

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



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DA QUEDA DE PRESSÃO EM UMA TUBULAÇÃO PARA UMA MISTURA BIFÁSICA (ÓLEO PESADO-GÁS NATURAL) UTILIZANDO UMA JUNÇÃO DE 90° NA HORIZONTAL

AUTORES:

Newton Jorge Barbosa Diniz, 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 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.

ANÁLISE DA QUEDA DE PRESSÃO EM UMA TUBULAÇÃO PARA UMA MISTURA BIFÁSICA (ÓLEO PESADO-GÁS NATURAL) UTILIZANDO UMA JUNÇÃO DE 90° NA HORIZONTAL

Abstract

When it comes to multiphase flow in the petroleum industry, this type of flow can occur between gas, oil, water and in some cases there is the presence of sand. The heavy oils represent a significant challenge for this industry because of the problems present during its production process and the difficulty of flowing on this type of fluid is directly associated to high viscosity and density. Computational tools that simulate multiphase flows in pipes are very important to obtain a detailed study in order to verify the technical and economic feasibility of installation of fluid flow systems, whether deployed system on oil rigs or in a refinery. This study aims to verify computationally, through software ANSYS CFX 13.0, and analytically from equations found in the literature, the pressure drop in a 90° junction for a two-phase flow (heavy oil - natural gas) flowing horizontally for comparison of the results and validation of the analytical formulations.

Introdução

Na indústria de petróleo há a necessidade de que os fluidos contidos no reservatório fluam do fundo do poço até a superfície, sendo necessário um grande apoio logístico para que os hidrocarbonetos sejam produzidos e transportados de forma segura e economicamente viável. Os escoamentos que ocorrem nesta indústria são considerados multifásicos devido à presença de hidrocarbonetos e emulsões, resultantes da coexistência de óleo, gás, água e por muitas vezes até haver presença de materiais inorgânicos como areia, silte, etc. A partir do momento em que se inicia a produção de hidrocarbonetos, no caso da ocorrência de um fluxo combinado, um reservatório de petróleo pode vir a produzir óleo e gás, ocorrendo assim um escoamento bifásico, uma das fases contidas neste sistema é líquida e a outra fase gasosa, na literatura podemos encontrar alguns trabalhos que estudaram este tipo de escoamento.

No decorrer de todo o processo produtivo, os fluidos produzidos são transportados através dos dutos de produção, risers, tubulações, podendo ocorrer em trechos horizontais, verticais, inclinados, ou em tubulações em forma de cotovelo (tubulação em 45° ou 90°). Em geral, devido à limitação de espaço para a acomodação de dutos nas plataformas de petróleo ou até mesmo das refinarias, é necessário o emprego de peças que venham a realizar conexões em sofisticados sistemas de tubulações proporcionando uma otimização de espaço utilizado, onde também podem ser utilizados medidores de vazões, registros e válvulas para que sejam realizadas ampliações, encurtamentos ou até mesmo a geração de diversos tipos de curvas para uma melhor acomodação das tubulações.

Com a crescente demanda mundial por petróleo somado a descoberta de grandes reservas de óleos pesados e extrapesados, a indústria petrolífera vem procurando entender a dinâmica da produção desses fluidos para que se seja possível desenvolver novas tecnologias que venham a diminuir os custos operacionais para a produção destes tipos de óleos. Devido à alta viscosidade e grande densidade, a queda de pressão por fricção durante o processo de escoamento de óleos pesado e extrapesado é demasiadamente elevada, exigindo que os equipamentos trabalhem com uma carga de trabalho excessiva.

Grande parte dos sistemas de transporte de fluidos na engenharia de petróleo são aplicados horizontalmente, sendo as tubulações interligadas por várias restrições de fluxo (cotovelos ou outros acessórios), através das quais ocorrem significativas mudanças de pressão, bem como nos padrões de escoamentos. Para trechos horizontais e retilíneos (Lockhart, R.W. & Martinelli, R.C., 1949),

desenvolveram uma correlação capaz de prever a perda de carga para uma tubulação. A partir desta correlação, vários estudos foram realizados para que fosse possível entender a dinâmica do escoamento bifásico líquido-gás. (SOUZA, R. G. S, 2009.), estudou o escoamento bifásico líquido – gás para obter a previsão dos gradientes de pressão, tanto com a correlação numérica de Lockhart & Martinelli como com o uso da fluidodinâmica computacional. Além desse estudo, vários outros estudos experimentais foram realizados. (KIM *et al.*, 2008), vieram a apresentar formulações matemáticas capazes de calcular a perda de carga em um cotovelo de 45° e 90° para uma mistura bifásica Ar-Água, utilizando-se dos princípios proposto por Lockhart & Martinelli.

