



SEI-SICITE 2021

Pesquisa e Extensão para um mundo em transformação

XI Seminário de Extensão e Inovação
XXVI Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica
08 a 12 de Novembro - Guarapuava/PR



Análise de correlações para a fração de arraste de gotículas no escoamento gás-líquido no padrão anular

Analysis of correlations for the droplets entrainment fraction in the gas-liquid flow in the annular pattern

Mariana Podolan Koss*

Luiz Eduardo Melo Lima†

RESUMO

Escoamentos multifásicos ocorrem em diversas aplicações industriais. O arraste de gotículas no escoamento gás-líquido no padrão anular corresponde ao desprendimento de uma pequena porção do filme de líquido que envolve a tubulação para o núcleo gasoso, por causa da tensão de cisalhamento interfacial entre as diferentes fases escoando. Este trabalho tem por objetivo analisar correlações para a fração de arraste de gotículas, sendo calculadas utilizando um código computacional e comparadas com dados experimentais da literatura, a fim de verificar os desvios apresentados por cada uma. Os resultados demonstram que as correlações analisadas não apresentam uma precisão satisfatória com relação aos dados experimentais utilizados. Isto se deve à complexidade deste fenômeno e sua difícil modelagem matemática, assim como pelas limitações operacionais impostas no desenvolvimento de cada correlação, além da dificuldade de se medir este parâmetro de forma satisfatória. Sendo assim, torna-se necessário outros estudos para melhor avaliar e entender o arraste de gotículas.

Palavras-chave: Escoamento bifásico. Escoamento anular. Arraste de gotículas. Correlação.

ABSTRACT

Multiphase flows occur in many industrial applications. The entrainment of droplets in the gas-liquid flow in the annular pattern corresponds to the detachment of a small portion of the liquid film surrounding the pipe to the gaseous core, because of the interfacial shear stress between the different flowing phases. This work aims to analyze correlations for the entrainment fraction of droplets, which are calculated using a computational code and compared with experimental data from the literature, in order to verify the deviations presented by each one. The results demonstrate that the analyzed correlations do not present a satisfactory precision in relation to the used experimental data. This is due to the complexity of this phenomenon and its difficult mathematical modeling, as well as the operational limitations imposed on the development of each correlation, in addition to the difficulty of measuring this parameter satisfactorily. Therefore, further studies are needed to better assess and understand the entrainment of droplets.

Keywords: Two-phase flow. Annular flow. Droplets entrainment. Correlation.

*  Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil;
 marianakoss@alunos.utfpr.edu.br.

†  Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil;
 lelima@utfpr.edu.br;  <https://orcid.org/0000-0002-3084-5720>.



1 INTRODUÇÃO

Os escoamentos multifásicos ocorrem em diversas aplicações industriais (HEWITT; HALL-TAYLOR, 1970). Escoamentos bifásicos como o gás-líquido podem se apresentar na forma de diversos padrões, sendo que o padrão anular caracteriza-se por um núcleo gasoso, com ou sem presença de gotículas de líquido, e um filme de líquido, que envolve internamente um tubo, sendo que estas duas fases são separadas por uma interface bem definida (OLIEMANS; POTS; TROMPÉ, 1986). As gotículas presentes no núcleo são importantes para determinar características das instalações de tubulações e dos fenômenos de transferência de massa e calor entre gás e líquido. A formação de gotículas está relacionada à ocorrência de ondas formadas no filme, que por sua vez rompem-se ao crescerem em direção ao núcleo, devido aos efeitos de tensão de cisalhamento interfacial com o filme (ALAMU; AZZOPARDI, 2011).

A maioria das aplicações industriais de escoamentos no padrão anular não condizem com os experimentos realizados em laboratório, devido às condições experimentais e características das tubulações e dos fluidos. Visto isso, há dificuldades em encontrar correlações suficientemente confiáveis para estimar a fração de gotículas presentes no núcleo em escoamentos no padrão anular (PALEEV; FILIPPOVICH, 1966; HEWITT; HALL-TAYLOR, 1970; ISHII; MISHIMA, 1989). Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa entre correlações disponíveis na literatura para estimar a fração de arraste de gotículas do escoamento gás-líquido no padrão anular, utilizando dados experimentais também disponíveis na literatura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Diversas correlações empíricas tem sido desenvolvidas para estimar a fração de arraste de gotículas E . Detalhes sobre cada uma delas, como a modelagem, a faixa de aplicações e a precisão, são descritas por cada autor. As analisadas neste trabalho estão na Tab. 1 e os fluidos considerados são frequentemente ar e água.

