

SIMULAÇÃO NÚMERICA DO TRANSPORTE NÃO-ISOTÉRMICO DE ÓLEOS PESADOS EM RISERS SUBMERSOS VIA CFX

George Henrique Sarmiento Pereira Filho¹, e-mail¹: georgesarmiento@gmail.com
Antonio Gilson Barbosa de Lima, e-mail¹: gilson@dem.ufcg.edu.br
Severino Rodrigues Farias Neto, e-mail²: fariasn@deq.ufcg.edu.br
Kelen Cristina de Oliveira Krivelaro³, e-mail²: kelenkrivelaro@yahoo.com.br

¹Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Caixa Postal 10069, CEP 58429-900, Campina Grande-PB, Brasil.

²Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Química, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Caixa Postal 10069, CEP 58429-900, Campina Grande-PB, Brasil.

Resumo: Atualmente as reservas brasileiras de óleo pesado e ultraviscosos estão estimadas em 3 trilhões de barris representando 15 % de todas as reservas mundiais. Desta forma o aproveitamento comercial de acumulações de óleos pesados e viscosos em águas profundas representa um grande desafio econômico e tecnológico para as grandes companhias de petróleo, uma vez que as reservas de óleos leves vêm apresentando um esgotamento progressivo nas últimas décadas. A alta viscosidade destes fluidos requer uma potência de bombeamento muito superior à dos óleos leves, sobrecarregando e conseqüentemente danificando os equipamentos, aumentando o custo de produção. Assumem virtude das inúmeras dificuldades de produção de petróleo pesado e viscoso em ambiente offshore há a necessidade de novos estudos sobre o escoamento de óleos pesados e ultra-viscosos a fim de se desenvolver projetos que permitam a produção e escoamento da produção em ambiente offshore de forma otimizada sob o ponto de vista técnico e econômico. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo investigar numericamente o escoamento multifásico não-isotérmico tipo core-annular flow, de óleos pesados e ultra-viscosos em risers submersos em forma de catenária, via software CFX-10. Resultados da distribuição de velocidade, pressão, fração volumétrica e temperatura das fases são apresentadas e analisadas.

Palavras-chave: transporte; óleos pesados; core-annular flow; CFX

1. INTRODUÇÃO

Considerados de grande importância na indústria petrolífera, os óleos pesados constituem uma significativa reserva a ser explorada e produzida. As reservas de óleo pesados no mundo estão estimadas em 3 trilhões de barris representando 15 % de todas as reservas mundiais. Diante da enorme potencialidade e da redução das reservas convencionais, o aproveitamento comercial de acumulações de óleos pesados e viscosos em águas profundas representa um grande desafio econômico e tecnológico para as grandes companhias petrolíferas. No Brasil, 14% das reservas estão localizadas em terra, 13% em lâminas d'água até 400 m, 34% em lâminas d'água de 400 m à 1000 m e 39% em lâminas d'água acima de 1000 m. Contudo, existem poucos campos no mar produzindo óleos pesados. Desta forma para o Brasil esta questão é de alta relevância devido aos expressivos volumes de óleos pesados e viscosos descobertos em áreas de produção e exploratórias nas Bacias de Campos e Santos.

Os óleos pesados são usualmente definidos como óleos com grau API inferior a 20° (ou seja, uma densidade relativa superior a 0,93), contudo a ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) classifica o petróleo nacional que apresenta °API variando de 10 até 22 como óleo pesado. Estes óleos, têm elevada quantidade de carbono em relação ao hidrogênio, em geral com mais de 15 átomos de carbono por molécula. Além disso, possuem índices elevados de aromáticos, parafina, asfalteno, enxofre, nitrogênio e metais (como Vanádio, Níquel e Enxofre), apresentando por isto problemas de extração e transporte. Entretanto o grau API não representa completamente as propriedades dos óleos pesados sendo a viscosidade dinâmica a propriedade mais característica, variando de 100 cP a 10.000 cP. Apesar da alta viscosidade, o óleo pesado dependendo do valor desta propriedade, apresenta um comportamento de fluido Newtoniano, sendo sua viscosidade função da temperatura.

Dentre os diversos desafios relacionados com a produção de petróleo em águas profundas a deposição de parafinas nas paredes internas de linhas de transporte e produção são problemas críticos da indústria que pode acarretar no aumento da potência de bombeamento requerida, diminuindo a vazão, ou mesmo o bloqueio completo da linha, com

perda de produção e investimentos. Atualmente a indústria petrolífera dispõe de métodos tradicionais para a prevenção ou remoção de depósitos de parafina, baseados na redução da viscosidade do óleo dentro do reservatório e no poço e, quase sempre são associadas com um sistema de elevação. No entanto custo de utilização destes métodos cresce significativamente com a profundidade da lâmina d'água, podendo vir a ser um fator de peso na viabilidade econômica de um campo de produção *offshore*. A técnica *core-flow* vem sendo utilizada na produção de óleos pesados uma vez que permite elevar e transportar petróleo de alta viscosidade de forma simples e econômica, reduzindo a resistência por atrito do óleo pesado e ultraviscoso no trajeto do poço até a plataforma.

A técnica *core-flow* consiste na injeção controlada de água, nas laterais do tubo formando um filme lubrificante em toda sua extensão como uma configuração anular conforme ilustrado na Fig. (1). Entretanto para manutenção da estabilidade hidrodinâmica do escoamento tipo *core-flow* é necessário o conhecimento velocidade, propriedades dos fluidos e frações bem definidas, uma vez que o padrão de escoamento acontece em condições específicas.

