

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



TÍTULO DO TRABALHO:

Escoamento trifásico não-isotérmico em duto vertical com vazamento via CFX: análise da influência da rugosidade da parede do duto

AUTORES:

Wanessa Raphaella Gomes dos Santos, Helton Gomes Alves, Boniek Evangelista Leite, Severino Rodrigues de Farias Neto, Antonio Gilson Barbosa de Lima

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Campina Grande

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. 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 publica do nos Anais do 8ºPDPETRO.

ESCOAMENTO TRIFÁSICO NÃO-ISOTÉRMICO EM DUTO VERTICAL COM VAZAMENTO VIA CFX: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DA PAREDE DO DUTO

Abstract

The multiphase flow (water, oil and gas) frequently occurs in petroleum industrial plants since their exploitation, until processing and transportation. The most economical and safe means of the oil industry fluids movement are the ducts, so, these are the means most used for the transportation of production between producing regions, platforms, refineries, marine terminals, storage parks and consumer centers. However, this operation is subject to damage due to the action of agents of physical-chemical nature that eventually deteriorates the duct, causing corrosion, disruption and interruption of fluid flow. The development of techniques that contribute to an adequate leak detection and the spill oil in the installations reduces the risks of ecological and financial losses originated for accidents of this nature, and contribute significantly to operational safety. In this case, it is essential that a leak detection system must be able to be activated instantly, in order to reduce losses and impacts environmental generated. From this theme, this study aims to analyze the influence of pipe roughness in the hydrodynamic of the transient, three-phase and non-isothermal flow of water, oil and gas in a pipeline leaking using numerical simulation and CFX software. Results of superficial velocity, pressure, temperature and volume fraction distribution of the phases present in the flow are presented and analyzed. It was found that the roughness of the wall does not change significantly the superficial velocity, temperature and volume fraction, but changes the pressure of the three-phase flow.

Introdução

O meio mais econômico e seguro de movimentação de fluidos da indústria do petróleo são os dutos, por isso, estes são os meios eficientes de escoamento de produção. A análise dos custos de transporte por este modo indica expressiva vantagem econômica, permitindo redução de custos com fretes que influenciam no preço final do produto, além da minimização do tráfego de caminhões e aumento na segurança de estradas urbanas. Por outro lado, este tipo de transporte tem como desvantagem o aparecimento de vazamentos provocados devido à variação brusca na pressão, ação da corrosão, desgaste ou manutenção inadequada, onde um pequeno percentual de perda gera eventos com significativos impactos socioeconômico e ambiental. Quando um vazamento ocorre, uma onda de pressão se propaga através do duto dependendo da posição e da forma do vazamento. Para que esta detecção seja eficiente deve-se determinar e entender a hidrodinâmica do escoamento dentro do duto em cada instante de tempo, depois da ocorrência do vazamento. A detecção de vazamentos mediante o uso de métodos computacionais vem tendo pouco êxito devido a dificuldades em determinar-se experimentalmente as características reais do fluido, o que acarreta grande geração de alarmes falsos.

A partir desta temática alguns trabalhos foram desenvolvidos com a finalidade de descrever o comportamento hidrodinâmico do escoamento de fluidos em tubulações, por exemplo, Bannwart *et al.* (2012), Barbosa (2012), Santos *et al.* (2013), Sarmiento *et al.* (2014) e Santos *et al.* (2014).

Buscando comprovações experimentais, Bannwart *et al.* (2012) construiu um experimento piloto para analisar a queda de pressão em uma tubulação vertical da mistura óleo pesado/água com várias combinações das vazões das fases a fim de investigar a aplicabilidade da utilização da água para o transporte de óleos pesados em poços reais (técnica *core-flow*). As melhorias registradas em termos da taxa de produção de óleo e redução da queda de pressão foram notáveis representando passo essencial para aplicação da técnica em larga escala.

