

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO ÓLEO-ÁGUA, APLICADO EM DUTO HORIZONTAL UTILIZANDO A TÉCNICA “CORE ANNULAR FLOW”

Priscila Farias Nilo, cilanilo@gmail.com¹

Gilberto Augusto Amado Moreira, gilberto@cear.ufpb.br²

Francisco José Araujo Melo, fjameloufpb@gmail.com³

Gustavo Roque Martorelli, gustavo_martorelli@hotmail.com⁴

^{1,2,3,4}Universidade Federal da Paraíba, Laboratório de Meios Porosos e Adsorção, João Pessoa, Paraíba, Brasil.

Resumo: O transporte de óleo pesado é um dos principais desafios tecnológicos para a indústria petrolífera no mundo, o que se explica pela elevada perda de carga causada pelo atrito entre o óleo e a parede da tubulação. Dessa forma, o presente trabalho apresenta um estudo numérico para o transporte de água e óleo pesado em dutos horizontais com um medidor por Bocal, empregando a técnica core anular flow utilizando o software comercial ANSYS CFX 15.0. O modelo matemático multifásico de mistura foi usado para o escoamento bifásico água-óleo, 3D, transiente, isotérmico, com o óleo escoando em regime laminar e água em regime turbulento, em que foi escolhido o modelo de turbulência k-ε. Nesta perspectiva, a velocidade, a queda de pressão e a fração volumétrica para cada fase são analisados nos resultados. Foi observado a água envolvendo o núcleo de óleo que escoo na região central da tubulação, reproduzindo o escoamento core flow, o que acarretou uma redução na queda de pressão. Os resultados foram confrontados com dados experimentais disponíveis na literatura, e foi verificado uma boa concordância entre os mesmos.

Palavras-chave: Óleo Pesado, Core-flow, Queda de Pressão, Medidor por Bocal.

1. INTRODUÇÃO

A diminuição das reservas de óleo leve tem direcionado os pesquisadores a estudar formas de como lidar com o óleo pesado, bem como seu transporte. Dentre vários métodos de transporte de óleo altamente viscoso, o transporte lubrificado com água surge como uma tecnologia de eficiência energética nas últimas décadas (KAUSHIK *et al.*, 2012).

A maior dificuldade encontrada na utilização do óleo pesado é a sua elevada viscosidade, tornando difícil o seu transporte, aumentando o custo de refinação. Dessa forma, transportar óleo pesado e ultra viscoso é um grande desafio tecnológico para a indústria petrolífera. Este fato ocorre devido à alta queda de pressão relacionada com os efeitos viscosos dos fluidos

A técnica *Core Annular Flow* consiste basicamente em injetar água em uma tubulação em um fluxo menor que o óleo, fazendo com que o óleo seja envolvido por uma camada de água, sem tocar na parede da tubulação, ver Figura 1, formando assim um padrão anular (ANDRADE *et al.*, 2013). Esta técnica não modifica a viscosidade do óleo, porém transforma o padrão de escoamento, e reduz o atrito no transporte do óleo pesado (ANDRADE, 2013).

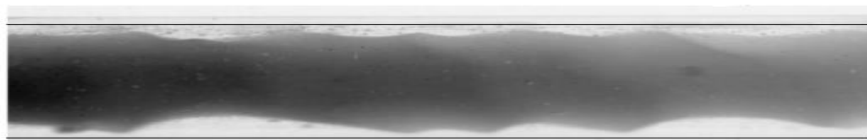


Figura 1: Esquema do Escoamento Core Annular Flow. Fonte: HOUSZ *et al.*, 2017

A técnica CAF é de suma importância industrial, pois os estudos experimentais, numéricos e analíticos têm sido relatados em diferentes aspectos do *core anular flow* (GHOSH; DAS & DAS, 2010). Para um *core anular flow* horizontal, na literatura são apresentados estudos relatados por Charles, Govier e Hodgson (1961); Arney *et al.* (1993); Ooms *et al.* (1983); Strazza e Pietro (2012); Kaushik *et al.* (2012). Em relação ao CAF vertical, são várias pesquisas como: Prada e Bannwart (2001); Ghosh e Das (2012); Gupta, Turangan e Manica (2016).

Nesta perspectiva, o presente trabalho tem como objetivo a utilização da Fluidodinâmica Computacional para analisar numericamente o Escoamento Bifásico de Óleo-Água, aplicado em dutos petrolíferos horizontais com medidor de escoamento por bocal, usando a técnica “Core Flow”.

