

## Análise de correlações para a fração de líquido no pistão em escoamentos intermitentes gás-líquido

### Correlation analysis for the slug liquid holdup in gas-liquid intermittent flows

#### RESUMO

**Gabriel de Freitas Barboza**  
[gabriefreitasb@gmail.com](mailto:gabriefreitasb@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

**Luiz Eduardo Melo Lima**  
[lelima@utfpr.edu.br](mailto:lelima@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Na indústria de petróleo, a produção e o transporte de óleo e gás é um exemplo clássico da ocorrência de escoamentos multifásicos. Por sua vez, os escoamentos gás-líquido são geralmente classificados em três padrões primários: disperso, separado e intermitente. Este último consiste de uma célula unitária que é dividida em duas regiões que se alternam ao longo do tubo: um pistão de líquido aerado (região de escoamento disperso) e uma bolha alongada de gás em paralelo com um filme fino de líquido (região de escoamento separado). O processo de aeração do pistão é bastante complexo, o que dificulta sua modelagem. Entretanto, é possível estimar a fração de líquido no pistão por meio de várias correlações disponíveis na literatura. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise comparativa de algumas dessas correlações utilizadas para estimar a fração de líquido no pistão. As correlações analisadas foram calculadas e comparadas com dados experimentais também disponíveis na literatura para verificar suas limitações e precisão. Os resultados obtidos neste estudo demonstraram quais correlações apresentam resultados mais satisfatórios, embora estejam limitadas aos dados experimentais utilizados para a comparação realizada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escoamento bifásico. Modelagem. Fração de líquido.

#### ABSTRACT

In the petroleum industry, the production and transportation of oil and gas is a classic example of multiphase flows' occurrence. In turn, the gas-liquid flows are generally classified into three primary patterns: dispersed, separated, and intermittent. The latter consists of a unit cell which is divided into two regions that alternate along the pipe: an aerated liquid piston (slug region) and an elongated gas bubble in parallel with a liquid thin film (bubble region). The slug aeration process is quite complex, what makes your modeling difficult. However, it is possible to estimate the slug liquid holdup from several correlations available in the literature. Thus, this study aims to present a comparative analysis of some of these correlations used to predict the slug liquid holdup. The correlations analyzed were calculated and compared against experimental data also available in the literature to check their limitations and accuracy. The results obtained in this study demonstrated which correlations present more satisfactory results, although they are limited to the experimental data used for the realized comparison.

**KEYWORDS:** Two-phase flow. Modeling. Liquid holdup.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos são encontrados em muitas aplicações práticas, e.g., na indústria de petróleo, onde óleo e gás são extraídos de poços e transportados por meio de tubulações para processamento. A maneira como as fases estão distribuídas espacialmente define o escoamento em três padrões primários: disperso, separado e intermitente. De acordo com o conceito de célula unitária, proposto por Wallis (1969), o escoamento intermitente é aquele caracterizado pela alternância de um pistão de líquido aerado (região de escoamento disperso) seguido de uma bolha alongada de gás em paralelo com um filme fino de líquido (região de escoamento separado).

Diversos modelos são usados para prever a espessura de filme sob a bolha alongada, bem como as frações das fases e o gradiente de pressão da célula unitária. Estes modelos são dependentes de vários parâmetros relacionados à natureza deste padrão de escoamento, e.g., a velocidade translacional da bolha alongada, a frequência da célula unitária e a fração de líquido no pistão. A aeração do pistão por bolhas dispersas de gás é um processo complexo e, conseqüentemente, torna a sua modelagem bastante difícil. No entanto, é possível estimar a fração de líquido no pistão por meio de correlações disponíveis na literatura (TAITEL; BARNEA, 1990).

Utilizando uma instrumentação adequada, é possível medir a fração de líquido no pistão de um escoamento intermitente. Contudo, diversos simuladores que são baseados em modelos mecanicistas, e.g., o modelo de célula unitária de Taitel e Barnea (1990), necessitam frequentemente de uma correlação que permita uma aproximação razoável dos valores da fração de líquido no pistão, entre outros parâmetros para o fechamento do modelo (LIMA; ROSA, 2014). As condições nas quais as correlações são desenvolvidas limitam as aplicações das mesmas de maneira generalizada. Portanto, a análise de correlações é uma ferramenta que auxilia na escolha de uma correlação mais apropriada para uma determinada aplicação.

