



VAZAMENTO DE ÓLEO EM UM DUTO SUBMERSO VIA CFD

Gicelia Moreira¹
Boniek Evangelista Leite²
Hortência L. Fernandes Magalhães³
Severino Rodrigues de Farias Neto⁴
Antonio Gilson Barbosa de Lima⁵

RESUMO

A indústria petrolífera utiliza tubulações para transportar óleo por longas distâncias. O processo produtivo de petróleo está submetido a riscos de acidentes, podendo ocasionar derramamento de óleo com danos elevados ou irreparáveis a natureza. Vazamentos de óleo em ambientes submarinos tem uma dinâmica diferente dos acidentes ambientais terrestres. Diante desse cenário, compreender o comportamento desses fluidos no ambiente marinho é de suma importância para tomadas de decisões, destinadas a contenção de vazamentos e minimização de danos a fauna e flora marinha. Portanto, esse trabalho tem como objetivo avaliar o vazamento de óleo em um oleoduto submerso empregando CFD. Na metodologia, uma tubulação submersa de 10 m de comprimento e submersa e 20 m de coluna de água constitui o domínio físico. Além disso, uma malha computacional hexaédrica com 139.488 elementos foi confeccionada usando o software ICEM-CFD 15.0. Na modelagem matemática, o modelo de superfície livre e o modelo de turbulência k-ε padrão foram usados para descrever o escoamento bifásico (água/óleo). Nas simulações realizadas, foram variadas a velocidade de entrada juntamente com a pressão de saída da tubulação. Os resultados mostram que o modelo proposto foi capaz de prever adequadamente o escoamento água/óleo na tubulação com vazamento, assim como demonstram que a velocidade de entrada do óleo aumenta a perda de carga na tubulação com vazamento.

Palavras-chave: Vazamento, Óleo, Água, Simulação numérica, CFD.

INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera utiliza comumente tubulações para transportar óleo e gás natural por longas distâncias, sendo considerado o transporte mais eficiente para grandes volumes de fluidos. A crescente demanda por petróleo traz a necessidade de descoberta de novas reservas, sendo necessário esforços para viabilizar a produção em reservatórios cada vez mais profundos. A produção de petróleo e gás natural em campos offshore é caracterizada pelo escoamento multifásico em tubulações, e estas são interligadas por vários equipamentos como cabeças de poços, bombas, compressores, plataformas de processamento, entre outros.

¹ Doutoranda do Curso de Eng. Química da Universidade Federal - UFCG, gicelia.moreira@eq.ufcg.edu.br

² Doutoranda do Curso de Eng. Química da Universidade Federal - UFCG, hortencia.luma@gmail.com

³ Doutor do Curso de Eng. de Processos da Universidade Estadual - UECG, boniek3@gmail.com

⁴ Professor orientador: Dr., da Universidade Federal – UFCG, severino.rodrigues@eq.ufcg.edu.br

⁵ Professor orientador: Dr., da Universidade Federal – UFCG, antonio.gilson@ufcg.edu.br



Zhu et al. (2014), ao estudar o derramamento de óleo, analisaram o processo e as características de migração de óleo inicialmente contido em um duto submarino e sua dispersão até a superfície livre, levando em conta a influência da densidade do óleo, da velocidade da corrente, do tamanho do vazamento e de outros parâmetros na condição de subcorrente da migração de óleo. Utilizando o software CFX, Tavares (2016) e Moreira et al., (2020), avaliaram a dispersão de óleo em água rasas, sendo avaliados parâmetros de pressão, velocidade da correnteza, adotando o modelo de turbulência o $k-\epsilon$ padrão e o modelo de superfície livre.

Jiang et al. (2016a; 2016b), investigaram as características de derramamento de óleo utilizando o modelo VOF e o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Esses autores, analisaram o vazamento de óleo através de simulação numérica, validando seu modelo matemático pela comparação dos resultados obtidos nas simulações com dados experimentais, atingindo uma boa concordância de dados. Posteriormente, Zhu et al. (2017a; 2017b) investigaram diferentes condições em ambiente marinho, como por exemplo, água parada, surgimento de onda e corrente combinada com a condição de onda. Além disso, esses autores analisaram a influência da densidade do óleo, viscosidade do óleo e fluxo de vazamento sobre características de espalhamento de óleo e processo de deriva.