Barbosa (2012) analisou o escoamento não-isotérmico trifásico (água, óleo, gás) em duto vertical de 7 metros com vazamento, observando a influência de parâmetros como viscosidade, velocidade inicial e efeitos da magnitude do vazamento sobre o escoamento. Dessa forma, verificou que o transiente de pressão é sensível às características termohidrodinâmicas do fluido. Sarmiento *et al.* (2014) realizaram uma análise numérica para investigar o comportamento de um escoamento multifásico (óleo pesado – água – gás) não isotérmico em duto tipo catenária através de simulação utilizando o CFX 11.0. Foi verificado que a maior fração de gás natural influencia diretamente na queda de pressão e transferência de calor. Santos *et al.* (2013) estudaram a hidrodinâmica do escoamento multifásico e isotérmico em duto vertical (15 metros de comprimento) com vazamento onde foi examinada a influência dos diferentes diâmetros do furo de seção circular (2 mm, 6 mm e 10 mm) localizado no meio da tubulação. Os autores observaram que quanto maior o diâmetro do vazamento, maior as diferenças causadas nos perfis estudados, e desta forma foi possível compreender a dificuldade de percepção de vazamentos de diâmetros mínimos. Assim, ficou clara a importância de obtenção de conhecimentos para compreensão da hidrodinâmica do escoamento a fim de otimizar o dimensionamento destes equipamentos, com o intuito de diminuir o tempo de resposta e alarmes falsos causados por perturbações oriundas do escoamento. Santos *et al.* (2014) avaliaram a fluidodinâmica do escoamento trifásico (água, óleo e gás) em uma tubulação vertical de 8 metros de comprimento, com seção circular de 25 cm de diâmetro, com e sem vazamento resolvida numericamente utilizando o software ANSYS CFX aplicando o modelo Euleriano-Euleriano e modelo de turbulência RNG κ - ϵ . Os autores concluíram que na região do vazamento existe um aumento da fração volumétrica de óleo e água e uma diminuição da fração volumétrica de gás provavelmente causada devido a sua baixa viscosidade e densidade, além disso, a velocidade superficial do óleo é cerca de oito vezes maior que a da água e vinte e sete vezes maior que a o gás natural no caso estudado.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo analisar a influência da rugosidade da parede em um duto vertical com vazamento em um escoamento trifásico (água-óleo-gás), não-isotérmico e transiente quanto a termofluidodinâmica via simulação numérica (CFD).

Metodologia

Modelagem Matemática

Para a fase contínua (óleo) utilizou-se o modelo de turbulência κ - ϵ padrão, enquanto que para as fases dispersas (água e gás) utilizou-se o modelo de partícula. Para as considerações feitas, as equações de conservação de massa (Equação 1), movimento (Equação 2) e energia (Equação 3) são, respectivamente:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_i \rho_i) + \nabla \cdot (f_i \rho_i \vec{U}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (f_i \rho_i \vec{U}_i)}{\partial t} + \nabla \cdot [f_i (\rho_i \vec{U}_i \otimes \vec{U}_i)] - f_i \nabla p_i + \nabla \cdot \{ f_i \mu_i [\nabla \vec{U}_i + (\nabla \vec{U}_i)^T] \} = \vec{S}_{Mi} + \vec{M}_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial (f_i \rho_i h_{tot_i})}{\partial t} + \nabla \cdot [f_i (\rho_i \vec{U}_i h_{tot_i} - \lambda_i T_i)] = \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{i\beta}^+ h_{\beta} - \Gamma_{\beta i}^+ h_i) + Q_i + S_i \quad (3)$$

A força de arraste ($\vec{M}_i$) entre duas fases α e β pode ser determinada por:

$$\vec{M}_i = \frac{1}{8} C_D \rho_\alpha A |\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha| (\vec{U}_\beta - \vec{U}_\alpha) \quad (4)$$

sendo C_D o coeficiente de arraste e A a densidade da área interfacial.

Para a fase contínua (óleo), foi utilizado o modelo de turbulência k - ϵ padrão, cuja equação da energia cinética turbulenta é dada por:

$$\frac{\partial(\rho_i k)}{\partial t} + \nabla(\rho_i \bar{U}_i k) = \nabla \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho_i \varepsilon \quad (5)$$

onde σ_k é uma constante empírica de valor 1.