Deste modo, realizou-se no presente trabalho uma análise comparativa de algumas correlações de fração de líquido no pistão disponíveis na literatura. Os resultados obtidos por cada correlação foram comparados com valores experimentais também disponíveis na literatura, a fim de verificar as limitações e a precisão de cada uma das correlações analisadas.

## REFERENCIAL TEÓRICO

O processo de aeração do pistão por bolhas dispersas é um fenômeno complexo, deste modo, o entendimento e a modelagem do escoamento intermitente ainda estão em desenvolvimento. Por definição, a fração de líquido no pistão,  $\phi_S$ , corresponde à razão entre o volume ocupado pelo líquido e o volume do pistão, conforme a Eq. (1):

$$\phi_S = \frac{1}{L_S} \int_0^{L_S} \frac{A_S}{A} dz_S \quad (1)$$

Sendo  $L_S$  o comprimento do pistão,  $A_S$  a área ocupada pelo líquido no pistão,  $A$  a área de seção transversal da tubulação e  $z_S$  a coordenada axial.

$\phi_S$  é frequentemente determinada a partir de correlações empíricas que desconsideram todas as distribuições radiais e axiais de líquido no pistão. Estas correlações normalmente expressam  $\phi_S$  como um valor médio para o pistão inteiro em função da velocidade superficial de mistura,  $J$ : C1 – Gregory, Nicholson e Aziz (1978); C2 – Malnes (1982); C3 – Ferschneider (1983); C4 – Barnea e Brauner (1985); C5 – Marcano et al. (1998); C6 – Gomez, Shoham e Taitel (2000); C7 – Kora et al. (2011); C8 – Xu (2013); C9 – Al-Safran, Kora e Sarica (2015); C10 – Al-Ruhaimani et al. (2018); C11 – Abdul-Majeed e Al-Mashat (2019); C12 – Archibong-Eso et al. (2019); entre outras. As principais características destas correlações são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das correlações analisadas neste trabalho

Correlação	$D$ / [mm]	$\theta$ / [°]	$J$ / [m/s]	Fluidos
C1	25,8 e 51,2	0	0,118 a 17,692	Ar e óleo refinado
C2	25,8 e 51,3	0	0,118 a 17,693	Ar e óleo refinado
C3	146	0 a 4	-	Gás natural e seu condensado
C4	-	0 a 90	-	-
C5	-	0	-	-
C6	51 a 203	0 a 90	-	Vários fluidos
C7	50,8	0	0,21 a 4,32	Ar e óleo viscoso
C8	25,8 a 60	0 a 75	0,1 a 20	Vários fluidos
C9	50,8	0	0,2 a 4,3	Ar e óleo mineral viscoso
C10	50,8	90	0,52 a 1,76	-
C11	80 e 100	0 a 90	0,2 a 4,14	Ar e óleo lubrificante
C12	25,4 e 76,2	0	0,13 a 7,21	Ar e óleo viscoso

Fonte: autoria própria.

As expressões matemáticas que definem cada uma das correlações da Tabela 1 podem ser obtidas nas suas respectivas referências e na literatura específica.

## MATERIAL E MÉTODOS

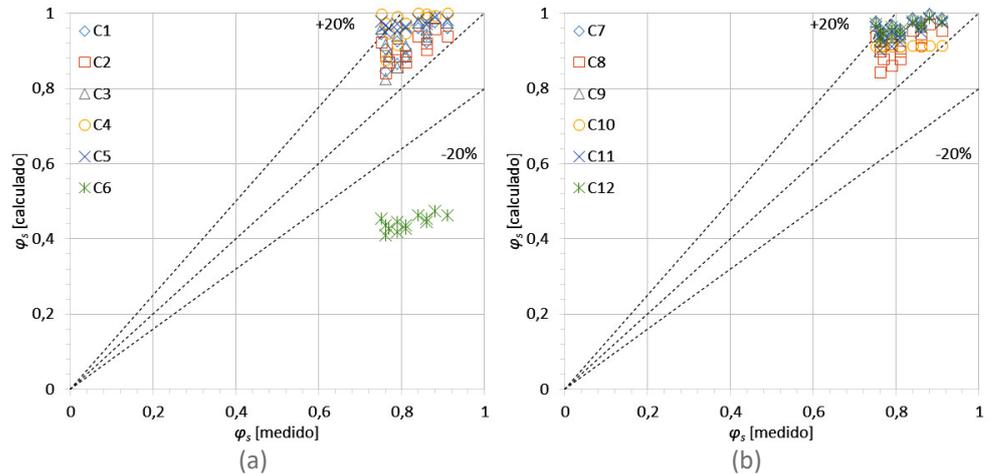
A precisão das correlações é dada pelo módulo do desvio relativo médio,  $\varepsilon_R$ , entre os valores de  $\phi_S$  calculados por cada correlação e os medidos experimentalmente. Assim como, pelo valor eficaz, RMS – *Root Mean Square*, de  $\varepsilon_R$ , para os  $N$  casos experimentais. As correlações analisadas e suas variáveis auxiliares, bem como  $\varepsilon_R$  e RMS foram calculados utilizando um código computacional escrito em linguagem MATLAB®.