Diversas pesquisadores tem estudado esta técnica a fim de otimizar a produção e transporte de óleo pesados dentre eles citar: Ooms (1972), Oliemans *et al.* (1987), Bannwart (1998), Prada e Bannwart (1999a), Prada e Bannwart (1999b), Silva(2003), Trevisan (2003), Barbosa(2004), Damacena (2009).

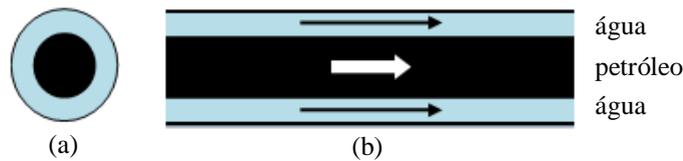


Figura 1: Modelo representativo do método core flow vistas: (a) seção transversal; (b) seção longitudinal

Devido as inúmeras dificuldades de produção e transporte de petróleo em águas profundas, bem como obtenção de dados experimentais, e devido a importância do problema físico em discussão, há necessidade de novos estudos sobre o escoamento de óleo pesado e ultra-viscoso a fim de se desenvolver projetos que permitam a produção e escoamento da produção em ambiente *offshore* de forma otimizada sob o ponto de vista técnico e econômico. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo investigar numericamente o escoamento multifásico tipo *core-annular flow*, de óleo pesados ultra-viscoso e água em *risers* submersos em forma de catenária quanto a sua termofluidodinâmica, utilizando o via software CFX-3D.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelagem matemática

Para descrever a termohidrodinâmica do escoamento multifásico, as seguintes equações foram usadas (CFX Solver Theory, 2005):

- Equação da continuidade

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

- Equação da quantidade de Movimento

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{\alpha} f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha} \right) + \nabla \cdot \left[\sum_{\alpha} f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha} \otimes \vec{U}_{\alpha} \right] - f_{\alpha} \nabla p_{\alpha} + \nabla \cdot \left\{ f_{\alpha} \mu_{\alpha} \left[\nabla \vec{U}_{\alpha} + \nabla \vec{U}_{\alpha}^T \right] \right\} + \\ + \sum_{\beta=1}^{N_p} \left(\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_{\beta} - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_{\alpha} \right) = S_{M\alpha} + M_{\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

Nas Equações 1 e 2, α e β , representam as fases envolvidas (água ou óleo), t é o tempo, f é a fração volumétrica, ρ é a densidade, \vec{U} é o vetor velocidade, N_p é o número de fases envolvidas, p é a pressão, μ é a viscosidade. Além disso, o termo $S_{MS\alpha}$ descreve a fonte de massa específica utilizada, $\Gamma_{\alpha\beta}$ é a taxa de fluxo de massa por unidade de volume da fase α para a fase β , $S_{M\alpha}$ são as forças de momento devido às forças de corpo externas (força de empuxo e força rotacional), M_{α} representam as forças interfaciais agindo na fase α devido à presença de outras fases (força de arrasto, força *lift*, força de lubrificação na parede, força de massa virtual e força de dispersão turbulenta na interface) e o termo $(\Gamma_{\alpha\beta}^+ \vec{U}_{\beta} - \Gamma_{\beta\alpha}^+ \vec{U}_{\alpha})$ representa a transferência de momento induzido pela transferência de massa na interface.

Na Equação 3, h_a é entalpia estática, l_a é condutividade térmica, T_a é temperatura da fase a , S_a é a fonte de calor externa, Q_a transferência de calor para fase α através das interfaces com outras fases, $\sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ h_{\beta s} - \Gamma_{\beta\alpha}^+ h_{\alpha s})$ representa transferência de calor induzida pela transferência de calor.

- Equação da energia

$$\frac{\partial}{\partial t} r_\alpha \rho h_\alpha + \nabla \cdot \left[r_\alpha \rho \bar{U}_\alpha h_\alpha - \lambda_\alpha \nabla T_\alpha \right] = \sum_{\beta=1}^{N_p} \Gamma_{\alpha\beta}^+ h_{\beta s} - \Gamma_{\beta\alpha}^+ h_{\alpha s} + Q_\alpha + S_\alpha \quad (3)$$

- Modelo de turbulência

O modelo de turbulência utilizado para descrever o escoamento da água foi o modelo $k-\varepsilon$. No modelo $k-\varepsilon$, é assumido que os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média, com a constante de proporcionalidade sendo caracterizada pela viscosidade turbulenta (idealização conhecida como hipótese de Boussinesq).

