

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



TÍTULO DO TRABALHO:

Análise da influência da rugosidade na perda de carga para escoamentos bifásicos de gás e óleo pesado em junções de 90°

AUTORES:

Yuri Aguiar Vitório Mendonça, José Luís Gomes Marinho.

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela 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 8º PDPETRO.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE NA PERDA DE CARGA PARA ESCOAMENTOS BIFÁSICOS DE GÁS E ÓLEO PESADO EM JUNÇÕES DE 90°

Abstract

The two-phase flow, in which two or more phases drain simultaneously, is present in various phenomena on the daily life of people, from a simple overflow of a refrigerant, to the blood flow in the human body, in both situations, the liquid and the gas phase flow simultaneously. In the petroleum industry, the two-phase flow is present since the moment which the oil and the gas leave the reservoir, because, almost every well that produces oil, produces gas, the reciprocal is valid as well, even the production is in small quantities. This flux of oil and gas continues on the pipes that take that production to the separation tanks. Due the economic importance of the transportation of the production, a study it is necessary so that it occurs the correct sizing of the pipe and the pulping system involved on this transportation. The following paper consists of an analysis of an oil-gas flow behavior in horizontal pipes, and also consists of an analysis of different values of rugosity's influence in pressure loss with a presence of a 90° junction on the pipe system. This analysis was made by the software ANSYS-CFX 13.0, and the validation of the results was made through the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase horizontal flows adapted to 90° junctions.

Introdução

O fluxo bifásico, fluxo no qual duas fases escoam simultaneamente, está presente em vários fenômenos facilmente observáveis no cotidiano da maioria das pessoas, ocorrendo no simples ato de derramar o conteúdo de uma garrafa de refrigerante até no complexo sistema que transporta oxigênio através do sangue humano, nesses dois fenômenos, as fases líquidas compostas pelo refrigerante e pelo sangue, escoam de maneira simultânea com as fases gasosas, compostas pelo gás do refrigerante e pelo oxigênio.

O comportamento desse tipo de escoamento, em determinadas situações de alta importância e complexidade deve ser alvo de um estudo mais profundo. Por exemplo, na indústria nuclear, o fluxo bifásico ocorre no sistema de refrigeração de reatores, na indústria química, o fluxo bifásico ocorre frequentemente no estágio de processamento, na indústria do petróleo, o fluxo bifásico ocorre nas tubulações e em poços, pois é extremamente comum a presença da fase gasosa junto à fase líquida ao sair do reservatório, pois a maioria dos poços com foco na produção de óleo também produzem gás, mesmo que em pequenas quantidades, e vice versa. Logo, para o correto dimensionamento dos equipamentos nessas indústrias, é necessário o prévio conhecimento das características do escoamento, como o holdup da fase líquida e a queda de pressão (BEGGS & BRILL,1973).

A queda de pressão pode se dar de maneira distribuída ou localizada. A perda distribuída ocorre através do choque entre as camadas do fluido, ou através do contato do fluido com a rugosidade da parede, fazendo com que a pressão existente no interior da tubulação. A perda localizada ocorre através da passagem do fluxo através de certas restrições, como válvulas, joelhos ou até mesmo furos na tubulação, resultando numa diminuição brusca da pressão.

Na indústria do petróleo, durante o escoamento da produção através das tubulações, é comum a presença de obstáculos no trajeto original da tubulação, devido a um relevo acidentado ou outros obstáculos, muitas vezes a opção de remover esses obstáculos para continuar o trajeto é inviável, logo, a criação de desvios torna-se a alternativa mais interessante para o projeto. Essas mudanças de trajeto podem variar desde suaves desvios, até bruscas variações na direção, para essas mudanças, podem ser usados os chamados joelhos, que consistem em conexões entre as partes retas de tubulações, esses joelhos podem ser de diferentes graduações, a depender das diferentes necessidades de mudança de trajeto. O uso de joelhos numa tubulação sem o correto estudo pode gerar diversos problemas para a indústria, como possíveis rompimentos da tubulação em regiões críticas ou mesmo uma produção abaixo do esperado devido aos erros no dimensionamento do sistema de bombas.