Estudar os processos de vazamento em tubulações submersas é primordial para auxiliar a tomada de decisão em acidentes reais. Nesse contexto, a fluidodinâmica computacional (Computational Fluid Dynamics) é uma poderosa ferramenta para auxiliar o desenvolvimento de pesquisas nessa área. Porém, a técnica de fluidodinâmica computacional é uma poderosa ferramenta para auxiliar na tomada de decisões em casos de acidentes reais como também, para simular situações de vazamentos ajudando a criar plano de contingência para desastres reais, diante deste cenário, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o vazamento de óleo em um oleoduto submerso através da simulação numérica via CFD.



METODOLOGIA

O problema físico analisado consiste de uma tubulação submersa em um domínio bidimensional, com 20 m de comprimento e 10 m de altura (Figura 1). No interior da tubulação ocorre o escoamento do óleo e na região acima da tubulação o escoamento da água. O tubo possui um diâmetro de 0,2 m sendo a espessura da parede de 0,02 m e um furo de 0,02 m de diâmetro localizado a 10 m da seção de entrada da tubulação.

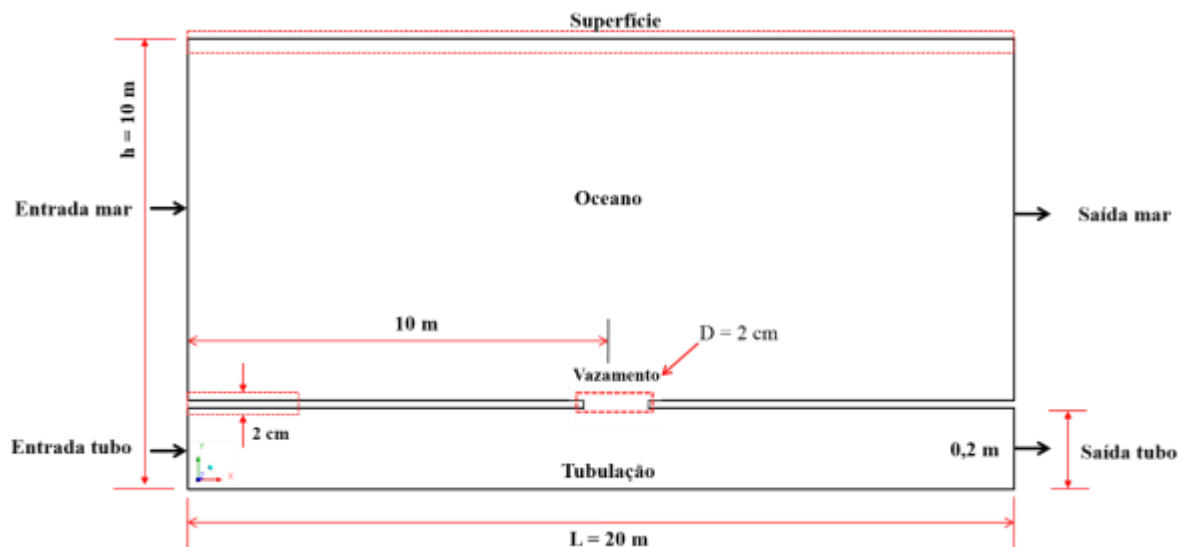


Figura 1: Domínio físico analisado.

A malha computacional que representa o domínio, foi gerada utilizando o software ICEM-CFD presente no pacote computacional da Ansys 15.0. Na Figura 2, pode ser vista a malha numérica gerada com 13.9488 elementos hexaédricos e 93.666 pontos nodais, com destaque para as regiões de tubulação e vazamento.

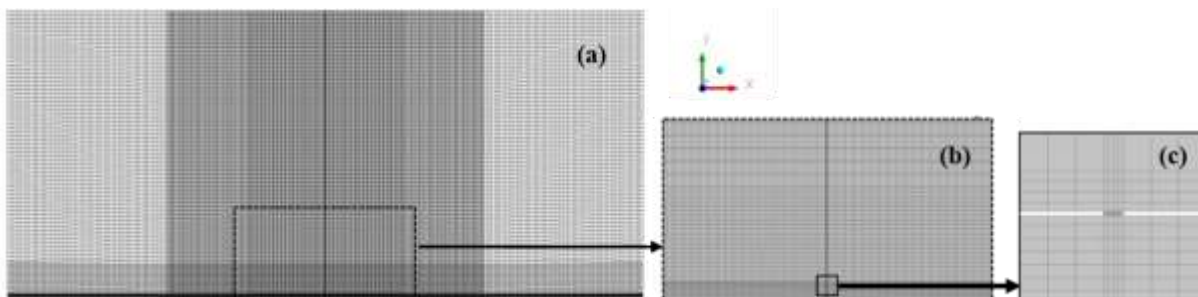


Figura 2: (a) Malha numérica do domínio físico analisado; (b) Região central do domínio físico e (c) Região do vazamento.



