

ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE DO FLUXO BIFÁSICO NÃO-ISOTÉRMICO DE ÓLEO PESADO E GÁS NATURAL EM UM DUTO VERTICAL

L. D. S. SILVA¹, J. L. G. MARINHO², J. I. SOLETTI¹, L. MEILI² e S. H. V. CARVALHO¹

¹ Universidade Federal de Alagoas, Unidade Acadêmica Engenharia Química

² Universidade Federal de Alagoas, Unidade Acadêmica Engenharia de Petróleo

E-mail para contato: lucas.ds25@gmail.com

RESUMO – escoamentos bifásicos líquido-gás são comuns em diversos processos industriais. Uma vez que óleo e gás são produzidos simultaneamente nos reservatórios petrolíferos, esse tipo de escoamento ocorre também no transporte de petróleo. Atualmente, o transporte de óleos pesados é um dos principais desafios na indústria de petróleo, necessitando de muita energia para a sua locomoção, ocasionando uma grande perda de carga decorrente dos efeitos viscosos. O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo numérico sobre o escoamento não-isotérmico de diferentes óleos pesados em um duto vertical. As equações governantes escritas no sistema de coordenadas cilíndricas foram resolvidas pelo método dos volumes finitos. Através de uma simulação numérica, pode-se identificar e avaliar a influência da viscosidade na queda de pressão e no perfil de temperatura do óleo pesado, contribuindo para tentar minimizar os custos operacionais do transporte de óleos pesados.

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos bifásicos líquido-gás são comuns em diversos processos industriais e é o escoamento dominante na produção de petróleo, uma vez que óleo e gás são produzidos simultaneamente nos reservatórios de petróleo (Nascimento, 2013; Souza, 2009; Silva, 2006; Thomas, 2001).

Nos últimos anos, o interesse pela produção de óleos pesados tem crescido devido à grande quantidade de reserva acessível (Andrade *et al.*, 2010). O óleo pesado é caracterizado por sua alta viscosidade e densidade em relação ao óleo convencional e seu transporte é um dos principais desafios na indústria de petróleo devido à alta perda de carga decorrente dos efeitos viscosos (Albuquerque *et al.*, 2007 a, b; Andrade *et al.*, 2013; Marinho, 2012; Santos *et al.*, 2010; Pereira Filho *et al.*, 2010). A produção e o transporte de óleos pesados em águas profundas, por exemplo, apresenta grandes dificuldades, pois a viscosidade do óleo pesado, que depende apenas da temperatura, pode ser afetada consideravelmente pela temperatura da água do mar (Barbosa, 2004 apud Marinho, 2012). Segundo Barbosa (2004 apud Marinho, 2012) e Albuquerque *et al.* (2007 a, b), a água nesses locais pode atingir temperaturas em torno de 5° C. Vale ressaltar que a maior parte das fontes de óleo pesado no Brasil está localizada em águas profundas (Albuquerque *et al.*, 2007 a, b; Schlumberger, 2007

apud Marinho, 2012).

No transporte de óleo em dutos, a diferença de temperatura que pode existir entre o óleo e a parede do duto faz com que as partículas do fluido em contato com a superfície entrem em equilíbrio térmico e troquem calor com as partículas adjacentes, formando um gradiente de temperatura que se desenvolve em uma camada limite térmica (Braga Filho, 2004). Por se tratar de escoamento bifásico, os cálculos utilizados para prever o seu comportamento são mais complexos (Souza, 2009; Silva, 2006). Tal comportamento pode ser entendido usando técnicas de fluidodinâmica computacional (Nascimento, 2013).

Com base no que foi apresentado, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um estudo numérico sobre o fluxo bifásico de dois tipos de óleo pesado em um duto vertical com influência da temperatura, utilizando o software ANSYS CFX 13.0, onde as equações governantes foram resolvidas pelo método dos volumes finitos.