Os dados experimentais obtidos por De Souza (2013) foram utilizados para a comparação das correlações. Estes dados correspondem a 13 casos de escoamento intermitente vertical de ar-água, em uma seção de testes de 306D de comprimento e diâmetro interno  $D = 26$  mm. As propriedades dos fluidos foram obtidas na pressão de 945 mbar e temperatura de 25°C. As velocidades superficiais das fases,  $J_G$  e  $J_L$ , variaram de 0,27 m/s a 1,25 m/s, para o gás ( $G$ ), e de 0,30 m/s a 1,20 m/s, para o líquido ( $L$ ), com  $\phi_S$  variando de 0,75 a 0,91.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos gráficos da Figura 1, os eixos das abscissas e das ordenadas correspondem aos valores de  $\phi_s$  medidos experimentalmente e calculados pelas correlações, respectivamente. As linhas tracejadas são os limites de  $\pm 20\%$  para  $\varepsilon_R$ .

Figura 1 – Comparação numérica-experimental para  $\phi_s$ : (a) C1 a C6; (b) C7 a C12



Fonte: autoria própria.

A Tabela 2 apresenta os valores de  $\varepsilon_R$  e RMS para cada correlação analisada.

Tabela 2 – Valores de  $\varepsilon_R$  e RMS para as correlações analisadas

Correlação	$\varepsilon_R$ / [%]	RMS / [%]
C1	12,78	13,83
C2	10,76	11,89
C3	13,73	14,91
C4	19,35	20,35
C5	19,44	20,43
C6	45,57	45,64
C7	18,80	19,68
C8	12,10	13,18
C9	18,62	19,49
C10	12,46	14,11
C11	16,45	17,35
C12	18,17	19,12

Fonte: autoria própria.

Embora desenvolvidas somente para escoamento horizontal, C1, C2, C3, C5, C7, C9 e C12 apresentaram valores de  $\varepsilon_R$  satisfatórios. A C8 também se mostrou satisfatória, apesar de válida de  $0^\circ$  a  $75^\circ$ , assim como as demais válidas para escoamentos verticais, C4, C10, C11. Por outro lado, a C6 apresentou os resultados menos satisfatórios, apesar de válida de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . A C6 foi desenvolvida a partir de dados obtidos pelo seu próprio autor, limitada as condições operacionais impostas no seu estudo.

## CONCLUSÃO

Na análise realizada, foi possível verificar a precisão de cada correlação com relação aos dados utilizados como referência, avaliando-se as mesmas quando comparadas em condições diferentes das quais foram desenvolvidas. Todas as correlações apresentaram resultados satisfatórios, mesmo as desenvolvidas para escoamentos horizontais, apresentando desvios inferiores à  $\pm 20\%$ . A única exceção foi a C6, que apresentou resultados insatisfatórios em virtude das limitações operacionais adotadas no seu desenvolvimento. Análises semelhantes podem ser realizadas, de modo a incluir mais correlações, bem como utilizar mais conjuntos de dados experimentais, nas mais diversas condições operacionais (diâmetros, inclinações, velocidades, fluidos, etc.).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela participação do acadêmico Gabriel de Freitas Barboza no Programa de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica através do Edital PROPPG 06/2018 (PVICT).