A característica deste tipo de modelo é que duas equações de transporte modeladas, separadamente, são resolvidas para o comprimento turbulento e a escala de tempo ou para quaisquer duas combinações linearmente independentes delas. As equações de transporte para a energia cinética turbulenta, k , e a taxa de dissipação turbulenta, ε , são respectivamente:

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha k_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \left[\rho_\alpha \bar{U}_\alpha k_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k_\alpha \right] \right\} = f_\alpha G_\alpha - \rho_\alpha \varepsilon_\alpha \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_\alpha f_\alpha \varepsilon_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \bar{U}_\alpha \varepsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \varepsilon_\alpha \quad (5)$$

onde G_α é a geração de energia cinética turbulenta no interior da fase α , C_1 e C_2 são constantes empíricas e ainda nesta, ε_α corresponde a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase α e k_α a energia cinética turbulenta para a fase α , definidas por:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{c_\mu q_\alpha^3}{l_\alpha} \quad (6)$$

$$k_\alpha = \frac{q_\alpha^2}{2} \quad (7)$$

onde l_α é o comprimento de escala espacial, q_α é a escala de velocidade, c_μ é uma constante empírica, dada por:

$$c_\mu = 4c_\alpha^2 \quad (8)$$

onde c_α também é uma constante empírica. A viscosidade turbulenta $\mu_{t\alpha}$ é dada por:

$$\mu_{t\alpha} = c_\mu \rho_\alpha \frac{k_\alpha^2}{\varepsilon_\alpha} \quad (9)$$

As constantes utilizadas nas equações anteriores são: $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

2.2. Condições de contorno e propriedades termofísicas

Foi considerado que a catenária estava inicialmente cheia com água. As demais condições de contorno aplicadas sobre as fronteiras, como está ilustrado na Fig. (2), como segue:

a) Na seção anular referente à entrada de água foi adotado um valor prescrito (regime turbulento) e não nulo para a componente de velocidade axial e fração volumétrica de água na direção z , de tal forma que:

$$R_i < r < R_e \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} u_{z,w} = u_w \\ f_w = 1 \\ T = T_w = 333K \end{cases}$$

b) Na seção referente à entrada de óleo foi adotado um valor prescrito (regime laminar) e não nulo para a componente de velocidade axial e para fração volumétrica de óleo na direção z , ou seja:

$$0 < r < R_i \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} u_{z,o} = u_o \\ f_o = 1 \\ T = T_o = 333K \end{cases}$$

c) Nas fronteiras referentes a parede da catenária foi considerada a condição de não deslizamento, ou seja:

$$r = R_e \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} u_{x,w} = u_{y,w} = u_{z,w} = 0 \\ u_{x,o} = u_{y,o} = u_{z,o} = 1 \\ T = T_p = 278K \end{cases}$$

d) Na seção de saída ($z = L$) foi prescrito uma pressão estática constante $p_{est} = 98100$ Pa, sendo L o comprimento da catenária.

Visando simplificar o modelo e a solução das equações governantes, algumas considerações foram assumidas conforme Tab (1).

Tabela.1. Considerações adotadas para a resolução das equações governantes.

Propriedades	Considerações
Escoamento	Bifásico (água-óleo), tridimensional, incompressível e não-isotérmico.
Modelo de transferência de interface	Modelo de Mistura
Força de empuxo	Considerada
Critério de Convergência para a massa	10^{-7} kg/s
Esquema de Advecção	High resolution
Método de interpolação para pressão	Trilinear
Método de interpolação para velocidade	Trilinear
Força interfacial	Arraste

As propriedades dos fluidos utilizados na simulação do transporte de óleos pesados empregando a técnica *core-flow* estão apresentadas na Tab. (2).

Tabela 2 – Propriedades termofísicas dos fluidos e velocidades da água e do óleo e coeficiente de transferência de calor.

Propriedades	Água de reservatório	Óleo Pesado
Massa específica (kg/m^3)	997	989
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	$\mu_w = \frac{2185}{(40,12 - 0,0051547T)T - 1000}$	$\mu_o = 51,87.e \left[-2,3935 \left(\frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right) \right]$
Calor específico (J/kg.K)	4181,7	1800
Condutividade térmica (W/m.K)	0,6069	0,147
Tensão superficial (N.m^{-1})	0,062	
Velocidade (m/s)	1,65	1,25
Coeficiente de transferência de calor ($\text{J/m}^2.\text{K}$)	30	

Na Tabela 2 T_{\min} e T_{\max} correspondem aos valores da mínima e máxima temperatura válidas para a correlação da viscosidade, do óleo pesado, sendo iguais a 273 K e 573 K, respectivamente. Estas propriedades foram obtidas de Babadagli e Al-Bemami (2007) e Perry (1963).

As pressões existentes no escoamento não-horizantal, como segue:

$$P_t = P_f + P_h \quad (10)$$

onde P_t é a pressão total, P_f é a pressão por fricção e P_h é a pressão hidrostática.

A pressão hidrostática é expressa por:

$$P_h = \left[\rho_\alpha \varepsilon_\alpha + \rho_\beta (1 - \varepsilon_\alpha) \right] \cdot g \cdot h \quad (11)$$

onde g é a aceleração gravitacional, ρ_α é a densidade da fase α do óleo e ε_α é a fração *in situ* do óleo da fase α .

A fração volumétrica *in situ* ou *holdup* é definida através da relação abaixo:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{A_\alpha}{A} \quad (12)$$

onde A_i corresponde área de injeção do óleo e A corresponde a área da secção transversal do *riser*.

A velocidade da mistura é utilizada nos escoamentos monofásicos sendo definida através da relação entre a vazão volumétrica total pela seção transversal do *riser*:

$$u_{mistura} = \frac{\dot{V}_\alpha + \dot{V}_\beta}{A} \quad (13)$$

onde \dot{V}_o é vazão volumétrica do óleo e \dot{V}_w é vazão volumétrica da água.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação foi desenvolvida no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, do Departamento de Engenharia Mecânica, no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande. A máquina utilizada um Intel core 2 quad 2.44 GHz, 8 Gb RAM e HD de 1 Terabyte.