2. METODOLOGIA

2.1. Descrição do Modelo

Para a resolução do problema proposto, foi utilizado um trecho de 20 m de altura de um duto vertical com 0,18 m de diâmetro. A geometria é composta por uma entrada, uma saída e a parede do duto. A geometria e a malha foram geradas no aplicativo ICEM CFD (Figura 1). Em todas as simulações numéricas, foi utilizada uma malha estruturada com 300 mil elementos.

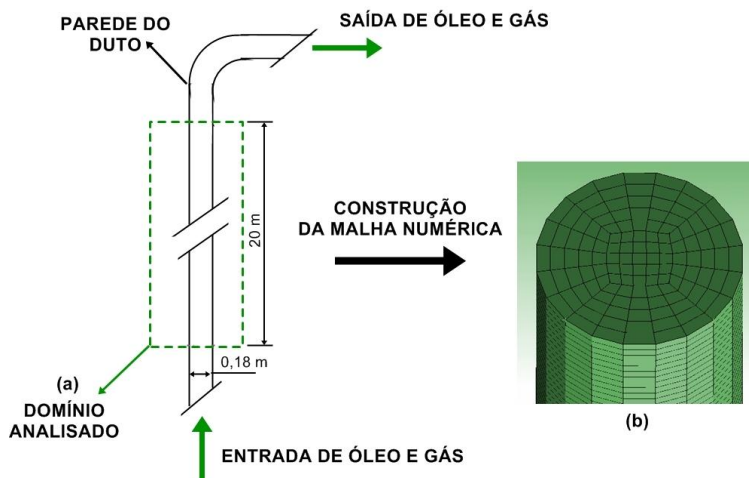


Figura 1 – Domínio analisado (a) e região de saída da malha numérica construída (b).

2.2. Modelagem Matemática

Para a resolução do problema proposto, foi utilizada uma modelagem matemática baseada nos princípios de conservação da massa, momento linear e energia, considerando as seguintes hipóteses: escoamento incompressível (a variação de compressibilidade do gás foi considerada muito pequena e,

portanto, negligenciada neste ambiente), regime permanente, efeito da gravidade, domínio tridimensional em coordenadas cilíndricas, sem reações químicas e sem transferência de massa na interface. Os efeitos rugosos foram considerados desprezíveis neste trabalho. As forças de não-arraste (sustentação, massa virtual, lubrificação na parede, dispersão turbulenta e força devido à pressão interfacial) não foram consideradas.

Adotou-se o modelo de partícula (abordagem Euleriana-Euleriana), onde o gás natural foi tratado como fase dispersa. Com base nas hipóteses consideradas, as principais equações que descrevem esse modelo são as seguintes, conforme apresentado por Marinho (2012):

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

$$\nabla \cdot [f_\alpha (\rho_\alpha \vec{U}_\alpha \otimes \vec{U}_\alpha)] = -f_\alpha \nabla p + \nabla \cdot [f_\alpha (\tau_\alpha + \tau_\alpha^{turb})] + \vec{S}_{MS\alpha} + \vec{M}_\alpha \quad (2)$$

onde as Equações 1 e 2 são as equações de conservação da massa e de conservação do momento linear, respectivamente. Os termos f_α , ρ_α , \vec{U}_α e τ_α^{turb} denotam a fração volumétrica, a massa específica, a velocidade e as tensões turbulentas de Reynolds na fase α e o termo p corresponde à pressão. O termo $\vec{S}_{MS\alpha}$ descreve as forças de momento devido às forças externas e o termo \vec{M}_α descreve as forças interfaciais agindo na fase α devido à presença de outras fases, que pode ser calculado usando a Equação 3 considerando apenas a força de arraste interfacial (Marinho, 2012):

$$\vec{M}_\alpha = C_D \rho_{\alpha\beta} A_{\alpha\beta} |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (3)$$

onde C_D é o coeficiente de arraste, $A_{\alpha\beta}$ é a densidade da área interfacial por unidade de volume, $\rho_{\alpha\beta}$ é a massa específica da mistura e \vec{U}_α e \vec{U}_β são as velocidades real das fases α e β , respectivamente.