Diante do exposto até o momento, este trabalho tem o objetivo de recriar as condições do estudo experimental, tais como comprimento do cotovelo de 90° e diâmetro interno da tubulação para um escoamento de óleo pesado – gás natural, sendo realizada simulação numérica via ANSYS-CFX 13.0, para que haja validação dos resultados obtidos via formulação e assim verificar o grau de confiabilidade para o escoamento de diferentes tipos de fluidos.

Metodologia

Formulação Analítica

Para a predição da queda de pressão em um cotovelo de 90° na horizontal foi aplicada uma formulação analítica desenvolvida por (KIM, *et al.*, 2008), com base nas equações propostas por Lockhart & Martinelli (1949) para um fluxo retilíneo horizontal. Onde a queda de pressão para o trecho curvo pode ser obtida analiticamente a partir das equações abaixo:

Perda de carga por fricção

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F^k = \frac{f}{2D} \rho_k j_k^2 \quad (1)$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho_k j_k^2 D}{\mu_k} \quad (2)$$

Perda de carga do líquido considerando a restrição

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F^f = \left(\frac{4f}{D} + \frac{K}{D}\right) \frac{\rho_f j_f^2}{2} = \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{FM}^f + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{Ff}^f \quad (3)$$

Multiplicador empírico

$$\phi_F^2 = \left[1 + \frac{1}{X_M^2}\right] + \left[1 + \frac{1}{X_M^2}\right]^{\frac{1}{2}} \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (4)$$

Parâmetros de restrição para obtenção do multiplicador

$$X^2 = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{Ff}^f}{\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F^g} e X_M^2 = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{Ff}^f}{\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{FM}^f} \quad (5)$$

Perda de carga para o cotovelo

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F^{2\phi} = \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F^f + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F^g + C \left[\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F^f \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F^g \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Onde, f é o fator de fricção; ρ é a massa específica do fluido; D é o diâmetro do tubo e L é o comprimento do tubo. $K = 0,58$ é o fator de restrição e $C = 65$ é um parâmetro para o cálculo do fator de multiplicação, estes valores de K e C segundo (KIM, *et al.*, 2008), são os mais adequados para a previsão da perda de carga de escoamento bifásico em um cotovelo de 90° .

Para a determinação do fator de atrito de Darcy, utilizaram-se as seguintes equações:

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

(Soave – Fluxo Turbulento)

$$f = \frac{64}{N_{RE}} \quad (8)$$

(Fluxo Laminar)

Descrição do Modelo Numérico

Utilizou-se um trecho horizontal reto de 0,5m de comprimento com 0,0503m de diâmetro e rugosidade de 0,0456 mm, além da parte curva (cotovelo) com um arco de 0,139800873m de comprimento total, contendo o mesmo diâmetro da parte reta e rugosidade. Gerou-se separadamente a geometria e malha da parte reta e o trecho curvo (para que fosse possível estimar as velocidades de entrada dos fluídos na parte reta), além de também ser gerada uma geometria e malha total (geometria e malha contendo a parte reta acoplada a parte curva). As geometrias geradas são compostas por uma entrada, uma parede e uma saída. As malhas e geometrias foram geradas no aplicativo ANSYS-ICEM 13.0. Utilizou-se malhas estruturadas, onde a parte reta e o trecho curvo da malha apresentaram aproximadamente um total de 250 mil elementos e 230 mil elementos, respectivamente, e a geometria completa (Figura 1a) apresentou cerca de 480 mil elementos.

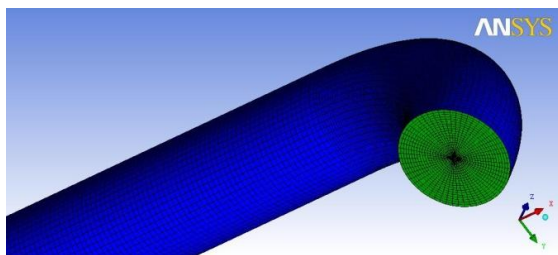


Figura 1a – Representação da malha numérica total.

