

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISES HIDRODINÂMICA E ENERGETICA DO TRANSPORTE DE ÓLEOS PESADOS VIA TÉCNICA CORE-FLOW EM DUTOS CURVADOS

AUTORES:

Sidlei Benevides da Conceição, Antonio Gilson Barbosa de Lima, Tony Herbert Freire de Andrade, Severino Rodrigues de Farias Neto, Kelly Cristinne Leite Angelim

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Campina Grande - Centro de Ciência e Tecnologia - Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UFCG/CCT/DEM)

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 8º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba-PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8ºPDPETRO.

ANÁLISES HIDRODINÂMICA E ENERGÉTICA DO TRANSPORTE DE ÓLEOS PESADOS VIA TÉCNICA CORE-FLOW EM DUTOS CURVADOS

Abstract

The multiphase flow of oil, gas and water occurs in the oil industry from the reservoir to the processing units. The occurrence of heavy oils in the world is increasing significantly and points to the need for greater investment in the reservoirs exploitation and, consequently, to the development of new technologies for the production and transport of this type of oil. Therefore, it is interesting improve techniques to ensure an increase in energy efficiency in the transport of oil. The core-flow technique is one of the most advantageous methods of lifting and transporting of oil. The objective of this paper is to study numerically the flow isothermal of heavy oils in curved pipelines, employing the core-flow technique. Simulations with different patterns of disposal phase (oil-gas-water) to optimize the transport of heavy oils has been done. Field results of pressure and volumetric fraction of the phases involved are presented and analyzed.

Key-words: Heavy oil, Core-annular flow, Numerical simulation, Water oil and gas flow.

Introdução

O escoamento multifásico de óleo, gás e água ocorre na indústria do petróleo desde o reservatório até as unidades de processamento. O cenário brasileiro revela que as reservas de petróleo leve são escassas, restando para o futuro a produção de hidrocarbonetos pesados. Deste modo, buscam-se tecnologias que venham minimizar possíveis problemas decorrentes da produção de óleo pesado. No que diz respeito ao transporte, pode-se afirmar que as altas viscosidade e densidade e a elevada queda de pressão por fricção que ocorre durante o escoamento são situações comuns ao se produzir este tipo de hidrocarboneto. Estas condições exigem uma carga de trabalho excessiva dos equipamentos, e consequentemente uma grande demanda de energia, a ponto de tornar a produção destes óleos economicamente inviável. Uma solução para minimizar tais dificuldades é a utilização da técnica *core-flow*. Esta técnica consiste na injeção de água nas laterais da tubulação, em vazões inferiores a do óleo, com o objetivo de se obter um padrão de escoamento anular, onde a água escoar como uma fase contínua formando uma película que envolve o óleo, evitando o contato deste com as paredes do duto consequentemente reduzindo a queda de pressão por atrito.

Em reservatórios de petróleo a presença do gás é algo comum, podendo estar não associado ao petróleo e ser produzido de forma independente, ou associado, inicialmente em solução no óleo se desprendendo ao longo da produção formando diferentes configurações durante o escoamento; estes padrões em dutos foram identificados experimentalmente por Trevisan (2003), Wegmann et al., (2007); Poesio et al., (2009).

Os estudos dos fenômenos durante o escoamento bifásico, ocorrendo em conexões e junções foram avaliados por Silva (2011) e Andrade (2013). Mesmo com a vasta literatura disponível ainda existe-se uma carência de estudos com escoamento trifásico abordando a influência do gás, principalmente em

tubulações com geometrias complexas. Diante do exposto este trabalho tem por objetivo estudar numericamente o escoamento trifásico, isotérmico, transiente e tridimensional de óleo pesado-água-gás, buscando informações sobre o comportamento dos fluidos no escoamento tipo core-flow em dutos curvados.

Metodologia

Malha Numérica

O estudo foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluídos (LCTF), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UEAM) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O computador utilizado para criação da malha e desenvolvimento da geometria foi um PC Intel Quad Core 3.2 GHz, 8Gb Ram e HD de 1 Terabyte.