A equação da conservação de energia é apresentada conforme a Equação 4 (Souza *et al*, 2010):

$$\nabla \cdot (f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha h_\alpha - k_\alpha \nabla T_\alpha) = Q_\alpha \quad (4)$$

onde h_α , k_α , T_α correspondem a entalpia estática, a condutividade térmica e a temperatura da fase α , respectivamente e Q_α é a transferência de calor na interface de uma fase para a outra.

Para completar a formulação matemática, foi necessário introduzir o número de Prandtl, um coeficiente adimensional que representa a razão entre a viscosidade cinemática e a difusividade térmica (Braga Filho, 2004), que pode ser obtido através da Equação 5 (Marinho, 2012):

$$\text{Pr}_{\alpha\beta} = \frac{\mu_\alpha c_{p\alpha}}{k_\alpha} \quad (5)$$

onde μ_α , $c_{p\alpha}$ e k_α são a viscosidade dinâmica, o calor específico a pressão constante e a condutividade térmica da fase contínua α , respectivamente.

2.3. Condições de Contorno e Propriedades Físicas dos Fluidos

A Tabela 1 apresenta as condições de contorno utilizadas em todos os casos avaliados. Os subscritos *o* e *g* correspondem ao óleo e ao gás, respectivamente.

Tabela 1 – Condições de contorno

	Temperatura	Velocidade média real	Pressão
Entrada	$T_o = T_g = 333,15 \text{ K}$	$U_o = U_g = 1 \text{ m/s}$	—
Parede	$T = 298,15 \text{ K}$	$U_o = U_g = 0 \text{ m/s}$	—
Saída	—	—	$p = 101325 \text{ Pa}$

Foi adotado o valor de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ para o diâmetro principal das partículas da fase gasosa. As propriedades físicas dos fluidos utilizados em todos os casos avaliados são descritas na Tabela 2. A viscosidade dos gases sofre pequenas variações quando a temperatura do gás varia quando comparada com a viscosidade dos líquidos (Munson *et al.*, 2004), de modo que a viscosidade do gás natural foi considerada constante no presente trabalho.

Tabela 2 – Propriedades físicas dos fluidos

	Óleo pesado 1	Óleo pesado 2	Gás natural
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	963,6	989	0,675
$\mu \text{ (Pa.s)}$	$3,1871 \exp(-2,3935 \cdot T_{adm})$	$51,87 \exp(-2,3935 \cdot T_{adm})$	$1,118 \cdot 10^{-5}$
$c_p \text{ (J/kg.K)}$	1870	1800	2230
$k \text{ (W/m.K)}$	0,12375	0,147	0,03388

Fonte: Albuquerque *et al.* (2007 a, b), Santos *et al.* (2010) e Souza *et al.* (2010).

O termo T_{adm} que aparece na Tabela 2 é calculado em função da temperatura absoluta T , conforme a Equação 6 (Santos *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2010)

$$T_{adm} = \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (6)$$

onde T_{min} e T_{max} correspondem a temperatura mínima e máxima válidas para a correlação da viscosidade do óleo pesado. Para o óleo pesado 1, $T_{min} = 298 \text{ K}$ e $T_{max} = 673,15 \text{ K}$ (Souza *et al.*, 2010). Para o óleo pesado 2, $T_{min} = 273 \text{ K}$ e $T_{max} = 573 \text{ K}$ (Santos *et al.*, 2010).

2.4. Casos Avaliados

Foram avaliados ao todo dois casos. No caso 1 foi analisado o fluxo não-isotérmico de gás natural e óleo pesado 1. No caso 2 foi analisado o fluxo não-isotérmico de gás natural e óleo pesado 2. Em ambos os casos, foi utilizada uma fração volumétrica de gás igual a 0,1.

