

Influência de parâmetros de fechamento no modelo de espessura de filme em escoamentos gás-líquido no padrão separado

Influence of closure parameters on the film thickness model in gas-liquid flows in the separated pattern

Elen Louise Camargo Cominesi*, Luiz Eduardo Melo Lima†

RESUMO

O escoamento separado é um padrão de escoamento bifásico ocorrente em tubulações e, frequentemente, subdividido em dois sub-padrões: estratificado e anular. Ambos sub-padrões apresentam um filme fino de líquido em contato com a parede do tubo e um núcleo gasoso que arrasta as gotículas de líquido do filme. A determinação experimental da espessura do filme de líquido é uma tarefa difícil. Portanto, modelos matemáticos que se baseiam nos aspectos físicos do fenômeno são desenvolvidos e usados para estimar a espessura do filme de líquido. A fração de arraste de gotículas e o fator de atrito interfacial, modelados via correlações empíricas, são essenciais para o fechamento desses modelos. Este estudo avalia a influência da fração de arraste de gotículas e do fator de atrito interfacial na previsão da espessura de filme. Para este propósito, um código computacional foi desenvolvido para resolver a equação implícita do modelo de filme. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais disponíveis na literatura para escoamentos estratificados horizontais e anulares verticais, demonstrando uma melhor precisão para o primeiro caso.

PALAVRAS-CHAVE: escoamento multifásico; espessura de filme de líquido; modelagem.

ABSTRACT

The separated flow is a two-phase flow pattern in ducts and is often subdivided into two sub-patterns, stratified and annular. These two sub-patterns present a thin liquid film in contact with the pipe wall and a gas core that drags liquid droplets from the film. Experimentally determining the liquid film thickness is a challenging task with high limitations. Therefore, mathematical models based on the physical aspects of the phenomenon are developed and employed to estimate the liquid film thickness. The entrainment fraction of the droplets and the interfacial friction factor, often modeled through empirical correlations, are essential for closing these models. This work evaluated the influence of the entrainment fraction of the droplets and the interfacial friction factor on the film thickness prediction using various empirical correlations. For this purpose, a computational code was developed to solve the implicit equation of the film model. The results obtained for the film thickness were compared with experimental databases from the literature for horizontal stratified and vertical annular flow, demonstrating better accuracy for the first case.

KEYWORDS: multiphase flow; liquid film thickness; modeling.

INTRODUÇÃO

Os escoamentos multifásicos gás-líquido são frequentemente agrupados em três padrões principais: disperso, intermitente e separado. O padrão separado divide-se em dois subpadrões: anular, onde o líquido flui como um filme fino na parede do tubo e o núcleo gasoso flui no centro carregando gotículas de líquido, e estratificado, onde as fases líquida e gasosa são separadas pela gravidade. O aumento da velocidade do gás torna a interface instável, aumentando a tensão de cisalhamento e arrastando gotículas de líquido. Pedras (1993) observou que esse arraste de gotículas está diretamente ligado ao atrito interfacial,

* Bolsista PIBIC/CNPq.  Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ✉ elen-cominesi@alunos.utfpr.edu.br. ☎ 9462317515308088.

† Docente do Programa de Pós-Graduação Multicampi em Engenharia Mecânica.  Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ✉ lelima@ufpr.edu.br. ☎ 0244063253702178.

uma vez que as gotículas no núcleo de gás são resultantes do desprendimento do líquido das cristas de ondas da superfície do filme.

Neste contexto, o presente trabalho visa analisar a influência de parâmetros de fechamento na estimativa da espessura do filme de líquido em escoamentos gás-líquido no padrão separado. Para isto, um código em MATLAB[®] foi desenvolvido para resolver o modelo, as equações auxiliares e as correlações de fechamento. Os resultados foram comparados com dados experimentais em escoamentos anulares e estratificados da literatura.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo para calcular a espessura de filme adimensional ($\delta_f \equiv H_f/D$) é derivado das equações de conservação de quantidade de movimento para o filme (f) e o núcleo (c), eliminando o gradiente de pressão e subtraindo a equação do núcleo gasoso da equação do filme (ALVES *et al.*, 1991; TAITEL; DUKLER, 1976):

$$f(\delta_f) = \frac{\tau_c S_c}{A_c} - \frac{\tau_f S_f}{A_f} + \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_c} + \frac{1}{A_f} \right) - (\rho_f - \rho_c) g \sin \theta = 0 \quad (1)$$

Em regime permanente, a fração de arraste de gotículas (E_d) é aproximadamente uniforme, mas sua estimativa é desafiadora devido à falta de correlações empíricas precisas para sua determinação. A Tabela 1 apresenta dez correlações para a fração de arraste de gotículas analisadas neste trabalho.