A malha foi criada no módulo ANSYS ICEM CFD®. Os domínios de estudo foram criados por meio da definição de pontos, curvas, superfícies e sólidos descrevendo o seu tamanho e o seu formato. O duto utilizado para simulações possui comprimento de 3m retos antes da curvatura ao longo do eixo z, e 3 metros retos após a curvatura ao longo do eixo y, totalizando 6m de trechos retos. A curvatura possui um raio de 20 cm e o diâmetro da tubulação é de 15 cm. A malha estruturada possui 279552 elementos hexaédricos (Figura 1 e 2).

Figura 1: (a) Geometria do problema; (b) malha estruturada com foco na curvatura.

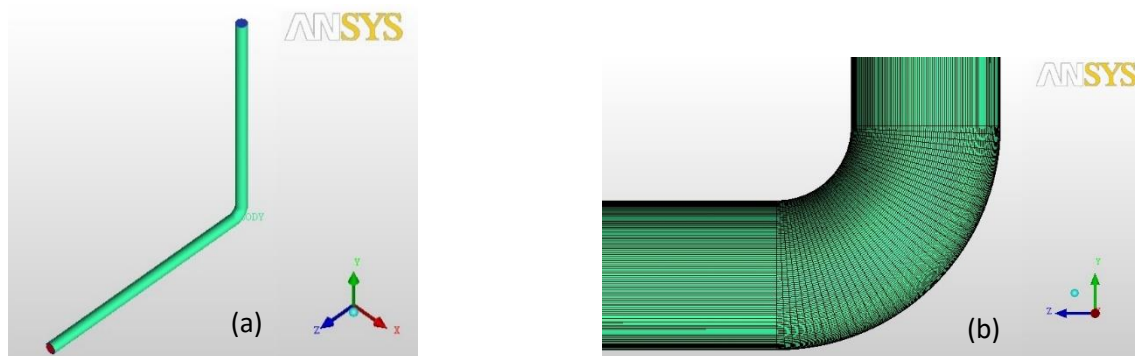
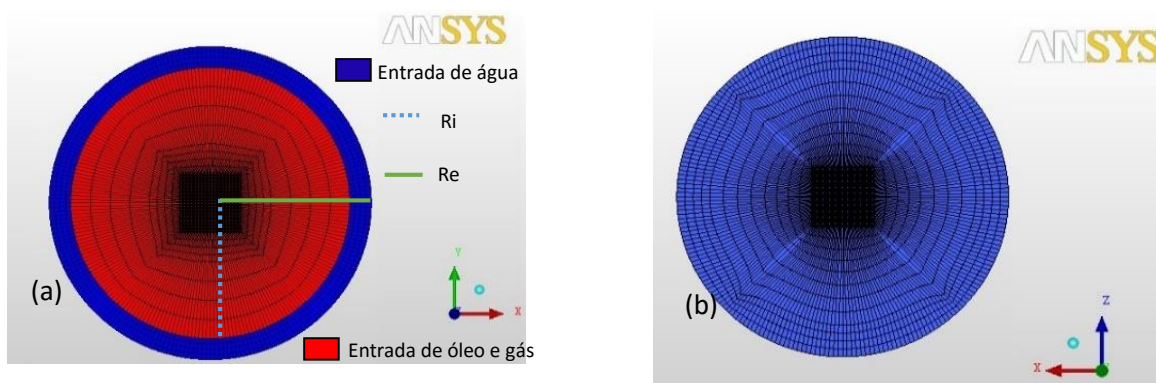


Figura 2: Detalhes da região de entrada (a) e região de saída (b); $Ri = 65\text{cm}$; $Re = 75\text{cm}$