Em todas as simulações, foi utilizado o valor de 10^{-6} como critério de convergência para o

resíduo médio quadrático (RMS). Os valores utilizados para o coeficiente de arraste foram 50,9295 e 604,1415 para o caso 1 e 2, respectivamente. Detalhes sobre o cálculo do coeficiente de arraste podem ser obtidos consultando o manual do CFX 13.0.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma melhor análise dos resultados obtidos, o trecho do duto vertical foi dividido em seções transversais ao eixo a fim de observar a variação da distribuição de temperatura e de viscosidade de cada óleo ao longo do duto, conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3.

A Figura 2 mostra os resultados obtidos para o caso 1 (fluxo não isotérmico de gás natural e óleo pesado 1). Na entrada do domínio analisado ($z = 0$ m), observa-se que a temperatura tem distribuição uniforme. Em $z = 5$ m, nota-se que a temperatura do óleo na região próxima a parede é menor que na região central, de modo que é possível observar um gradiente de temperatura do centro do duto para a parede. A maior temperatura do óleo em relação à superfície interna do duto faz com que as camadas de fluido mais quentes transfiram calor para as camadas mais próximas à parede, provocando uma diminuição na temperatura média do óleo diminua à medida que o fluido escoar ao longo do duto. Esse fato pode ser observado na Figura 2 com o crescimento da camada limite térmica entre $z = 0$ m e $z = 20$ m. Nota-se ainda que a camada limite térmica não está totalmente desenvolvida. Segundo Pereira *et al.* (2010), isso pode ser atribuído ao pequeno comprimento do trecho analisado e ao elevado número de Prandtl para o óleo pesado 1 ($Pr = 45146,654$). Resultados semelhantes foram obtidos pelos autores Albuquerque *et al.* (2007 a, b) e Andrade *et al.* (2013).

Na Figura 2, também é possível observar que a viscosidade do óleo pesado também é uniforme na entrada do domínio analisado ($z = 0$ m). Entre $z = 5$ m e $z = 20$ m, nota-se que a viscosidade do óleo aumenta na região da camada limite térmica, onde a temperatura do fluido é menor.

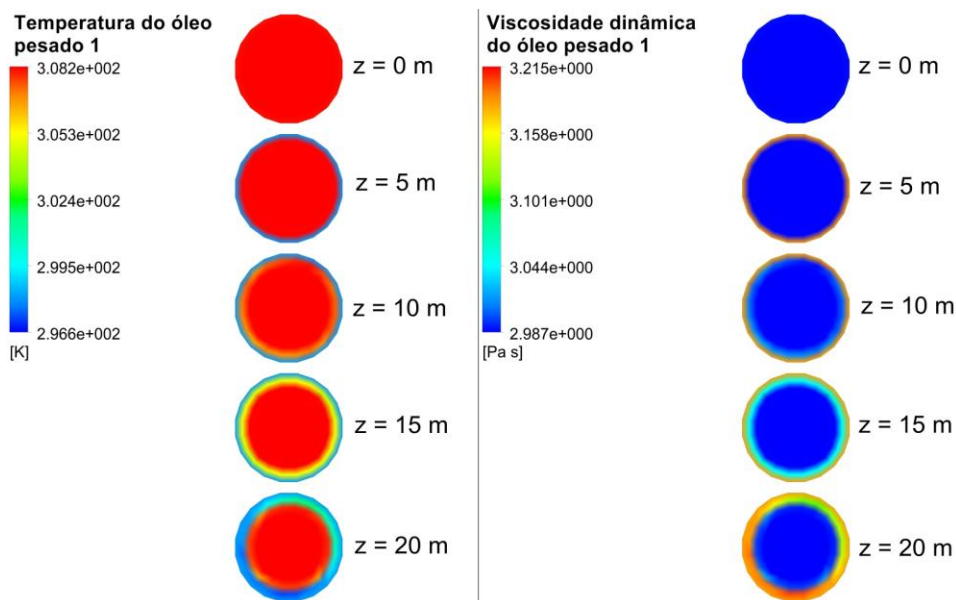


Figura 2 – Campo de temperatura e de viscosidade do óleo pesado 1 em cada seção transversal.