Tabela 1 – Correlações para a fração de arraste de gotículas E_d

Correlação	E_d
CE1 (PALEEV; FILIPPOVICH, 1966)	$0,015 + 0,44 \log \left[10^4 \frac{\rho_c}{\rho_l} \left(\frac{J_g \mu_l}{\sigma} \right)^2 \right]$
CE2 (WALLIS, 1968)	$1 - \exp \left[-0,125 \left(10^4 \frac{We_g}{Re_g} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} - 1,5 \right) \right]$
CE3 (OLIEMANS; POTS; TROMPÉ, 1986)	$\frac{\Omega}{1+\Omega}$
CE4 (OWEN, 1986)	$\begin{cases} \exp(-6,8872 + 0,472 \ln I_m) & \text{se } I_m \times 10^{-6} < 1,35 \\ 0,69 + 8,03 \times 10^{-8} I_m & \text{se } 1,35 \leq I_m \times 10^{-6} \leq 2,15 \\ \exp(-1,775 + 0,112 \ln I_m) & \text{se } I_m \times 10^{-6} > 2,15 \end{cases}$
CE5 (ISHII; MISHIMA, 1989)	$\tanh(7,25 \times 10^{-7} I_m)$
CE6 (PAN; HANRATTY, 2002a)	$\frac{\Omega}{1+\Omega}$
CE7 (PAN; HANRATTY, 2002b)	$\frac{\Omega}{1+\Omega}$
CE8 (SAWANT; ISHII; MORI, 2008)	$\tanh \left(2,31 \times 10^{-4} Re_l^{-0,35} \widetilde{We}_g^{5/4} \right)$
CE9 (SAWANT; ISHII; MORI, 2009)	$\tanh \left(2,31 \times 10^{-4} Re_l^{-0,35} \widetilde{We}_g^{5/4} \right)$
CE10 (KARAMI <i>et al.</i> , 2017)	$\frac{\Omega}{1+\Omega}$

Fonte: autoria própria (2023)

O grupo adimensional Ω é calculado conforme a correlação empregada (Tabela 1):

$$\Omega = \begin{cases} 10^{-2,52} J_g^{1,44} J_l^{0,7} \rho_g^{0,18} \rho_l^{1,08} \mu_g^{0,28} \mu_l^{0,27} \sigma^{-1,8} g^{0,46} D^{1,72} & \text{se CE3} \\ 9 \times 10^{-8} \frac{J_g^3 D \sqrt{\rho_g \rho_l}}{\sigma} \left(\frac{\rho_g^{1-m} \mu_g^m}{g D_d^{1+m} \rho_l} \right)^{1/(2-m)} & \text{se CE6} \\ 6 \times 10^{-5} \frac{J_g^2 D \sqrt{\rho_g \rho_l}}{\sigma} & \text{se CE7} \\ 3 \times 10^{-8} We_g^{5/4} \frac{J_g - J_{gatom}}{U_{dterm}} \frac{D}{S_{atom}} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} & \text{se CE10} \end{cases} \quad (2)$$

Há diversas correlações para o fator de atrito interfacial (C_{fi}). Muitas são precisas quando aplicadas sob condições adequadas e respeitando suas limitações. Neste estudo, é realizada uma análise das dez correlações listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Correlações para o fator de atrito interfacial C_{fi}