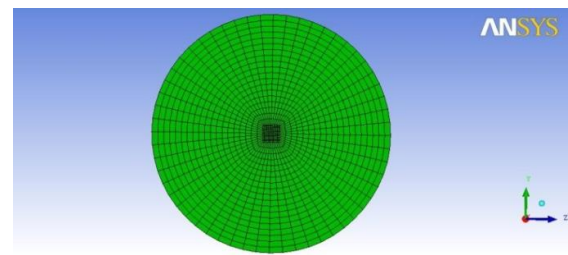


Figura 1b – Representação da face de entrada da malha numérica.

Para a resolução do problema, utilizou-se de uma modelagem matemática baseada nos princípios do momento linear e massa, considerando um escoamento isotérmico e incompressível, levando em conta o efeito da gravidade, domínio tridimensional com coordenadas cartesianas, sem reações químicas, regime permanente e propriedades físico-químicas constantes. Sendo assim, as principais equações utilizadas foram:

Equação da Continuidade (Conservação da massa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (9)$$

Equação do momento (conservação do momento linear)

$$\frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \otimes V) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (10)$$

Sendo,

$$\tau = \mu \left(\nabla V + (\nabla V)^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \quad (11)$$

Onde, ρ é a massa específica; t é o tempo; V é velocidade; p é pressão; τ é a tensão cisalhante e S_M é a força de campo por volume de fluido.

Casos Analisados

No presente trabalho foi analisado o escoamento bifásico líquido-gás para dois tipos de óleos pesados distintos, a tabela 1 apresenta as propriedades físicas dos fluidos utilizados:

- Simulação caso 1: Escoamento Óleo pesado 1 – Gás Natural;
- Simulação caso 2: Escoamento Óleo pesado 2 – Gás Natural.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos fluidos a 25°C.

Propriedade	Óleo 1	Óleo 2	Gás
ρ (kg/m ³)	948	952	0,78
μ (Pa.s)	1,109	0,8059	1,08E-05
C_p (J/KgK)	1800	1762	2230
K (W/mK)	0,147	0,134	0,03388
V (m/s)	4,3	4,3	1,6

Fonte: BARBOSA, A. (2004), SILVA et al. (2014), MAXWELL (2015).

Resultados e Discussão

As simulações têm o objetivo de verificar a perda de carga para um escoamento em um cotovelo de 90°, considerando um fluxo bifásico óleo pesado-gás natural para um modelo isotérmico, com a finalidade de que se possa comparar com os resultados obtidos analiticamente.

A figura 2a apresenta o comportamento da queda de pressão total, via simulação, da tubulação composta por uma parte reta com 0,5m de comprimento, engastada a um cotovelo de 90° com um comprimento de arco de 0,139800873m, quando se leva em consideração as propriedades físicas referentes ao óleo pesado 1, tomando como referência os valores das propriedades físicas encontrados na tabela 1.

A figura 2b apresenta o comportamento da queda de pressão total, via simulação, da tubulação levando-se em consideração a perda de carga para um escoamento bifásico óleo pesado-gás natural, considerando-se as propriedades do óleo pesado 2.

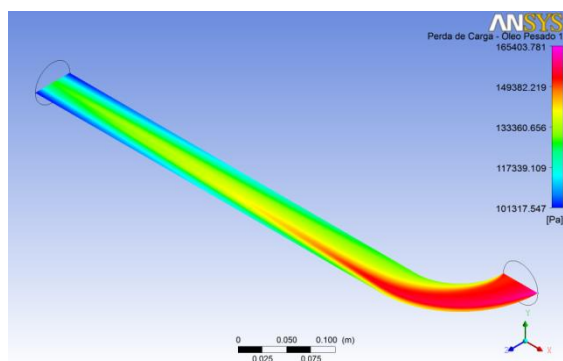


Figura 2a – Perda de carga bifásica para o óleo pesado 1, tubulação completa.

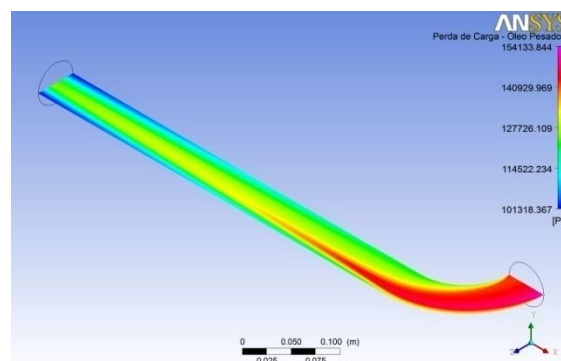


Figura 2b – Perda de carga bifásica para o óleo pesado 2, tubulação completa.

