

Modelagem e simulação de escoamento anular de água, óleo pesado e ar em dutos horizontais

Modeling and simulation of water, heavy oil and air annular flow in horizontal ducts

Modelado y simulación de flujo anular de agua, petróleo pesado y aire en conductos horizontales

Recebido: 13/12/2020 | Revisado: 16/12/2020 | Aceito: 17/12/2020 | Publicado: 20/12/2020

Flávio César Brito Nunes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2289-6915>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil

E-mail: flavio@ifce.edu.br

Maria Gorethe Sousa Lima Brito

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8977-1116>

Universidade Federal do Cariri, Brasil

E-mail: gorethe.lima@ufca.edu.br

Severino Rodrigues de Farias Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9826-2110>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: severino.rodrigues@ufcg.edu.br

Elisiane Santana de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3004-8841>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: limaelisianelima@hotmail.com

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-2691>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: wan_magno@hotmail.com

Ricardo Soares Gomez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4387-4600>

Universidade Federal da Paraíba, Brasil

E-mail: ricardosoaresgomez@gmail.com

Hortência Luma Fernandes Magalhães

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7849-2792>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: hortencia.luma@gmail.com

Antonio Gilson Barbosa de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1691-1872>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: antonio.gilson@ufcg.edu.br

Resumo

Este artigo tem como objetivo estudar o escoamento trifásico água – óleo pesado – ar em dutos horizontais, utilizando a técnica “core annular flow”. O modelo matemático utilizado foi o não-homogêneo, numa abordagem Euleriana – Euleriana. Considerou-se o modelo de mistura para tratar os termos de transferência de momento interfacial entre as fases contínuas (água e óleo pesado) e o modelo de partícula para tratar os termos de transferência de momento interfacial entre as fases dispersa e contínua (ar e óleo pesado). Todas as simulações foram realizadas utilizando o Software CFX versão 11. Resultados dos campos de pressão e fração volumétrica das fases e queda de pressão no duto são apresentados e comparados com dados experimentais. Verificou-se que a modelagem matemática utilizada foi adequada, apresentado erro máximo com relação aos dados experimentais de queda de pressão de 7,3%, demonstrando a eficiência da técnica core-flow para o transporte trifásico de água - óleo pesado – ar.

Palavras-chave: Escoamento multifásico; Core-flow; Duto horizontal; Simulação; CFD.

Abstract

This paper aims to study the three-phase flow of water - heavy oil - air in horizontal ducts, using the “core annular flow” technique. The non-homogeneous mathematical model in an Eulerian - Eulerian approach was used. The mixture model was considered to deal with the interfacial momentum transfer terms between the continuous phases (water and heavy oil) and the particle model to deal with the interfacial momentum transfer terms between the dispersed and continuous phases (air and heavy oil). All simulations were carried out using the CFX Software version 11. Results of the pressure fields and volume fraction of the phases and pressure drop in the duct are presented and compared with experimental data. It was found that the mathematical modeling used was adequate, presenting a maximum error in relation to

the experimental data of pressure drop 7.3%, demonstrating the efficiency of the core-flow technique in predict transport of water - heavy oil – air in horizontal pipe.

Keywords: Multiphase flow; Core-flow; Horizontal duct; Simulation; CFD.

Resumen

Este artículo tiene como objetivo estudiar el flujo trifásico de agua - petróleo pesado - aire en conductos horizontales, utilizando la técnica de “flujo anular central”. El modelo matemático utilizado fue el no homogéneo, en un enfoque euleriano-euleriano. Se consideró que el modelo de mezcla para tratar los términos de transferencia de momento interfacial entre las fases continuas (agua y petróleo pesado) y el modelo de partículas para tratar los términos de transferencia de momento interfacial entre las fases dispersa y continua (aire y petróleo pesado). Todas las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el software CFX versión 11. Se presentan los resultados de los campos de presión y la fracción de volumen de las fases y la caída de presión en el conducto y se comparan con los datos experimentales. Se encontró que la modelación matemática utilizada fue adecuada, presentando un error máximo en relación a los datos experimentales de caída de presión de 7.3%, demostrando la eficiencia de la técnica core-flow para el transporte trifásico de agua - petróleo pesado - aire.

Palabras clave: Flujo multifásico; Core-flow; Conducto horizontal; Simulación; CFD.

1. Introdução

A técnica “core-flow” consiste em injetar pequenas quantidades de água na tubulação de óleo, estabelecendo um padrão de escoamento anular, no qual um fino anel de água lubrifica o núcleo central formado pelo óleo. Isso é possível porque existe uma forte tendência de dois líquidos imiscíveis escoando arranjam-se de tal forma que o líquido de menor viscosidade se localize na região de maior deformação (nas paredes da tubulação) (Prada & Bannwart, 1999). A consequência desse fenômeno é uma redução de atrito entre a parede e o óleo ao longo do escoamento, possibilitando assim, uma considerável redução na queda de pressão. Assim sendo, a técnica “core-flow”, permite elevar e transportar petróleo de alta viscosidade de forma simples e econômica, reduzindo a resistência do óleo pesado no trajeto do poço até a plataforma, com menores potências de bombeamento e pressão interna no duto.