A equação da taxa de dissipação viscosa turbulenta é dada como segue:

$$\frac{\partial(\rho_i \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho_i \bar{U}_i \varepsilon) = \nabla \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho_i \varepsilon) \quad (6)$$

onde σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ são constantes empíricas com os seguintes valores: 1,3; 1,44 e 1,92, respectivamente. Já para as fases dispersas (água e gás) utilizou-se o modelo de partícula (Modelo Zero Equação para fase dispersa). Neste modelo, assume-se que a viscosidade turbulenta da fase dispersa, $\mu_{t,d}$, é proporcional a viscosidade turbulenta da fase contínua, $\mu_{t,c}$, da seguinte forma:

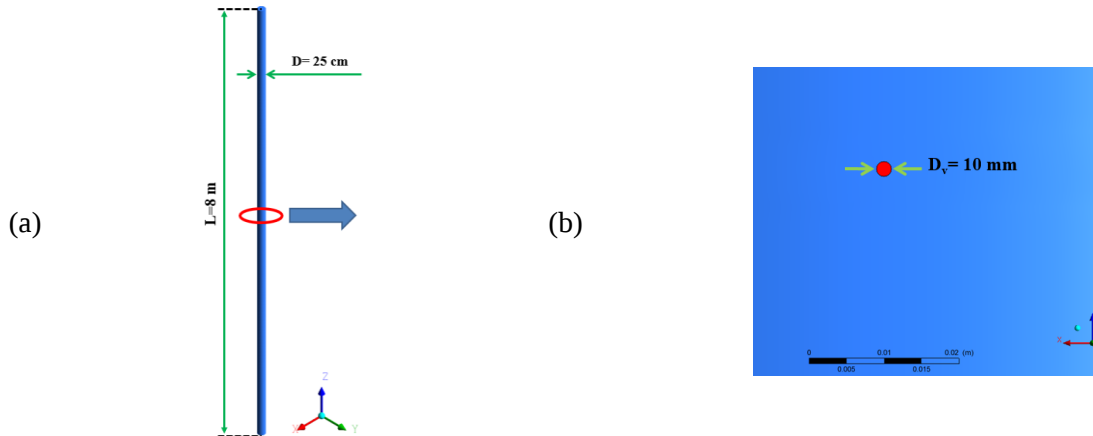
$$\mu_{t,d} = \left(\frac{\rho_d}{\rho_c} \right) \frac{\mu_{t,c}}{Pr_t} \quad (7)$$

onde Pr_t é um número de Prandtl turbulento que relaciona a viscosidade cinemática turbulenta da fase dispersa ($\nu_{t,d}$) com a viscosidade cinemática turbulenta da fase contínua ($\nu_{t,c}$), ρ_d representa a densidade da fase dispersa e ρ_c a densidade da fase contínua.

O problema físico e a geometria

O problema físico consiste em uma tubulação vertical de 8 metros de comprimento, com seção transversal circular de 25 cm de diâmetro, onde para o caso com vazamento, o mesmo é localizado ao centro da tubulação em sua posição axial com formato circular e diâmetro do furo 10 mm, conforme Figura 1.

Figura 1 - Geometria estudada (a) e detalhe do vazamento (b).



A construção da malha foi definida de forma a atender a problemática a ser tratada sem aumentar demasiadamente o tempo computacional necessário. A malha utilizada contém 411656 elementos hexaédricos, obtida após vários refinamentos.

Condições iniciais, de contorno e propriedades dos fluidos adotadas

O escoamento considerado é trifásico (gás – água - óleo), tendo o óleo como fase contínua, e o gás e água sendo as fases dispersas. Foi considerada a seguinte composição do gás: 90% CH_4 , 5% C_2H_6 , 2,5% C_3H_8 e 2,5% C_4H_{10} . As condições iniciais e de contorno e propriedades utilizadas nas simulações encontram-se nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Condições de contorno e condições iniciais utilizadas

Condições de contorno	Vazão volumétrica (m ³ /h)	Pressão (atm)	Fração volumétrica		
			Óleo	Água	Gás
Entrada	500	-	0,9	0,08	0,02
Saída	-	0,981	-	-	-
Vazamento	-	0,981	-	-	-
T _{parede} (K)	300				

Tabela 2 – Propriedades e parâmetros geométricos dos fluidos utilizados

Parâmetro	Fase		
	Óleo (Contínua)	Água (Dispersa)	Gás (Dispersa)
Diâmetro da partícula (mm)	-	0,8	0,3
ρ (kg/m ³)	989	997	CFX
μ (mPa.s)	$\mu_o = 10^{-3} \exp\{\exp[11,29983 - 2,099 \ln(1,8T - 459,67)] - 1,015\}$	$\mu_w = 0.00002414 \times 10^{\left(\frac{N_1}{T - N_2}\right)}$	CFX
κ (W/m.K)	0,165	0,61825	CFX
σ (mN/m)	45 (água/óleo)		
	15 (gás natural/óleo)		
h (W/m ² .K)	30		