2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O problema físico trata-se de uma tubulação com um medidor de escoamento por bocal (NFM) posicionado horizontalmente, ver Figura 2, com 2,070 m de comprimento, seção circular de 40mm de diâmetro e uma seção de estrangulamento de 30mm. Para a investigação do escoamento isotérmico de óleo pesado e água, o diâmetro de entrada de água é igual a 14 mm e o diâmetro referente a entrada de óleo é igual a 26 mm. Os fluidos apresentam as seguintes propriedades: $\rho_o = kg/m^3$, $\rho_A = 998 kg/m^3$, $\mu_o = 0,9 Pa.s$ e $\mu_A = 1,026 \times 10^{-3} Pa.s$.

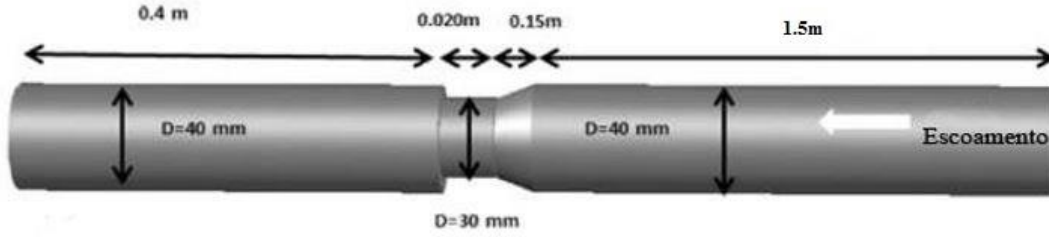


Figura 2 - Tubulação Horizontal com 40 mm de diâmetro (medidor de escoamento por bocal).

Neste problema cada fase possui um campo de velocidade distintos. Estes campos são obtidos através da solução das equações da continuidade e da quantidade de movimento para cada fase.

A equação que descreve a conservação de massa para o escoamento multifásico para a fase α é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = \sum_{\beta=1}^{N_P} \Gamma_{\alpha\beta} + S_{MS\alpha} \quad (1)$$

Onde: f_α é a fração volumétrica, ρ_α a massa específica, $\vec{U}_\alpha$ é o vetor velocidade. Os termos $\Gamma_{\alpha\beta}$ é o fluxo mássico interfacial por unidade de volume e $S_{MS\alpha}$ representa possíveis fontes de massa, no caso de não ser levada em consideração, temos:

$$S_{MS\alpha} = 0$$

O subscrito α ou β , representam a fase contínua ou a fase dispersa; $\alpha\beta$ ou $\beta\alpha$ representam a interação entre as fases α e β junto à interface.

As equações de transporte de quantidade de movimento para a fase α são dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) + \nabla \cdot [(f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha))] = -f_\alpha \nabla P_\alpha + \nabla \cdot \{(f_\alpha (\tau_\alpha + \tau_\alpha^{turb} + \tau_S))\} + \sum_{\beta=1}^{N_P} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_\alpha) + \vec{S}_{M\alpha} + \vec{M}_\alpha \quad (2)$$

Onde o sub-índice α indica a fase no escoamento multifásico, f, ρ, μ e $\vec{U}$ são, respectivamente, fração volumétrica, densidade, viscosidade dinâmica e o vetor velocidade, P é a pressão. $\vec{S}_{M\alpha}$ representa o termo das forças externas que atuam sobre o sistema por unidade de volume e $\vec{M}_\alpha$ é a força interfacial total que age entre as duas fases. $\Gamma_{\alpha\beta}^+$ corresponde à taxa de fluxo mássico por unidade de volume da fase β para a fase α vice-versa.

2.1. Condições Iniciais e de Contorno

Foi considerado que a tubulação inicialmente estava cheia com água. Logo, as condições sobre as fronteiras são definidas de acordo como segue:

- a) Na seção anular referente à entrada de água foi adotado um valor prescrito e não nulo para a componente de velocidade axial e a fração volumétrica de água na direção z e nulo para as outras componentes nas direções r e θ , ou seja:

$$R - \Delta r < r < R \Rightarrow \begin{cases} u_{z,A} = u_A \\ f_A = 1,0 \\ u_{z,o} = f_o = 0 \end{cases} \quad (3)$$

onde R é o raio da respectiva tubulação e r é o raio do núcleo de óleo.