Diante da grande importância que dessa tecnologia, no cenário de transporte de óleos pesados, vários estudos vêm sendo propostos com o intuito de aperfeiçoar essa nova técnica para a aplicação na indústria de petróleo.

A primeira menção à lubrificação por água apareceu no início deste século com o pedido de patente de Isaacs & Speed (1904), onde o padrão anular foi obtido por meio da rotação do tubo. Mas, no final dos anos 50 é que um grupo de pesquisadores canadenses (Russel et al., 1959; Charles et al., 1961) deram início aos estudos, tanto teóricos quanto experimentais, constatando a estabilidade desse padrão de escoamento, propondo os primeiros modelos relativos para a perda de carga e a fração volumétrica das fases. Desde então, estudos envolvendo a técnica do “core-flow” vêm sendo realizados visando sua aplicação no transporte de óleos pesados.

Um dos primeiros trabalhos sobre Core Annular Flow foi desenvolvido por Clark & Shapiro (1949), que patentearam um processo de bombeamento de óleo viscoso ($\mu = 0,8-1,0$ Pa.s) por injeção de óleo e agentes mulsificantes no interior de oleoduto. Os autores concluíram que a injeção de 24% de água reduziu o gradiente de pressão de um fator de 7,8-10,5, e que a redução de pressão ótima ocorreu quando 8-10% de água foi injetado no duto com óleo cru, contudo, não puderam prever o padrão de fluxo resultante.

Charles et al. (1961) realizaram experimentos com óleos de densidade 998 kg/m³ e viscosidade 0,0063, 0,0168 e 0,065 Pa.s em um duto horizontal com 2,5 cm de diâmetro. Um mapa de padrão de escoamento em termos de velocidade superficial óleo-água foi obtido e notaram que o “core-flow” não podia ser estabelecido abaixo de uma velocidade crítica do óleo para uma fixada fração de água.

Experimentos em laboratório feitos por Prada & Bannwart (1999) demonstraram que o uso da técnica “core-flow” reduz em torno de 45 a 150 vezes o gradiente de pressão total, para um óleo com viscosidade de 2,7 Pa.s e densidade de 989 kg/m³. De acordo com os autores, a melhor razão entre as velocidades superficiais da água e do óleo está na faixa de 0,07 a 0,5, dependendo da velocidade superficial do óleo.

Devido a importância, diversos outros trabalhos relacionados com escoamento de óleos pesados usando a técnica core-flow têm sido reportado na literatura (Trevisan, 2003; Rodriguez & Bannwart, 2006; Ooms et al., 2007, Belém, 2008; Pereira Filho, 2010; Andrade et al., 2012; Gadelha et al., 2013; Andrade et al., 2013a; Andrade et al., 2013b; Andrade et al., 2014; Conceição et al., 2017; Silva et al., 2020).

A constatação da eficiência da técnica de transporte de óleos pesados pela injeção de água (“core-flow”), em sistema bifásico água-óleo, tanto em termos de consumo de energia como em volume produzido, a credencia para ser avaliada em outras situações práticas. Dentre as situações práticas destaca-se o transporte de óleo pesado com a presença de uma terceira fase, o gás, que, ao ser extraído do reservatório, está em solução na fase. No entanto,

em consequência da queda de pressão ao longo do duto, o gás se desprende do óleo, formando bolhas, inicialmente pequenas e com baixa velocidade superficial que, ao longo da tubulação, se expandem e aceleram. A presença desta terceira fase no escoamento modifica significativamente o padrão de escoamento bifásico anular óleo-água, assim como sua queda de pressão e, pesquisas envolvendo a técnica core-flow e escoamento trifásico ainda é incipiente.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo estudar teoricamente o transporte de fluidos multifásicos em duto horizontal, considerando o escoamento trifásico anular água-óleo pesado-ar, por meio de simulação numérica (Software CFX versão 11). Para validar os resultados numéricos desta pesquisa, foram utilizados os resultados experimentais de queda de pressão, obtidos por Trevisan (2003), ao estudar os padrões de fluxo e perda de carga em escoamento trifásico horizontal de óleo pesado, água e ar..

