudos ambientais sobre o planejamento de contingências e pronto atendimento nas ocorrências de acidentes.

No ano de 2010, o vazamento decorrente da explosão da plataforma *Deepwater Horizon* no Golfo do México resultou em fortes impactos ambientais e grandes desafios para as operações de contingência. A descarga de óleo e gás a altas temperaturas e pressões, em regime turbulento, entrou em contato com a água em baixa temperatura, produzindo uma variedade de fases dispersas, incluindo pequenas partículas de óleo, bolhas de gás, emulsão de óleo e gás, e hidratos.

Apesar de ter tomado proporções catastróficas, o acidente se apresentou como um marco na revisão dos aspectos relacionados à preservação do meio ambiente, e uma rara oportunidade de aprimorar o entendimento sobre o comportamento da pluma de hidrocarbonetos gerada pelo fluxo descontrolado do poço em águas profundas.

O *blowout* de um poço de petróleo em águas profundas lança óleo e gás para o ambiente marinho sob a forma de um jato flutuante submerso. Após este lançamento, em função das interações do óleo e do gás com a massa da coluna d'água, diferentes tamanhos de gotículas e bolhas são formadas, em diferentes profundidades (Zhao et al., 2014). Gotículas maiores e menores terão diferentes velocidades de subida, em função dos efeitos de flutuabilidade. Ryerson et al. (2012) estimaram que o tempo de subida das gotículas maiores até a superfície seria de algumas horas, enquanto alguns dias ou semanas seriam necessários para as partículas menores atingirem a superfície, assim como aconteceu no acidente da *Deepwater Horizon*, em Macondo, no Golfo do México, no ano de 2010. Partículas menores podem se manter na coluna d'água por períodos prolongados devido à turbulência vertical, estratificação por densidade, ou pelo arraste das correntes oceânicas (Johansen et al., 2003).

A grande maioria dos modelos para simulação do vazamento de óleo limita-se à representação da trajetória bidimensional da mancha, considerando efeitos como a

evaporação e perda de massa devido ao intemperismo. Os modelos mais recentes buscam aperfeiçoar as previsões da trajetória ao longo da coluna d'água do óleo derramado em subsuperfície (Paiva et al., 2016).

Em casos de vazamentos em subsuperfície, o espalhamento da mancha de óleo é um processo tridimensional, regido pela dimensão das gotículas de óleo e por processos de difusão por cisalhamento (Wang et al., 2008).

Recentemente alguns trabalhos de simulação 3D vêm sendo realizados com o objetivo de melhor entender os processos envolvidos ao longo da trajetória da pluma (Paiva et al., 2016), dentre eles: o tamanho das gotículas, o arraste pelas correntes oceânicas, a flutuabilidade do óleo e o uso de dispersantes sintéticos.

Em cenários de *blowout* de poços em águas profundas ocorre o vazamento descontrolado de óleo e gás para o ambiente marinho. As bolhas de gás não tendem a ficar aprisionadas na coluna d'água por períodos muito longos devido à grande diferença de densidade e à rápida dissolução do gás na água (White e Berry, 2014). Por outro lado, os estudos numéricos de Paris et al. (2012) sugerem que as gotículas menores de óleo tendem a se separar da pluma principal a profundidades próximas de 1.000 m, em movimentos laterais significativos.

Os únicos dados experimentais de campo de plumas de *blowout* são do experimento *DeepSpill* (Johansen et al., 2003), que simulou um *blowout* na costa da Noruega, com o recurso de monitoramento submarino com ROV (*Remote Operating Vehicle*), registrando partículas com dimensões na ordem de 8 a 10 mm. Segundo Aman et al. (2015), o uso de diesel pode ter aumentado artificialmente o diâmetro das gotículas, por ser uma substância menos densa e menos viscosa que o óleo de um poço de petróleo.