Na Figura 3 são apresentadas as distribuições de temperatura e de viscosidade referentes ao caso 2, que apresentam comportamentos semelhantes aos resultados obtidos para o caso 1. Embora o número de Prandtl do óleo pesado 2 ($Pr = 479820,278$) seja superior ao obtido para o óleo pesado 1, a camada limite térmica do óleo pesado 2 é maior, mostrando que o perfil de temperatura para este fluido desenvolve-se mais rapidamente. Tal fato não é contraditório, uma vez que o comprimento de entrada térmico também depende do número de Reynolds, que é relativamente pequeno para o óleo pesado 2 em virtude da sua alta viscosidade (Albuquerque *et al.*, 2007 a, b). Assim, a maior espessura da camada limite térmica obtida no caso 2 pode ser atribuída ao menor calor específico e maior condutividade térmica do fluido utilizado.

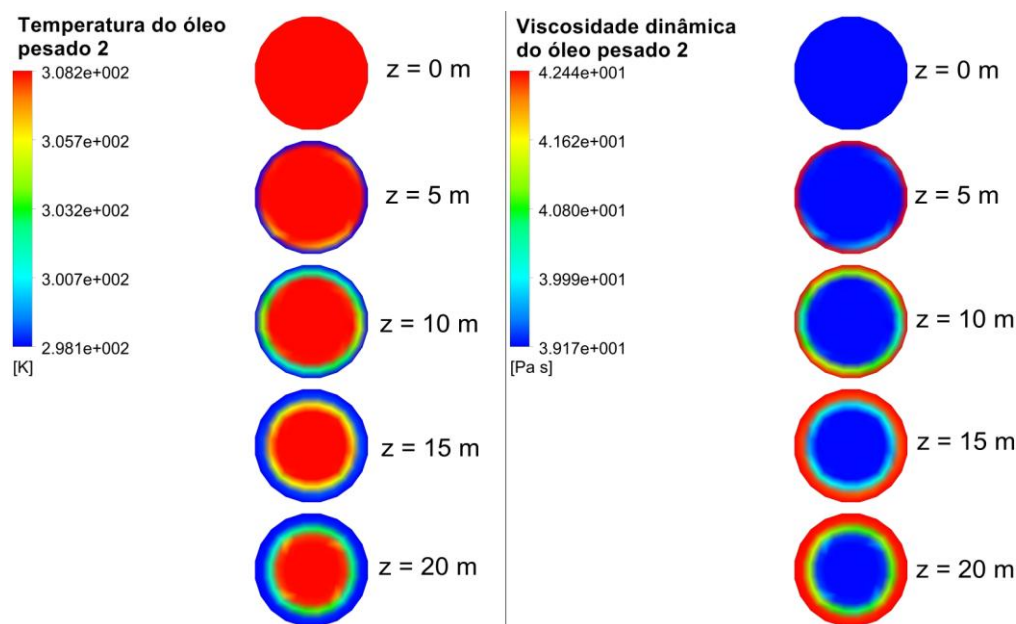


Figura 3 – Campo de temperatura e de viscosidade do óleo pesado 2 em cada seção transversal.

A Tabela 3 apresenta os valores em módulo da queda de temperatura média de cada óleo, do aumento da viscosidade média de cada óleo e da queda de pressão em cada caso avaliado. A maior queda de temperatura obtida no caso 2 é esperada, uma vez que a camada limite térmica do óleo pesado 2 é maior, isto é, o fluido utilizado no caso 2 é resfriado mais facilmente. O caso 2 também apresenta um maior aumento na viscosidade devido à maior diminuição da temperatura e maior queda de pressão em virtude da alta viscosidade do óleo utilizado.