A Fig. (2) mostra a malha numérica obtida de uma catenária com 15 metros de comprimento e diâmetro menor ($D_i = 0,08001$ m), região por onde o óleo é injetado, e por um duto de diâmetro maior ($D_e = 0,0889$ m), onde a região anular ($D_e - D_i$) é a região de injeção de água. Essa disposição de entrada água-óleo faz com que a água forme um perfil anular ao longo da catenária, fazendo com que o óleo escoe pela parte central da tubulação. A malha tridimensional não-estruturada gerada no CFX 5.6 com 346.075 elementos (177.390 tetraédricos, 168.564 prismáticos e 121 piramidais) representa o domínio de estudo no presente trabalho, o qual foi criado por meio de um conjunto de pontos, curvas, superfícies e sólidos descrevendo a sua forma (catenária) e suas dimensões (diâmetro e comprimento).

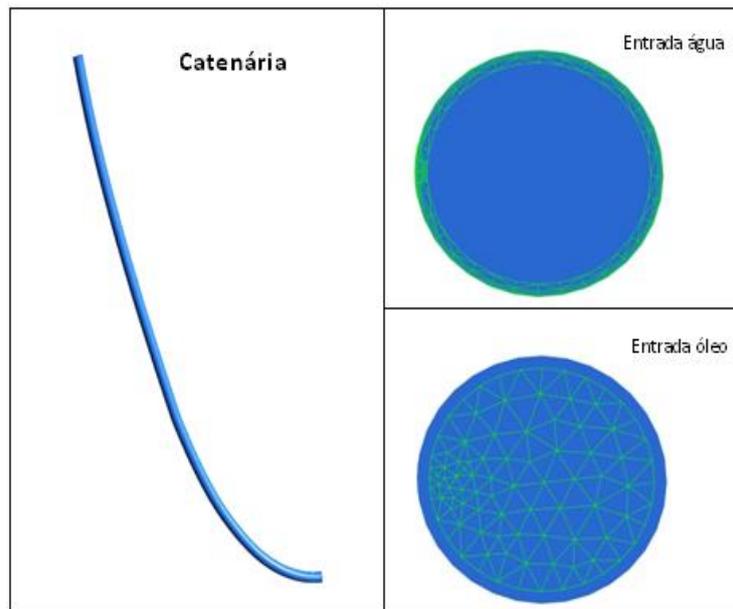


Figura 2: Malha criada no CFX.

A simulação foi realizada em regime transiente, com um tempo total de $t = 60$ s e um $\Delta t = 0,3$ s, contudo só serão apresentados os resultados em regime permanente.

A Figura 3 mostra o campo de pressão ao longo do riser utilizando o escoamento *core-flow*. Observa-se que ocorre um decréscimo da perda de pressão ao longo do escoamento, onde a pressão máxima ocorre na entrada e a pressão mínima na região de saída do duto. O diferencial de pressão necessário para transporta o óleo utilizando o padrão de escoamento *core-flow* é $\Delta P = 90169,7$ Pa.

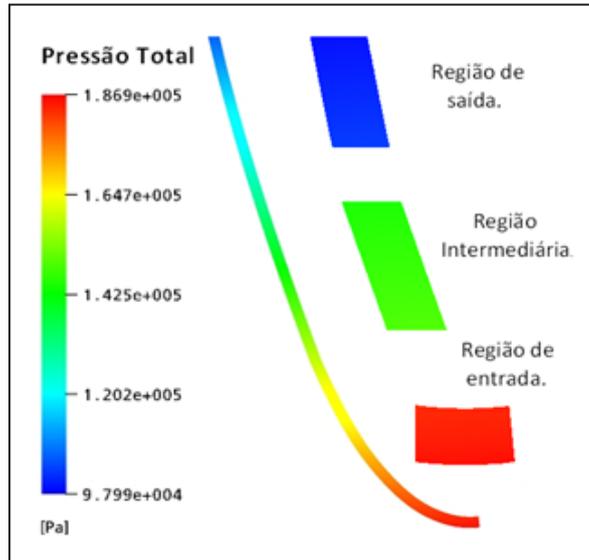


Figura 3. Distribuição de pressão ao longo do riser.

O escoamento monofásico óleo do com viscosidade variável ($\mu = f(T)$) apresenta variação pressão hidrostática inferior a queda de pressão por fricção. Para o escoamento monofásico do óleo pesado a perda de pressão por atrito viscoso é 5,59 vezes maior do que a de perda hidrostática; o diferencial de pressão total necessário para escoar óleo em regime monofásico é $\Delta P = 563105$ Pa. Devido a grande dramaticidade do transporte e de crus em ambientes *offshore* torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas capazes escoar petróleo de alta viscosidade com menor consumo energético, tornado a exploração dos mesmos cada vez mais atrativas.

Existem várias metodologias para avaliar a eficiência da técnica do padrão de escoamento *core flow* em relação ao escoamento monofásico do óleo. A Tab. (3) mostra os fatores de redução: por fricção, total, potência por fricção e o potencial total obtidas nas simulações. Para elevar a mesma quantidade de óleo utilizando o padrão de escoamento *core-flow*.

Tabela 3 – Propriedades termofísicas dos fluidos e velocidades da água e do óleo e coeficiente de transferência de calor.

