

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CÁLCULO DE GRADIENTE DE PRESSÃO PARA ESCOAMENTO ANULAR

J. R. ALMEIDA<sup>1</sup>, M. C. C. SOARES<sup>1</sup> e L. P. S. ROSA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário Jorge Amado, Depart. Engenharia de Petróleo e Gás

<sup>2</sup> Doutoranda pela Universidade Federal da Bahia, Depart. Engenharia Industrial

E-mail para contato: anulartcc2016@gmail.com

**RESUMO** – escoamentos bifásicos em padrão anular são constantemente encontrados na produção de petróleo e gás, portanto, prever o comportamento deste tipo de padrão para um projeto de sistema adequado é de fundamental importância, e para tal, compreende a aplicação de modelos para sua representação. Os principais objetivos deste trabalho são a análise da influência quanto à aplicação de diferentes correlações na determinação do coeficiente de arraste de gotículas  $E_D$  e tensão interfacial em termos do parâmetro  $I$ , no desenvolvimento de um modelo para o cálculo de gradiente de pressão baseado no modelo de fases separadas. Os resultados obtidos foram comparados com os dados experimentais do gradiente de pressão de escoamento isotérmico vertical ascendente de gás e líquido no padrão anular, em um duto de seção transversal circular constante. Além disto, uma comparação dos resultados contra outra modelagem foi realizada. O modelo proposto neste artigo apresentou menor desvio relativo médio de 7,74, o que permitiu a identificação de um modelo satisfatório na representação deste tipo de escoamento em condições operacionais distintas.

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da modelagem e simulação de processos está associado a modelos rigorosos capazes de prever condições operacionais para projetos envolvendo escoamentos de fluidos. Estes são constantemente encontrados na produção de petróleo, nas indústrias química e petroquímica, com aplicações em reatores nucleares, condensadores e em dutos de processos químicos. Ao longo do escoamento, a mistura pode desenvolver diferentes tipos de padrão de acordo com algumas características que são capazes de alterá-lo e nesse sentido, o conhecimento deste, é de fundamental importância por questões relacionadas a projetos, melhor compreensão e otimização do processo, e simulação do mesmo.

O escoamento Anular apresenta três correntes distintas: o filme de líquido, o núcleo gasoso e as gotículas de líquido, e caracteriza-se por uma fase gasosa escoando no centro da tubulação com alta velocidade, em contato com um filme de líquido gerando uma tensão interfacial, e este último escoando com menor velocidade na periferia em contato com a parede da tubulação, exercendo uma tensão de cisalhamento. O objetivo do presente trabalho é a comparação e análise da interação das correlações observadas junto ao padrão de

escoamento anular quanto ao coeficiente de arraste de gotículas e tensão interfacial em termos do parâmetro  $I$ , no desenvolvimento de uma modelagem para o cálculo de gradiente de pressão baseado no modelo de fases separadas. Os resultados obtidos serão comparados com os dados experimentais do gradiente de pressão de uma tubulação de diâmetro constante, de escoamento isotérmico vertical ascendente de gás e líquido no padrão anular com inclinação de  $90^\circ$ , obtidos por Owen (1986), Rosa e Mastelari (2008) e Lima (2011). Dessa forma, deseja-se obter uma melhor combinação desses parâmetros que possibilitem uma maior aproximação dos resultados calculados com os experimentais, explanando aquela que apresentar melhor precisão. Além disto, serão realizadas comparações com os resultados da modelagem computacional proposta por Lima (2011) para o mesmo padrão de escoamento. O modelo desenvolvido será implementado no *Microsoft Excel* e o *Visual Basic for applications* (VBA) será utilizado para resolução numérica de equações implícitas aplicadas ao modelo.

## 2. MODELOS

Para fins de modelagem é definido escoamento unidimensional em regime permanente, isotérmico e incompressível, sem transferência de massa entre as fases, sem deslizamento entre o gás e as gotículas de líquido, e, o filme de líquido possui simetria azimutal. As variáveis unidimensionais e suas relações cinemáticas, bem como, as relações geométricas características do escoamento anular vertical ascendente de gás e líquido, para um duto de seção circular constante, utilizados neste artigo, foram obtidas por Alves (1991). Para fechamento do modelo é necessário a definição de dois parâmetros importantes: nos termos que envolvem a tensão interfacial na determinação do parâmetro interfacial  $I$ , e outro, nas indeterminações relativas à fração de arraste de gotículas (*entrainment fraction*).