Modelagem Matemática

As condições matemáticas adotadas são referentes a um estudo Euleriano-Euleriano com abordagem não homogênea. Tais considerações possibilitam um estudo em que cada fase possui seu campo de escoamento, havendo assim, um conjunto de soluções para cada fase separadamente. As fases presentes no escoamento são representadas pelas letras α , β , e γ . As condições gerais do escoamento trifásico (água-óleo-gás) foram: escoamento isotérmico, transiente, tridimensional, sem transferência de massa, incompressível, propriedades termo-físicas constantes e presença de força de corpo. Para modelar o escoamento multifásico em três dimensões, utilizou-se das seguintes equações:

- Equação da Continuidade

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

- Equação da Quantidade de Movimento

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

onde assume-se que para a fase α , f é a fração volumétrica, ρ é a densidade, $\vec{U}$ é o vetor velocidade, μ é a viscosidade dinâmica, p é a pressão, o termo $\vec{S}_{M\alpha}$ descreve as forças de momento devido às forças de corpo externas (força gravitacional) enquanto $\vec{M}_\alpha$ descreve as forças interfaciais (força de arraste, força lift, força de massa virtual, força de lubrificação na parede e força de dispersão turbulenta na interface), forças essas que atuam em α devido a presença de outras fases.

Para o escoamento do tipo core-flow, a água escoar em regime turbulento, deste modo, foi escolhido o modelo k- ϵ para calcular tais efeitos. As equações da energia cinética turbulenta e da dissipação viscosa turbulenta, respectivamente são:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_\alpha f_\alpha K_\alpha) + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \left[\rho_\alpha \vec{U}_\alpha K_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_\alpha}{\sigma_k} \right) \nabla K_\alpha \right] \right\} = f_\alpha (G_\alpha - \rho_\alpha \epsilon_\alpha) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_\alpha f_\alpha K_\alpha) + \nabla \cdot \left\{ f_\alpha \rho_\alpha \vec{U}_\alpha \epsilon_\alpha - \left(\mu + \frac{\mu_\alpha}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_\alpha \right\} = f_\alpha \frac{\epsilon_\alpha}{K_\alpha} (C_1 G_\alpha - C_2 \rho_\alpha \epsilon_\alpha) \quad (4)$$

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

$$\epsilon_\alpha = \frac{C_\mu q_\alpha^3}{l_\alpha} \quad (5)$$

$$K_\alpha = \frac{q_\alpha^2}{2} \quad (6)$$

onde l_α é o comprimento de escala espacial, q_α é a escala de velocidade e C_μ é uma constante empírica calculada por:

$$C_\mu = 4C_\alpha^2 \quad (7)$$

em que C_α também é uma constante empírica. O termo $\mu_{t\alpha}$ corresponde a viscosidade turbulenta, definida por:

$$\mu_{t\alpha} = C_\mu \rho_\alpha \frac{K_\alpha^2}{\varepsilon_\alpha} \quad (8)$$

Onde as constantes utilizadas nas equações anteriores são: $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,99$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$ e $\sigma_k = 1,0$.

Condições de contorno e iniciais

As premissas referentes a entrada (Figura 2) da água levaram em consideração uma fração volumétrica e uma velocidade axial de água não-nula, como segue:

$$Ri < r < Re, \text{ em } X=0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_w = 2,0 \text{ m/s} \\ v_w = w_w = 0 \\ u_o = v_o = w_o = 0 \\ f_o = 0 \\ f_w = 1 \end{array} \right\}$$

As considerações acerca da entrada de óleo e gás foram baseadas nas seguintes condições:

$$0 < r < Ri, \text{ em } X = 0 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} u_o = u_g = 1,5 \text{ m/s} \\ v_o = w_o = v_g = w_g = 0 \\ u_w = v_w = w_w = 0 \\ f_o = 0,95 \\ f_w = 0 \\ f_g = 0,05 \end{array} \right\}$$

Para a região de saída foi adotado um valor prévio de pressão de 0 Pa, com o objetivo de gerar um diferencial de pressão capaz de garantir o fluxo dos fluidos. Na parede, a condição de não deslizamento foi adotada (no-slip), nesta condição admite-se que a velocidade do fluido seja reduzida próximas as paredes do duto. Nas condições iniciais das simulações adotou-se um duto cheio de água escoando com uma velocidade de 0,5 m/s.