Modelo matemático

Adotou-se o modelo de superfície livre para analisar o escoamento bifásico água-óleo, adotando as seguintes considerações:

- Escoamento isotérmico em regime laminar no interior da tubulação;
- Escoamento isotérmico em regime turbulento transiente no domínio mar;
- Domínio bidimensional;
- Não há transferência de massa entre as fases;
- Propriedades físico-químicas dos fluidos constantes;
- Coeficiente de arraste constante e igual a 0,44;
- Adotou-se o modelo de turbulência k- ϵ padrão no domínio mar;
- Adotou-se uma pressão de referência igual a 1 atm;
- Adotou-se tubulação lisa (rugosidade nula).

Desconsiderando o termo fonte de massa $S_{MS\alpha}$ e o termo de difusividade mássica por unidade de volume da fase β para a fase α , $\Gamma_{\alpha\beta}$, a equação de conservação da massa da mistura é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_{\alpha}\rho_{\alpha}) + \nabla(f_{\alpha}\rho_{\alpha}\vec{U}_{\alpha}) = 0 \quad (1)$$

onde, ρ , f e U são respectivamente a massa específica, fração volumétrica e o vetor velocidade da fase α , $S_{MS\alpha}$ representa os termos de fonte de massa, os subíndices α e β correspondem às fases envolvidas no escoamento multifásico.

Conservação do momento linear:

A equação da conservação do momento é dada por:



$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) + \nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = \\ -f_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot \{f_\alpha \mu_\alpha [\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T]\} + \vec{M}_\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

onde ρ e μ são a densidade e a viscosidade da fase α , respectivamente. O Termo \vec{M}_α , correspondente as forças interfaciais sendo escritas como:

$$\vec{M}_\alpha = \frac{3}{4} \frac{C_D}{dp} f_\beta \rho_\alpha |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (3)$$

As equações de fechamento aplicadas para as equações de conservação podem ser inseridas em diferentes formas. Para a equação da continuidade, a soma das frações volumétricas da fase contínua é igual a 1. Para a equação de transferência de quantidade de movimento o fechamento é feito pela força que atua entre as fases sendo expresso pelo coeficiente de arraste (ANSYS, 2015).

Uma outra consideração adotada para o modelo matemático é o modelo de superfície livre, onde, para duas fases presentes na mistura, a equação usada para o cálculo da densidade de área interfacial é dada por:

$$A_{\alpha\beta} = |\nabla f_\alpha| \quad (4)$$

Quando tem-se mais de duas fases presentes no escoamento, utiliza-se a seguinte equação:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{2|\nabla f_\alpha| |\nabla f_\beta|}{|\nabla f_\alpha| + |\nabla f_\beta|} \quad (5)$$

Modelo de turbulência k- ϵ padrão

Para todos os casos estudados e considerando ambas as fases (água/óleo) como sendo contínuas, utilizou-se o modelo de turbulência k - ϵ padrão. Onde, a equação da energia cinética turbulenta é dada por:



$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \left[\rho_\alpha \vec{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (6)$$

onde k é a energia turbulenta, ε é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, μ_t é a viscosidade turbulenta, σ_k é uma constante empírica de valor igual a 1.

A taxa de dissipação turbulenta é dada por:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha \varepsilon_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (7)$$

onde G_α é a geração de energia cinética no interior da fase α , f_α é a fração volumétrica da fase α , e C_1 , C_2 , σ_k , σ_ε são constantes empíricas de valores iguais a 1.44, 1.92, 1.0 e 1.3 respectivamente.

Condições iniciais e de contorno

Para os casos isotérmicos, considerou-se apenas o óleo escoando no interior da tubulação, assumindo o comportamento completamente desenvolvido (Equação 8). As condições iniciais e de contorno adotadas, estão representadas na Figura 3.

$$U_o = U_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad \text{Re} < 2300 \quad (8)$$

Para o domínio externo a tubulação (mar) considerou-se água parada de acordo com as condições adotadas (Figura 3). Sendo adotada a seguinte equação:

$$U_{e,m} = \frac{U_{\max}}{3} \quad (9)$$

onde, $U_{e,m}$ é a velocidade de entrada mar; U_{\max} é o valor máximo de velocidade da água na correnteza e 3 é um parâmetro de referência de velocidade da água. As simulações foram realizadas adotando-se duas situações: a primeira em regime laminar e a segunda em regime transiente, condições iniciais e de contorno adotadas para entrada e saída da tubulação,



paredes e faces frontal e traseira da tubulação e da correnteza marítima estão representados na Figura 3.