A viscosidade da água baseia-se no trabalho de Babadagli e Al-Bemami (2007), com $N_1=247,8$ K e $N_2=140$ K. Os valores das propriedades do gás natural foram calculadas internamente no CFX já que se definiu o mesmo como componente de mistura. Os casos estudados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Características gerais dos casos analisados

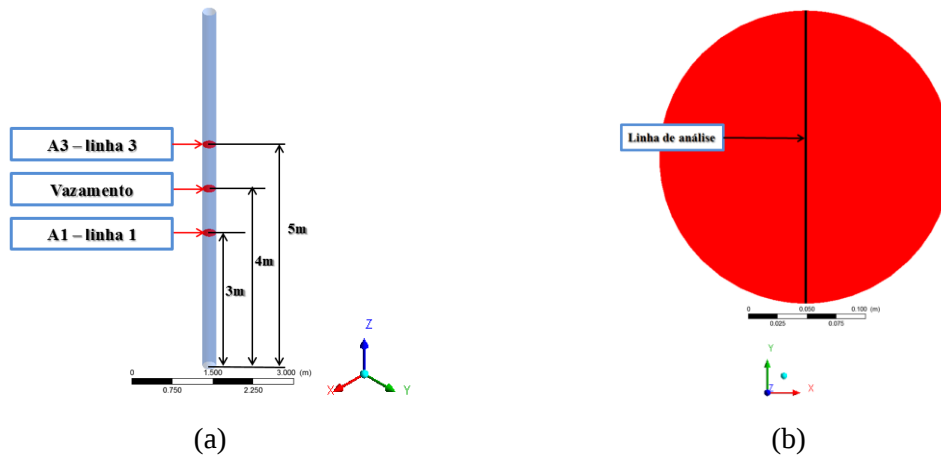
Caso	L (m)	D _v (mm)	T _{entrada} (K)	Rugosidade do duto (mm)	Condições térmicas
1	8	10	333	Sem rugosidade	Não isotérmico, trifásico, transiente.
2				Aço revestido com epóxi (0,00575)	
3				Aço soldado limpo (0,175)	

Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra as linhas de corte transversal para as seções A1 e A3 utilizadas para a análise da velocidade superficial, temperatura, pressão e fração volumétrica na posição radial. As análises foram feitas em um tempo de processo de 10 s (tempo total de simulação definido como condição inicial). A variação da velocidade superficial da fase água após o vazamento (Figura 3) ocorre devido à influência do furo e propriedades dos fluidos. Observa-se que a velocidade da fase óleo é cerca de 10 vezes maior que a da fase água e 33 vezes maior que a da fase gás. Variando-se a rugosidade da parede do duto, não se verifica efeito significativo na velocidade superficial das fases para os casos estudados. O mesmo comportamento ocorre para a temperatura das fases (Figura 4). Contudo, na análise da fração volumétrica, vê-se que próximo à parede do duto antes do vazamento (Figura 5), há uma pequena variação da fração volumétrica de acordo com a rugosidade da parede. À medida que se afasta da parede do duto em direção ao centro do mesmo, esta diferença de fração volumétrica das fases torna-se mínima, apresentando comportamento similar para os casos 1, 2 e 3.

Assim, pode-se afirmar que a velocidade superficial, fração volumétrica e temperatura das fases não sofrem influência significativa da rugosidade da parede para os casos estudados.

Figura 2 – Demonstrativo da linha de corte transversal utilizada nas análises dos parâmetros ao longo do comprimento da tubulação. (a) Localização das linhas e (b) forma do corte no plano.



A Figura 6 mostra a influência da rugosidade da parede do duto na pressão do fluido, para os casos 1, 2 e 3, na seção A1. Os casos 1 (rugosidade = 0 mm, tubo liso) e 2 (rugosidade do aço revestido com epóxi = 0,00575mm) são os casos de menor rugosidade. De acordo com a Figura 6, estes casos são os que atingem menor pressão. O caso 3 (rugosidade do aço soldado limpo usado = 0,175 mm) é o de maior pressão. Então quanto maior a rugosidade da parede, maior a pressão desenvolvida pelo escoamento. A queda de pressão média (diferença entre a pressão média na entrada e saída da tubulação) para os casos 1, 2 e 3, apresentam os seguintes valores: 0,67143 atm; 0,67136 atm e 0,671838 atm, respectivamente. Isto comprova que o caso 3 (de maior rugosidade) é que tem maior queda de pressão média, evidenciando o efeito da rugosidade da parede na pressão do escoamento.