O gás utilizado foi o mesmo que Silva (2011), sendo composto quimicamente por: $CH_4 = 0,92$; $C_2H_6 = 0,055$; $C_3H_8 = 0,015$; $C_4H_{10} = 0,01$. A partir destes valores calculou-se a densidade e a viscosidade gás.

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

Tabela 1 - Propriedades reológicas dos fluidos utilizados nas simulações

Propriedades	Óleo	Gás	Água
Viscosidade (Pa.s)	12	$1,09 \times 10^{-5}$	$8,899 \times 10^{-4}$
Densidade (kg/m ³)	989	0,77895	997

Para cada mistura entre as fases foi utilizado uma tensão superficial diferente devido a diferença de interação natural existente entre os componentes. Estes valores estão disponíveis na Tabela 2:

Tabela 2 - Tensões superficiais entre as fases envolvidas

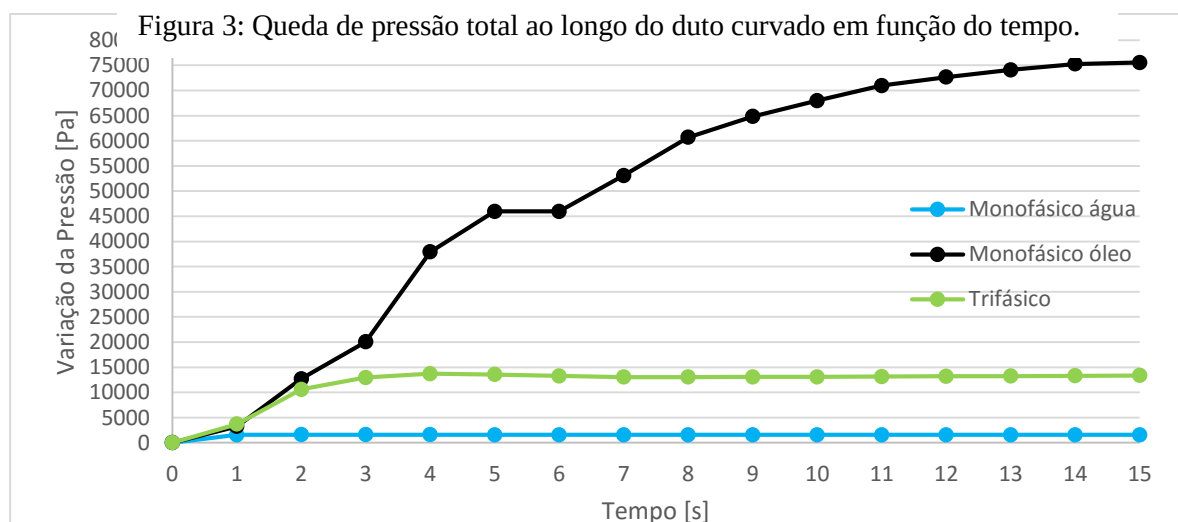
Água-óleo	0,067 (N/m)
Água-Gás	0,07257 (N/m)
Óleo-Gás	0,026 (N/m)

Em todos os casos trifásicos a água e o óleo foram considerados como fases contínuas e o gás disperso com um diâmetro de bolha igual a 3 mm. O critério de convergência adotado (RMS) foi de 10^{-7} com simulações de 15s e um intervalo de tempo de 0,02s.