2. Metodologia

2.1 Descrição do problema e da geometria

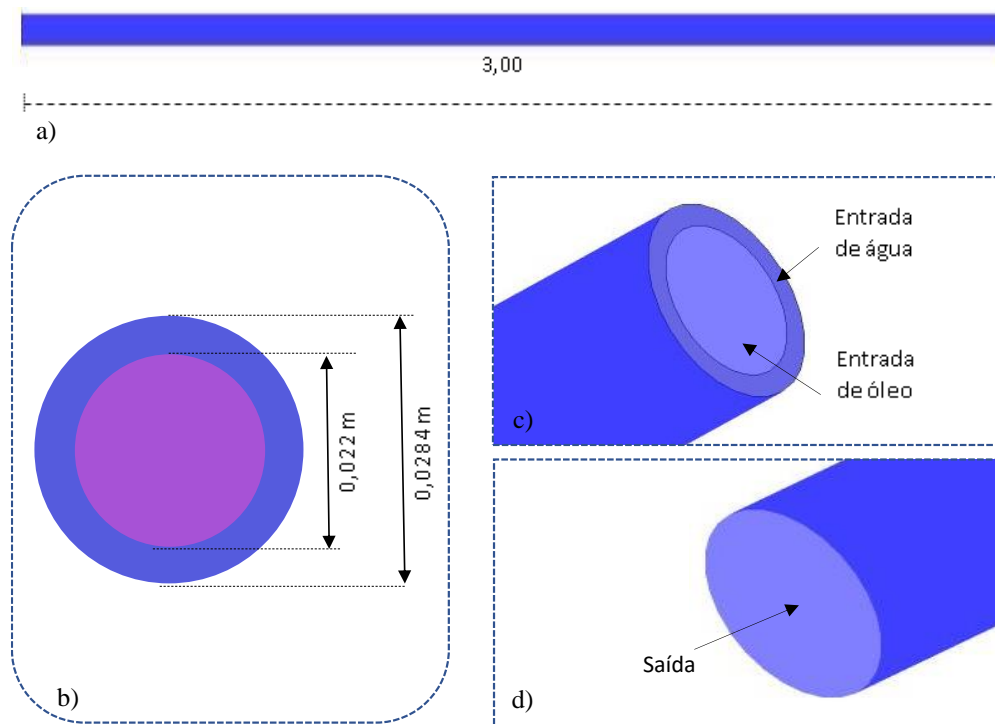
Domínio de estudo

Do aparato experimental utilizado por Trevisan (2003), foi escolhido, como domínio de estudo, um segmento horizontal, como ilustrado na Figura 1a. Este segmento consiste de uma tubulação de vidro de 3 m de comprimento e 0,0284 m de diâmetro interno, com 0,003 m de espaço anular que permite a formação de um anel de água adjacente à parede da tubulação (Figura 1b). A entrada da tubulação apresenta duas regiões distintas, denominadas entrada de água e de óleo (Figura 1c) e a saída do duto tem uma única região (Figura 1d).

Para a criação do domínio e geração da malha do tubo de seção transversal circular, foi utilizado o software Ansys Icem CFD 11.0. Após geração da malha, foram realizados refinamentos a fim de eliminar a dependência dos resultados com a malha.

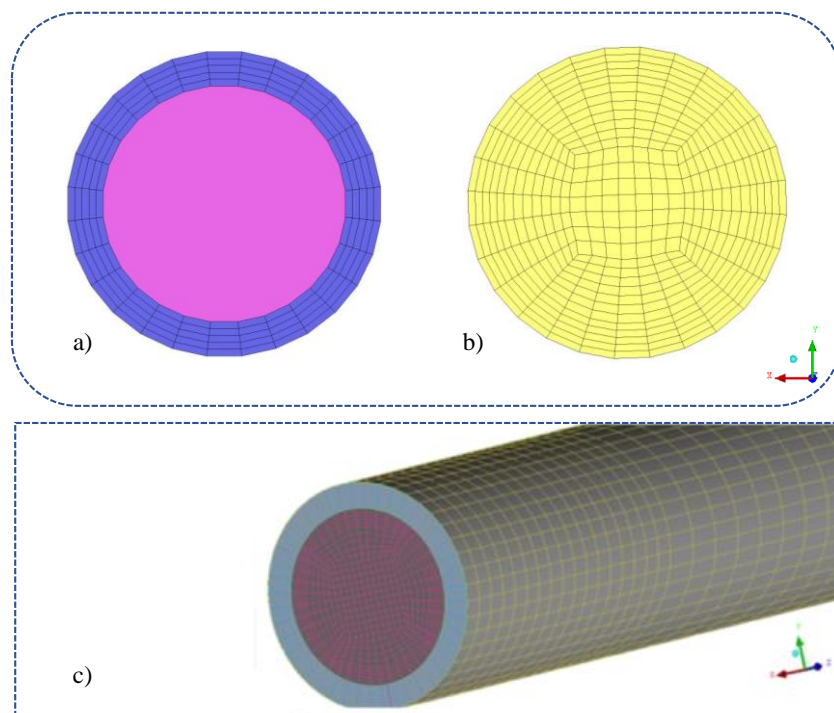
A Figura 2 ilustra a malha estruturada gerada no domínio fictício tridimensional. Após diferentes refinamentos de malha (visando a não dependência dos resultados numéricos com as mesmas), selecionou-se uma malha constituída por 72.000 elementos hexaédricos.

Figura 1. Representação da tubulação: (a) visão geral, (b) ilustração do espaço anular, (c) região de entrada e (d) região de saída.



Fonte: Dados da pesquisa.

Figura 2. Ilustração da malha estruturada representativa do domínio físico. a) Entrada, b) Saída, e c) Vista tridimensional.



Fonte: Dados da pesquisa.