Um dos fatores que mais influenciam a perda de carga, principalmente em grandes distâncias é a rugosidade do material que compõe a tubulação. Normalmente, os responsáveis pela escolha dos materiais das tubulações na indústria de petróleo, observam principalmente a capacidade de resistência aos esforços mecânicos e a diversos danos que estarão agindo nas tubulações, porém, outro fator importante na escolha é a análise da rugosidade dos diferentes materiais disponíveis na indústria. A rugosidade é responsável por boa parte da perda de carga em escoamentos longos, sendo essencial que seja levada em conta no projeto de dimensionamento do sistema de bombas para o correto escoamento da produção.

Kim, Kojasoy e Guo (2008) realizaram medições experimentais da perda de carga de um fluxo bifásico horizontal numa tubulação com a presença de joelhos de 45° e 90°, e conseguiram adaptar, com sucesso, as equações de Lockhart-Martinelli (1945) para fluxos bifásicos horizontais em tubulações retas para a presença de joelhos. Quamrul H. Mazumder (2012), utilizou o programa a computação fluidodinâmica FLUENT para analisar a queda de pressão em um escoamento ar-água em uma tubulação com um joelho de 90° e comparou os resultados obtidos nas simulações com os obtidos através de correlações empíricas.

Motivado pela importância do tema para a indústria, o trabalho a seguir realiza uma análise da influência das rugosidades de diversos materiais no escoamento bifásico horizontal, de óleo pesado e gás natural, através de uma junção de 90°, por meio de simulações geradas no *software* ANSYS CFX 13.0, posteriormente validadas utilizando a correlação de Kim (2008).

Metodologia

O modelo utilizado para o estudo continha as seguintes medidas: 0,00503 m de diâmetro, 1 m de comprimento na parte reta antes da conexão, a conexão possui um raio de curvatura de 0,089 m e após a conexão, existe outra parte reta com 0,063 m.

Os seguintes dados foram utilizados para o óleo e para o gás:

Tabela 1: Dados para o óleo e para o gás utilizados para o estudo.

	Óleo	Gás
Velocidade superficial (m/s)	9	9
Viscosidade dinâmica a 50°C	0,692	0,00011011428
Densidade (Kg/m³)	936,527	0,78
Massa molecular (g/mol)	1200	16,04
Capacidade calorífica (J/Kg×K)	2092	2220

Os dados para o óleo representam o óleo extraído no campo de Alba, com °API de 19,59, e a fonte para os dados do gás é a COPERGÁS.

• Modelo Analítico

O cálculo da perda de carga na parte reta inicial da tubulação é feito através da correlação de Lockhart-Martinelli, que é aplicável para escoamentos bifásicos horizontais.

Para a determinação da perda de carga monofásica, foi utilizada a fórmula de Darcy (1), e para o cálculo do fator de atrito, a fórmula de Soave (2) foi utilizada:

$$\frac{\Delta P}{\Delta l} = \frac{\rho \times f \times v^2}{2 \times d} \quad (1)$$

$$f = \left\{ -2 \left[\log \left(\left(\frac{\varepsilon}{3,7d} \right) + \left(\frac{(1,66 \ln(N_{Re}) - 1,07)}{N_{Re}} \right) \right) \right] \right\}^{-2} \quad (2)$$

Onde $\frac{\Delta P}{\Delta l}$ é a perda de carga distribuída (Pa/m), ρ é a densidade do fluido (Kg/m³), f é o fator de atrito de Darcy, v é a velocidade superficial do fluido (m/s), d é o diâmetro interno da tubulação, N_{Re} é o número de Reynolds do fluido, e ε é a rugosidade absoluta da parede da tubulação (m).

Para calcular a perda bifásica, de acordo com Lockhart-Martinelli (1945), temos:

$$X = \left[\frac{\left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_L}{\left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_G} \right]^{0,5} \quad (3)$$

$$y_L = \left(1 + \frac{20}{X} + \frac{1}{X^2} \right)^{0,5} \quad (4)$$

$$y_G = (1 + 20X + X^2)^{0,5} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_{BF} = y_L \left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_L \quad (6)$$

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_{BF} = y_G \left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_G \quad (7)$$

Onde $\left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_L$ é a perda de carga do líquido, $\left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_G$ é a perda monofásica do gás e y_L e y_G são os coeficientes utilizados para o cálculo da perda bifásica $\left(\frac{\Delta P}{\Delta l} \right)_{BF}$, que é calculada pela média dos valores obtidos para a fase líquida e para a fase gasosa.