Correlação	C_{fi}
CF1 (TAITEL; DUKLER, 1976)	C_{fc}
CF2 (WHALLEY; HEWITT, 1978)	$C_{fc} \left[1 + 24\delta_f \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/3} \right]$
CF3 (CHEREMISINOFF; DAVIS, 1979)	$0,008 + 2 \times 10^{-5} Re_l$
CF4 (BHARATHAN; WALLIS, 1983)	$0,005 + \Pi_{Eo1} \left(\frac{\delta_f}{\sqrt{Eo}} \right)^{\Pi_{Eo2}}$
CF5 (KOWALSKI, 1987)	$\begin{cases} 0,96 Re_g^{-0,52} & \text{se } Re_g \leq \beta \\ 7,5 \times 10^{-5} \phi_f^{-1/4} Re_g^{-0,3} Re_l^{0,83} & \text{se } Re_g > \beta \end{cases}$
CF6 (HAMERSMA; HART, 1987)	$0,0625 \left[\log \left(\frac{\epsilon_i}{3,715D} + \frac{15}{Re_c} \right) \right]^{-2}$
CF7 (XIAO; SHOHAM; BRILL, 1990)	$\begin{cases} C_{fc} & \text{se } J_g \leq J_{gatom} \\ C_{fc} \left[1 + 15\sqrt{\delta_f} \left(\frac{J_g}{J_{gatom}} - 1 \right) \right] & \text{se } J_g > J_{gatom} \end{cases}$
CF8 (KAYA; SARICA; BRILL, 1999)	$\begin{cases} C_{fc} (1 + 300\delta_f) & \text{se } E_d > 0,9 \\ C_{fc} \left[1 + 24\delta_f \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/3} \right] & \text{se } E_d \leq 0,9 \end{cases}$
CF9 (PEDRAS, 1993)	$52 \left(1 - \sqrt{\phi_g} \right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) Re_{V_gJ}^{2/5} - 0,0078$
CF10 (FUKANO; FURUKAWA, 1998)	$1,7 \left(12 + \frac{\nu_l}{\nu_{l20^\circ C}} \right)^{-1,33} (1 + 12\delta_f)^8$

Fonte: autoria própria (2023)

A Equação (1) é implícita em δ_f , uma vez que seus termos e as correlações de arraste de gotículas (E_d) e de fator de atrito (C_{fi}) são dependentes desta variável. Portanto, empregou-se o método da bisseção para a solução iterativa da Equação (1). O método de solução, os demais cálculos e as análises foram realizados no MATLAB®.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Gráficos 1 e 2 apresentam as distribuições de valores de raiz média quadrática (RMS) dos desvios relativos para δ_f entre os resultados obtidos numericamente e os dados experimentais de Torres (1992) (horizontal) e Aliyu *et al.* (2017) (vertical), respectivamente, para cada combinação de correlações de E_d (Tabela 1) e C_{fi} (Tabela 2).

Comparando com os dados de Torres (1992), notou-se que a espessura do filme varia menos com a fração de arraste de gotículas, devido à maior influência da gravidade em escoamentos estratificados. As correlações CE10 e CE3 foram as mais precisas, enquanto a hipótese de $E_d = 0$ (CE0) resultou nos maiores desvios. Quanto ao fator de atrito interfacial, CF10 foi mais preciso e CF5 o menos preciso. Os dados de Aliyu *et al.* (2017) apresentaram desvios maiores em relação a Torres (1992). As correlações CE10 e CE7, para tubulações verticais, tiveram melhor desempenho. CE3, originalmente para escoamentos verticais, provou-se eficaz em escoamentos como os de Torres (1992).

As correlações são geralmente válidas para diâmetros (D) de 10 mm a 50 mm, que pode explicar a melhor concordância com os dados de Torres (1992) ($D = 38,1$ mm) do que com os dados de Aliyu *et al.* (2017) ($D = 101,6$ mm). Além disso, as correlações dependem de variáveis como velocidade e diâmetro, que variam entre os conjuntos de dados.

Gráfico 1 – Mapa de calor dos valores RMS dos desvios relativos para os dados de Torres (1992)



Fonte: autoria própria (2023)

Gráfico 2 – Mapa de calor dos valores RMS dos desvios relativos para os dados de Aliyu et al. (2017)



Fonte: autoria própria (2023)

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos concordaram mais com os dados experimentais em escoamentos estratificados horizontais (TORRES, 1992) do que em escoamentos anulares verticais (ALIYU *et al.*, 2017). Para escoamentos estratificados, a combinação CE3 e CF10 resultou no menor valor de RMS dos desvios relativos entre as espessuras do filme calculada e medida. Por outro lado, o menor valor de RMS ocorreu ao considerar a hipótese de $E_d = 0$ (CE0) com a correlação CF5. Para escoamentos anulares, o menor valor de RMS foi obtido com a combinação CE3 e CF3, enquanto a maior ocorreu com a combinação CE1 e CF5.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — Brasil (Edital UTFPR/PROPPG n.º 02/2022 — PIBIC).



Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

ALIYU, Aliyu Musa *et al.* Interfacial friction in upward annular gas-liquid two-phase flow in pipes. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 84, p. 90–109, 2017. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.02.006.

ALVES, Ibere N. *et al.* Modeling annular flow behavior for gas wells. **SPE Production Engineering**, v. 6, n. 4, p. 435–440, 1991. DOI: 10.2118/20384-PA.