O acidente da *Deepwater Horizon* corresponde ao maior vazamento de petróleo da história nas águas dos Estados Unidos, e foi a primeira vez em que os dispersantes químicos foram aplicados diretamente na cabeça do poço em *blowout*. É sabido que a adição de dispersantes reduz a tensão interfacial entre o óleo e a água, promovendo a formação de gotículas menores (Zhao et al., 2014). Os dispersantes são usados com a intenção de reduzir o diâmetro das partículas, o que pode acarretar em maior tempo de residências das partículas na coluna d'água. Isto facilita o trabalho da equipe de resposta, uma vez que há uma tendência de que o óleo chegue à superfície em regiões mais afastadas do ponto do vazamento (Socolofsky et al., 2015).

Os modelos de Johansen et al. (2003) sugerem que os diâmetros iniciais das gotas estavam na faixa entre 1 e 10 mm nos períodos em que não havia aplicação de dispersantes no vazamento da *Deepwater Horizon*. Em questão de horas, as gotículas já chegariam à superfície, tempo muito curto para uma biodegradação significativa na coluna d'água. Os dispersantes químicos reduzem a tensão superficial entre o óleo e a água. Neste mesmo estudo (Johansen et al., 2003), os resultados sugerem que, para o *blowout* da *Deepwater Horizon*, quando o fluxo foi tratado com biodispersantes, estima-se que as gotículas eram cerca de 100 vezes menores, em uma faixa entre 10 e 100 μm .

Estas partículas menores seriam as responsáveis pela formação das plumas subsuperficiais, também chamadas de intrusões, que se destacam da pluma principal (Chan et al., 2015), que podem levar algumas centenas de horas para chegar à superfície.

Zhao et al. (2014) apresentam em seu estudo a distribuição volumétrica das gotículas para os diversos diâmetros. Na proximidade do orifício da descarga, a maior parte das gotículas têm diâmetros entre 8,5 e 10 mm. O processo de quebra destas gotículas ocorre principalmente dentro dos primeiros 50 m em função das altas forças envolvidas no jato inicial. Acima dos 50 m, este efeito se reduz e a distribuição dos diâmetros começa a ficar mais estável.

A velocidade terminal de subida da gotícula é ditada pela fluatuabilidade, que depende da sua densidade, tamanho e viscosidade do fluido (Zheng et al., 2003). Como já vimos, o movimento de cada partícula é a composição da sua velocidade vertical, da contribuição das correntes oceânicas de cada instante de tempo, e de uma componente aleatória de turbulência (Lindo-Atichati et al., 2014).

Assim sendo, especialmente nos casos de vazamentos em águas profundas, a distribuição do tamanho inicial da partícula, assim como as taxas de biodegradação e dissolução, são parâmetros críticos para a confiabilidade das previsões do modelo (Socolofsky et al., 2015).

Apesar de possuírem fundamental importância na modelagem da pluma e dos mecanismos de intrusão, a estimativa destes parâmetros apresenta fortes limitações. Segundo Johansen (2000), a formação das gotículas é causada por diferentes mecanismos, dependendo da condição de fluxo da descarga. A distribuição do tamanho das partículas é melhor prevista nas condições de baixa velocidade do jato ou em fluxo disperso em tubos. Entretanto, não há uma boa

estimativa quando as gotículas são formadas por atomização, fenômeno predominante para as grandes vazões de óleo e gás típicas dos *blowouts*.

No presente estudo é realizada uma análise de sensibilidade nos resultados da modelagem de um *blowout* de petróleo na Bacia de Campos, com o objetivo de avaliar a viabilidade de se utilizar técnicas de Problemas Inversos para obtenção de estimativas para o diâmetro das gotículas. Na seção número 2, referente à metodologia, são apresentados os principais conceitos aplicados para obtenção da solução numérica, descrevendo as equações e as variáveis de entrada do problema. Na seção número 3, intitulada resultados e discussão, descreve o caso estudado, os resultados calculados e apresenta o estudo de sensibilidade. Finalmente, na seção de número 4, relativa às conclusões e trabalhos futuros, apresenta-se a interpretação do estudo realizado e também as possibilidades de aprofundamento na temática visando a sua continuidade.