2.2 Modelagem matemática

Para o estudo do escoamento trifásico (água, óleo e ar), no interior do duto, foi utilizado o modelo para escoamentos multifásicos com transferência interfacial (aproximação Euleriana – Euleriana) disponibilizado no Software CFX versão 11. Inicialmente, visando simplificar o modelo e a solução das equações governantes, foram feitas as seguintes suposições:

- Fluidos newtonianos;
- Escoamento incompressível, regime permanente e trifásico, formado por duas fases contínuas (água - α e óleo - γ) e uma fase dispersa (ar - β);
- Sistema isotérmico, com temperatura igual a 298K (Trevisan, 2003);
- Propriedades termodinâmicas (massa molar, massa específica e capacidade de calor específico) e de transporte (viscosidade dinâmica e condutividade térmica) constantes;
- Regime de escoamento turbulento (modelo $k - \varepsilon$) para a água e laminar para o óleo e o ar;
- Modelo de mistura para os termos de transferência de momento interfacial entre as fases contínuas e Modelo de partícula para os termos de transferência de momento interfacial entre as fases dispersa e contínua;
- A transferência de momento interfacial entre as fases α , γ e β é função apenas da força de arraste. Esta suposição foi respaldada na afirmação de que a força de arraste é a força que exerce maior efeito nos modelos de transferência de momento interfacial (Chen et al., 2005);
- As bolhas de ar são esféricas e com distribuição escassa. Disto, as determinações dos coeficientes de arraste (C_D) para os pares de fluidos água/ar e óleo/ar foram realizadas por meio da correlação de Ishii & Zuber (1979). Para o par de fluidos água/óleo, o (C_D) foi considerado constante e igual a 0,44;
- A fonte de momento devido à força corpo externa depende apenas do empuxo;
- A transferência de massa interfacial foi considerada desprezível;
- Núcleo de óleo estático e centralizado do duto, no início do processo;
- Rugosidade do duto de vidro igual a $1,5 \times 10^{-5} \text{m}$;
- Considerando-se que superfícies rugosas podem causar efeitos significativos sobre o fluxo - como conduzir ao aumento da produção de turbulência próximo a parede, resultando no aumento significativo tanto na tensão de cisalhamento na parede como

nos coeficientes de transferência de calor - a predição do fluxo próximo a parede foi modelada por meio da utilização da condição de contorno no *slip wall*;

- Modelo de contato com a parede: *specify area fraction*;
- Misturas de óleo, água e ar nas duas regiões de entrada da tubulação (entrada de água e de óleo). Esta suposição foi baseada na consideração de que os fluidos, provenientes do tanque de separação, ao serem reintroduzidos no sistema, de forma pressurizada, eram parcialmente misturados, principalmente ao passarem pelo cotovelo que unia as tubulações das seções de teste vertical e horizontal, o que favorecia a formação de misturas (Trevisan, 2003).

Mediante as hipóteses formuladas, as equações governantes podem ser reescritas da seguinte forma:

➤ **Conservação de massa:**

$$\nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

➤ **Conservação do momento linear:**

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left[r_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha) \right] = & -r_\alpha \nabla p + \nabla \cdot \left\{ r_\alpha \mu_\alpha \left[\nabla \vec{U}_\alpha + (\nabla \vec{U}_\alpha)^T \right] \right\} + \\ & r_\alpha (\rho_\alpha - \rho_{ref}) g + c_{\alpha\beta}^{(d)} (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

Tendo em vista que a água escoar no regime turbulento, considerou-se o modelo k - ε como modelo de estudo. Este modelo é dado a seguir:

- Para a energia cinética turbulenta:

$$\nabla \cdot \left\{ r_\alpha \left[\rho_\alpha \vec{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = r_\alpha (P_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) + T_{\alpha\beta}^k \quad (3)$$

- Para a taxa de dissipação turbulenta:

$$\nabla \cdot \left[r_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha} \varepsilon_{\alpha} - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \nabla \varepsilon_{\alpha} \right] = r_{\alpha} \frac{\varepsilon_{\alpha}}{k_{\alpha}} (C_{\varepsilon 1} P_{\alpha} - C_{\varepsilon 2} \rho_{\alpha} \varepsilon_{\alpha}) + T_{\alpha\beta}^{\varepsilon} \quad (4)$$

onde k_{α} , ε_{α} e $\mu_{t\alpha}$ correspondem, respectivamente, a energia cinética turbulenta, a taxa de dissipação turbulenta e a viscosidade turbulenta da fase contínua (α), Os parâmetros $T_{\alpha\beta}^k$ é transferência interfacial para energia cinética turbulenta, $T_{\alpha\beta}^{\varepsilon}$ é a taxa de dissipação turbulenta, e $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k e σ_{ε} são constantes, cujos valores são 1,44; 1,92; 1,0 e 1,3, respectivamente.

Aplicação

Com o objetivo de validar a modelagem matemática que prediz o comportamento fluidodinâmico do escoamento físico real em dutos horizontais, considerando o escoamento trifásico anular água – óleo pesado – ar, foram realizadas simulações, considerando às propriedades termofísicas dos fluidos e parâmetros de escoamento utilizados nos experimentos de Trevisan (2003). Na Tabela 1 são apresentadas as propriedades termofísicas dos fluidos para os casos simulados na temperatura de 298 K.

Tabela 1. Parâmetros termofísicas e geométrico dos fluidos.