- b) Na seção de entrada de óleo, foi considerada uma velocidade U_o não nula e uma fração volumétrica do óleo de $f_o = 1,0$ na direção z e nulo para as componentes nas direções r e θ . Dessa forma, considere as seguintes condições:

$$0 < r < R - \Delta r \Rightarrow \begin{cases} u_{z,o} = u_o \\ f_o = 1,0 \\ u_{r,o} = u_{r,A} = u_{z,A} = f_A = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Onde R é o raio das respectivas tubulações e r é o raio do núcleo de óleo.

- c) Nas fronteiras, com relação as paredes da tubulação foi considerado a condição de não-deslizamento, portanto:

$$\begin{aligned} u_{r,A} &= u_{\theta,A} = u_{z,A} = 0 \\ u_{r,o} &= u_{\theta,o} = u_{z,o} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

- d) Na seção de saída foi prescrito uma pressão estática constante de $P = 86126,25 Pa$.

O modelo de turbulência adotado neste trabalho foi o $k-\varepsilon$ padrão. É um modelo de viscosidade turbulenta onde os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média. São duas equações de transporte resolvidas para o comprimento turbulento e a escala de tempo ou para quaisquer duas combinações linearmente independentes dessas equações. Sendo k a energia cinética turbulenta, definida como a variância das flutuações na velocidade; ε é a taxa de dissipação turbulenta, que é a taxa pela qual as flutuações de velocidade se dissipam.

I. Equação da Energia Cinética Turbulenta:

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

II. Equação da taxa de dissipação turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) \quad (8)$$

onde: G_α é geração de energia cinética turbulenta no interior da fase α ;

ε_α é a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase α , dada por:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{c_\mu q_\alpha^3}{l_\alpha}$$

k_α é a energia cinética turbulenta da fase α , dada pela seguinte expressão:

$$k_\alpha = \frac{q_\alpha^2}{2}$$

Sendo:

l_α o comprimento de escala espacial, q_α a escala de velocidade, c_μ é uma constante empírica dada pela seguinte expressão:

$$c_\mu = 4c_\alpha^2$$

$\mu_{t\alpha}$ é a viscosidade turbulenta, dada por:

$$\mu_{t\alpha} = C_{\mu} \rho_{\alpha} \frac{k_{\alpha}^2}{\varepsilon_{\alpha}}$$

Dessa forma, as constantes adotadas neste trabalho são:

$$C_1 = 1.44; C_2 = 1.92; C_{\mu} = 0.09; \sigma_k = 1.0 \text{ e } \sigma_{\varepsilon} = 1.3.$$

Quadro 1: Condições Gerais do Problema e da Solução Numérica.

Característica	Consideração	
	Monofásico	Bifásico
Regime	Permanente	Transiente
Passo de Tempo	-----	0,1 s
Critério de Convergência para a Solução dos Sistemas de Equações	10^{-7} (RMS)	10^{-7} (RMS)
Esquema de Advecção	Alta Resolução	Alta Resolução
Esquema Transiente	-----	Segunda Ordem
Esquema de Interpolação para a Pressão	Tirilintar	Trilinear
Esquema de Interpolação para a Velocidade	Trilinear	Trilinear
Método Numérico	Volumes Finitos	Volumes Finitos
Modelo	-----	Não Homogêneo

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 apresenta-se o perfil de velocidade do escoamento monofásico de água em função da posição radial na posição longitudinal igual $z = 1$ m da entrada, obtida numericamente com aquela obtida via solução analítica disponibilizada na literatura, verificando uma concordância entre os resultados analíticos e numéricos. Dessa forma, foram determinados o comprimento hidrodinâmico $L_e = 0,0308m$ para o escoamento da fase óleo e $L_e = 0,9792m$ para o escoamento da fase água, mostrando que todo escoamento está na região hidrodinamicamente completamente desenvolvido.

Na Figura 4 observa-se que à medida que a velocidade superficial da água aumenta de $U_w = 0,44m/s$ para $U_w = 0,88m/s$, a velocidade de escoamento próximo à saída do duto é maior no centro, e nas paredes a velocidade é nula, comportamento semelhante foi observado no trabalho de Ghosh, Das e Das (2010). Para as condições de escoamento neste trabalho, não foram observadas a formação de ondulações, visto que, isto ocorre quando maiores gradientes de velocidades na interface fazem com que essa região seja perturbada.