2. METODOLOGIA

O MOHID Water é um módulo da plataforma MOHID (IST,2016) para simulação hidrodinâmica e transporte de constituintes em suspensão e solução. O MOHID Water tem sido aplicado em diversas regiões costeiras e estuarinas, mostrando-se capaz de simular complexas características presentes em escoamentos observados nessas regiões.

Com relação à modelagem da deriva de óleo em mar aberto com o uso do MOHID Water, podemos destacar: o estudo de Juliano et al. (2012), que realizaram a simulação do vazamento de óleo na costa sudeste brasileira, ocorrido em 2011; o trabalho de Leitão et al. (2013) na costa caribenha da Colômbia; o estudo de Paiva et al. (2017) sobre *blowout* de poços de petróleo na Bacia de Campos; e o trabalho de Campos et al. (2017) sobre o descarte de fluidos de cimentação em águas profundas.

Para o modelo utilizado no presente estudo foi imposta a solução hidrodinâmica do trabalho de Franz et al. (2016), que buscou refinar o modelo da plataforma sudeste brasileira por meio da técnica de *downscaling*, utilizando o software MOHID Water.

O conceito de traçador é utilizado pelo módulo “Lagrangiano” (IST, 2016). O resultado principal dos cálculos realizados por este módulo é a posição no espaço

(x, y, z) para cada passo de tempo (*time-step*) da simulação. O módulo “Hidrodinâmico” simula o campo de velocidades necessário ao módulo “Lagrangiano”, para calcular a trajetória das partículas de petróleo. O campo de velocidades gerado pelo módulo “Hidrodinâmico” é muito influente nos resultados obtidos nas simulações do módulo “Lagrangiano”.

O diâmetro adotado para as partículas de óleo, assim como as diferenças de viscosidade entre o óleo e a água, são fatores determinantes para o cálculo desta velocidade de empuxo, que é imposta no módulo “Lagrangiano”. Esta velocidade de subida influencia fortemente no resultado final da posição vertical da partícula, controlando o comportamento da pluma de subsuperfície, o tempo de chegada até a superfície, além da direção e extensão da dispersão horizontal da pluma. Conforme a metodologia proposta por Leitão et al. (2013), o cálculo deste parâmetro, também chamada velocidade de empuxo, é baseado na formulação apresentada por Wang et al. (2005).

A equação que determina esta velocidade de subida é função do diâmetro crítico para o cenário estudado. O diâmetro crítico das partículas pode ser calculado pela equação (1)

$$d_c = \frac{(9,52\nu)^{\frac{2}{3}}}{g^{\frac{1}{3}}\left(1-\frac{\rho_o}{\rho_w}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

onde ν é a viscosidade da água, g é a aceleração da gravidade e ρ_o e ρ_w são a densidade do óleo e da água, respectivamente.

Para gotículas de óleo menores que o diâmetro crítico, obtém-se da lei de Stokes a velocidade de empuxo (u_{LS}) que pode ser calculada pela equação (2)

$$u_{LS} = gd_g^2 \frac{\left(1-\frac{\rho_o}{\rho_w}\right)^{\frac{1}{3}}}{18\nu} \quad (2)$$

onde d_g é o diâmetro da partícula.

Para gotículas com diâmetros maiores ou iguais ao diâmetro crítico, obtém-se a partir da lei de Reynolds a equação (3) que permite calcular a velocidade (u_{LR}):

$$u_{LR} = \sqrt{\frac{8}{3}gd_g \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_w}\right)} \quad (3)$$

Os diâmetros representativos das partículas foram definidos, com base nos resultados de Zhao et al. (2014). Conforme os autores, as reduções das gotículas para os casos de injeção de dispersantes variam entre 10 e 1000 vezes. Neste estudo, assumimos que as partículas para os cenários com injeção de dispersantes reduzem os seus diâmetros em 40 vezes, fator suficiente para que todas as partículas tenham seu diâmetro reduzido abaixo do diâmetro crítico.