Fatores de Redução de Pressão	Equações	Redução
Fricção (Pa)	$\frac{\Delta P_{f,monofásico\ óleo}}{\Delta P_{f,core-flow}}$	104,68
Total (Pa)	$\frac{P_{t,monofásico\ óleo}}{P_{t,monofásico\ core-flow}}$	6,24
Potência por Fricção (Pa)	$\frac{\Delta P_{f,\ óleo} \cdot \dot{Q}_{\ óleo}}{\Delta P_{f,core-flow} \cdot \dot{Q}_t}$	79,93
Potência total (Pa)	$\frac{\Delta P_{t,\ óleo} \cdot \dot{V}_{\ óleo}}{\Delta P_{t,core-flow} \cdot \dot{V}_t}$	4,76

Dentre as várias metodologias utilizadas, outra observação bastante pertinente diz respeito à razão entre a variação de pressão por fricção utilizando o padrão de escoamento *core-flow* e a variação de pressão do escoamento monofásico da água à vazão da mistura. A relação encontrada no presente estudo foi de 1,37, representando a aproximação do

escoamento *core-flow* com escoamento monofásico da água à vazão da mistura. Desta forma o transporte de óleo pesado e ultraviscoso apresenta praticamente a mesma perda de carga de um escoamento monofásico de água.

A Figura 4 mostra a fração volumétrica do óleo ao longo do escoamento. Verifica-se o padrão de escoamento *core flow*, sendo que o óleo escoou pelo centro do duto e a água próxima a parede da tubulação em forma anular, garantindo a lubrificação do escoamento.

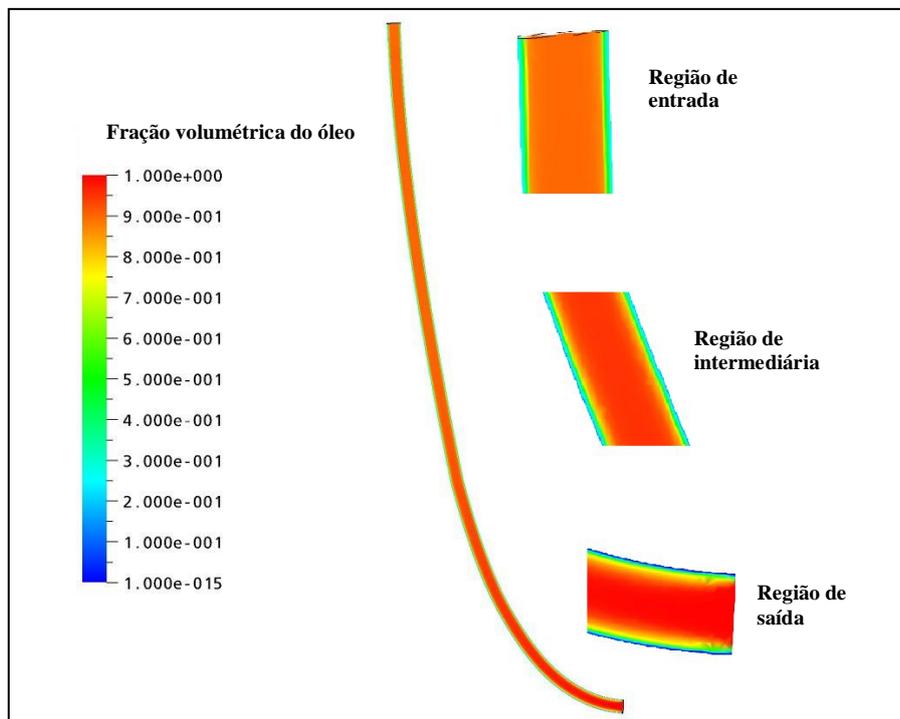


Figura 4. Fração volumétrica do óleo ao longo do riser.

A Figura 5 mostra que na região de saída, mesmo com a presença da água, o óleo ainda entra em contato com a tubulação, apresentando na região anular frações em torno de 0,09 de óleo. Percebe-se uma quase completa concentração de óleo na região central do duto.

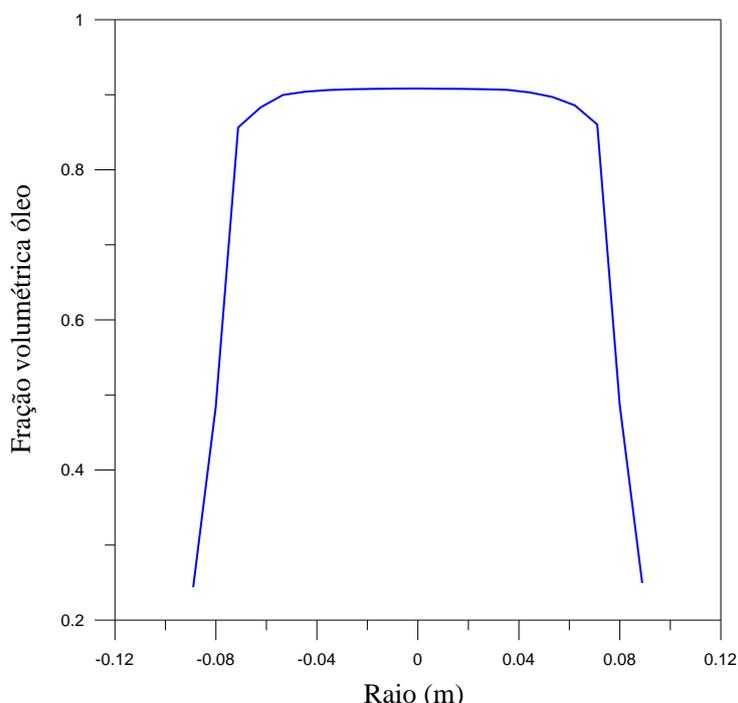


Figura 5. Fração volumétrica do óleo na região de saída.