Tabela 1 – Correlações para a fração de arraste de gotículas analisadas neste trabalho.

Autor	Correlação
Paleev e Filippovich (1966)	$E = 0,015 - 0,44 \log \left[10^4 \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{J_G \mu_L}{\sigma} \right)^2 \right]$
Owen (1986)	$\frac{E}{E_{\max}} = \begin{cases} \exp(-6,8872 + 0,472 \ln I_m) & \text{se } I_m < 1,35 \times 10^6 \\ (0,69 + 8,03 \times 10^{-8} I_m) & \text{se } 1,35 \times 10^6 \leq I_m \leq 2,15 \times 10^6 \\ \exp(-1,775 + 0,112 \ln I_m) & \text{se } I_m > 2,15 \times 10^6 \end{cases}$
Oliemans, Pots e Trompé (1986)	$\frac{E}{1-E} = 10^{\beta_0} \rho_L^{\beta_1} \rho_G^{\beta_2} \mu_L^{\beta_3} \mu_G^{\beta_4} \sigma^{-\beta_5} D^{\beta_6} J_G^{\beta_7} J_G^{\beta_8} g^{\beta_9}$
Ishii e Mishima (1989)	$E = \tanh \left(7,25 \times 10^{-7} \text{Re}_L^{1/4} \text{We}_{G,\text{mod}}^{5/4} \right)$
Pan e Hanratty (2002a)	$\frac{E/E_{\max}}{1-E/E_{\max}} = 9 \times 10^{-9} \left(\frac{J_G^3 D \sqrt{\rho_G \rho_L}}{\sigma} \right) \sqrt{\frac{\rho_G^{1-m} \mu_G^m}{g d_{32}^{1+m} \rho_L}}$
Pan e Hanratty (2002b)	$\frac{E/E_{\max}}{1-E/E_{\max}} = 8,8 \times 10^{-5} \left(\frac{J_G^2 D \sqrt{\rho_G \rho_L}}{\sigma} \right)$
Sawant, Ishii e Mori (2008)	$E = E_{\max} \tanh \left(2,13 \times 10^{-4} \text{Re}_L^{-0,35} \text{We}_{G,\text{mod}}^{5/4} \right)$
Sawant, Ishii e Mori (2009)	$E = E_{\max} \tanh \left[2,31 \times 10^{-4} \text{Re}_L^{-0,35} (\text{We}_{G,\text{mod}} - \text{We}_{G,\text{crit}})^{5/4} \right]$
Karami et al. (2017)	$\frac{E}{E_{\max}-E} = 3 \times 10^{-8} \text{We}^{5/4} \frac{J_G - J_{G,\text{atom}}}{J_{G,\text{crit}}} \frac{D}{S_{\text{atom}}} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G}}$

Fonte: autoria própria (2021).



Paleev e Filippovich (1966), Pan e Hanratty (2002a) e Karami et al. (2017) utilizaram uma tubulação horizontal nos experimentos. No caso de Paleev e Filippovich (1966), a correlação não é válida para pequenos valores de razão entre vazões mássicas de filme e de líquido (total) e não há uma relação aparente entre o diâmetro da tubulação e o arraste de gotículas. Para Pan e Hanratty (2002a), os valores de velocidade do gás em geral foram baixos, sendo que um expoente $m = 0,6$ é considerado neste trabalho. Já Karami et al. (2017) realizou um experimento multifásico com ar, óleo Isopar L e água à pressão constante, utilizando correlações de Andritsos e Hanratty (1987) e Pan e Hanratty (2002a).

As correlações descritas na sequência foram desenvolvidas com experimentos em tubulações verticais. Owen (1986) percebeu na sua correlação um ponto de máximo relacionado ao gradiente de pressão e sua dependência com a vazão de gás, idêntico ao problema de resistência hidráulica. Oliemans, Pots e Trompé (1986) usaram os valores do banco de dados Harwell (WHALLEY; HEWITT, 1978) para obtenção dos coeficientes de ajuste β no fechamento da sua correlação. Vale notar que os parâmetros utilizados indicam que o arraste de gotículas aumentam com o aumento do diâmetro do tubo, contrariando resultados de outros trabalhos (PALEEV; FILIPPOVICH, 1966; ISHII; MISHIMA, 1989). Ishii e Mishima (1989) desenvolveram uma correlação em termos de parâmetros adimensionais baseada no mecanismo de arraste por quebra de ondas da superfície do filme, considerando o efeito do comprimento da região de entrada do escoamento, e introduziram um número de Weber modificado do gás. Pan e Hanratty (2002b) desenvolveram uma correlação para escoamento vertical similar àquela para escoamento horizontal, mas desconsiderando o efeito gravitacional e do expoente m . Por fim, Sawant, Ishii e Mori (2008) também utilizaram uma correlação em termos de números adimensionais, que se mostrou eficiente para altos valores de pressão e velocidade do gás nos experimentos, mas indicaram a necessidade de utilizar-se uma melhor correlação para o valor máximo de arraste de gotículas. A fração máxima de arraste de gotículas é expressa de forma análoga a utilizada por Pan e Hanratty (2002b). Baseando-se no trabalho anterior, Sawant, Ishii e Mori (2009) utilizaram um fluido orgânico (Freon-113), a fim de simular vapor de água e água a alta pressão, para fazer uma nova correlação. Apesar disso, os resultados não se apresentaram confiáveis para certos dados da literatura, provavelmente pelo método de extração do filme utilizado.