O principal objetivo é ilustrar o comportamento tridimensional da pluma formada para os diferentes diâmetros de partículas. Para efeito de comparação entre os resultados dos diferentes cenários, foram propostas duas métricas adaptadas do estudo de Paiva *et al.* (2017), chamadas de “deslocamento” e “espalhamento”. Na Figura 1 são representadas de forma gráfica estas duas métricas.

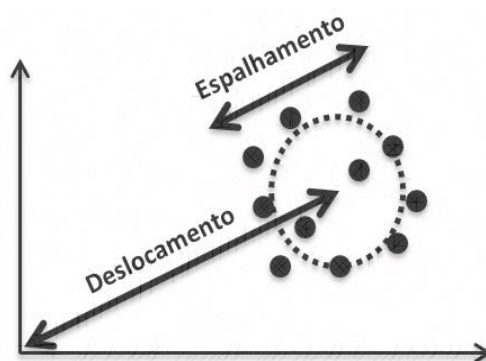


Figura 1- Representação gráfica das métricas propostas: deslocamento e espalhamento.

A métrica “deslocamento” foi proposta, com a finalidade de identificar o quanto a trajetória de subida da partícula ao longo da coluna d’água impacta nas suas coordenadas geográficas finais. Esta medida busca quantificar o distanciamento entre a média das posições das partículas para um caso específico identificado com o subscrito “i”, em relação à coordenada geográfica do poço no qual se origina o vazamento. O cálculo do deslocamento para os diferentes cenários é realizado empregando a equação (4)

$$\text{Deslocamento} = \sqrt{(\mu_{xi} - x_0)^2 + (\mu_{yi} - y_0)^2} \quad (4)$$

onde μ é a média, x_i é a longitude do cenário i , x_0 é a longitude do ponto de origem do vazamento, x_i é a latitude do cenário i e y_0 é a latitude do ponto de origem do vazamento.

Por outro lado, com o objetivo de avaliar o efeito da trajetória de subida no espalhamento das partículas, ou seja, no distanciamento destas em relação à posição média, foi proposta métrica “espalhamento”, utilizando o valor do desvio padrão da distribuição de latitudes e longitudes dos diversos cenários “ i ”. O cálculo do espalhamento relativo para os diferentes cenários é dado pela equação (5)

$$\text{Espalhamento} = \sqrt{(\sigma_{x_i} + \sigma_{y_i})^2} \quad (5)$$

onde σ é o desvio padrão, x_i e y_i representam, respectivamente, a longitude e a latitude do cenário i .

Na solução de problemas diretos, caso se tenha pouco conhecimento acerca de um parâmetro do modelo, uma propriedade física ou química ou mesmo um dado operacional, é interessante que a sensibilidade relacionada a este parâmetro seja pequena, pois assim sua influência na resposta do modelo será pequena.

Entretanto, na solução de problemas inversos, é fundamental que a sensibilidade à incógnita que se deseja determinar seja grande o bastante, fazendo com que as respostas do modelo reflitam até mesmo uma pequena mudança nos valores desta incógnita. Quando esta sensibilidade é pequena devido a alguma limitação associada ao fenômeno sob análise, ou a uma possível inadequação do modelo matemático que está sendo utilizado para representá-lo, os coeficientes de sensibilidade permitem a identificação destas dificuldades. Desta forma pode-se alterar a abordagem empregada, planejando outro experimento que permita uma maior sensibilidade às grandezas que se deseja determinar, ou desenvolvendo-se um modelo matemático mais adequado.

Esta sensibilidade pode ser avaliada pelo valor da derivada da grandeza para a qual podem ser efetuadas medidas experimentais com relação à incógnita que se deseja determinar, e recebe o nome de coeficiente de sensibilidade. Para poder comparar os valores dos coeficientes de sensibilidade para incógnitas com

diferentes unidades e magnitudes entre si, e assim determinar se um coeficiente é grande o bastante ou pequeno demais, utilizam-se os coeficientes modificados. Estes coeficientes são obtidos multiplicando-se o coeficiente de sensibilidade pelo valor estimado da incógnita, obtendo-se então todos os coeficientes com as mesmas unidades.