BHARATHAN, D.; WALLIS, G. B. Air-water countercurrent annular flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 9, n. 4, p. 349–366, 1983. DOI: 10.1016/0301-9322(83)90093-9.

CHEREMISINOFF, Nicholas P.; DAVIS, E. James. Stratified turbulent-turbulent gas-liquid flow. **AIChE Journal**, v. 25, n. 1, p. 48–56, 1979. DOI: 10.1002/aic.690250106.

FUKANO, T.; FURUKAWA, T. Prediction of the effects of liquid viscosity on interfacial shear stress and frictional pressure drop in vertical upward gas-liquid annular flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 24, n. 4, p. 587–603, 1998. DOI: 10.1016/s0301-9322(97)00070-0.

HAMERSMA, P. J.; HART, J. A pressure drop correlation for gas/liquid pipe flow with a small liquid holdup. **Chemical Engineering Science**, v. 42, n. 5, p. 1187–1196, 1987. DOI: 10.1016/0009-2509(87)80068-4.

ISHII, Mamoru; MISHIMA, Kaichiro. Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 32, n. 10, p. 1835–1846, 1989. DOI: 10.1016/0017-9310(89)90155-5.

KARAMI, Hamidreza *et al.* Droplet entrainment analysis of three-phase low liquid loading flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 89, p. 45–56, 2017. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.011.

KAYA, A. S.; SARICA, C.; BRILL, J. P. Comprehensive mechanistic modeling of two-phase flow in deviated wells. *In*: ALL Days. Houston, TX, USA: SPE, 1999. spe-56522–ms. Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. DOI: 10.2118/56522–ms.

KOWALSKI, J. E. Wall and interfacial shear stress in stratified flow in a horizontal pipe. **AIChE Journal**, v. 33, p. 274–281, 1987. DOI: 10.1002/aic.690330214.

OLIEMANS, R. V. A.; POTS, B. F. M.; TROMPÉ, N. Modelling of annular dispersed two-phase flow in vertical pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 12, n. 5, p. 711–732, 1986. DOI: 10.1016/0301-9322(86)90047-9.



OWEN, D. G. **An experimental and theoretical analysis of equilibrium annular flows.** 1986. 411 f. Tese (Doutorado) – Faculty of Science & Engineering, University of Birmingham, Birmingham, UK.

PALEEV, I. I.; FILIPPOVICH, B. S. Phenomena of liquid transfer in two-phase dispersed annular flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 9, n. 10, p. 1089–1093, 1966. DOI: 10.1016/0017-9310(66)90031-7.

PAN, Lei; HANRATTY, Thomas J. Correlation of entrainment for annular flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, n. 3, p. 385–408, 2002a. DOI: 10.1016/s0301-9322(01)00074-x.

PAN, Lei; HANRATTY, Thomas J. Correlation of entrainment for annular flow in vertical pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, n. 3, p. 363–384, 2002b. DOI: 10.1016/s0301-9322(01)00073-8.

PEDRAS, Marcos Heinzemann Junqueira. **Atrito interfacial em escoamento anular transicional.** 1993. 101 f. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. DOI: 10.47749/t/unicamp.1993.62352. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1580362>.

SAWANT, Pravin; ISHII, Mamoru; MORI, Michitsugu. Droplet entrainment correlation in vertical upward co-current annular two-phase flow. **Nuclear Engineering and Design**, v. 238, n. 6, p. 1342–1352, 2008. DOI: 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. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 30, n. 4, p. 715–728, 2009. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.03.003.

TAITEL, Yemada; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, v. 22, n. 1, p. 47–55, 1976. DOI: 10.1002/aic.690220105.

TORRES, Flavio Ramos. **Caracterização da interface e determinação experimental do fator de atrito interfacial em escoamento horizontais estratificados.** 1992. Diss. (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. DOI: 10.47749/t/unicamp.1992.108039. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1583712>.

WALLIS, G. B. Phenomena of liquid transfer in two-phase dispersed annular flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 11, n. 4, p. 783–785, 1968. Letters to the editors. DOI: 10.1016/0017-9310(68)90081-1.

WHALLEY, P. B.; HEWITT, G. F. **The correlation of liquid entrainment fraction and entrainment rate in annular two-phase flow.** Harwell, Oxon, UK, 1978. Final Report: AERE-R 9187.

XIAO, J. J.; SHOHAM, O.; BRILL, J. P. A comprehensive mechanistic model for two-phase flow in pipelines. In: ALL Days. Houston, TX, USA: SPE, 1990. spe-20631–ms. Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. DOI: 10.2118/20631-MS.