## REFERÊNCIAS

ABDUL-MAJEED, G. H.; AL-MASHAT, A. M. A unified correlation for predicting slug liquid holdup in viscous two-phase flow for pipe inclination from horizontal to vertical. *SN Appl. Sci.*, v. 1, n. 1, jan. 2019. DOI: [10.1007/s42452-018-0081-0](https://doi.org/10.1007/s42452-018-0081-0).

AL-RUHAIMANI, F. et al. Prediction of slug-liquid holdup for high-viscosity oils in upward gas/liquid vertical-pipe flow. *SPE Prod. Oper.*, v. 33, n. 2, p. 281–299, may 2018. DOI: [10.2118/187957-PA](https://doi.org/10.2118/187957-PA).

AL-SAFRAN, E.; KORA, C.; SARICA, C. Prediction of slug liquid holdup in high viscosity liquid and gas two-phase flow in horizontal pipes. *J. Petrol. Sci. Eng.*, v. 133, p. 566–575, sep. 2015. DOI: [10.1016/j.petrol.2015.06.032](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.06.032).

ARCHIBONG-ESO, A. et al. Estimating slug liquid holdup in high viscosity oil-gas two-phase flow. *Flow Meas. Instrum.*, v. 65, p. 22–32, mar. 2019. DOI: [10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.027](https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.027).

BARNEA, D.; BRAUNER, N. Holdup of the liquid slug in two phase intermittent flow. *Int. J. Multiph. Flow*, v. 11, n. 1, p. 43–49, jan. 1985. DOI: [10.1016/0301-9322\(85\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0301-9322(85)90004-7).

FERSCHNEIDER, G. Ecoulements diphasiques gaz-liquide à poches et à bouchons en conduites. *Rev. Inst. Fr. Pét.*, v. 38, n. 2, p. 153–182, mar. 1983. DOI: [10.2516/ogst:1983010](https://doi.org/10.2516/ogst:1983010).

GOMEZ, L. E.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. Prediction of slug liquid holdup: horizontal to upward vertical flow. **Int. J. Multiph. Flow**, v. 26, n. 3, p. 517–521, mar. 2000. DOI: [10.1016/S0301-9322\(99\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(99)00025-7).

GREGORY, G. A.; NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K. Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow. **Int. J. Multiph. Flow**, v. 4, n. 1, p. 33–39, mar. 1978. DOI: [10.1016/0301-9322\(78\)90023-X](https://doi.org/10.1016/0301-9322(78)90023-X).

KORA, C. et al. Effects of high oil viscosity on slug liquid holdup in horizontal pipes. In: **Proceedings of the Canadian Unconventional Resources Conference**. Calgary, Alberta, Canada: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2011. DOI: [10.2118/146954-MS](https://doi.org/10.2118/146954-MS).

LIMA, L. E. M.; ROSA, E. S. Comparative analysis of wall shear stress models to the drift-flux model applied to slug flow regime. **J. Petrol. Sci. Eng.**, v. 122, p. 371–383, oct. 2014. DOI: [10.1016/j.petrol.2014.07.032](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.07.032).

MALNES, D. **Slug flow in vertical, horizontal an inclined pipe**. Kjeller, Norway, 1982. Report IFE/KR/E-83/002.

MARCANO, R. et al. A study of slug characteristics for two-phase horizontal flow. In: **Proceedings of the International Petroleum Conference and Exhibition of Mexico, Villahermosa, Mexico**. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 1998. p. 1–7. DOI: [10.2118/39856-ms](https://doi.org/10.2118/39856-ms).

DE SOUZA, M. A. S. F. **Caracterização experimental da fração de gás no escoamento vertical intermitente gás-líquido**. Jun. 2013. f. 251. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brazil. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264090>.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. Two-phase slug flow. In: **Advances in Heat Transfer**. [S.l.]: Elsevier, 1990. v. 20. p. 83–132. DOI: [10.1016/s0065-2717\(08\)70026-1](https://doi.org/10.1016/s0065-2717(08)70026-1).

WALLIS, G. B. **One-Dimensional Two-Phase Flow**. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1969.

XU, J.-y. A simple correlation for prediction of the liquid slug holdup in gas/non-Newtonian fluids: Horizontal to upward inclined flow. **Exp. Thermal Fluid Sci.**, v. 44, p. 893–896, jan. 2013. DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2012.06.017](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.06.017).