No problema estudado, tem como objetivo avaliar a sensibilidade da métrica proposta para espalhamento (E), em relação à variação no diâmetro das gotículas (d_g), podendo-se utilizar a equação (6) para calcular o coeficiente de sensibilidade modificado (X)

$$X = d_g \frac{\partial E}{\partial d_g} \quad (6)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os casos em que os diâmetros das gotículas estão acima do diâmetro crítico, conforme estabelecido na Eq. (1), a velocidade de subida é alta. Em questão de horas a pluma alcança a superfície, e rapidamente assume configuração muito próxima da hipótese de que todo o vazamento ocorre na superfície. Para os cenários em que se assume a injeção de dispersante, conforme considerado neste estudo, os diâmetros das partículas estão abaixo do diâmetro crítico, resultando em velocidades de subida bem baixas. Nestes cenários, um tempo de 48 horas de simulação não foi suficiente para a chegada da pluma à superfície, e o comportamento das partículas é muito semelhante ao das intrusões descritas nas seções anteriores, que ocorrem quando as gotículas ficam aprisionadas na coluna d'água por longos períodos, percorrendo grandes distâncias.

No presente estudo foram considerados na Eq. (1) os seguintes valores representativos para a aceleração da gravidade, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, viscosidade cinemática, $\nu = 1,52E - 2 \text{ cm}^2/\text{s}$, massa específica do óleo, $\rho_o = 948 \text{ kg/m}^3$ e massa específica da água, $\rho_a = 1030 \text{ kg/m}^3$, resultando no diâmetro crítico, $d_c = 0,645 \text{ mm}$.

Após as 48 horas simuladas, as posições finais de longitude e latitude das partículas de cada um dos cenários de diferentes diâmetros das gotículas foram utilizadas para o cálculo das métricas “deslocamento” e “espalhamento”, Eqs. (4) e (5), respectivamente, como pode ser visto nas Figuras 2 e 3.

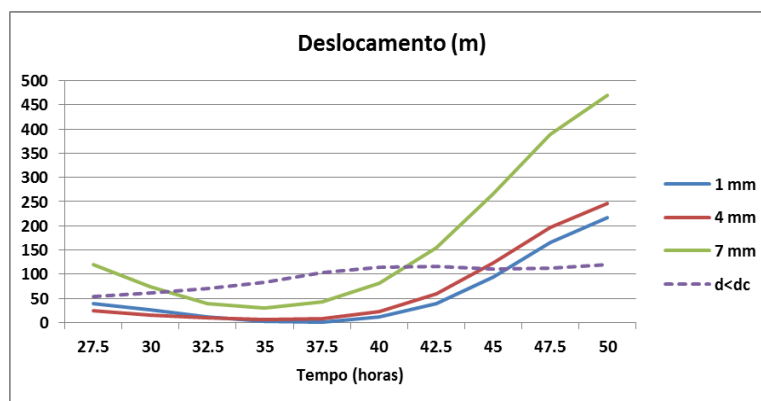


Figura 2- Deslocamento calculado para os diferentes cenários. Em função do diâmetro das gotículas (1, 4 e 7 mm).

O deslocamento calculado evidencia uma dependência desta variável relacionada às forçantes do modelo hidrodinâmico. Todas as simulações, para os diferentes diâmetros de partículas maiores que o diâmetro crítico, apresentaram inicialmente um afastamento, seguido de uma aproximação e um novo afastamento em relação à origem do vazamento. Este comportamento deve-se às variações no sentido da corrente superficial, determinadas pela hidrodinâmica do modelo.