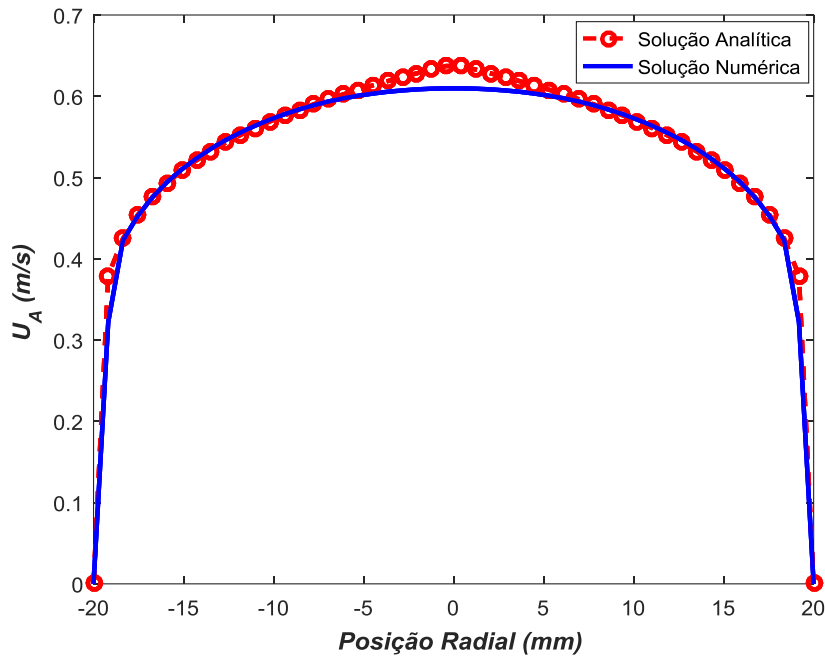


Figura 3: Perfil de velocidade numérico e analítico da água para $U_A = 0,88 \text{ m/s}$ (regime turbulento)

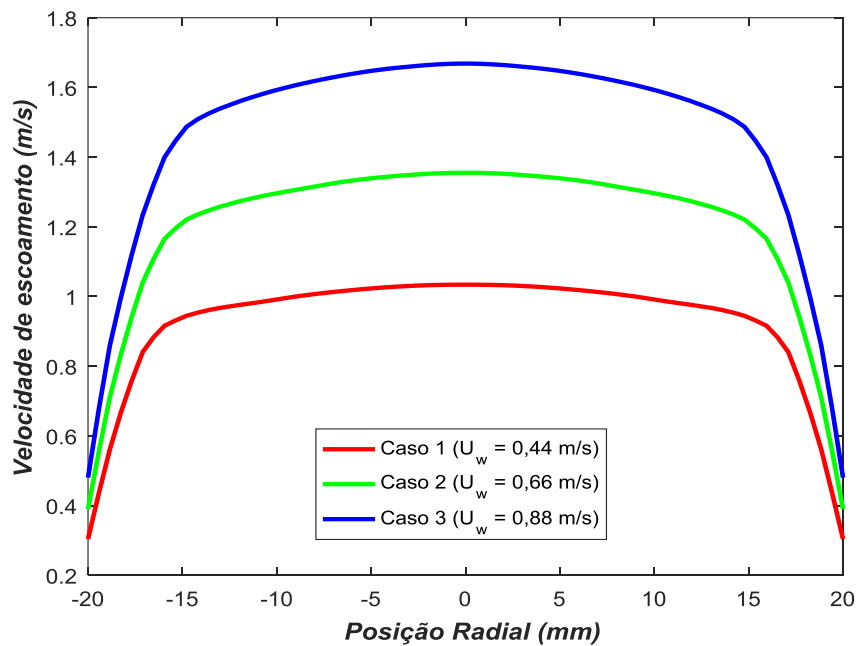


Figura 4: Perfil de Velocidade para $U_o = 0,45 \text{ m/s}$.