Particularmente neste padrão de escoamento só uma única fase, a líquida, está em contato com a tubulação, sofrendo a ação do fator de atrito exercido por esta última, definido neste trabalho pela equação de Morrison (2013). O fator de atrito interfacial, por sua vez, envolve fenômenos complexos e mais difíceis de serem estimados, e é expresso na forma geral por:

$$f_I = f_C I \quad (1)$$

onde  $I$  é o parâmetro interfacial que leva em conta a aspereza equivalente causada pela estrutura ondulada do líquido. O  $f_C$  corresponde ao fator de atrito do núcleo gasoso e é determinado conforme equação de Blasius a seguir:

$$f_C = C_C (D_C V_C / \nu_C)^{-m} \quad (2)$$

sendo  $D_C$  o diâmetro hidráulico do núcleo gasoso,  $V_C$  a velocidade do núcleo gasoso na tubulação e  $\nu_C$  a viscosidade cinemática do núcleo gasoso.  $C_C = 16$  e  $m = 1$  para escoamento laminar, e  $C_C = 0,046$  e  $m = 0,2$  para escoamento turbulento.

Neste trabalho, o parâmetro adimensional  $I$ , é estimado pelas correlações conforme tabela abaixo:

Tabela 1 – Correlações para cálculo do parâmetro interfacial  $I$  em interface concêntrica

Autor	$I$	Eq.
Wallis (1969)	$1 + 300 (H_F/D)$	(3.1)
Whalley e Hewitt (1978)	$1 + 24 (\rho_L/\rho_G)^{1/3} (H_F/D)$	(3.2)

Sendo:  $H_F$  é a altura de filme de líquido;  
 $D$  é o diâmetro da tubulação;  
 $\rho_L$  e  $\rho_G$  são as massas específicas líquido e gás, respectivamente.

Devido à velocidade e diferença das fases que estão em contato ocorre o processo de atomização e deposição das gotículas de líquido, determinantes na definição da fração de arraste de gotículas, o qual constitui um dos parâmetros responsáveis pela sensibilidade na modelagem do padrão anular, e por sua vez, envolvem fenômenos físicos complexos e de diversos processos para sua determinação. Em regime permanente, as taxas de deposição e atomização são aproximadamente iguais, assim, sua estimativa pode ser feita utilizando algumas correlações empíricas encontradas na literatura. Abaixo, na Tabela 2, estão apresentadas as correlações da fração de arraste de gotículas  $E_D$ , adimensional, utilizadas neste artigo.

Tabela 2 – Correlações para estimativa da fração de arraste de gotículas  $E_D$

Autor	$E_D$	Eq.
Wallis (1969)	$1 - \exp [-0,125 (10^4 J_G \mu_G (\rho_G/\rho_L)^{1/2}/\sigma - 1,5)]$	(4.1)
Ishii e Mishima (1989)	$\tanh (7,25 \times 10^{-7} Re_L^{1/4} We^{*5/4})$	(4.2)
Sawant et al. (2008)	$(1 - Re_{L,min.}/Re_L) \tanh [2,31 \times 10^{-4} Re_L^{-0,35} (We^*)^{5/4}]$	(4.3)
Sawant et al. (2009)	$(1 - Re_{L,min.}^*/Re_L) \tanh [2,31 \times 10^{-4} Re_L^{-0,35} (We^{**})^{5/4}]$	(4.4)

Fonte: Lima (2011).

Sendo:  $J_G$  é a velocidade superficial do gás;

$\mu_G$  é a viscosidade absoluta do gás;

$\rho_G$  e  $\rho_L$  são as massas específicas do gás e líquido;

$\sigma$  é a tensão superficial gás-líquido;

$Re_L$  é o número de Reynolds do líquido;

$Re_{L,min.} = 250 \ln(Re_L) - 1265$  é o número de Reynolds do líquido mínimo;

$Re_{L,min.}^* = 13 N_\mu^{-1/2} + 0,3 (Re_L - 13 N_\mu^{-1/2})^{0,95}$  é o n. de Re. do líq. mín. modificado;

$N_\mu = \frac{\mu_L}{[\rho_L^2 \sigma^3 / \Delta\rho g]^{1/4}}$  é o número de viscosidade;

$\Delta\rho = \rho_G - \rho_L$ ;

$We^* = \left(\frac{\rho_G J_G^2 D}{\sigma}\right) \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_G}\right)^{1/3}$  e  $We^{**} = We^* \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_G}\right)^{-1/12}$  são os n. de Weber modificados.