Parâmetro	Fase contínua (Água)	Fase dispersa (Óleo)	Fase dispersa (Ar)
Densidade (ρ : kg/m ³)	997	971	1,18
Viscosidade dinâmica (μ : Pa s)	8,899x10 ⁻⁴	5	1,831x10 ⁻⁵
Diâmetro (d_{β} : m)	-	-	0,000010
Tensão superficial (σ : N/m)			
(Água - Ar)	(Água - Óleo)		(Ar - Óleo)
0,07257	0,045		0,026

Fonte: Dados da pesquisa.

As condições de fronteira especificadas para todas as variáveis em análise, para os casos estudados considerando o escoamento trifásico e as hipóteses formuladas, estão contidas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de fronteira especificadas sobre o domínio de estudo, considerando o sistema isotérmico (298 K).

Fronteira	Parâmetros de fronteira	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Entrada de Água	$U_{\text{água}} (m/s)$	0,6700	0,4500	0,5500	0,5400
	$r_{\text{água}}$	0,9200	0,8000	0,9400	0,9600
	$U_{\text{óleo}} (m/s)$	0,7100	0,4800	0,5700	0,5700
	$r_{\text{óleo}}$	0,0796	0,1900	0,0600	0,0396
	$U_{\text{ar}} (m/s)$	0,7500	0,5200	0,5900	0,5900
	r_{ar}	0,0004	0,0100	0,0004	0,0004
Entrada de Óleo	$U_{\text{água}} (m/s)$	0,2000	0,7100	0,6300	0,9000
	$r_{\text{água}}$	0,0100	0,0250	0,0001	0,0100
	$U_{\text{óleo}} (m/s)$	0,2200	0,8900	0,6560	0,9900
	$r_{\text{óleo}}$	0,9700	0,9700	0,9400	0,9400
	$U_{\text{ar}} (m/s)$	0,2500	0,9400	0,6900	1,0600
	r_{ar}	0,0200	0,0050	0,0400	0,0420
Parede	$A_{\text{contato da água}}$	0,9995	0,9997	0,9998	0,9997
	$A_{\text{contato do óleo}}$	0,0005	0,0003	0,0002	0,0003
	$A_{\text{contato da ar}}$	0,00000	0,0000	0,0000	0,0000
Saída	Pressão estática (Pa)	101325,00			

Fonte: Dados da pesquisa.

Eficiência da técnica core flow

Uma das formas de se avaliar a eficiência da técnica core-flow é comparar a variação de pressão no escoamento bifásico água - óleo pesado com aquela obtida para os escoamentos monofásicos de água e de óleo. Como a água, no escoamento core-flow, sempre está em

contato com a parede interna da tubulação, a variação de pressão bifásica medida deve ser próxima da queda de pressão da água escoando sozinha no tubo à vazão volumétrica da mistura.

Para a simulação do escoamento bifásico água - óleo pesado, utilizando o modelo trifásico, foram utilizadas as condições iniciais e de contorno apresentadas na Tabela 3. A velocidade da água ($U_{\text{água}} = 0,54 \text{ m/s}$), especificada no espaço anular, e a velocidade do óleo ($U_{\text{óleo}} = 0,95 \text{ m/s}$), especificada no núcleo de óleo, foram calculadas mantendo-se a mesma vazão mássica do caso 4 (escoamento trifásico), que é de 0,49 kg/s.

Tabela 3. Condições de fronteira especificadas sobre o domínio de estudo, considerando o sistema isotérmico (298 K).

Fronteira	Parâmetros de fronteira	Caso 7
Entrada de Água	$U_{\text{água}} \text{ (m/s)}$	0,54000
	$r_{\text{água}}$	0,99998
	$U_{\text{óleo}} \text{ (m/s)}$	0,00001
	$r_{\text{óleo}}$	0,00001
	$U_{\text{ar}} \text{ (m/s)}$	0,00001
	r_{ar}	0,00001
Entrada de Óleo	$U_{\text{água}} \text{ (m/s)}$	0,00001
	$r_{\text{água}}$	0,00001
	$U_{\text{óleo}} \text{ (m/s)}$	0,95000
	$r_{\text{óleo}}$	0,99998
	$U_{\text{ar}} \text{ (m/s)}$	0,00001
	r_{ar}	0,00001
Parede	$A_{\text{contato da água}}$	0.99970
	$A_{\text{contato do óleo}}$	0,00030
	$A_{\text{contato da ar}}$	0,00000
Saída	Pressão _{estática} (Pa)	101.325

Fonte: Dados da pesquisa.

Após as comparações realizadas entre o escoamento bifásico água - óleo pesado (caso 7), através da técnica core flow, com os escoamentos monofásicos de água (caso 5) e de óleo pesado (caso 6), mantida constante a vazão mássica, realizou-se a comparação entre os resultados obtidos com os escoamentos bifásico e trifásico (caso 4).

3. Resultados e Discussões

3.1 Análise dos parâmetros hidrodinâmicos

Na Tabela 4 constam os resultados da variação de pressão no duto obtidos nas simulações dos casos 1, 2, 3 e 4 e experimentalmente por Trevisan (2003). Observando-se a Tabela 4 constata-se que a modelagem adotada para representar o problema físico mostrou-se adequada, já que a comparação entre os dados experimentais de queda de pressão obtidos por Trevisan (2003) e os resultados numéricos obtidos em simulação apresentaram diferenças sempre inferiores a 10%; erro nesta ordem é considerado aceitável em simulação.