As Figuras 3 e 4 apontam a diferença entre a queda de pressão do escoamento monofásico da água e do óleo pesado e a queda de pressão usando a técnica CAF. Com a utilização da CAF a queda de pressão reduziu significativamente quando comparada com o escoamento monofásico do óleo pesado, ou seja, $\Delta P = 25300 \text{ Pa}$ (monofásico óleo) para $\Delta P = 4000 \text{ Pa}$ (CAF). O aumento da queda de pressão (monofásico óleo) é causado pelo contato do óleo com a parede do duto, visto que, a viscosidade do óleo é maior do que a da água. Este comportamento da queda de pressão também é observado por Bannwart (2001), Tripathi *et al.* (2015). Andrade (2013) em sua pesquisa afirma que com a técnica CAF a redução na queda de pressão foi de aproximadamente 90%, apresentando para o

escoamento com apenas óleo um $\Delta P = 52200 Pa$ e para o uso da CAF um $\Delta P = 4826 Pa$, dessa forma, os resultados numéricos demonstraram que o escoamento de óleo no duto apresentou uma queda de pressão de aproximadamente 10 vezes superior à queda de pressão quando foi utilizado a técnica CAF.

Neste trabalho foi observado o escoamento monofásico de água, e pode-se afirmar que a queda de pressão utilizando a CAF se aproxima da queda de pressão monofásica da água, que foi de $\Delta P = 1745 Pa$.

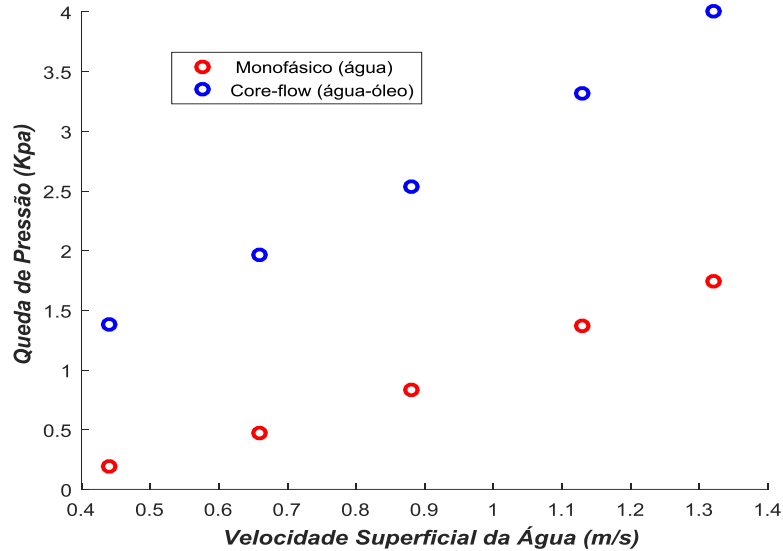


Figura 3: Comparação da queda de pressão entre o escoamento monofásico da água e o escoamento anular (água-óleo) no Bocal.

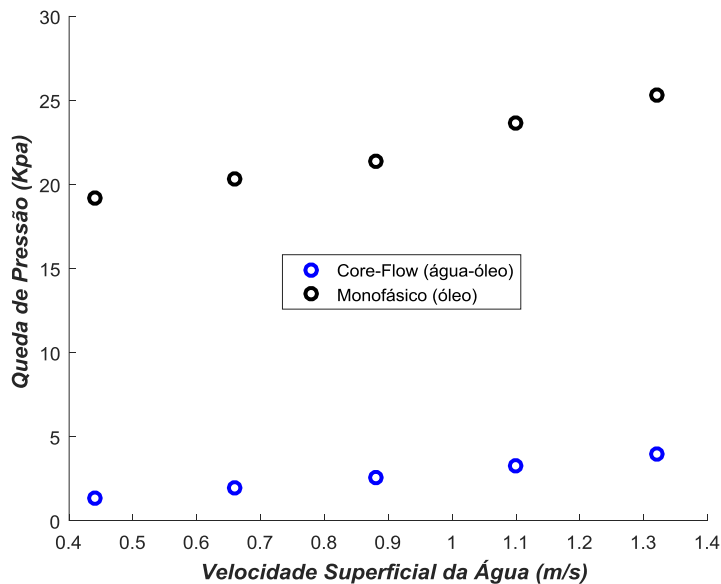


Figura 4: Comparação da queda de pressão entre o escoamento monofásico do óleo pesado e o escoamento anular (água-óleo) no Bocal.

4. CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados obtidos neste trabalho foi observado que o uso da técnica fluidodinâmica computacional (CFD), com a utilização do software Ansys CFX, reproduziu o comportamento do escoamento *core annular flow*, em um duto horizontal com a presença de um Bocal, comprovando que o emprego de modelos CFD, no estudo do escoamento multifásico, é de grande valor para a avaliação das condições operacionais.