A busca pela razão entre as velocidades de óleo e de água adequadas, de forma a garantir a eficiência da lubrificação das paredes da catenária, ou seja, a manutenção do filme de água no escoamento *core-flow*, consiste na

maior dificuldade da utilização do padrão de escoamento *core-flow*, uma vez que tal configuração de escoamento existe para razões bem definidas de velocidades.

A Figura 6 mostra a velocidade do óleo ao longo do escoamento, onde percebe-se padrão de escoamento *core flow*. Neste caso o óleo escoa pelo centro do duto com velocidades maiores na região central do *riser*, a qual, existe uma pequena quantidade de água mostrando desta forma que a maior parte da fração volumétrica de água encontra-se na região anular. Nota-se ainda que há uma diminuição do campo de velocidade em virtude das forças viscosas e da possível emulsão formada no transporte e elevação do petróleo pesado e ultraviscoso.

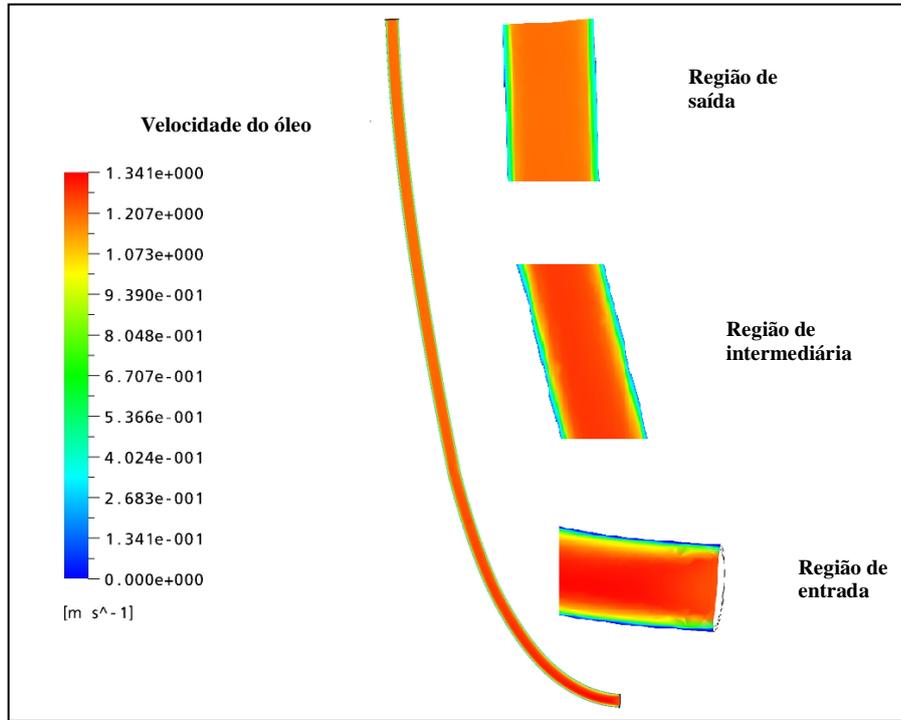


Figura 6. Campo de velocidade do óleo ao longo do riser.

Pode-se constatar a partir da Fig. (7) que o perfil de velocidade conserva praticamente as características do perfil pistão imposta como condição de contorno sobre a seção de entrada do óleo. A Figura 4 mostra ainda a velocidade do óleo possui valor zero na parede do duto e uma velocidade máxima no centro de 1,21 m/s.

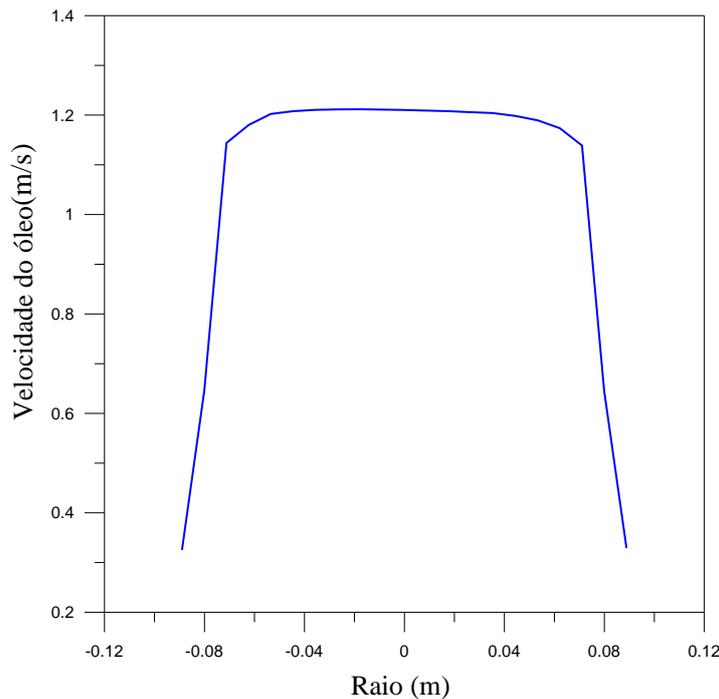


Figura 7. Velocidade do óleo na região de saída.