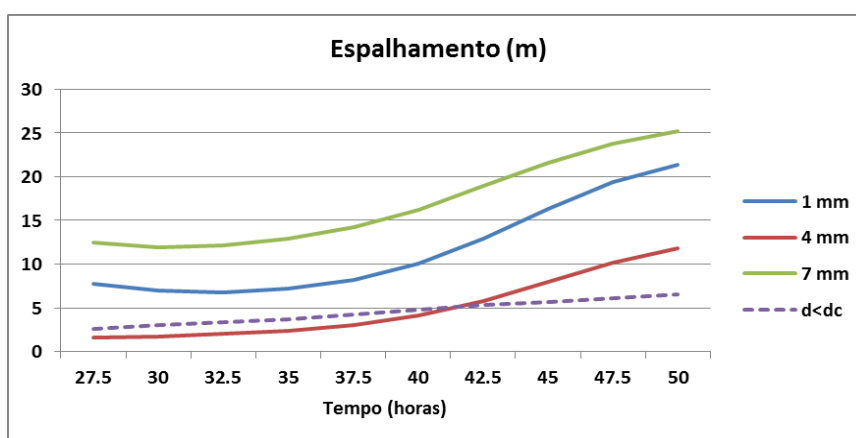


Figura 3- Espalhamento calculado para os diferentes cenários em função dos diâmetros das gotículas (1, 4 e 7 mm).

Por sua vez, o espalhamento apresentou uma tendência de aumento durante todo o período simulado, para os diferentes diâmetros de gotículas utilizados na simulação. Devido ao seu comportamento, o espalhamento se apresentou como um candidato para a proposta em estudo, i.e. estimativa do diâmetro das gotículas.

Como pode ser observado na Figura 4, as curvas do coeficiente de sensibilidade modificado correspondem a valores mais elevados para os diâmetros maiores (0,6, 2,50 e 5,50 mm), indicando uma forte sensibilidade do espalhamento às variações de diâmetros das gotículas. O cálculo do espalhamento, conforme a métrica proposta neste trabalho, apresenta-se como um parâmetro de potencial aplicação da análise de sensibilidade para estimativa do diâmetro das gotículas de *blowout* de poços de petróleo.

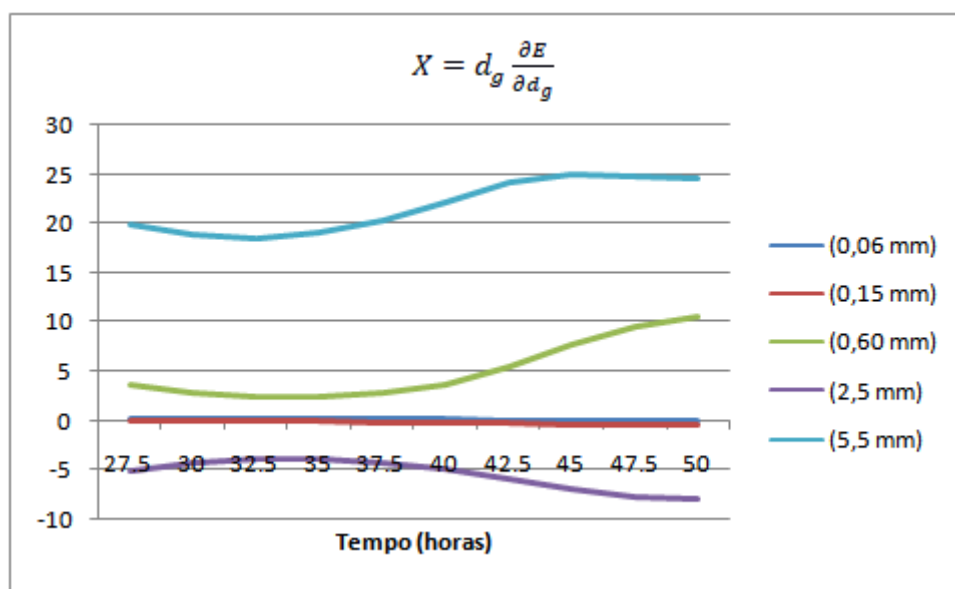


Figura 4- Coeficiente de sensibilidade escalonado (do espalhamento em relação ao diâmetro das gotículas) para os diferentes cenários, em função do diâmetro das gotículas (0,06, 0,15, 0,60, 2,50 e 5,50 mm).