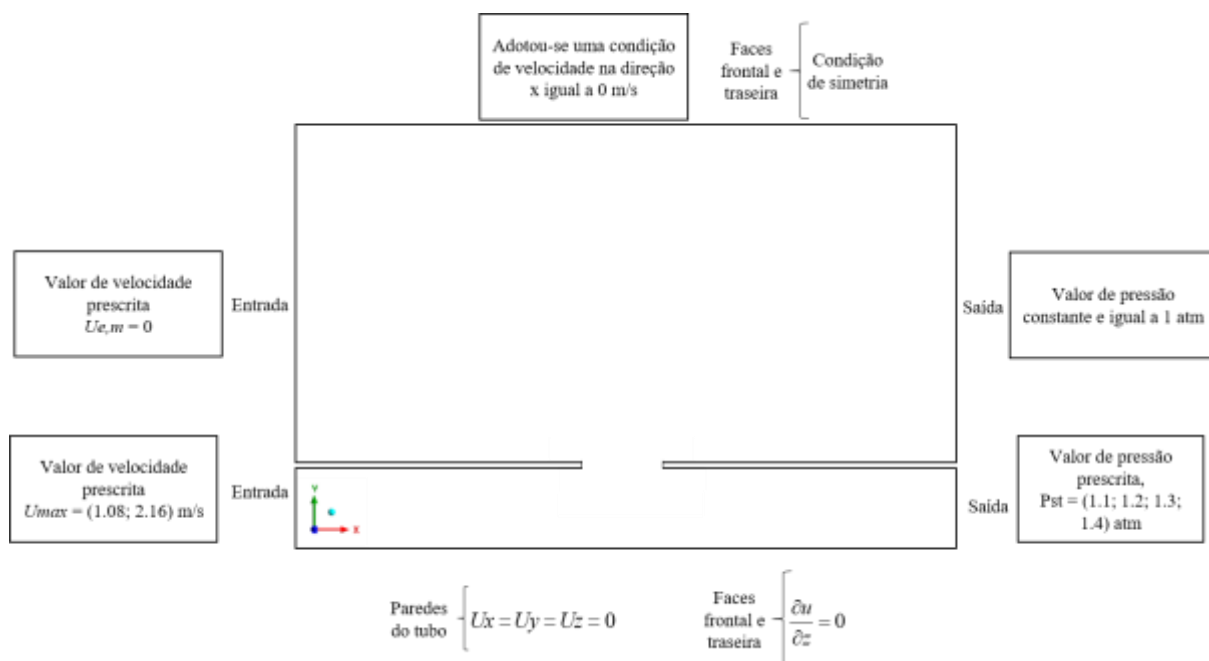


Figura 3: Condições iniciais e de contorno adotadas para o domínio da tubulação e mar.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas dos fluidos adotados para simulação.

Propriedades Físico-químicas	Água	Óleo
Densidade (kg/m^3)	997 ⁽¹⁾	925,5 ⁽²⁾
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	0,000889 ⁽¹⁾	0,1 ⁽³⁾
Tensão superficial (N/m)	0,07 ⁽¹⁾	

Fonte: Rodriguez ⁽¹⁾; Banco de dados do Ansys CFX[®] ⁽²⁾; Açikgöz *et al.* *apud* Paladino ⁽³⁾

Tabela 2 - Representações das considerações adotadas para o problema físico.

Caso	Velocidade de entrada tubo (U_{max}) m/s	Pressão na saída do tubo ($P_{s,t}$) atm	Velocidade de entrada mar ($U_{e,m}$) m/s
1	2,16	1.1	0
2	1,08	1.2	0
3	1,08	1.3	0
4	1,08	1.4	0



Para os casos estudados são aplicadas condições de contorno em todo domínio físico, equações de conservação da massa e momento linear para resolução, um critério de convergência de 10^{-6} Kg/s para o resíduo. As propriedades físico-químicas dos fluidos adotados e as condições de contorno aplicadas para o problema encontram-se nas Tabelas 1 e 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