A Figura 8 mostra o campo de temperatura do óleo ao longo do escoamento. Percebe-se que o crescimento da camada limite térmica é pequeno em virtude do número de Prandtl elevado para óleo, além da capacidade calorífica e presença da água que atuam como isolantes térmicos; há também a questão geométrica do comprimento do duto que é de apenas 15 metros.

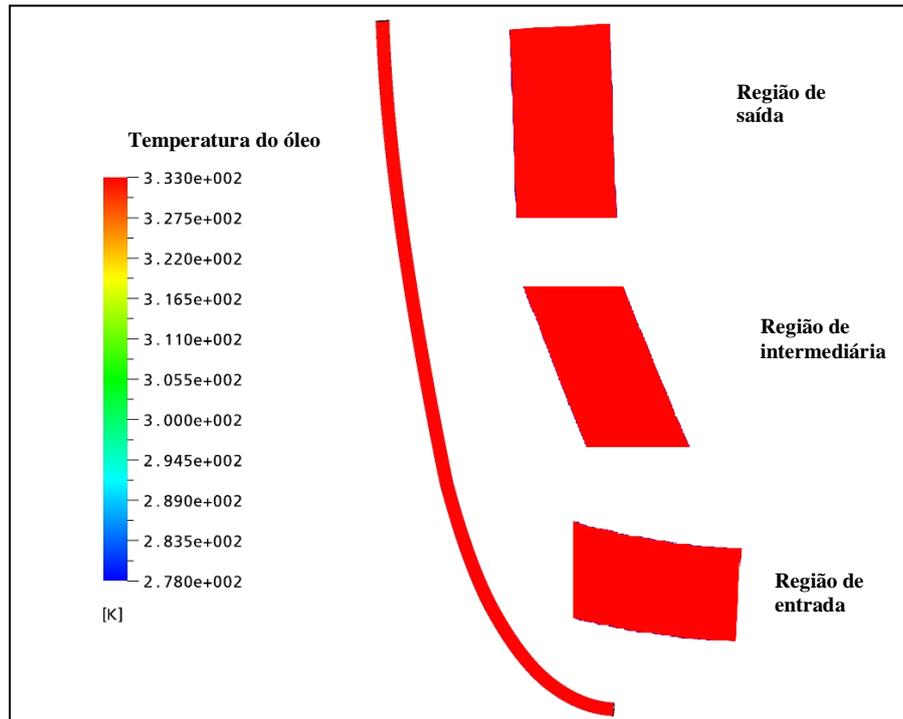


Figura 8. Campo de temperatura do óleo ao longo.

A Figura 9 mostra a pequena redução de temperatura do óleo $\Delta T = 0,21 \text{ }^\circ\text{C}$, entre as regiões de entrada e saída, entretanto tal variação exerce um efeito significativo na viscosidade dinâmica do óleo gerando uma maior estabilidade hidrodinâmica no padrão de escoamento *core-flow*. Além do desenvolvimento da camada limite térmica mais acentuada no escoamento monofásico do óleo.

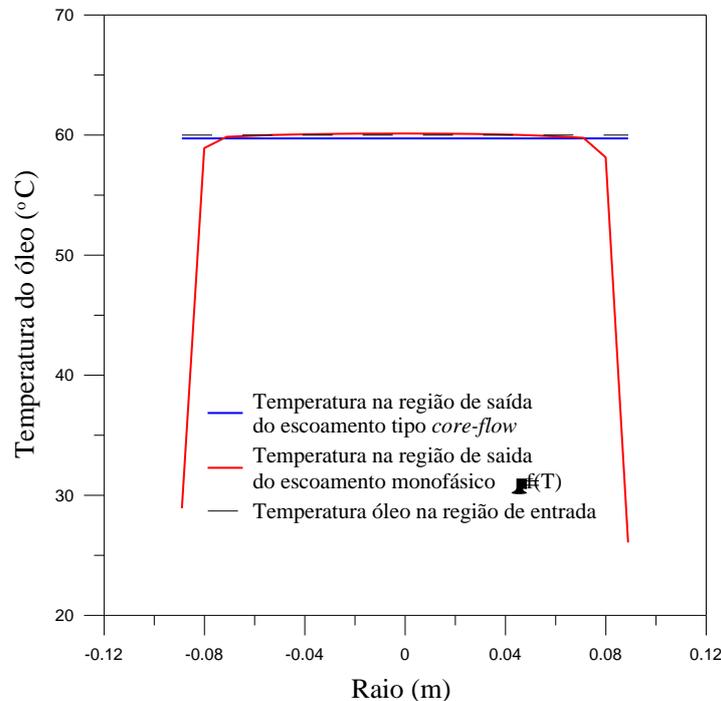


Figura 9. Comparação entre as temperaturas na região de entrada e saída.

Em virtude da grande complexidade geométrica da catenária, a manutenção do filme de água torna-se bastante complexa havendo uma maior propensão de deposição do óleo nas regiões de altas pressões além dos locais onde a

estrutura das ondas são perturbadas causando variações locais e instantâneas do *hold up* (fração volumétrica de cada fase).