De acordo com a figura 2a e 2b, nota-se que na região da curva tem-se uma maior queda de pressão, devido à alteração do sentido do fluxo e aumentando a perda de carga. É possível verificar, também, que o comportamento nas regiões de maior pressão (curva) e menor pressão (na saída) são praticamente idênticos nos dois casos. Devido ao estreitamento da região do cotovelo, há um aumento da pressão na parte curva da tubulação.

Para uma melhor visualização da perda de carga localizada do cotovelo de 90°, foram realizadas simulações com os valores encontrados na tabela 1. A figura 3a e 3b apresentam os valores da perda de carga, via simulação, e configuração gráfica da distribuição de pressão considerando-se que o escoamento só ocorre na parte curva para os óleos pesados 1 e 2 respectivamente.

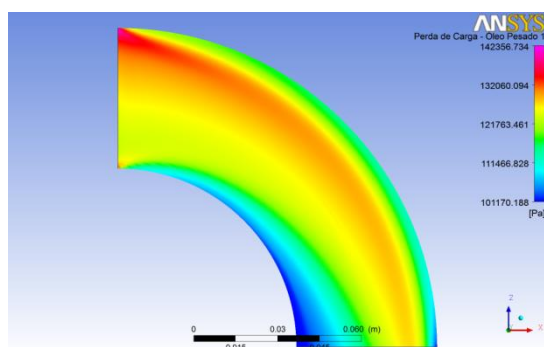


Figura 3a – Perda de carga bifásica para o óleo pesado 1, trecho curvo.

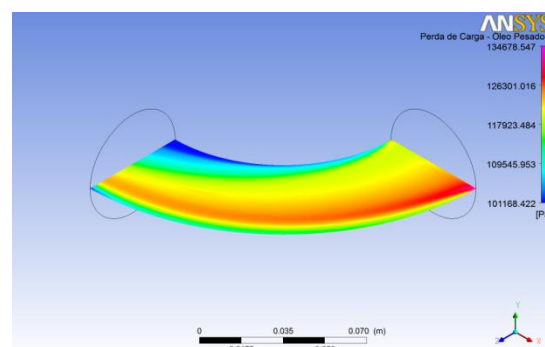


Figura 3b – Perda de carga bifásica para o óleo pesado 2, trecho curvo.

Realizada a simulação numérica considerando, apenas, o joelho, foi possível obter os valores das velocidades de entrada, na parte reta da tubulação, do gás e do óleo pesado para cada caso simulado. Os dados das velocidades de entrada na parte reta da tubulação podem ser verificados na tabela 2:

Tabela 2 - Velocidades de entrada no trecho reto para o óleo e para o gás.

Caso	Óleo	Gás	-
1	3,42256	4,32046	m/s
2	3,6832	3,98697	m/s

A partir dos dados de velocidades para cada caso, foi possível realizar uma simulação (figura 4a e 4b) considerando apenas o trecho reto de 0,5m de comprimento da tubulação, levando-se em consideração

as propriedades dos fluidos contidas na tabela 1. No entanto, os valores de velocidades da tabela 1 foram descartados, utilizando-se os valores de velocidades encontrados na tabela 2.

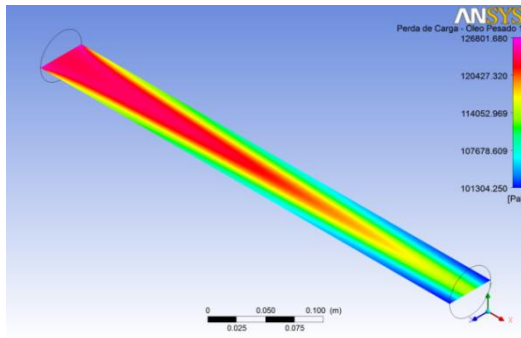


Figura 4a – Perda de carga bifásica para o óleo pesado 1, trecho reto.