Para a perda de carga na conexão, segundo Kim, temos:

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_F^{2\phi} = \phi_F^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{Ff}^f \quad (8)$$

Onde $\left(\frac{dp}{dz} \right)_F^{2\phi}$ é a perda de carga bifásica no joelho, $\left(\frac{dp}{dz} \right)_{Ff}^f$ é a perda de carga bifásica em uma tubulação reta de igual comprimento ao arco da curva do joelho e ϕ_F^2 é o fator de correção.

• Modelo Numérico

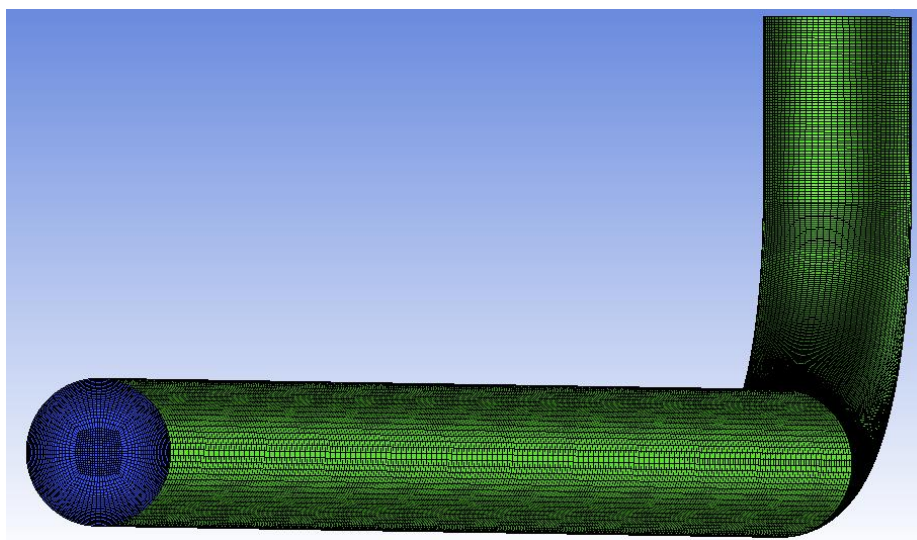
Para o modelo numérico, foi criada uma malha com 1.080.758 elementos, com as mesmas dimensões do modelo proposto, pelo aplicativo Icem CFD, onde os nós distribuídos no interior da malha foram deslocados para que ficassem mais concentrados próximos à parede da tubulação.

Para a definição das condições de contorno do modelo, e o cálculo da perda de carga, foram utilizados os programas CFD Pre e CFD solver, onde foram definidas as condições de contorno do problema, para a visualização do resultado da simulação foi utilizado o CFD post.

Tabela 2: condições de contorno utilizadas nas simulações

	Óleo	Gás
Velocidade de entrada (m/s)	9	9
Holdup de entrada	0,9	0,1
Holdup da saída	0,9	0,1

Figura 1: Malha desenvolvida para a simulação numérica



A pressão no domínio foi definida como 0 atm, e a pressão na saída 1 atm, a temperatura para o escoamento foi definida como sendo de 50°C. O padrão de escoamento foi definido com o óleo formando a fase contínua e o gás a fase dispersa, todas as reações químicas e as trocas de calor entre as fases foram desprezadas para a simplificação do problema.

Para a elaboração da modelagem foram levadas em conta as equações de continuidade e de momento.

• Estudos

Para um melhor estudo sobre a influência da rugosidade na perda de carga na tubulação, foram feitos 12 estudos para que fosse possível calcular analiticamente e através de simulações.

Tabela 3: Materiais e suas respectivas rugosidades utilizadas no estudo.