Tabela 4. Queda de pressão predita pelo modelo matemático e experimental no escoamento anular trifásico de óleo, água e ar em duto horizontal.

Caso	ΔP (Pa)		Erro (%)
	Simulado	Experimental (Trevisan, 2003)	
1	256,0	243,5	4,9
2	656,0	637,0	2,9
3	435,0	443,8	2,0
4	741,0	794,8	7,3

Fonte: Dados da pesquisa.

A Figura 3 ilustra o comportamento do campo de pressão sob o plano longitudinal yz, que se estabeleceu no interior do duto ao longo do escoamento, para o caso 1.

Figura 3. Comportamento do campo de pressão sobre o plano yz para o caso 1.

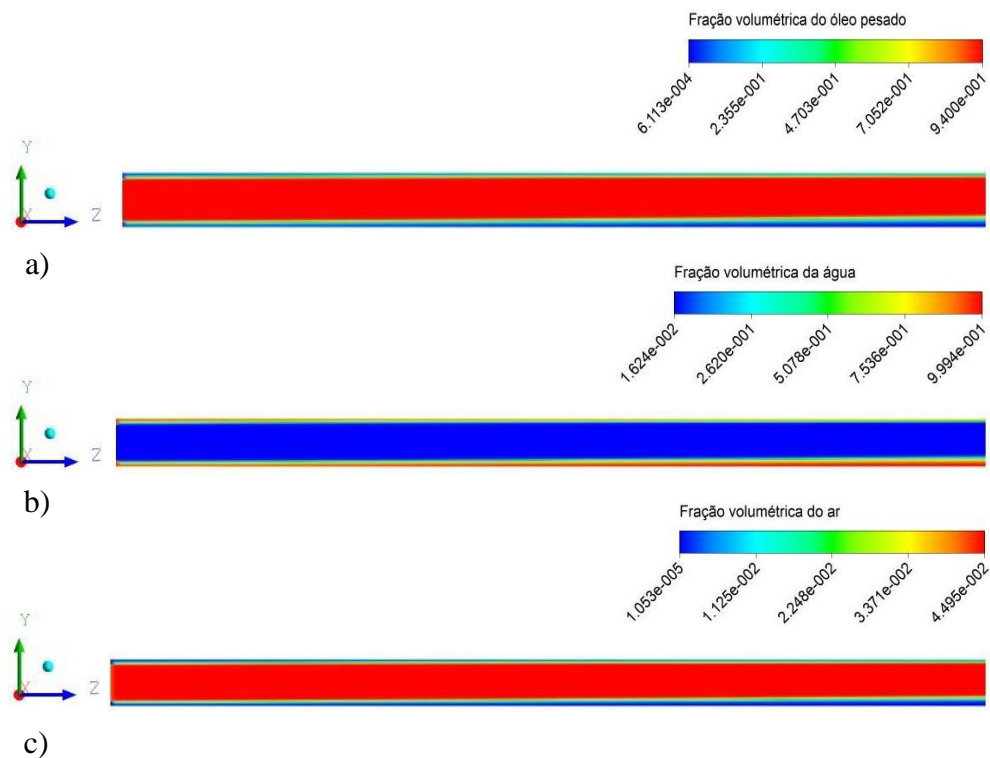


Fonte: Dados da pesquisa.

Observando-se esta Figura 3, constata-se que ocorreu uma queda de pressão (ΔP) ao longo do duto, com pressão máxima na entrada do duto (extremidade esquerda do duto) e mínima na saída (extremidade direita do duto). Tal comportamento é naturalmente esperado, já que para um fluido deslocar-se é necessário que haja gradiente de pressão. Este deslocamento ocorre sempre no sentido decrescente da queda de pressão que, nos casos analisados, ocorre da esquerda para a direita.

A Figura 4 ilustra os campos de fração volumétrica das fases, óleo pesado, água e ar, sobre o plano longitudinal yz, para o caso 3.

Figura 4. Campo de fração volumétrica sobre o plano yz, ao longo do duto, para o caso 3, para as fases (a) óleo pesado, (b) água e (c) ar.



Fonte: Dados da pesquisa.

Observando-se a Figura 4, constata-se a formação do padrão anular ou "core-flow" ao longo do comprimento do duto, com uma concentração maior de óleo e ar na região central do duto e um anel de água em contato com a parede, com uma maior concentração desta próxima a parede inferior do duto, como esperado.

Avaliação da eficiência da técnica core flow

A Tabela 5 resume, comparativamente, os valores das quedas de pressão obtidas para os escoamentos monofásicos de água (caso 5) e de óleo pesado (caso 6), bifásico óleo pesado – água (caso 7) e trifásico, água - óleo pesado – ar (caso 4), utilizando-se a técnica core-flow. Nela pode-se constatar de forma inequívoca a eficiência da técnica core-flow para o transporte de óleos pesados, uma vez que reduz significativamente as perdas de pressão durante o escoamento no duto.