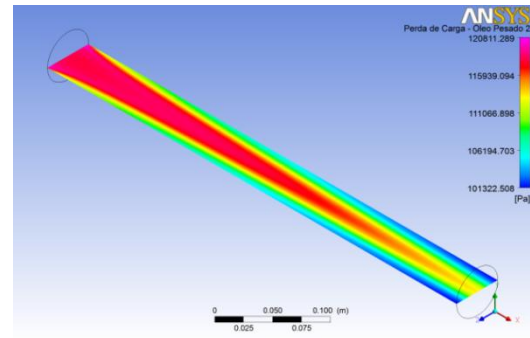


Figura 4b – Perda de carga bifásica para o óleo pesado 2, trecho reto.

Tabela 3 - Comparação da perda de carga: simulação curva x modelo analítico curva.

Caso	Númerico Curva (Pa)	Analítico Curva (Pa)	ERRO %
1	41186,546	41771,142	1,400
2	33510,125	32041,385	4,584

Tabela 4 - Comparação da perda de carga: simulação x modelo analítico curva + simulação trecho reto.

Caso	Númerico Total (Pa)	Númerico Reta + Analítico Cura (Pa)	ERRO %
1	64086,234	67268,572	4,966
2	52815,477	51530,166	2,494

Nas tabelas 3 e 4 podem ser verificados os valores da queda de pressão obtidos via simulação numérica e analiticamente, assim como os valores dos respectivos erros quando se comparando os valores obtidos através da simulação numérica com os valores encontrados via formulações matemáticas.

Conclusões

- Devido às altas densidades e altas viscosidades, características dos óleos pesados, pôde-se verificar que a queda de pressão por fricção ocorrida durante a simulação e verificada numericamente vem a ser extremamente elevada, o que já era esperado. Nota-se que a queda de pressão na região curva é maior devido à maximização do contato dos fluidos com as paredes do tubo.
- Tratando-se do escoamento bifásico em cotovelos de 90°, foi verificado que a queda de pressão é, aproximadamente, 2 vezes superior a perda de carga para um fluxo bifásico em um trecho reto com um comprimento total 4 vezes maior que o comprimento do trecho curvo.
- Para a geometria utilizada à correlação desenvolvida por (Kim *et al.*, 2008), veio à representar satisfatoriamente o comportamento da perda de carga para um cotovelo de 90°, pois a formulação analítica apresentou valores de perda de carga próximos aos valores encontrados via simulação numérica como pode ser verificado nas tabelas 3 e 4.
- A queda de pressão considerando um escoamento bifásico para o óleo 2, óleo com maior viscosidade, foi cerca de 21,3% superior a queda de pressão para um fluxo bifásico levando-se

em conta o óleo 1. Este efeito já era esperado, já que fluidos com valores mais altos de viscosidades tendem a ter maior resistência ao fluxo.

Agradecimentos

Agradeço ao programa de Bolsas de Desenvolvimento Acadêmico e Institucional – BDAI da Universidade Federal de Alagoas pelo apoio financeiro, ao Prof. Dr. Luís Marinho por me ceder esta grande oportunidade.

Referências Bibliográficas

BARBOSA, A. **Efeitos Transientes na Perda de Carga no Escoamento Óleo Pesado – Água em Regime Anular em Duto Metálico**. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica – Instituto de geociências. 2004.

KIM, S, KOJASOY, G., GUO, T. **Two-phase minor loss in horizontal bubbly flow with elbows: 45° and 90° elbows**. Nuclear Engineering and Design 240.2010.pp.284-289.

LOCKHART, R.W., MARTINELLI, R.C., 1949. **Proposed correlation of data for isothermal two-phase component flow in pipes**. Chem. Eng. Prog. 45, 30.

MAXWELL, **Projeto do LAMBDA – Laboratório de Automação de Museus, Bibliotecas Digitais e Arquivos**. Departamento de Engenharia elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11028/11028_5.PDF>. Acesso em: 18 junho de 2015.

SILVA, L. D. S.e Marinho, J. L. G. **Numerical study on the influence of gas volume fraction on the two-phase flow of heavy oil and natural gas mixtures in na oil well**. Brazilzan Journal of Petroleum and Gas. 2014.

SPEDDING, P. L. e BENARD, E. **Gas-liquid two phase flow through a vertical 90° elbow bend**. Experimental Thermal and Fluid Science 31.2007. pp. 761–769.

SOUZA, A. D. **Estudo da perda de carga em escoamento multifásico utilizando técnicas de inteligência artificial com ênfase no escoamento do petróleo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Química. 2011.

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, Escola de Química. 2009.