Figura 3 – Velocidade superficial das fases após o vazamento (seção A3 - linha 3) para os casos 1, 2 e 3 (corte transversal).

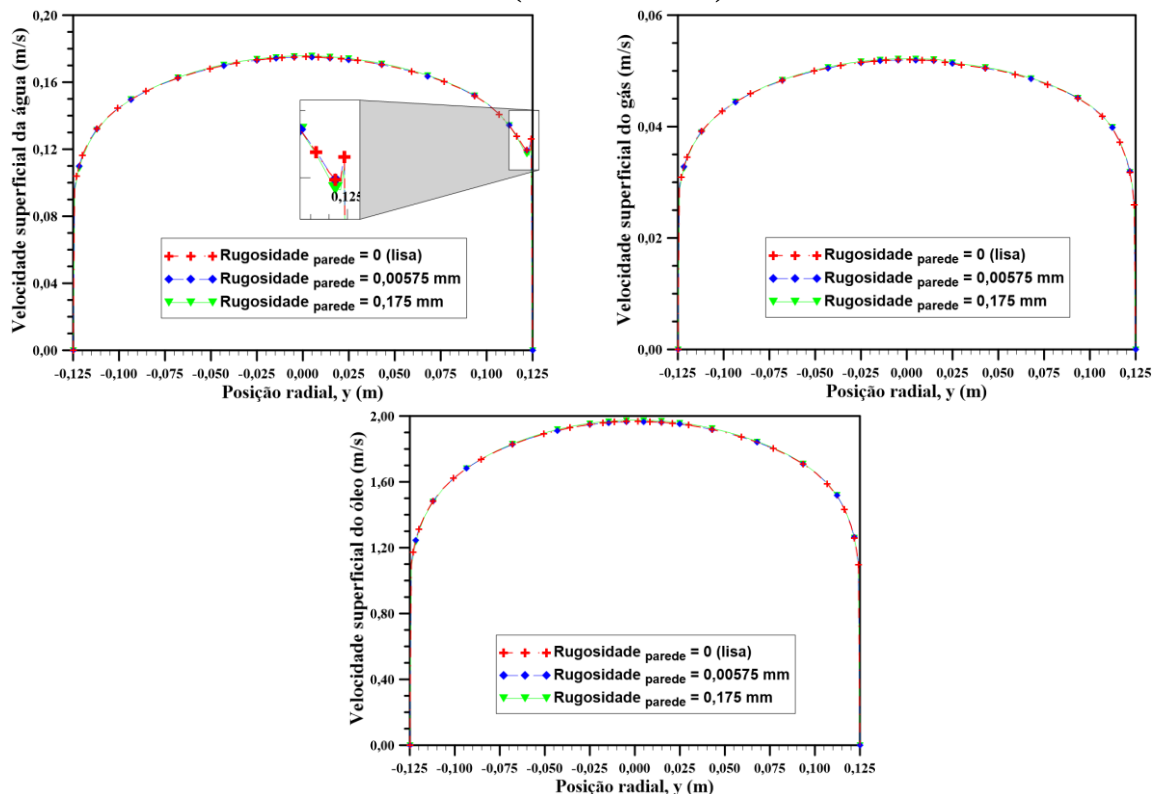


Figura 4 – Temperatura das fases após o vazamento (seção A3 - linha 3) para os casos 1, 2 e 3 (corte transversal).