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Devido às inerentes limitações para realização de experimentos de campo, há muitas incertezas sobre a adequada definição dos diâmetros das gotículas de óleo resultantes do *blowout* de poços de petróleo, e conseqüentemente da velocidade de subida. O melhor entendimento sobre o mecanismo de formação das gotículas, e sobre os efeitos da aplicação de dispersantes na dimensão destas, é fundamental para aprimorar os modelos tridimensionais de dispersão de óleo.

Para partículas com diâmetro menor que o diâmetro crítico, os parâmetros estudados (deslocamento e espalhamento) apresentaram baixa sensibilidade,

indicando menor viabilidade de uso desta abordagem na estimativa do diâmetro das gotículas, indicando a necessidade de investigação de outras metodologias.

Para partículas com diâmetro maior que o diâmetro crítico, o espalhamento apresentou uma sensibilidade maior em relação às variações nos diâmetros das gotículas, indicando potencial de uso de técnicas de Problemas Inversos para estimativa do diâmetro das gotículas. Este será o objeto de estudo em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências FAPERJ, CNPq e CAPES.

REFERÊNCIAS

Aman, Z.M., Paris, C.B., May, E.F., Johns, M.L., Lindo-Atichati, D. (2015), **High-pressure visual experimental studies of oil-in-water dispersion droplet size**. Chemical Engineering Science, v. 127, p. 392-400. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.01.058>.

Chan, G. K. Y.; Chow, A. C.; Adams, E. E. (2015), **Effects of droplet size on intrusion of sub-surface oil spills**. Environmental Fluid Mechanics, v. 15, n. 5, p. 959-973. <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9389-5>.

Campos, L.F.de, Paiva, P.M., Rodrigues, PPGW, Ferreira, M.I.P., Lugon Junior, J. (2017). **Disposal of waste from cementing operation from offshore oil and gas wells building**. Ciência e Natura, 39(2), 413-422. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X25821>.

Franz, G.A.S., Leitão, P., Santos, A., Juliano, M., Neves, R. (2016). **From regional to local scale modelling on the south-eastern Brazilian shelf: case study of Paranaguá estuarine system**. Braz. J. Oceanogr. 64, 277–294. <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-875920161195806403>.

IST (Instituto Superior Técnico) (2016). *MOHID Modelling System Description*.

Disponível

em:

<http://www.maretec.mohid.com/portugueseestuaries/Reports/MOHID_Description.pdf>. Acesso em 30 jul 2017.

Johansen, O. (2000) **DeepBlow – a lagrangian plume model for deep water blowouts**. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 6, n. 2, p. 103-111. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(00\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(00)00042-6).

Johansen, O.; Rye, H.; Cooper, C. (2003), **DeepSpill-Field study of a simulated oil and gas blowout in deep water**. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 8, n. 5-6, p. 433-443. [https://doi.org/10.1016/S1353-2561\(02\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S1353-2561(02)00123-8).

Juliano, M.M.F., Neves, R., Rodrigues, P.P.G.W., Lugon Junior, J., Fernandes, R. (2013), **Aplicação da Plataforma MOHID para simulação computacional de deriva oceânica de petróleo na bacia de Campos-RJ**. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, v. 6, n. 1, p. 161-172. <https://doi.org/10.19180/2177-4560.20120010>.

Leitão, P.C., Malhadas, M.S., Ribeiro, J., Leitão, J.C., Pierini, J., Otero, L. (2013), **An Overview for simulating the blowout of oil spills with a Three-Dimensional model approach (Caribbean Coast, Colombia)**. *Ocean Modelling for Coastal Management–Case Studies with MOHID*, edited by: Mateus, M. and Neves, R., IST PRESS, p. 97-115.