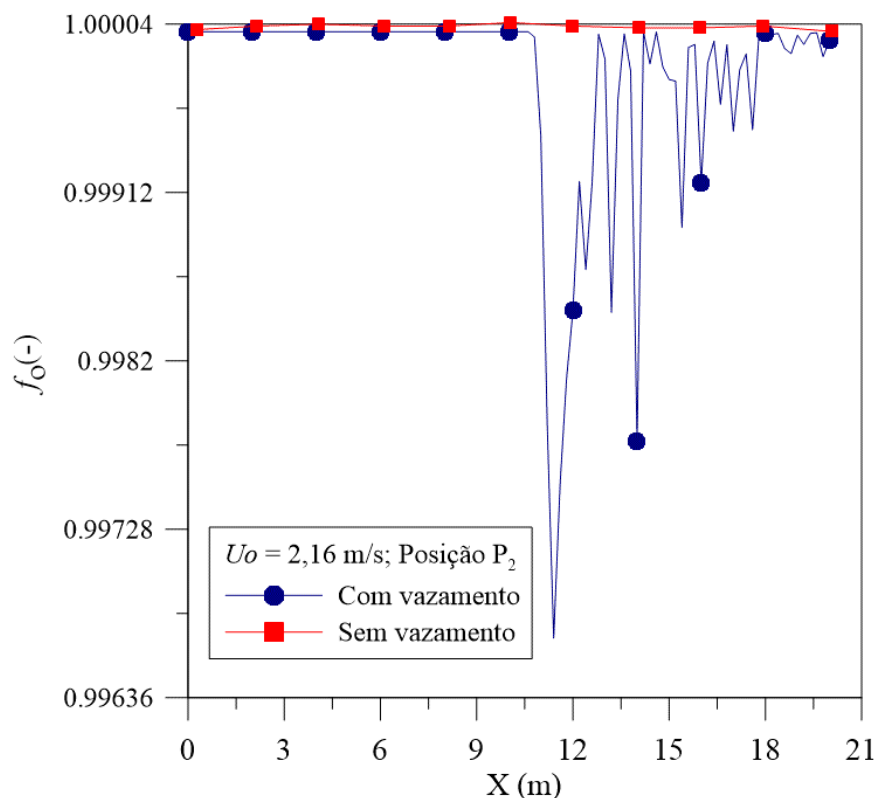
Os casos avaliados nesta pesquisa têm por objetivo analisar o comportamento da vazão de uma tubulação de transporte de óleo em um escoamento bifásico, isotérmico, antes e depois do vazamento em toda a correnteza marítima.

Com objetivo de analisar a pressão, pressão total, velocidade superficial e fração volumétrica das fases ao longo de todo domínio de estudo com e sem vazamento, sobre planos transversais, foram definidas diferentes posições, as quais são representados os perfis de pressão, velocidade superficial e de fração volumétrica.

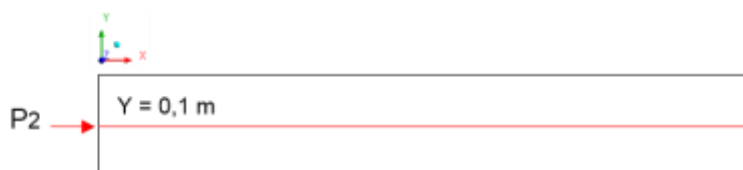
Efeito da presença do vazamento

A Figura 4 apresentam a distribuição da fração volumétrica do óleo no tubo para a correnteza, nas posições P_2 e P_4 , referente ao caso 1 com e sem vazamento. Observa-se que, para o caso com vazamento a 10 m da entrada do tubo, região em que se encontra o furo, ocorre uma queda na fração de óleo indicando a entrada de água na tubulação, permanecendo ao longo da tubulação em direção a saída do tubo. Para a análise sem vazamento, a fração de óleo se mantém constante e igual a 1, ou seja, não há entrada de água no tubo.

A Figura 5 apresenta a distribuição da fração volumétrica do óleo para os casos 1 e 2 na posição P_{10} ($y = 0,202$ m) em um tempo de 5 s (caso 1). Pode-se observar, o comportamento da fase secundária no orifício de vazamento. Percebe-se que entre 10 m e 10,01 m há um aumento da fração de óleo até um valor máximo, indicando que a saída ou vazamento de óleo do tubo para o domínio mar ocorre preferencialmente a partir do centro do orifício de vazamento ($x = 10$ m) com sentido do escoamento da esquerda pra direita, ou seja, no sentido da montante para a jusante.



(a)