## 2.1. Modelo de Fases Separadas

Para o cálculo de gradiente de pressão, em escoamento anular vertical ascendente, será empregado o modelo de fases separadas proposto por Alves (1991). Este por sua vez, baseia-se na aplicação do balanço de forças, admitindo-se condições de equilíbrio entre as fases, conforme evidenciada abaixo:

$$-\tau_w S_w/A_F + \tau_i S_i(1/A_F + 1/A_C) - (\rho_L - \rho_C)g \sin \theta = 0 \quad (5)$$

sendo  $\tau_w$  a tensão de cisalhamento na parede da tubulação,  $\tau_i$  a tensão interfacial,  $S_w$  o perímetro molhado pela fase líquida,  $S_i$  o perímetro interfacial,  $A_F$  e  $A_C$  a área ocupada pela fase líquida e pelo núcleo gasoso, respectivamente,  $\rho_L$  e  $\rho_C$  são as massas específicas do líquido e do núcleo gasoso, respectivamente, e  $g$  a aceleração da gravidade.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção é apresentada a análise dos resultados obtidos das combinações realizadas entre as correlações dos parâmetros estudados neste artigo, utilizando o modelo de fases separadas. Os pontos utilizados foram obtidos pelo autor Owen (1986), em um tubo de diâmetro igual a 0,032m e pressão de 240kPa, e pelos autores Rosa e Mastelari (2008) e Lima (2011) em um tubo de diâmetro igual a 0,026m e pressão em torno de 100kPa, utilizando ar e água, com as propriedades físicas medidas em pressão atmosférica e temperatura ambiente. Na Tabela 3 são apresentados os desvios relativos médios do gradiente de pressão resultantes dos pontos experimentais dos autores citados acima, sendo as Equações 3.1 e 3.2 referentes às correlações do parâmetro interfacial  $I$  e 4.1 a 4.4 referentes às correlações da fração de arraste de gotículas.

Tabela 3 – Valores percentuais do erro do gradiente de pressão em função das combinações de  $E_D$  e  $I$ , resultantes dos pontos experimentais de Owen (1986), Rosa e Mastelari (2008) e Lima (2011)

Correlações de $I$	Correlações de $E_D$			
	Eq. (4.1)	Eq. (4.2)	Eq. (4.3)	Eq. (4.4)
Equação (3.1)	11,14	17,64	17,13	9,35
Equação (3.2)	15,69	9,75	8,94	7,74

O melhor resultado foi obtido com a combinação da Equação 4.4, por Sawant et al. (2009), e da Equação 3.2, por Whalley e Hewitt (1978), com desvio relativo médio de 7,74. Nota-se que, a correlação de  $E_D$  de Wallis (Eq. 4.1) leva em consideração na sua fórmula a velocidade superficial do gás, ao passo que as outras correlações (Eq. 4.2 a 4.4) consideram, adicionalmente, a velocidade superficial do gás. Essa diferença nas formulações pode ter influenciado na discrepância dos resultados.

Nas Tabelas 4 e 5 analisa-se a sensibilidade da fração de arraste de gotículas  $E_D$ , resultantes dos pontos experimentais obtidos por Rosa e Mastelari (2008) e Lima (2011), e dos pontos experimentais obtidos por Owen (1986), respectivamente. A primeira linha apresenta aos resultados encontrados pela modelagem desenvolvida por Lima (2011), e a

segunda linha os obtidos pelo modelo proposto neste artigo.

Tabela 4 – Comparação dos valores percentuais do erro do gradiente de pressão em função das correlações de  $E_D$  obtidas neste trabalho e por Lima (2011), resultantes dos pontos experimentais de Rosa e Mastelari (2008) e Lima (2011)

Autores	Correlações de $E_D$			
	Eq. (4.1)	Eq. (4.2)	Eq. (4.3)	Eq. (4.4)
Lima (2011)	8,0	9,6	5,2	5,3
Equação 3.2	15,35	7,16	5,75	5,4

Tabela 5 – Comparação dos valores percentuais do erro do gradiente de pressão em função das correlações de  $E_D$  obtidas neste trabalho e por Lima (2011), resultantes dos pontos experimentais de Owen (1986)

Autores	Correlações de $E_D$			
	Eq. (4.1)	Eq. (4.2)	Eq. (4.3)	Eq. (4.4)
Lima (2011)	45,5	42,7	43,5	43,3
Equação 3.2	15,86	11,04	10,54	8,92

