

Determinação da espessura de filme de líquido em escoamentos gás-líquido no padrão separado

Determination of the liquid film thickness in gas-liquid flows on separated pattern

RESUMO

Escoamentos multifásicos podem ser encontrados em diversos ramos da indústria, como em plantas de geração de energia e na produção de petróleo e gás. Os escoamentos estratificado e anular constituem um importante padrão de escoamento bifásico em dutos, denominado escoamento separado (ou de fases separadas), que possui uma variedade de aplicações práticas. Para escoamentos gás-líquido, este padrão apresenta-se como um filme de líquido, em contato com a parede da tubulação, escoando em paralelo com um núcleo gasoso, que pode arrastar gotículas de líquido. Pelas dificuldades e limitações em se medir experimentalmente a espessura de filme, modelos matemáticos foram desenvolvidos para esse fim, baseados nos aspectos físicos do fenômeno. No presente trabalho, avaliou-se a influência da fração de arraste de gotículas e do fator de atrito interfacial na estimativa da espessura de filme em tubulações. Para tal, um código computacional foi desenvolvido para resolver a equação implícita do modelo de filme e os resultados obtidos para espessura de filme foram comparados com duas bases de dados experimentais da literatura: uma para estratificado na horizontal e a outra para anular na vertical. A partir dos desvios obtidos, foi possível identificar a precisão das correlações de fração de arraste de gotículas analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento bifásico. Espessura de filme de líquido. Modelagem.

ABSTRACT

Multiphase flows can be found in various industry branches, such as power plants and oil and gas production. Stratified and annular flows are an important two-phase flow pattern in ducts, called separated (or separated phases) flow, which has a variety of practical applications. For gas-liquid flows, this pattern presents itself as a liquid film in contact with the pipe wall flowing parallel with a gas core, which can drag liquid droplets. Due to the difficulties and limitations in experimentally measuring of the film thickness, mathematical models were developed for this purpose, based on the physical aspects of the phenomenon. In the present work, the influence of droplet entrainment fraction and interfacial friction factor on the film thickness prediction in pipes was evaluated. To this end, a computational code was developed to solve the implicit equation of the film model and the results obtained for film thickness were compared with two experimental literature databases: one for horizontal stratified and the other for vertical annular. From the obtained deviations, it was possible to identify the precision of the droplets entrainment fraction correlations analyzed.

KEYWORDS: Two-phase flow. Liquid film thickness. Modeling.

Vinicius Sylvestre Simm
viniciussimm@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Luiz Eduardo Melo Lima
lelima@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

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

Em plantas de geração de energia, em processos químicos, em reatores nucleares e na indústria de petróleo pode ser observada a ocorrência de escoamentos multifásicos (Li et al., 2013). Os escoamentos estratificado e anular são padrões de escoamento bifásico em tubulações, que apresentam um filme de líquido em contato com a parede do tubo, escoando em paralelo com um núcleo gasoso, separados por uma interface bem definida (TORRES, 1992). Em escoamentos horizontais, a interface é plana e, com o aumento da velocidade do gás, ondas aparecem na interface, gotículas de líquido são arrastadas pelo gás e o filme “escala” as paredes, tendendo a formar o padrão anular. Modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para analisar os aspectos físicos deste padrão de escoamento e permitir a determinação de parâmetros importantes. Estudos a respeito da espessura de filme já foram abordados por Oliemans, Pots e Trompé (1986), Torres (1992), Li et al. (2013) e Aliyu et al. (2017), entre outros.

No presente trabalho, foi realizado um estudo para determinar a espessura de filme de líquido em escoamentos gás-líquido no padrão separado. Para tal, um código em linguagem MATLAB® foi desenvolvido para resolver a equação implícita do modelo de filme, a fim de avaliar a influência da fração de arraste de gotículas e do fator de atrito interfacial. Dois conjuntos de dados experimentais da literatura foram utilizados para comparação dos resultados obtidos: um para estratificado na horizontal e outro para anular na vertical.