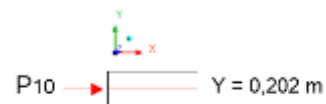
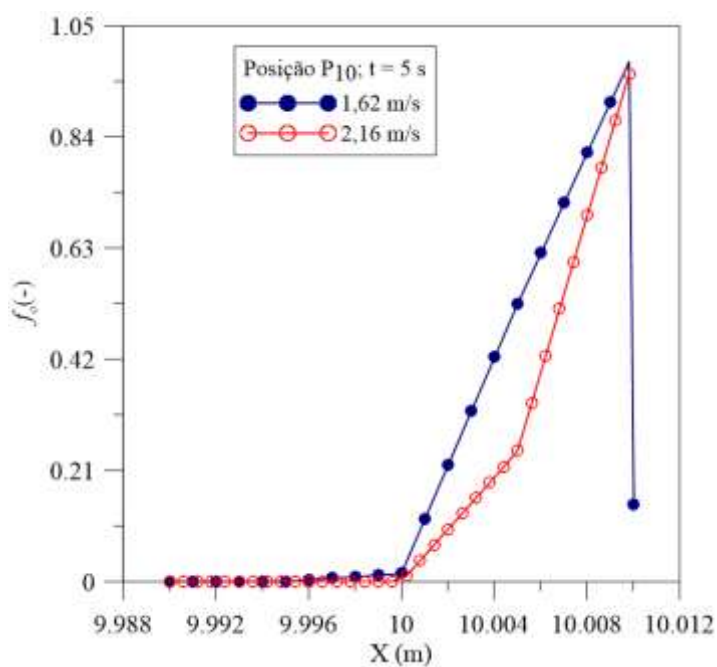
(b)

Figura 4: Distribuição da fração volumétrica do óleo, no tubo, posição P_2 , ($t = 10$ s, caso 1) e (b) posição de medição do parâmetro P_2 .

3.3. Efeito da presença do vazamento

A Figura 6 mostra a evolução da velocidade superficial do óleo com o tempo na posição P_2 ($y = 0,1$ m) caso 1. Observa-se que, à medida que aumenta o tempo, menor é a diferença de velocidade do escoamento, este fato é explicado pela condição inicial adotada com valor máximo no centro do tubo nos tempos de 1 a 5 s.

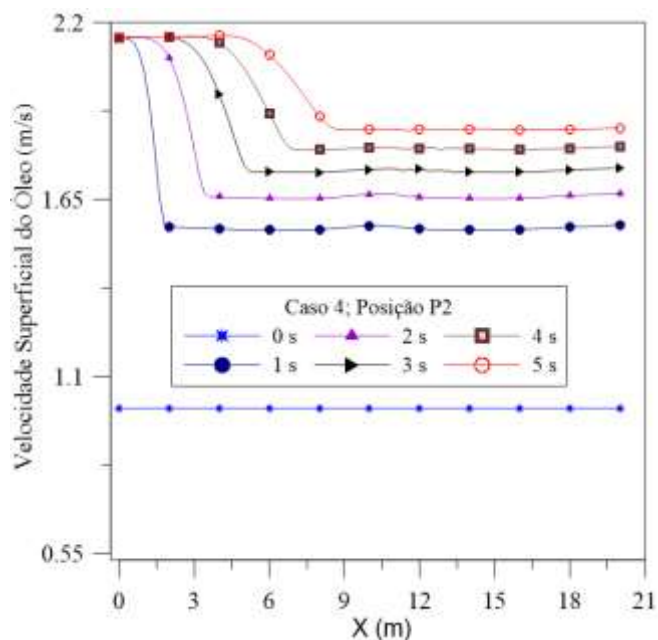
A Figura 7 apresenta o comportamento da pressão total a 1 m antes, no centro e 1 m após o vazamento (posição P_{11} , P_{12} e P_{13}) na tubulação, considerando uma pressão prescrita de 1.1 atm na saída do tubo (caso 4). Pode-se observar que, a pressão total é proporcional a cada posição transversal. Para a região em que se encontra o furo, posição P_{12} , também com pressão prescrita na saída do tubo a pressão total aumenta.



(a)

(b)

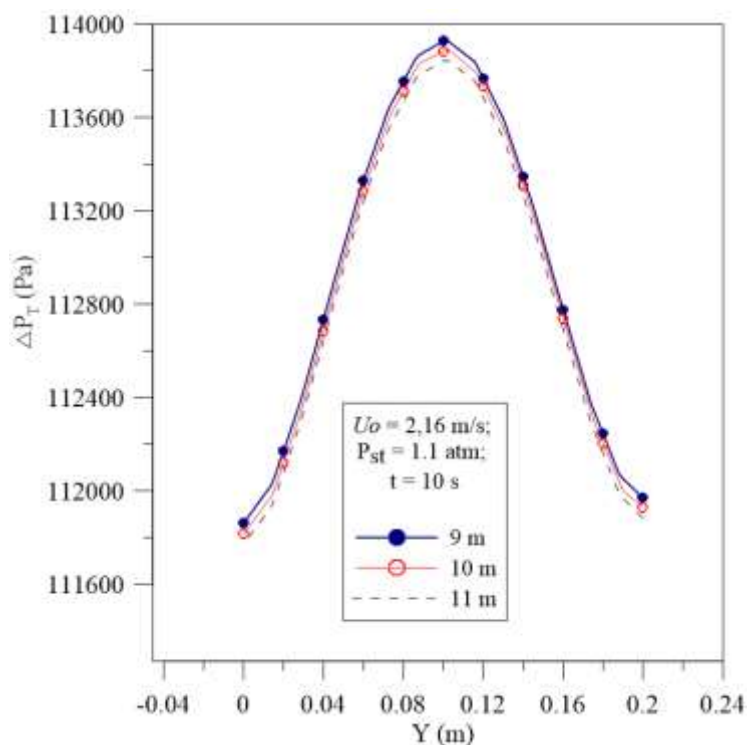
Figura 5: (a) Distribuição da fração volumétrica do óleo, na posição 10, para diferentes velocidades do óleo ($t = 5$ s) e (b) posição de medição do parâmetro P10 (Caso 1).