2.1 Dados experimentais e método de análise

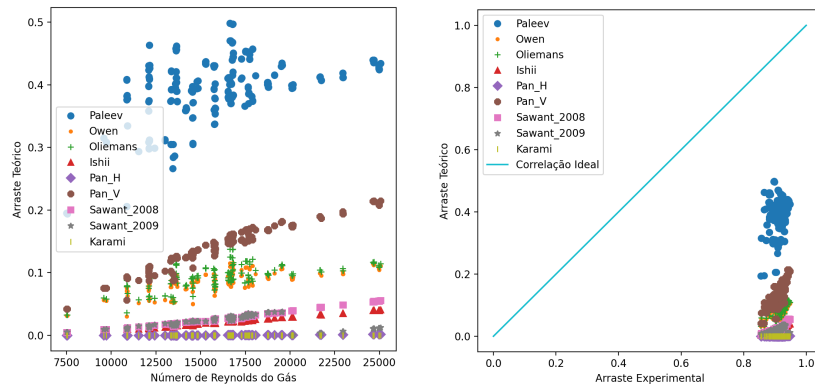
Para fins de comparação das correlações de fração de arraste de gotículas analisadas neste trabalho, utilizaram-se os dados experimentais obtidos nos trabalhos de MacGillivray (2004) e Kesana et al. (2018). MacGillivray (2004) realizou experimentos para analisar o efeito da massa específica do gás e da aceleração gravitacional na espessura de filme e na perda de pressão por atrito no escoamento anular de hélio-água e ar-água, nas condições de microgravidade, hipergravidade e gravidade normal. Neste trabalho, utilizaram-se os resultados obtidos para ar-água em gravidade normal. No trabalho de Kesana et al. (2018), foram analisados os efeitos da pressão do sistema, das vazões de gás e de líquido e do material da tubulação no arraste de gotículas em condições de baixa vazão de filme, utilizando Hexafluoreto de Enxofre, SF₆, de alta massa específica, como fase gasosa, e o óleo Exxsol D60, como fase líquida. Duas tubulações foram utilizadas: uma de policloreto de vinila (PVC, do inglês *PolyVinyl Chloride*) e outra de aço carbono.

Para solução e análise das correlações em comparação com os dados experimentais, foi desenvolvido um código computacional em linguagem Python™. Cada resultado da fração de arraste de gotículas foi filtrado nos limites do intervalo $0 \leq E \leq 1$. Os resultados válidos foram plotados de forma gráfica, a fim de encontrar tendências e verificar a precisão dos resultados.

3 RESULTADOS

Com os dados de MacGillivray (2004), pode-se observar na Fig. 1a uma relação diretamente proporcional de E com o número de Reynolds do gás, Re_G . Os resultados de Paleev e Filippovich (1966) são consideravelmente maiores que dos restantes, superestimando E , enquanto que os de Sawant, Ishii e Mori (2009) são subestimados, aproximando-se de zero para valores mais baixos de Re_G . O restante das correlações apresentam resultados semelhantes, uma vez que usaram abordagens parecidas. A Figura 1b ilustra a comparação teórico-experimental, sendo que a linha diagonal representa a relação de desvio zero entre os valores. É possível observar que os dados experimentais concentram-se em $0,8 \leq E \leq 1,0$, o que pode ter sido causado pelo método de extração utilizado por MacGillivray (2004), entre outros fatores.

Figura 1 – Gráficos dos resultados utilizando o banco de dados de MacGillivray (2004).