O modelo foi validado com dados experimentais apresentados por Dehkordi *et al.* (2017) e os resultados obtidos neste trabalho apresentaram conformidade em relação aos resultados do autor. Foi possível obter para o regime transiente resultados que confirmam a evolução do filme de água envolvendo o óleo.

Pode-se observar que a velocidade superficial do óleo foi maior no centro do tubo e diminuiu gradualmente para zero nas paredes, e variando a velocidade superficial da água de 0,44-1,32 m/s, constatou-se que com a redução da velocidade superficial da água ocorre o aumento no núcleo de óleo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao CNPQ por apoiar esta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Andrade, T. H. F.; Silva, F. N.; Neto, S. R. F.; Lima, A. G. B., 2013, "Applying CFD in the analysis of heavy oil - water two-phase flow in joints by using core annular flow technique", *International Journal of Multiphysics*, Vol. 7, No. 2, pp.137-151.
- Arney, M. S.; Bai, R.; Guevara, E.; Joseph D. D.; Liu, K., 1993, "Friction Factor And Holdup Studies For Lubricated Pipelining", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 19, No. 6, pp. 1061-1076.
- Charles, M. E.; Govier, G. W.; Hodgson, G. W., 1961, "The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixtures", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp. 27-36.
- Ghosh, S.; Das, G.; Das, P. K., 2010, "Simulation of core annular down flow through CFD – A comprehensive study", *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Vol. 49, pp. 1222 – 1228.
- Gupta, R.; Turangan, C.K.; Manica, R., 2016, "Oil-water core-annular flow in vertical pipes: A CFD study", *Chemical Engineering Canadian*, Vol. 94, pp. 980-987.
- Housz, I.E.M.R.M.; Ooms, G.; Henkes, R.A.W.M.; Pourquie, M.J.B.M.; Kidess, A.; Radhakrishnan, R., 2017, "A comparison between numerical predictions and experimental results for horizontal core-annular flow with a turbulent annulus", *International Journal of Multiphase Flow*. Vol.95, pp. 271-282.
- Kaushik, V. V. R.; Ghosh, S.; Das, G.; Das, P. K., 2012, "CFD simulation of core annular flow through sudden contraction and expansion", *Journal of Petroleum and Engineering*. Vol. 86-87, pp. 153 – 164.
- Ooms, G.; Segal, A.; Wees, V. D. A. J.; Meerhoff, R.; Oliemans, R. V. A., 1983, "A theoretical model for core-annular flow of a very viscous oil core and a water annulus through a horizontal pipe", *International Journal of Multiphase Flow*. Vol.10, No.1, p.41-60.
- Prada, J.W.V.; Bannwart, A. C., 2001, "Pressure drop in vertical core annular flow", *Journal French Society of Mechanical Science*. Vol. 23, No. 4.
- Strazza, D.; Pietro, P., 2012, "Experimental study on the restart of core-annular flow", *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 90, No. 11.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho

NUMERICAL STUDY OF THE MULTIPHASE OIL-WATER APPLIED IN HORIZONTAL DUTY, USING THE "CORE ANNULAR FLOW"

Priscila Farias Nilo, cilanilo@gmail.com¹

Gilberto Augusto Amado Moreira, gilberto@cear.ufpb.br²

Francisco José Araujo Melo, fjameloufpb@gmail.com³

Gustavo Roque Martorelli, gustavo_martorelli@hotmail.com⁴

^{1,2,3,4}Federal University of Paraíba, Laboratory of Porous Means and Adsorption, João Pessoa, Paraíba, Brazil

Abstract. *The high viscosity heavy oil transport is one of the main technological challenges for the oil industry, which is explained by the high loss of load caused by the friction between the oil and the pipe wall. Thus, the present work presents a numerical study for the transport of water and heavy oil in horizontal pipe with a nozzle meter, using the core annular flow technique using the commercial software ANSYS CFX 15.0. The multiphase mixture mathematical model was used for two-phase water-oil flow, 3D, transient, isothermal, with the oil flowing in laminar regime and water in turbulent regime, in which the turbulence model $k - \varepsilon$ was chosen. In this perspective, the velocity, the pressure drop and the volumetric fraction for each phase are analyzed in the results. The water surrounding the oil core flowing in the central region of the pipe was observed, reproducing the core annular flow, which resulted in a reduction the pressure drop. The results were compared with experimental data available in the literature, and a good agreement was found between them.*

Keywords: *Heavy Oil, Core flow, Pressure drop, Nozzle Meter.*