A comparação entre a queda de pressão obtida utilizando-se a técnica core-flow para o escoamento bifásico óleo pesado – água com aquela do escoamento monofásico da água, mostra que os valores obtidos nos dois casos são muito próximos, evidenciando que a técnica core-flow apresentou uma boa eficiência sob as condições utilizadas. Este comportamento também foi observado por Prada & Bannwart (2000) e Silva (2003).

Com relação ao escoamento monofásico de óleo pesado, verifica-se que foi necessário um ΔP igual a 125965 Pa para deslocar um fluxo de massa de óleo de 0,492 kg/s ao longo do duto. Comparando-se este resultado ao ΔP obtido para o escoamento do caso core-flow, foi obtido um fator de redução do gradiente de pressão em torno de 366 vezes (Tabela 5). Prada & Bannwart (1999a), em seus trabalhos, obtiveram redução na faixa de 45 a 150 vezes. Contudo, deve-se ressaltar que os resultados foram obtidos utilizando-se um óleo com viscosidade de 2,7 Pa.s e densidade de 989 kg/m³, enquanto que, nesta pesquisa, a viscosidade do óleo foi de 5 Pa.s e sua densidade 971 kg/m³.

Ao se realizar uma comparação entre os escoamentos bifásico água - óleo pesado e trifásico água - óleo pesado - ar, utilizando a técnica core-flow, constata-se, através dos resultados numéricos apresentados na Tabela 5, que estes corroboram os resultados experimentais obtidos por Trevisan (2003). O autor concluiu que, apesar da presença da fase gasosa aumentar o gradiente de pressão no escoamento trifásico, uma vez que esta fase tende a acelerar o fluxo aumentando o fator de atrito entre os fluidos e a parede do duto, quando comparado com o fluxo bifásico óleo - água, o método de injeção de água como técnica para o transporte de óleos pesados provou ser mais uma vez eficaz.

Estabelecendo-se uma comparação entre as quedas de pressão obtidas nos escoamentos trifásico água - óleo pesado – ar e monofásico de óleo, verifica-se que a queda de pressão no escoamento trifásico é cerca de 170 vezes menor que a obtida no escoamento monofásico. Esta redução é atribuída à presença da lubrificação da parede do duto causada pelo anel de água. Trevisan (2003), ao comparar os gradientes de pressão do escoamento trifásico com o monofásico de óleo, verificou que a presença da água reduziu a queda de pressão cerca de 100 vezes.

Tabela 5. Queda de pressão nos escoamentos monofásico água (caso 5), monofásico óleo pesado (caso 6), bifásico óleo pesado – água (caso 7) e trifásico água-óleo pesado-ar (caso 4).

Escoamento	Perda de Pressão (Pa)
Monofásico de água	203,0
Monofásico de óleo pesado	125965,0
Bifásico	344,0
Trifásico	741,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Devido à importância do tema para o setor petrolífero mundial, recomenda-se fortemente o desenvolvimento de novas pesquisas na área de escoamento multifásico tipo core-flow. Como por exemplo: a) Análise do comportamento do padrão de fluxo e queda de pressão com o aumento do comprimento, diâmetro e espaço anular do duto; b) Análise do comportamento do padrão de fluxo e queda de pressão para diferentes frações volumétricas; c) A determinação de critérios de estabilidade hidrodinâmicas para o escoamento anular, trifásico, com padrão "core-flow " e, d) A análise do comportamento do padrão de fluxo do tipo "core-flow" para escoamentos trifásicos em dutos verticais, catenárias, curvas e derivações. O que certamente abrirá um leque de discussões importantes para o setor.

4. Considerações Finais

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser dadas:

- A modelagem multifásica adotada foi adequada para representar a física do escoamento trifásico água - óleo pesado - ar, já que os resultados de queda de pressão, obtidos numericamente, apresentaram boa concordância com os resultados experimentais obtidos por

Trevisan (2003), com um erro máximo de 7,3 %.

- A técnica core-flow mostrou-se eficiente para o transporte de água-óleo pesado-ar, pois apesar da presença da fase gasosa aumentar a queda de pressão, quando comparado ao escoamento bifásico água-óleo pesado, ela apresentou uma queda de pressão aproximadamente 170 vezes menor quando comparado ao escoamento monofásico de óleo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES, FINEP, ANP e PETROBRAS pelo apoio financeiro, e aos pesquisadores citados no texto que, com suas pesquisas ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Andrade, T. H. F., Crivelaro, K. C. O., Farias Neto, S. R., Lima, A. G. B. (2013b) Isothermal and non-isothermal water and oil two-phase flow (core-flow) in curved pipes. *The International Journal of Multiphysics*, 7, 167 - 182. <https://doi.org/10.1260/1750-9548.7.3.167>

Andrade, T. H. F., Crivelaro, K. C. O., Farias Neto, S. R., Lima, A. G. B. (2012) Numerical Study of Heavy oil Flow on Horizontal Pipe Lubricated by Water, *In: Materials with Complex Behaviour II: Properties, Non-Classical Materials and New Technologies. Series: Advanced Structured Materials*, 1 ed. Heidelberg (Germany): Springer-Verlag, 16, 99-118. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-22700-4_6