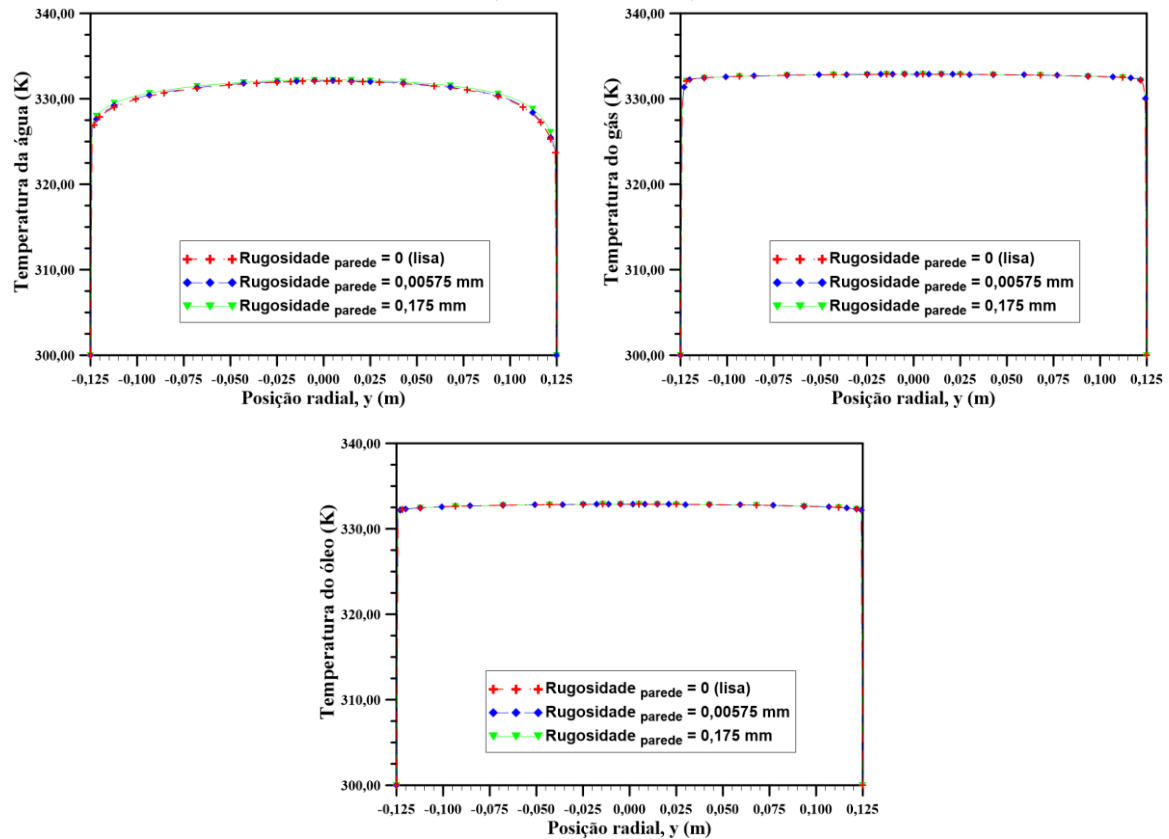


Figura 5 – Fração volumétrica das fases antes do vazamento (seção A1 - linha 1) para os casos 1, 2 e 3 (corte transversal).