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A utilização da água de reservatório no padrão de escoamento *core-flow*, apresenta-se como uma solução bastante interessante devido aos grandes volumes de água nos reservatórios, dos elevados custos do tratamento de espaço ocupado pelas centrais de tratamento;
- O padrão de escoamento *core-flow* assemelha-se ao escoamento monofásico de água, com aproximadamente, a mesma perda de carga de um escoamento monofásico da água à vazão da mistura;
- O escoamento tipo *core-flow* apresenta um fator de redução de pressão por fricção de 104,68 vezes;
- O escoamento tipo *core-flow* apresenta um fator de redução pressão total de 6,24 vezes;
- O escoamento tipo *core-flow* apresenta um fator de redução de potência por fricção de 79,93 vezes;
- O escoamento tipo *core-flow* apresenta um fator de redução de potência total de 4,76 vezes;
- O pequeno crescimento da camada limite térmica ocorre devido ao elevado número de Prandtl do óleo e da alta capacidade calorífica da água que lubrifica o escoamento;
- A redução da temperatura do óleo entre as regiões de entrada e saída exerce um aumento da viscosidade dinâmica do óleo.
- A redução da temperatura do óleo entre as regiões de entrada e saída gera uma maior estabilidade hidrodinâmica ao padrão de escoamento tipo *core-flow*.

5. AGRADECIMENTOS

A ANP/PRH-25, a FINEP, ao CNPq, a PETROBRAS S/A, a JBR Engenharia Ltda e a RPCMOD pelo suporte financeiro a esta pesquisa, e aos pesquisadores referenciados que com seus estudos ajudaram no melhoramento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- ANDRADE, T. H. F. **Estudo Numérico do transporte de óleos pesados em tubos lubrificados por água**. 2008, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- BANNWART, A. C. **Wavespeed and volumetric fraction in core-annular flow**. 1998, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 24, p 961-974.
- BARBOSA, A. **Efeitos Transientes na perda de carga no escoamento óleo pesado-água em regime anular em duto metálico**. 2004, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Petróleo), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- BORDALO, S, N.; OLIVEIRA, R, C. **Escoamento bifásico óleo-água com precipitação de parafinas em dutos submarinos de produção de petróleo**. 4^o PDPETRO, Campinas, SP, Outubro 21-24, 2007.
- CFX SOLVER THEORY. **Manual Ansys CFX 10.0**. 2005, ANSYS.
- DAMACENA, Y. T. **Aplicando a técnica core flow no transporte de óleos pesados em dutos: um estudo numérico**. 2009, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- OLIEMANS, R. V. A.; OOMS, G.; WU, H.L; DUIVESTIJN, A. **Core annular oil-water flow: the turbulent lubricating film model and measurements in a 5 cm pipe loop**. 1987, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 13, n. 1, p. 23-31.
- OOMS, G. **The hydrodynamic stability of core-annular flow of two ideal liquids**. 1972. Applied Science Research, Vol. 26, p.147-158.
- PRADA, J.W.V.; BANNWART, A.C. **Core-flow lift: a new alternative for heavy-oil production**. 1999. Proceedings of the XV Brazilian Congress of Mechanical Engineering - COBEM'99, 10 p., CD-ROM, Aguas de Lindoia.
- HERNANDEZ RODRIGUEZ, O. M. **Forma da interface e gradiente de pressão no padrão líquido-líquido anular vertical ascendente**. 2002, Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SILVA, R. C. R. **Alteração da molhabilidade de superfícies internas de tubulações utilizadas no transporte de óleos pesados via core-flow**. 2003, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- TREVISAN, F. E. **Padrões de fluxo e perda de carga em escoamento trifásico horizontal de óleo pesado água e ar**. 2003, Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- BELÉM. E. Z. B. **Redução de atrito durante o transporte de óleos pesados em curvas**. 2009, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

7. DIREITOS AUTORAIS

NUMERICAL SIMULATION OF NON- ISOTHERMAL TRANSPORT OF HEAVY OIL IN SUBSEA RISERS VIA CFX

George Henrique Sarmiento Pereira Filho¹, e-mail¹: georgesarmiento@gmail.com

Antonio Gilson Barbosa de Lima, e-mail¹: gilson@dem.ufcg.edu.br

Severino Rodrigues Farias Neto, e-mail²: fariasn@deq.ufcg.edu.br

Kelen Cristina de Oliveira Krivelaro³, e-mail²: kelenkrivelaro@yahoo.com.br

¹Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Mecânica, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Caixa Postal 10069, CEP 58429-900, Campina Grande-PB, Brasil.

²Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Química, Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Caixa Postal 10069, CEP 58429-900, Campina Grande-PB, Brasil.

Abstract: *In present day the reserves of heavy oil are estimated at 3 trillion barrels, by representing 15% of world reserves. The commercial use of heavy oil in deep waters is a major economic and technological challenge for oil companies. In recent decades the light oil reserve has presented a gradual depletion. Due to several problems of oil production in offshore platform it is need to investigate the fluid flow. The high viscosity of heavy oil requires a pumping highest that of light oils, overloading and consequently damaging the equipment, increasing the cost of production. In order to develop projects that will allow the production and marketing of produce in offshore environment optimally under technical and economical view of point, the need of new research about heavy oil flow it is undeniable. In this sense, this study aims to investigate numerically the non-isothermal multiphase flow of heavy oil and ultra-viscous type core-annular flow in submerged risers with catenary shape using the software CFX-10. Results of the velocity, pressure, and temperature and volume fraction distribution are presented and analyzed.*

Keywords: *Transport, Heavy oil, core-annular flow, CFX*

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.