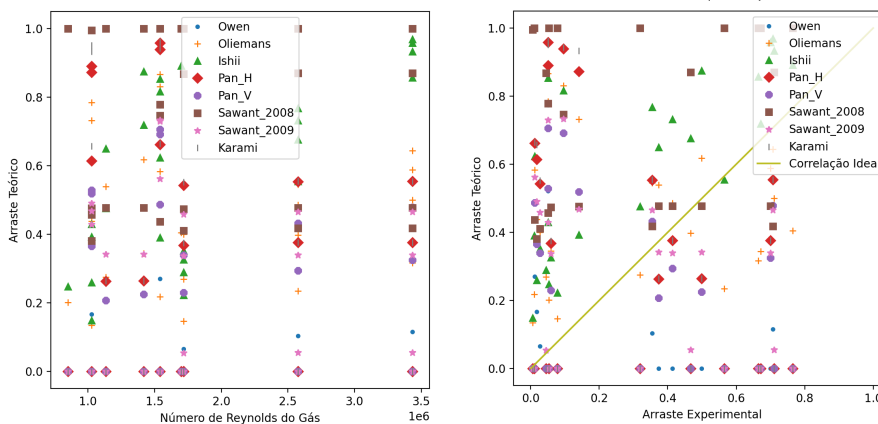
(a) E em função de Re_G .

(b) Comparação teórico-experimental.

Fonte: autoria própria (2021).

Com os dados de Kesana et al. (2018) em tubulação de PVC, observa-se na Fig. 2a que mais de um ponto está sobre o mesmo valor de Re_G , mas com valores de E diferentes. Isso implica que Re_G não é o único parâmetro de influência de E . Na Figura 2b é possível observar que os resultados das correlações de Oliemans, Pots e Trompé (1986), Ishii e Mishima (1989) e Sawant, Ishii e Mori (2009) são os que mais se aproximam dos resultados experimentais, para altos valores de E , apesar da baixa precisão. Grande parte dos valores teóricos superestimam E , como pode ser observado na concentração de pontos no lado esquerdo da linha diagonal do gráfico.

Figura 2 – Gráficos dos resultados utilizando o banco de dados de Kesana et al. (2018) com tubulação de PVC.



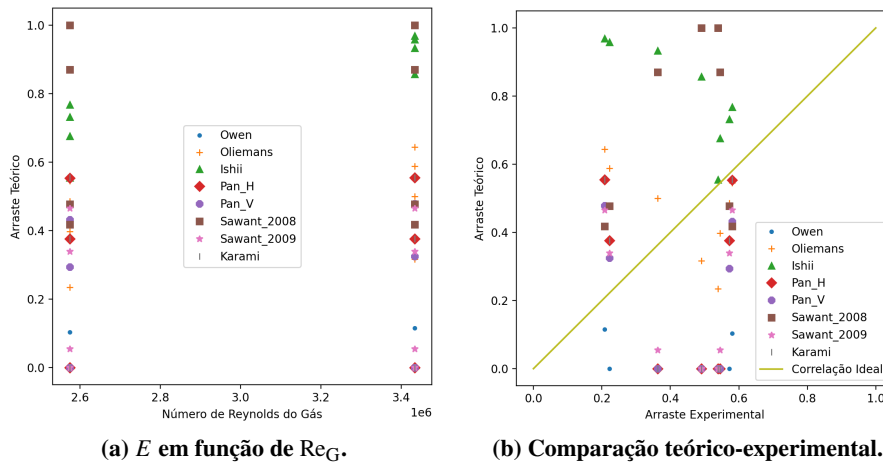
(a) E em função de Re_G .

(b) Comparação teórico-experimental.

Fonte: autoria própria (2021).

Com os dados de Kesana et al. (2018) em tubulação de aço carbono, resultou em uma concentração dos pontos nos dois únicos valores de Re_G , conforme Fig. 3a. Na Figura 3b, é possível observar que a maior parte dos resultados superestima ou subestima os valores de E . Kesana et al. (2018) observou que os valores de E da tubulação de PVC são maiores que os encontrados na tubulação de aço carbono, devido à diferenças nas rugosidade absolutas de cada material, mas não foi notado o mesmo comportamento ao analisar os dados desses dois experimentos com as correlações da Tab. 1.

Figura 3 – Gráficos dos resultados utilizando o banco de dados de Kesana et al. (2018) com tubulação de aço-carbono.



Fonte: autoria própria (2021).