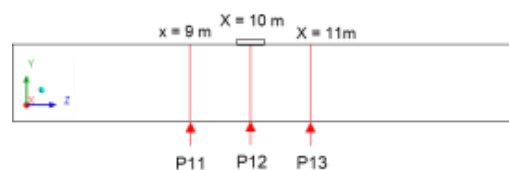
(a)

(b)

Figura 6: Evolução da velocidade superficial do óleo no duto em diferentes tempos (caso 1).



(a)



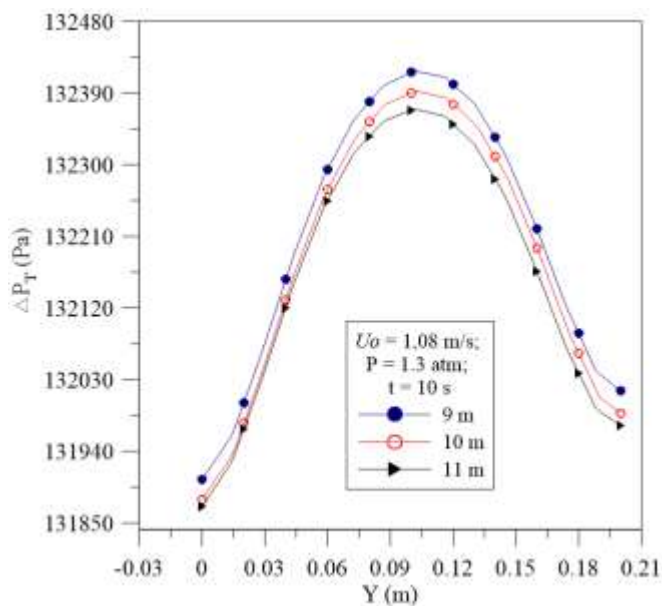
(b)

Figura 7: Distribuição radial da pressão total, antes, durante e após o vazamento, (caso 1, $t = 5$ s).

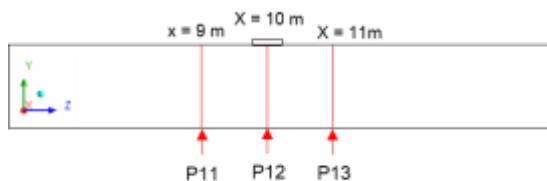
Influência da pressão na região do vazamento

Na Figura 8, pode-se observar a distribuição de pressão em função do raio do tubo a (9, 10 e 11) m da entrada quando adotada uma pressão na saída igual a 1.3 atm (caso 3). Observa-se uma redução da pressão e que praticamente não há mudança no comportamento do perfil de pressão mesmo na presença de vazamento.

A Figura 9 ilustra o comportamento da pressão total para três pressões prescritas na saída do tubo no tempo igual a 10 s (posição P_{12}) no tubo passando pelo centro do orifício de vazamento (casos 2, 3 e 4). Pode ser observado que quanto maior for a pressão prescrita na saída do tubo maior é a pressão total para esta posição.

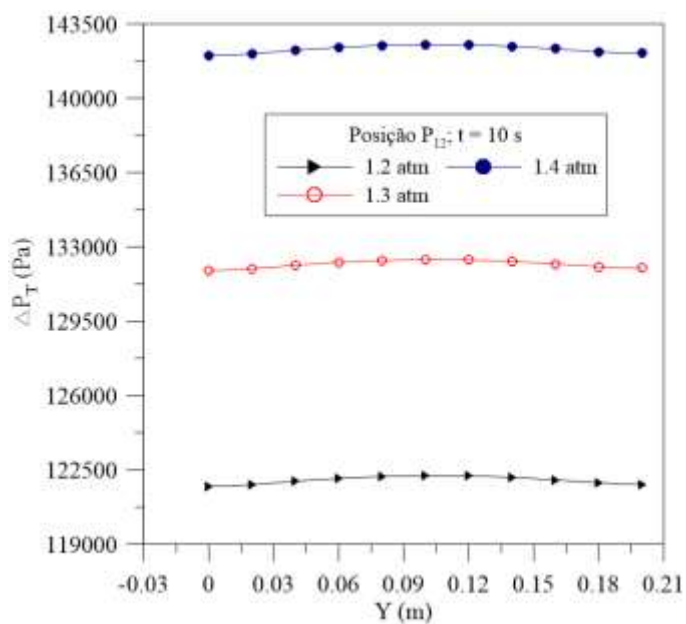


(a)