Resultados e Discussão

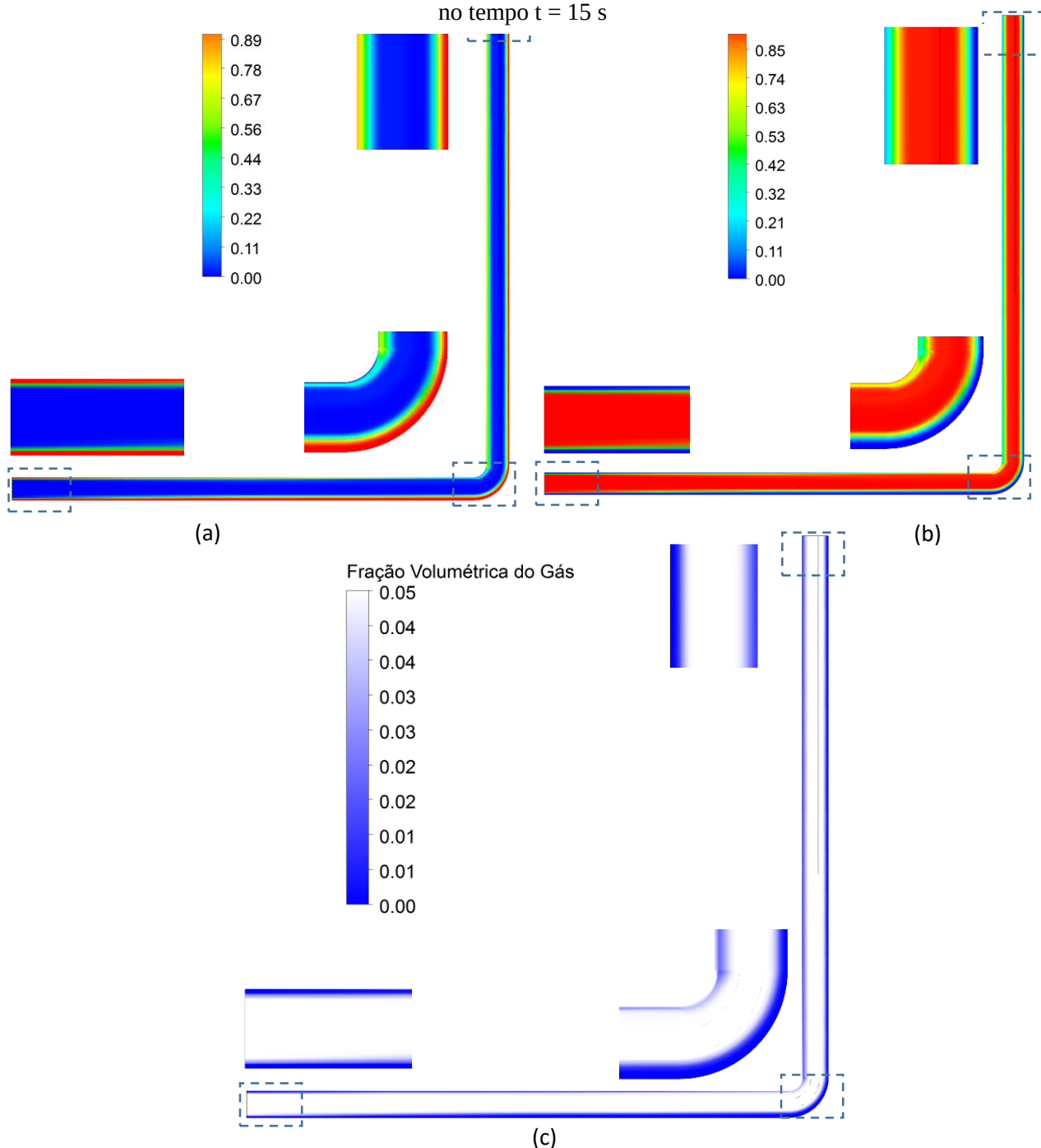
Afim de compreender o comportamento do campo de pressão de cada fluido ao longo do escoamento, foram rodados também casos de escoamentos monofásicos de óleo e de água. Estes casos serviram para comparação com o escoamento trifásico, afim de comprovar a queda de pressão existente após a formação do perfil anular devido a presença do core-flow. Para poder comparar a perda de pressão nos três casos a vazão volumétrica teve que se manter igual, dessa forma, evita-se a perda de óleo ou o ganho indesejado de água em volume de fluido transportado, a vazão volumétrica trabalhada foi de 0,01890 m³/s para o óleo e o gás e 0,008791 m³/s para a água.