Lindo-Atichati, D., Paris, C.B., Hénaff, M.Le, Schedler, M., Juárez, A.G.V., Müller, R. (2014), **Simulating the effects of droplet size, high-pressure biodegradation, and variable flow rate on the subsea evolution of deep plumes from the Macondo blowout**. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 129, p. 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.01.011>

Paiva, P.M., Barreto, A.N., Lugon Junior, J., Campos, L.de (2016), **Modelagem computacional 3D do blowout de poço de petróleo: revisão sobre requisitos**

Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão. Paranaguá, PR, v.3, n.3, setembro de 2018.

ambientais e metodologia. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, v.10, n.1. <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v10n12016p51-71>.

Paiva, P.M., Lugon Junior, J., Barreto, A.N., Silva, J.A.F., Silva Neto, A.J. (2017). **Comparing 3d and 2d computational modeling of an oil well blowout using MOHID platform-A case study in the Campos Basin.** *Science of The Total Environment*, 595, 633-641. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.007>.

Paris, C.B., Hénaff, M.Le, Aman, Z.M., Subramaniam, A., Helgers, J., Wang, D.P., Kourafalou, V.H., Srinivasan, A. (2012), **Evolution of the Macondo well blowout: Simulating the effects of the circulation and synthetic dispersants on the subsea oil transport.** *Environmental science & technology*, v. 46, n. 24, p. 13293-13302. <https://doi.org/10.1021/es303197h>.

Ryerson, T.B., Camilli, R., Kessler, J.D., Kujawinski, E.B., Reddy, C.M., Valentine, D.L., Atlas, E., Blake, D.R., Gouw, J.de, Meinardi, Simone, Parrish, D.D., Peischl, J., Seewald, J.S., Warneke, C. (2012), **Chemical data quantify Deepwater Horizon hydrocarbon flow rate and environmental distribution.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.109, p. 20246-20253. <https://doi.org/10.1073/pnas.1110564109>

Socolofskya, S.A., Adams, E.E., Boufadel, M.C., Aman, Z.M., Johansen, Ø., Konkell, W.J., Lindo, D., Madsen, M.N., North, E.W., Paris, C.B., Rasmussen, D., Reed, M., Rønningen, P., Sim, L.H., Uhrenhold, T., Anderson, K.G., Cooper, C., Nedwed, T.J. (2015), **Intercomparison of oil spill prediction models for accidental blowout scenarios with and without subsea chemical dispersant injection.** *Marine pollution bulletin*, v. 96, n. 1, p. 110-126. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.039>.

Wang, S.D., Shen, Y.M., Guo, Y.K., Tang, J. (2008), **Three-dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas.** *Ocean Engineering*, v. 35, p. 503–510. <https://doi:10.1016/j.oceaneng.2007.12.001>

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, v. 32, p. 1556–1571. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.12.010>.

White, J.; Berry, G. (2014), **Emergency response planning for subsea hydrocarbon release using advanced engineering analysis**. In: ABU DHABI INTERNATIONAL PETROLEUM EXHIBITION AND CONFERENCE. Society of Petroleum Engineers. <https://doi.org/10.2118/172123-MS>.

Zhao, L., Boufadel, M.C., Socolofsky, S.A., Adams, E., King, T., Lee, K. (2014), **Evolution of droplets in subsea oil and gas blowouts: Development and validation of the numerical model VDROP-J**. *Marine Pollution Bulletin*, v. 83, n. 1, p. 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.04.020>.

Zheng, L.; Yapa, P. D.; Chen, F. (2003), **A model for simulating deepwater oil and gas blowouts - Part I: Theory and model formulation**. Journal of Hydraulic Research, v. 41, n. 4, p. 339-351. <https://doi.org/10.1080/00221680309499980>.

Enviado em: 06 jun. 2018

Aceito em: 09 jul. 2018

Editor responsável: Mateus das Neves Gomes