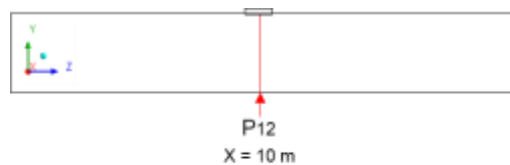


(b)

Figura 8: Distribuição radial da pressão total, antes, durante e depois do vazamento (caso 3, $t = 10$ s) e (b) posições de medição dos parâmetros P_{11} , P_{12} e P_{13} .



(a)



(b)

Figura 9: Distribuição radial da pressão total, na posição do vazamento, no tempo $t = 10$ s (casos 2, 3 e 4) e (b) posição de medição do parâmetro P_{12} .



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foi possível avaliar o escoamento transiente, isotérmico de óleo em um domínio horizontal com e sem vazamento, podendo concluir que:

O modelo proposto e analisado, mostrou resultados de campo de pressão, fração volumétrica e velocidade superficial das fases que representam bem a física do problema;

Os resultados numéricos do escoamento monofásico de óleo mostraram-se coerentes com os resultados teóricos, onde o vazamento tem grande influência no campo de pressão total;

O aumento da velocidade do óleo no tubo acarreta um decréscimo da pressão, onde, quanto maior for a velocidade do óleo na entrada da tubulação maior é a diferença de pressão total ao longo do tubo;

As condições de contorno de pressão na saída da tubulação não têm influência significativa sobre o comportamento do óleo no interior do tubo;

Nas regiões próximas ao orifício de vazamento ocorre as maiores quedas de fração volumétricas das fases.



REFERÊNCIAS

AÇIKGÖZ, M.; FRANCA, F.; LAHEY, J.; An Experimental Study of Three Phase Flow Regimes. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 18, n. 3, p. 327-336, 1992.

ANSYS Inc., CFX-Theory Manual Guide, 2015.

JIANG, M.R., Li, Z.G., Yu, J.X., Yu, H.J., Jiang, Y., 2016a. A $k-\epsilon$ turbulence model for subseapipeline oil spill numerical simulation. *Proceedings of the 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*. Rhodes.

JIANG, M.R., Li, Z.G., Yu, J.X., 2016b. Effect of grid density on numerical result for oilleakage from subsea pipeline. *J. Tianjin Univ. (Sci. Technol.)* 49 (9), 1–8.

MOREIRA, G.; MAGALHÃES, H. L. F., TAVARES, D. P. S. A.; CORREIA, B. R. B; LEITE, B. E.; PEREIRA, A. B. C; FARIAS NETO, S. R.; LIMA, A.G.B. Fluid Leakage in Submerged Offshore Pipeline: An Analysis of Oil Dispersion in Seawater. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2020, v.10, p. 95-121. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2020.102007>

RODRIGUEZ, O. M. H.; Forma da Interface e Gradiente de Pressão no Padrão Líquido-Líquido Anular Vertical Ascendente. Tese de Doutorado, Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, 239 f.: il. color. Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2002.

TAVARES, D. P. S. A.; Fluidodinâmica Da Dispersão De Óleo A Partir De Vazamento Em Riser Submarino Tipo Catenária: Análise De Plumás Multifásicas. Tese de Doutorado, Pós-Graduação de Engenharia Química, 141 f.: il. color. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande/PB, 2016.

ZHU, H.; YOU, J.; ZHAO, H. An experimental investigation of underwater spread of oil spill in a shear flow. *Marine Pollution Bulletin*, Edição 116, páginas 156–166, 2017a.

ZHU, H.; YOU, J.; ZHAO, H. Underwater spreading and surface drifting of oil spilled from a submarine pipeline under the combined action of wave and current. *Applied Ocean Research*. Edição 64, páginas 217–235, 2017b.

ZHU, H.; LIN, Q. A.; A CFD (computational fluid dynamic) simulation for oil leakage from damaged submarine pipeline. *Energy*, v. 64, p. 887-899, 2014.