Tabela 3 – Variação de temperatura e viscosidade do óleo e queda de pressão em cada caso

	$ \Delta T_{\text{média}} $ (K)	$\Delta \mu_{\text{média}}$ (Pa.s)	$ \Delta p $ (Pa)
Caso 1	2,950	0,058	220382
Caso 2	3,828	1,240	936300

4. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos foi possível observar um gradiente de temperatura do centro da tubulação para a parede do duto. A queda percentual de temperatura foi de 0,96% e 1,24% para os casos 1 e 2, respectivamente. A maior diminuição de temperatura obtida no caso 2 pode ser atribuída ao menor calor específico e maior condutividade térmica do óleo utilizado.

A viscosidade de ambos os óleos foi afetada pela temperatura. A variação percentual de viscosidade foi igual a 1,94% e 3,16% para os casos 1 e 2, respectivamente. O maior aumento relativo de viscosidade no caso 2 se deve à maior queda de temperatura observada. As variações de temperatura e viscosidade de cada óleo utilizado podem ser consideradas desprezíveis em virtude do comprimento do duto utilizado.

Foram obtidos valores da queda de pressão iguais a 220382 Pa e 936300 Pa para os casos 1 e 2, respectivamente. A viscosidade do óleo utilizado no caso 2 teve grande influência na queda de pressão em virtude da alta viscosidade do fluido.

5. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, S. F. *et al.* Simulação Numérica do Escoamento Não-Isotérmico de Gás e Óleo em Duto Flexível de Seção Circular. 4º *PDPETRO*, 10 p. Campinas/SP, 2007.
- ALBUQUERQUE, S. F. *et al.* Steady Non-Isothermal Two-Phase Flow of Oil and Gas in Subsea Flexible Pipe. *International Journal of Modeling and Simulation for the Petroleum Industry*, p. 41-42. 2007.
- ANDRADE, T. H. F. *et al.* Isothermal and non-isothermal water and oil two-phase flow (core-flow) in curved pipes. *International Journal of Multiphysics*, p. 167-169, 2013.
- ANDRADE, T. H. F. *et al.* Redução de Atrito no Escoamento Bifásico Água-Óleo em Tubos Horizontais. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Campina Grande/PB, 2010.
- ANSYS CFX 13. *User manual*. Ansys Europe Ltd., 2011.
- BRAGA FILHO, W. *Transmissão de Calor*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- MARINHO, J. L. G. *Escoamento anular isotérmico de óleos pesados e água em bifurcações angulares: modelagem e simulação*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2012.
- MUNSON, B. R. *et al.* *Fundamentos da mecânica dos fluidos*. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- NASCIMENTO, J. C. S. *Simulador de Escoamento Multifásico em Poços de Petróleo*.

Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, fev. 2013.

PEREIRA FILHO, G. H. S. *et al.* Simulação Numérica do Transporte Não-Isotérmico de Óleos Pesados em Risers Submersos Via CFX. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Campina Grande/PB, 2010.

SANTOS, J. S. S. *et al.* Transporte de Óleos Pesados em Catenárias Via Técnica Core-Flow - Modelagem e Simulação. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Campina Grande/PB, 2010.

SILVA, E. S. *Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2006.

SOUZA, J. S. *et al.* Separação Não Isotérmica Água/Óleo Pesado e Ultra-Viscoso Via Hidrociclone - Modelagem e Simulação. *VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. Campina Grande/PB, 2010.

SOUZA, R. G. S. *Escoamento bifásico líquido-gás: previsão de gradientes de pressão com a correlação de Lockhart & Martinelli e fluidodinâmica computacional*. Projeto final de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, fev. 2009.

THOMAS, J. E. (Org.) *et al.* *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobras, ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV/UFAL) e ao Laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP/UFAL) pelo apoio financeiro e suporte técnico, respectivamente.