MATERIAL E MÉTODOS

A partir das equações de conservação de quantidade de movimento do filme de líquido e do núcleo gasoso, é possível obter uma função implícita da espessura de filme, H_f , por meio da subtração da equação para o núcleo da equação para o filme, eliminando o gradiente de pressão, conforme apresentado na Eq. (1):

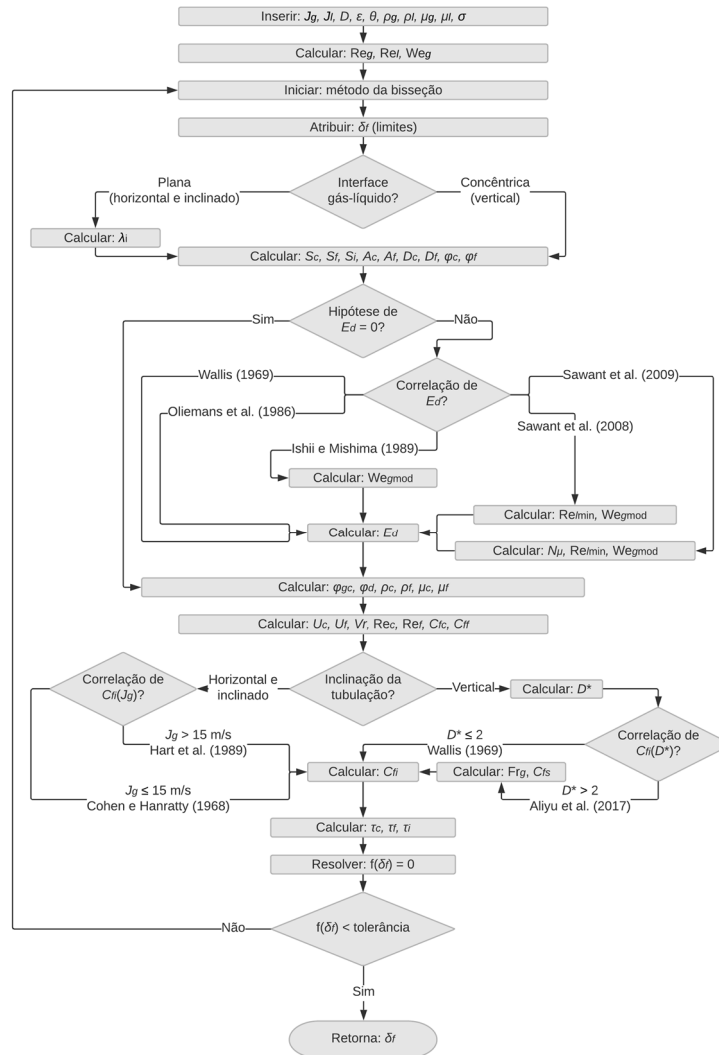
$$f(H_f) = \frac{\tau_c S_c}{A_c} - \frac{\tau_f S_f}{A_f} + \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_c} + \frac{1}{A_f} \right) - (\rho_f - \rho_c) g \sin \theta = 0 \quad (1)$$

Sendo τ_k a tensão de cisalhamento, S_k o perímetro, A_k a área, ρ_k a massa específica, g a aceleração da gravidade e θ o ângulo de inclinação. O subscrito k é usado para representar uma fase ou região: núcleo (c), filme (f) e interface (i).

Os termos presentes na Eq. (1) são dependentes de diversos parâmetros, como características geométricas, velocidades e propriedades físicas das fases, entre outros, que estão bem definidos na literatura (TORRES, 1992; PEDRAS, 1993; SHOHAM, 2006; LIMA, 2011; ALIYU et al., 2017). As tensões de cisalhamento, τ_k , são dadas em termos de fatores de atrito de Fanning, C_{fk} , que podem ser dados por correlações, e.g., a de Haaland (1983), nos casos do núcleo e do filme. Para interface, as correlações de Cohen e Hanratty (1968) e de Hart, Hamersma e Fortuin (1989), para estratificado, e de Wallis (1969) e de Aliyu et al. (2017), para anular, podem ser utilizadas, entre outras. A espessura de filme, H_f , e, conseqüentemente, as características geométricas e demais parâmetros relacionados são dependentes da fração de arraste de gotículas, E_d , que pode ser estimada por diversas correlações disponíveis na literatura, como: C1 – Wallis (1969); C2 – Oliemans, Pots e Trompé (1986); C3 – Ishii e Mishima (1989); C4 e C5 – Sawant, Ishii e Mori (2008, 2009), respectivamente; entre outras.