Andrade, T. H. F., Farias Neto, S. R., Lima, A. G. B., Silva, C. J., Lima, W. M. P. B. (2014) Operation control of fluids pumping in curved pipes during annular flow: a numerical evaluation. *The International Journal of Multiphysics*, 8, 271 - 284. doi: 10.1260/1750-9548.8.3.271

Andrade, T. H.F., Silva, F. N., Farias Neto, S. R., Lima, A. G. B. (2013a) Applying CFD in the analysis of heavy oil - water two-phase flow in joints by using core annular flow technique. *The International Journal of Multiphysics*. 7, 137 - 152. doi: 10.1260/1750-9548.7.2.137

Belém, E. Z. G. (2008) *Redução de atrito durante o transporte de óleos pesados em curvas*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, Brasil.

Charles, M. E., Govier, G. W., Hodgson, G. W. (1961) The horizontal pipeline flow of equal density of oil–water mixtures. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 39, 17–36. doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450390106>

Chen, P., Sanyal, J., Dudukovic, M. P. (2005) Numerical simulation of bubble columns flows: effect of different breakup and coal essence closures. *Chemical Engineering Science*. 60, 1085 – 1101. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.09.070>

Clark, A.F, Shapiro, A. (1949) *Method of pumping viscous petroleum*. U.S. Patent, 2, 533 - 878.

Conceição, S. B., Lima, A. G. B., Andrade, T. H. F., Farias Neto, S. R., Oliveira, V. A. B., Angelim, K. C. L., Rocha, L. A. (2017) Applying CFD in the Analysis of Heavy-Oil Transportation in Curved Pipes Using Core-Flow Technique. *The International Journal Of Multiphysics*. 11, 169 - 186. doi: 10.21152/1750-9548.11.2.169

Gadelha, A. J. F., Farias Neto, S. R., Swarnakar, R., Lima, A. G. B. (2013) Thermo-Hydrodynamics of Core-Annular Flow of Water, Heavy Oil and Air Using CFX. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 3, 37 - 45. doi: 10.4236/aces.2013.34A1006

Isaacs, J. D., Speed, J. B. (1904) *Method of Piping Fluids*. US Patent N° 759374.

Ishii, M., Zuber, N. (1979) Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet and particulate flow. *AIChE Journal*, 25, 834 – 854. *apud* Manual CFX 10.0. Ansys, Harwell, UK, (2005).

Ooms, G., Vuik, C., Poesio, P. (2007) Core-annular flow through a horizontal pipe: hydrodynamic counter balancing of buoyancy force on core. *Physical Fluids*, 19, 92-103. doi: <https://doi.org/10.1063/1.2775521>

Pereira Filho, G. H. S. (2010) *Transporte não - isotérmico de óleos pesados em risers submerso*. Monografia de graduação, ANP / UFCG - PRH 25, Campina Grande-PB, Brasil.

Prada, J. W. V., Bannwart, A. C. (1999) *Pressure Drop in Vertical Core AnnularFlow*, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Água de Lindóia, São Paulo.

Prada, J. W. V., Bannwart, A. C. (1999a) *Core-flow lift: a new alternative for heavy-oil production*, Proceedings of the XV Brazilian Congress of Mechanical Engineering - COBEM'99, Águas de Lindóia. Obtido em: CD-ROM

Prada, J. W. V., Bannwart, A. C. (2000) *Modeling of vertical core annular flows and application to heavy oil production*, Proceedings of the ETCE2000 & OMAE 2000 Joint Conference - Energy for the New Millenium, New Orleans, LA. Obtido em: CD-ROM

Rodriguez, O. M. H., Bannwart, A. C. (2006) Experimental study on interfacial waves in a vertical core flow. *Journal of Petroleum Science Engineering*, 54, 140–8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2006.07.007>

Russell, T. W. F., Charles, M. E. (1959) The effect of less viscous liquid in the laminar flow of two immiscible liquids. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 37, 8–24. doi: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450370105>

Silva, B. F., Magalhães, H. L. F., Gomez, R. S., Cabral, E. M.S, Batista, F. A., Pereira, A. B. C., Lima, W. M. P. B., Lima, A. G. B. (2020) Isothermal Transport (Core-Flow Type) of Heavy and Ultraviscous Oil in Curved Pipes: A Transient Study by CFD. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 10, 122 - 134. doi: 10.4236/ojfd.2020.102008

Silva, R. C. R. (2003) *Alteração da molhabilidade de superfícies internas de tubulações utilizadas no transporte de óleos pesados via core-flow*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil.

Trevisan, F. E. (2003) *Padrões de fluxo e perda de carga em escoamento trifásico horizontal de óleo pesado, água e ar*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Flávio César Brito Nunes – 40%

Maria Gorethe Sousa Lima Brito – 10%

Severino Rodrigues de Farias Neto – 20%

Elisiane Santana de Lima – 5%

Wanderson Magno Paiva Barbosa de Lima – 5%

Ricardo Soares Gomez – 5%

Hortência Luma Fernandes Magalhães – 5%

Antonio Gilson Barbosa de Lima – 10%