Materiais	Rugosidades (m)	Materiais	Rugosidades (m)
Vidro	0,000000125	Ferro galvanizado	0,00015
Alumínio	0,000001	Aço usado	0,000175

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

PVC	0,0000015	Aço pouco corroído	0,000275
Fibra de vidro	0,000005	Madeira lixada	0,0005
Aço novo	0,000015	Ferro novo	0,0007
Aço soldado	0,000075	Ferro corroído	0,0015

Resultados e Discussão

Para o cálculo analítico da perda de carga na parte curva, era necessária uma estimativa da velocidade de entrada dos fluidos no joelho, para isso, foram simulados diversos casos com diferentes rugosidades em uma malha contendo apenas um trecho reto de 1m de comprimento, com o mesmo diâmetro do caso estudado. Como resultado das simulações, obtivemos, com variações quase nulas, uma velocidade de entrada na curva de 4,73 m/s, utilizamos esse valor para todos os valores de rugosidade.

Tabela 4: Dados utilizados no cálculo analítico da perda de carga.

Materiais	Rugosidades (m)	Perda de carga analítica na parte reta (Pa)	Perda de carga analítica na parte curva (Pa)	Perda de carga analítica total (Pa)
Vidro	0,000000125	35335,82	32212,11	67547,93
Alumínio	0,000001	35341,822	32216,44	67558,26
PVC	0,0000015	35345,25	32218,92	67564,17
Fibra de vidro	0,000005	35369,25	32236,24	67605,49
Aço novo	0,000015	35437,72	32285,65	67723,37
Aço soldado	0,000075	35845,2	32579,67	68424,87
Ferro galvanizado	0,00015	36347,19	32941,61	69288,8
Aço usado	0,000175	36512,86	33060,97	69573,83
Aço pouco corroído	0,000275	37168,07	33532,53	70700,6
Madeira lixada	0,0005	38604,9	34563,37	73168,27
Ferro novo	0,0007	39846,78	35450,63	75297,41
Ferro corroído	0,0015	44584,98	38809,88	83394,86

Pode-se observar, da tabela 4, uma comparação entre os valores de perda de carga do escoamento na parte reta e na parte curva através do cálculo analítico, onde os valores de perda de carga na parte curva representam boa parte do valor total de perda de carga do escoamento, mesmo que o comprimento do arco da curva seja menor do que o da parte reta. Essa perda de carga considerável ocorre devido a mudança no trajeto e na velocidade do fluxo.

Figura 2: Detalhe do perfil de pressão na curva

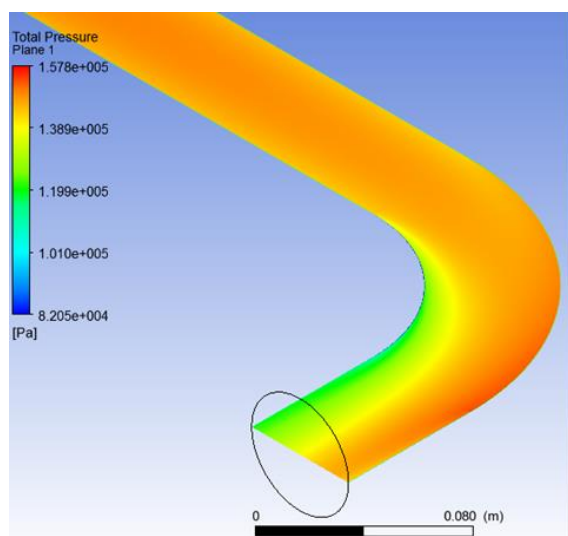
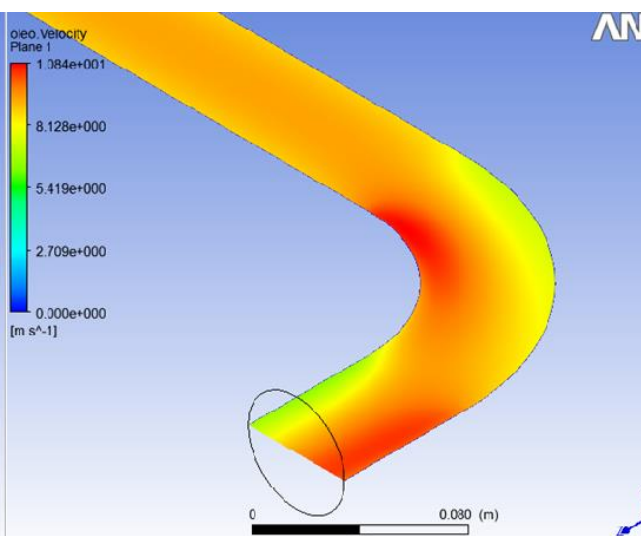