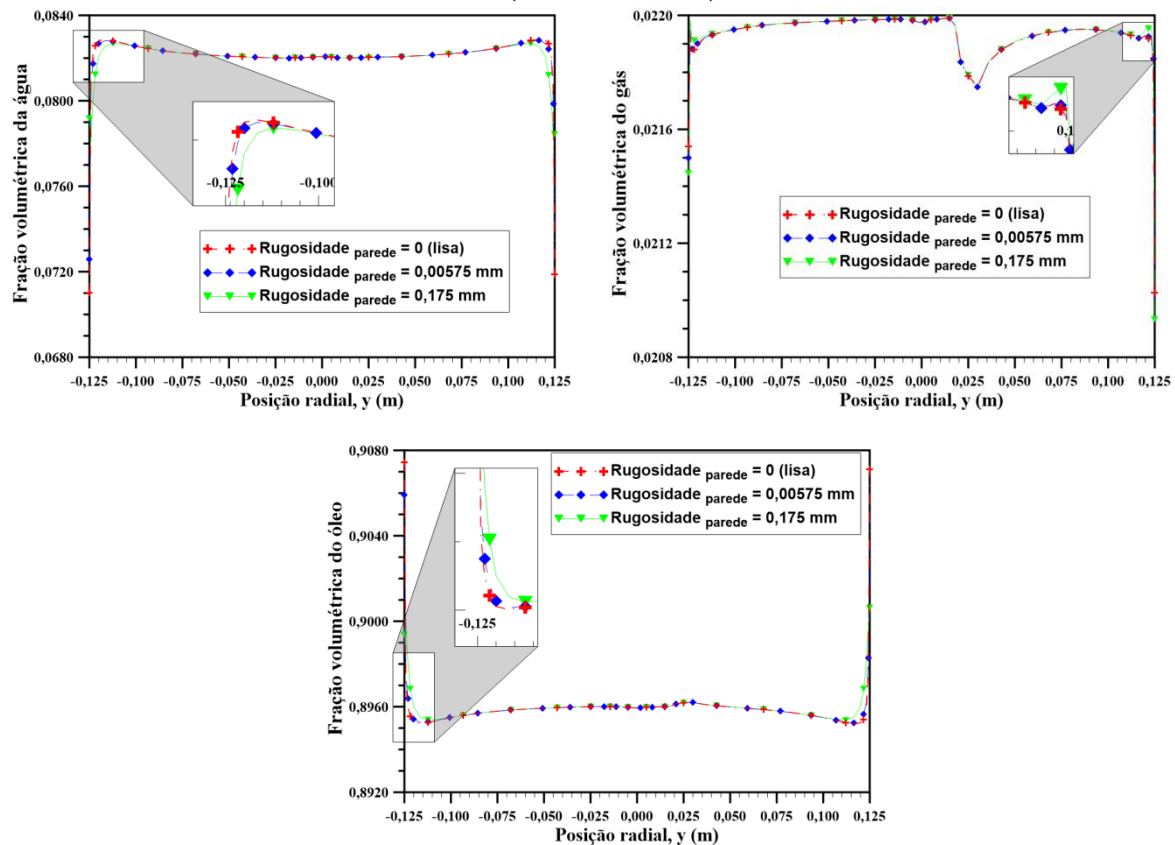
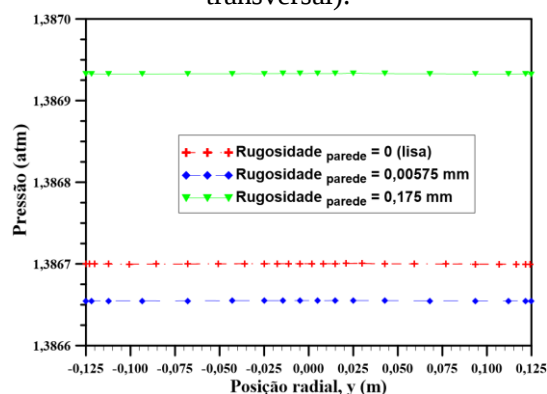


Figura 6 – Pressão antes do vazamento (seção A1 -linha 1) para os casos 1, 2 e 3 – (corte transversal).



Conclusões

A rugosidade da parede não altera significativamente a velocidade superficial, temperatura e fração volumétrica das fases. No entanto, na análise da pressão, observou-se que quanto maior a rugosidade da parede, maior a pressão desenvolvida pelo escoamento e maior a queda de pressão.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PRH - 25ANP, a CAPES, ao CNPq e a FINEP pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

ANSYS, CFX – Theory Manual, 2012.

BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H.; BIAZUSSI, J. L.; MARTINS, F. N.; SELLI, M. F.; CARVALHO, C. H. M.; **Water-assisted Flow of Heavy Oil in a Vertical Pipe: Pilot-scale Experiments**, International Journal of Chemical Reactor Engineering, v. 10, n.1, p. 1542-6580, 2012.

BARBOSA, L. M. C.; **Escoamento não-isotérmico de óleo pesado, água e gás em duto vertical com vazamento**, Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Campina Grande, UFCG, 2012.

SANTOS, W. R. G., BARBOSA, E. S., FARIAS NETO, S. R., LIMA, A. G. B.; **Hidrodinâmica do Escoamento Multifásico em Duto Vertical com Vazamento**. 7º Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás, Aracaju- SE. v. 1. p. 1-18, 2013.

SANTOS, W. R. G., BARBOSA, E. S., FARIAS NETO, S. R., LIMA, A. G. B., LIMA, W. M. P. B.; **Three-phase flow (water, oil and gas) in a vertical circular cylindrical duct with leaks: A theoretical study**, The International Journal of Multiphysics, v. 8, p. 253-270, 2014.

SARMENTO, L. R. B.; PEREIRA FILHO, G. H. S.; LIMA, A. G. B.; FARIAS NETO, S. R.; BARBOSA, E. S., CUNHA, A. L.; **Multiphase flow and heat transfer in Risers**, Defect and Diffusion Forum, v. 348, p. 3-8, 2014.