A queda de pressão no escoamento monofásico de óleo atinge o regime estacionário em 75073 Pa, enquanto a água atinge valores constantes em 1581 Pa. Para o caso trifásico, onde possui o perfil anular de escoamento, a queda de pressão se torna constante em 13062 Pa. Com este resultado é possível observar a expressiva diferença entre escoamento monofásico de óleo e o trifásico. Neste último, a diminuição na queda de pressão é bastante expressiva e se aproxima dos valores obtidos no escoamento monofásico de água. A Figura 3 apresenta a diferença de pressão total para os diferentes casos estudados.



A Figura 4 ilustra a distribuição da fração volumétrica das fases envolvidas em $t = 15$ s. Verifica-se aparentemente que o padrão anular para o escoamento trifásico não se manteve estável completamente após a curvatura. A presença do gás interferiu na interação total da mistura. Além disso, pode ser visto na figura 4 (a), que a fração volumétrica da água se reduz à medida que se aproxima da curva. Assim percebe-se um escoamento assimétrico no trecho horizontal. No trecho vertical as fases tendem a retornar a seu padrão de escoamento simétrico.

Figura 4: Frações volumétricas da água (a), óleo (b) e gás (c) no plano XY em $Z = 0$, no tempo $t = 15$ s



8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

É possível visualizar o filme de água formado próximo a parede do duto logo no começo do escoamento. Porém este padrão anular só se mantém estável até as proximidades da curvatura. Passada esta região, ainda visualiza-se maiores concentrações de água nas paredes do duto, mas o padrão anular concêntrico já está comprometido.

Conclusões

Diante das simulações dos escoamentos monofásico de óleo e de água, e trifásico óleo pesado, água e gás, em dutos curvados conclui-se que:

- Existe uma significativa redução na variação da pressão ao longo do escoamento para os casos trifásicos em comparação com o escoamento exclusivo de óleo, evidenciando a eficiência do transporte de óleos pesados por meio da técnica core-flow.
- O núcleo de óleo não se mantém concêntrico ao longo do duto no escoamento trifásico, devido à redução na densidade da mistura óleo-gás, ocorrida pela presença do gás. Com essa redução o escoamento tende a se concentrar na parte superior do duto.
- Para as condições adotadas o padrão anular tende a se desfazer quando a mistura passa pela curvatura, devido ao redirecionamento e efeito hidrodinâmico que as fases sofrem ao passar por esta região.

Agradecimentos

Agradecimentos a ANP/UFCG/PRH-42, a CAPES, ao CNPq, a FINEP, e a PETROBRÁS por todo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

1. ANDRADE, T. E. V. **Transporte de óleos pesados e ultraviscosos via core-flow: aspectos geométricos e termofluidodinâmicos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande.
2. ANSYS, CFX-Theory Manual, 2009.
3. POESIO, P.; SOTGIA, G.; STRAZZA, D. Experimental Investigation of Three-Phase Oil-Water-Air Flow Through a Pipeline. **Multiphase Science and Technology**, v.21, n.1-2, pp. 107-122, 2009.
4. SILVA, F. N. **Estudo numérico do escoamento trifásico (água-óleo pesado-gás) tipo core-flow em uma conexão “T”**. in: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS 6, Santa Catarina, 2011.
5. TREVISAN, F. E. **Padrões de fluxo e perda de carga em escoamento trifásico horizontal de óleo pesado, água e ar**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) -Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
6. WEGMANN, A.; MELKE, J.; ROHR, P. R. Three phase liquid-liquid-gas flows in 5.6 mm and 7 mm inner diameter pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v.33, n.5, pp.484-497, 2007.