Figura 3: Perfil de velocidade na curva



Nas figuras podemos perceber o comportamento do fluxo ao passar pela junção, com um destaque para o aumento considerável de pressão na região mais externa da curva na figura 2. Pela figura 3, podemos analisar a velocidade da fase líquida composta pelo óleo ao passar pela junção.

O resultado das simulações com os diferentes valores de rugosidade e a comparação com os valores obtidos analiticamente estão na tabela abaixo:

Tabela 5: Comparação dos resultados analíticos e numéricos do estudo.

Materiais	Perda de carga analítica total (Pa)	Perda de carga numérica (Pa)	Erro (%)
Vidro	67547,93	75769,7	12,17175
Alumínio	67558,26	75770,1	12,15519
PVC	67564,17	75770,4	12,14583
Fibra de vidro	67605,49	75772,5	12,08039
Aço novo	67723,37	75777,8	11,89313
Aço soldado	68424,87	75809	10,79159
Ferro galvanizado	69288,8	75848,1	9,466609
Aço usado	69573,83	75870,8	9,050774
Aço pouco corroído	70700,6	75913,8	7,373629
Madeira lixada	73168,27	76032,6	3,914716
Ferro novo	75297,41	76137,2	1,115297
Ferro corroído	83394,86	76547,1	8,21125

Através das simulações, obtivemos um erro médio de 7,8335% quando comparados com os valores de perda de carga calculados analiticamente. Através de uma análise dos resultados da tabela 5, pode ser constatado o aumento da perda de carga com o aumento dos valores de rugosidade devido a resistência gerada pelos materiais ao fluxo dos fluidos nos seus interiores.

Conclusões

A partir dos resultados obtidos, se um limite de erro de 13% for estabelecido, pode-se observar que a modelagem obteve resultados razoavelmente satisfatórios, com um percentual de erro mediano de 7,8335% quando comparados aos resultados obtidos analiticamente.

Sobre a influência do joelho na perda de carga, pudemos notar, que apesar de ter um comprimento de arco menor do que o comprimento da parte reta da malha, ao ser atravessado por um fluido com a velocidade já bastante reduzida, ainda gerou uma grande perda de carga no escoamento, portanto a presença de joelhos em sistemas de tubulações deve ser alvo de um cuidadoso projeto, para evitar rompimentos de tubulações, baixa produção ou outros efeitos indesejáveis.

O estudo da influência das rugosidades dos diferentes materiais na perda de carga foi válido, pois permite uma análise sob o ponto de vista econômico por parte das empresas do setor petrolífero e químico, pois o uso de materiais mais baratos pode ser considerado viável em situações nas quais a tubulação não esteja efeito de grandes esforços, ou outros tipos de danos.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos aos meus colegas e orientador, por todo o auxílio disponibilizado no Laboratório de Separação e Otimização de Processos (LASSOP-UFAL).

Referências Bibliográficas

KIM, Seugjin; KOJASOY, Gunol; GUO, Tangwen. **Two-phase minor loss in horizontal bubbly flow with elbows: 45° and 90° elbows**. Chemical Engineering Journal. Pennsylvania, p. 1-6. 21 ago. 2008.

LOCKHART, R. W; MARTINELLI, R.C. **Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two Component Flow in Pipes**, Chemical Engineering Progress – Vol. 45, 1949.

MARINHO, José Luis Gomes. **Estudo do Escoamento Multifásico Tipo Bolha de Taylor em Dutos em Conexões Curvadas**". 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

MAZUMDER, Q. H. **CFD Analysis of the Effect of Elbow Radius on Pressure Drop in Multiphase Flow**. Modelling and Simulation in Engineering. Volume 2012, Article ID 125405, 8 páginas.

BEGGS, H.D; BRILL, J.P. **A study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes**, Journal of petroleum technology, 1973, p.1-11.