Para a Tabela 4, ambas as modelagens apresentaram resultados bastante próximos, com exceção da Eq. 4.1, que apresentou neste trabalho um desvio superior ao apresentado por Lima (2001). Por outro lado, na Tabela 5 constata-se que os resultados alcançados pela modelagem de Lima (2011) apresentam altos valores de desvio relativo médio ao gradiente de pressão, na ordem de 40%, ao passo que na modelagem desenvolvida neste trabalho obteve um desvio relativo médio na ordem de 10%. Uma das diferenças cruciais entre as modelagens se trata da correlação utilizada para a definição do fator  $I$ , dado que Lima (2011), utiliza da Equação de Wallis (1969), Equação 3.1, à proporção que este trabalho adotou como melhor combinação a utilização do fator  $I$  de Whalley e Hewitt (1978), Equação 3.2. Após análise de ambas as correlações da Tabela 1, percebeu-se que estas podem ser expressas na forma geral:

$$I = \omega (H_F/D) \quad (6)$$

Para um mesmo diâmetro, na equação de Wallis (1969),  $\omega$  é uma constante de valor 300, logo a mesma se dá em função apenas da altura do filme de líquido, enquanto que na equação de Whalley e Hewitt (1978), a determinação do fator  $\omega$  é dependente das massas específicas do gás e do líquido. Para um escoamento em regime permanente, no qual as propriedades do fluido não variam com o tempo, o valor de  $\omega$  através da formulação expressa pela Eq. 3.2 também será uma constante, mas, para cada sistema de projeto desenvolvido, tal valor vai variar com as propriedades físicas de massa específica dos fluidos. Isto nos permite concluir que a aplicação da Equação 3.1 está limitada às condições operacionais a qual foi estabelecida, o que justifica a desconformidade dos valores entre as correlações. A Equação 3.2, por sua vez, apresentou os melhores resultados em termos de desvio relativos médio para cada equação de  $E_D$ , com exceção da correlação de Wallis (1969), e, portanto, possui maior flexibilidade de aplicação.

## 4. CONCLUSÃO

O modelo descrito e desenvolvido neste trabalho apresentou resultados satisfatórios para condições operacionais distintas, utilizando-se da combinação da correlação de Sawant et al. (2009), para estimativa de  $E_D$ , e da correlação de Whalley e Hewitt (1978) para definição do parâmetro  $I$ . A grande sensibilidade do modelo de fases separadas de Lima (2011) para os dados experimentais de Owen (1986), quando comparada ao modelo proposto neste artigo, pode ser justificada pelas seguintes particularidades: a altura de filme de líquido por meio da escolha do método iterativo de resolução da sua equação implícita, as indeterminações relativas ao cálculo do parâmetro  $I$  e da fração de arraste de gotículas, das incertezas de medições experimentais, e em menor escala, pela determinação do fator de atrito entre o líquido e a tubulação. Para fins de validação destas proposições sugere-se a elaboração de um estudo minucioso para a identificação dos fatores que influenciaram este diferencial de desvio relativo médio entre os modelos, além da realização de futuros trabalhos utilizando o modelo proposto neste artigo sob pressões típicas em poços de petróleo e gás em padrão anular.

## 5. REFERÊNCIAS

- ALVES, I.N.; CAETANO, E.F.; MINAMI, K.; SHOHAM, O. Modeling Annular Flow Behavior for Gas Wells. *SPE Prod. Engineering*, v. 6, p. 435-440, 1991.
- ISHII, M.; MISHIMA, K. Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 32, p. 1835–1846, 1989.
- LIMA, L. E. M. Análise do Modelo de Mistura Aplicado em Escoamentos Isotérmicos Gás-Líquido. Tese (Doutorado em Engenharia). Unicamp, Campinas, 2011.
- MORRISON, F. A. *An Introduction to Fluid Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- OWEN, D. G. An experimental and theoretical analysis of equilibrium annular flows. Tese (Doutorado). University of Birmingham, Birmingham, England, 1986.
- ROSA, E. S.; MASTELARI, N. Desenvolvimento de Técnicas de Medidas, Instrumentação e Medidas em Escoamentos de Golfadas de Líquido e Gás em Linhas Vertical e Inclinada. Unicamp, Campinas, 2008.
- SAWANT, P.; ISHII, M.; MORI, M. Droplet entrainment correlation in vertical upward co-current annular two-phase flow. *Nuclear Eng. Design*, v. 238, p. 1342–1352, 2008.
- SAWANT, P.; ISHII, M.; MORI, M. Prediction of amount of entrained droplets in vertical annular two-phase flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v.30, p. 715-728, 2009.
- WALLIS, G. B. *One Dimensional Two-Phase Flow*. New York: Editora McGraw-Hill, 1969.
- WHALLEY, P. B.; HEWITT, G. F. The Correlation of Liquid Entrainment Fraction and Entrainment Rate in Annular Two-Phase Flow. *AERE-R9187*, 1978.