A solução da Eq. (1) é obtida por meio de um método iterativo de solução, o método da bisseção (CHAPRA; CANALE, 2016), obtendo-se a espessura de filme adimensional, $\delta_f = H_f/D$, e demais parâmetros relacionados. O fluxograma da Figura 1 ilustra a sequencia de passos realizados pelo código computacional desenvolvido em linguagem MATLAB® para solução do modelo de filme.

Figura 1 – Fluxograma de solução do modelo de filme para determinação de δ_f



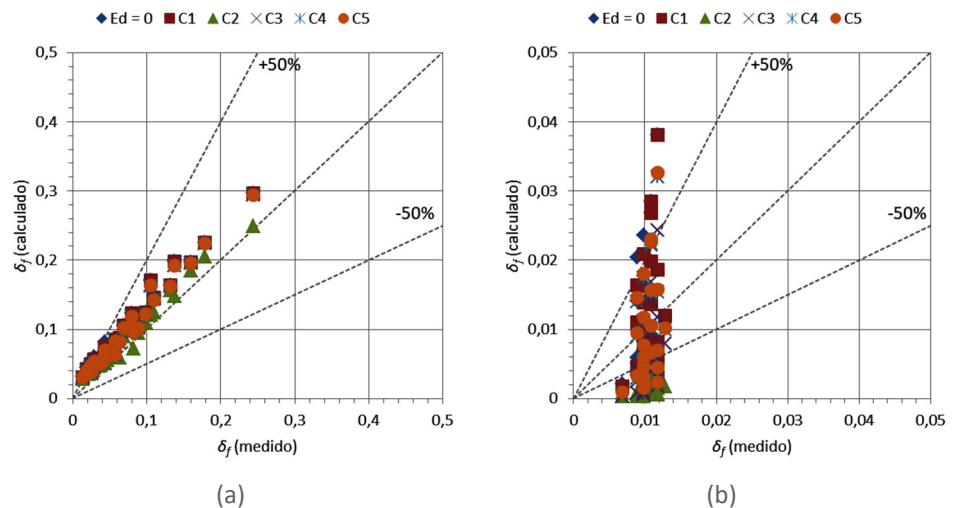
Fonte: autoria própria.

Para verificação dos resultados obtidos pelo procedimento numérico descrito na Figura 1, foi utilizado dois conjuntos de dados experimentais de H_f . No primeiro, Torres (1992) empregou ar e água, em temperaturas e pressões próximas à atmosfera padrão, numa tubulação horizontal com diâmetro $D = 38,1$ mm. As velocidades superficiais das fases, J_g e J_l , variaram de 4,5 m/s a 25,0 m/s, para o gás (g), e 0,01 m/s a 0,07 m/s, para o líquido (l), resultando em 30 casos no padrão estratificado. No segundo, Aliyu et al. (2017) utilizou uma tubulação vertical de diâmetro $D = 101,6$ mm, com ar e água escoando em temperaturas e pressões também próximas às da atmosfera padrão. As velocidades superficiais das fases, J_g e J_l , variaram de 11 m/s a 29 m/s, para o gás (g), e 0,1 m/s a 1,0 m/s, para o líquido (l), resultando em 23 casos no padrão anular.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos gráficos apresentados na Figura 2, é possível observar a comparação dos valores de δ_f calculados numericamente, eixo das ordenadas, com os medidos experimentalmente, eixo das abcissas, em função das correlações de E_d analisadas no presente trabalho ($E_d = 0, C1, C2, C3, C4$ e $C5$).

Figura 2 – Comparação numérica-experimental: (a) Torres (1992) e (b) Aliyu et al. (2017)



Fonte: autoria própria.

Na Tabela 1, são apresentados os valores médios, $\bar{\varepsilon}$, e os desvios padrões, σ_{ε} , do módulo dos desvios relativos, ε , para δ_f em função das correlações de E_d .

Tabela 1 – Resultados obtidos para δ_f em termos de ε em função das correlações de E_d

Correlação de E_d	Torres (1992)		Aliyu et al. (2017)	
	$\bar{\varepsilon}$ / [%]	σ_{ε} / [%]	$\bar{\varepsilon}$ / [%]	σ_{ε} / [%]
$E_d = 0$	54,32	35,32	69,81	55,85
C1	51,61	31,45	67,15	52,66
C2	30,50	28,04	90,05	6,71
C3	47,38	30,20	62,82	29,00
C4	45,65	28,22	60,17	38,55
C5	46,02	28,80	60,64	39,46

Fonte: autoria própria.