4 CONCLUSÕES

O arraste de gotículas em escoamentos gás-líquido no padrão anular é complexo e difícil de ser modelado. Apesar de existir uma margem de precisão, nenhuma das correlações analisadas neste trabalho atende de forma satisfatória quando comparada com os valores experimentais utilizados. Cabe notar, que os dados de fração arraste de gotículas de MacGillivray (2004) podem ser imprecisos devido à metodologia empregada para sua determinação. Portanto, deve-se ter cautela na utilização das correlações para a estimativa do arraste de gotículas, assim como com suas condições e limitações. Assim, torna-se necessário estudos mais aprofundados para compreender o fenômeno e como desenvolver correlações que estimem satisfatoriamente o arraste de gotículas e que sejam aplicáveis nas mais diversas condições operacionais e situações de interesse.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária (FA), pela bolsa de Iniciação Científica (Edital PROPPG 02/2020 — PIBIC) concedida à acadêmica Mariana Podolan Koss.

REFERÊNCIAS

ALAMU, M. B.; AZZOPARDI, B. J. Wave and drop periodicity in transient annular flow. **Nucl. Eng. Des.**, v. 241, n. 12, p. 5079–5092, dez. 2011. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2011.08.015](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.08.015).



- ANDRITSOS, Nikolaos; HANRATTY, T. J. Influence of interfacial waves in stratified gas-liquid flows. **AIChE J.**, v. 33, n. 3, p. 444–454, abr. 1987. DOI: [10.1002/aic.690330310](https://doi.org/10.1002/aic.690330310).
- HEWITT, G. F.; HALL-TAYLOR, N. S. **Annular Two-Phase Flow**. Oxford, UK; New York, NY, USA: Pergamon Press, 1970. ISBN 9780080157979.
- ISHII, Mamoru; MISHIMA, Kaichiro. Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 32, n. 10, p. 1835–1846, out. 1989. DOI: [10.1016/0017-9310\(89\)90155-5](https://doi.org/10.1016/0017-9310(89)90155-5).
- KARAMI, Hamidreza et al. Droplet entrainment analysis of three-phase low liquid loading flow. **Int. J. Multiph. Flow**, v. 89, p. 45–56, mar. 2017. DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.011](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.011).
- KESANA, Netaji R. et al. Droplet flux measurements in two-phase, low liquid loading, horizontal pipe flow using a high-density gas. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 56, p. 472–485, ago. 2018. DOI: [10.1016/j.jngse.2018.06.004](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.06.004).
- MACGILLIVRAY, Ryan Malcolm. **Gravity and gas density effects on annular flow average film thickness and frictional pressure drop**. 2004. 127 f. Dissertation (M.Sc. in Mechanical Engineering) – University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10388/etd-09222004-160524>. Acesso em: 10 dez. 2020.
- OLIEMANS, R. V. A.; POTS, B. F. M.; TROMPÉ, N. Modelling of annular dispersed two-phase flow in vertical pipes. **Int. J. Multiph. Flow**, v. 12, n. 5, p. 711–732, set. 1986. DOI: [10.1016/0301-9322\(86\)90047-9](https://doi.org/10.1016/0301-9322(86)90047-9).
- OWEN, David Garfield. **An experimental and theoretical analysis of equilibrium annular flows**. Abr. 1986. 411 f. Thesis (Ph.D. in Chemical Engineering) – Faculty of Science e Engineering, University of Birmingham, Birmingham, UK.
- PALEEV, I. I.; FILIPPOVICH, B. S. Phenomena of liquid transfer in two-phase dispersed annular flow. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 9, n. 10, p. 1089–1093, out. 1966. DOI: [10.1016/0017-9310\(66\)90031-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(66)90031-7).
- PAN, Lei; HANRATTY, Thomas J. Correlation of entrainment for annular flow in horizontal pipes. **Int. J. Multiph. Flow**, v. 28, n. 3, p. 385–408, mar. 2002. DOI: [10.1016/S0301-9322\(01\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(01)00074-X).
- PAN, Lei; HANRATTY, Thomas J. Correlation of entrainment for annular flow in vertical pipes. **Int. J. Multiph. Flow**, v. 28, n. 3, p. 363–384, mar. 2002. DOI: [10.1016/S0301-9322\(01\)00073-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(01)00073-8).
- SAWANT, Pravin; ISHII, Mamoru; MORI, Michitsugu. Droplet entrainment correlation in vertical upward co-current annular two-phase flow. **Nucl. Eng. Des.**, v. 238, n. 6, p. 1342–1352, jun. 2008. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2007.10.005](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.10.005).
- SAWANT, Pravin; ISHII, Mamoru; MORI, Michitsugu. Prediction of amount of entrained droplets in vertical annular two-phase flow. **Int. J. Heat Fluid Flow**, v. 30, n. 4, p. 715–728, ago. 2009. DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.03.003](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.03.003).
- WHALLEY, P. B.; HEWITT, G. F. **The correlation of liquid entrainment fraction and entrainment rate in annular two-phase flow**. Harwell, Oxon, UK, 1978.