Da análise dos resultados obtidos para $\bar{\varepsilon}$, presentes na Tabela 1, os menores valores são obtidos quando se utiliza a correlação de Oliemans, Pots e Trompé (1986) para E_d (C2), no caso dos dados de Torres (1992), e a correlação de Sawant, Ishii e Mori (2008) para E_d (C4), no caso dos dados de Aliyu et al. (2017). A correlação C2 apresenta os menores valores de σ_{ε} para ambos os casos.

Além de E_d , um dos parâmetros relevantes para o cálculo de H_f é o fator de atrito interfacial, C_{fi} , que é estimado por meio de correlações da literatura. Contudo, estas correlações dependem de diversos parâmetros, e.g., o padrão de escoamento, e têm sua validade restrita para $10 \text{ mm} \leq D \leq 50 \text{ mm}$, sendo que Torres (1992) utilizou $D = 38,1 \text{ mm}$ e Aliyu et al. (2017) utilizaram $D = 101,6 \text{ mm}$.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresenta-se uma análise da influência da fração de arraste de gotículas e do fator de atrito interfacial na estimativa da espessura de filme, em casos de escoamento gás-líquido no padrão separado (estratificado e anular). Seis correlações para a fração de arraste de gotículas da literatura foram empregadas num código computacional para a solução do modelo de filme. Os resultados para espessura de filme foram comparados com duas bases de dados experimentais da literatura, com inclinações e diâmetros de tubulação distintos, bem como diversas velocidades das fases. Os resultados dos casos de escoamento estratificado horizontal foram mais satisfatórios que os de escoamento anular vertical, sendo verificada a influência tanto da fração de arraste de gotículas quanto do fator de atrito interfacial, cujas correlações dependem de diversos parâmetros, e.g., padrão de escoamento, diâmetro da tubulação, etc.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária, pela bolsa de Iniciação Tecnológica e Inovação concedida ao acadêmico Vinicius Sylvestre Simm, por meio do Edital PROPPG 04/2017 (PIBITI). O autor Vinicius Sylvestre Simm agradece ainda a Deus, ao professor Luiz Eduardo Melo Lima, aos amigos e familiares, pelo apoio e companheirismo.

REFERÊNCIAS

ALIYU, A. M. et al. Interfacial friction in upward annular gas-liquid two-phase flow in pipes. **Exp. Therm. Fluid Sci.**, v. 84, p. 90–109, jun. 2017. DOI: [10.1016/j.expthermflusci.2017.02.006](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.02.006).

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 7. ed. Porto Alegre, RS, Brasil: McGraw-Hill Brasil, 2016.

COHEN, L. S.; HANRATTY, T. J. Effect of waves at a gas-liquid interface on a turbulent air flow. **J. Fluid Mech.**, v. 31, n. 3, p. 467–479, fev. 1968. DOI: [10.1017/s0022112068000285](https://doi.org/10.1017/s0022112068000285).

HAALAND, S. E. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. **J. Fluids Eng. – T. ASME**, v. 105, n. 1, p. 89–90, 1983. DOI: [10.1115/1.3240948](https://doi.org/10.1115/1.3240948).

HANRATTY, T. J. Separated flow modelling and interfacial transport phenomena. **Appl. Sci. Res.**, v. 48, n. 3-4, p. 353–390, out. 1991. DOI: [10.1007/bf02008206](https://doi.org/10.1007/bf02008206).

HART, J.; HAMERSMA, P. J.; FORTUIN, J. M. H. Correlations predicting frictional pressure drop and liquid holdup during horizontal gas-liquid pipe flow with a small liquid holdup. **Int. J. Multiph. Flow**, v. 15, n. 6, p. 947–964, nov. 1989. DOI: [10.1016/0301-9322\(89\)90023-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(89)90023-2).

ISHII, M.; MISHIMA, K. Droplet entrainment correlation in annular two-phase flow. **Int. J. Heat Mass Transf.**, 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).

LI, H. et al. A simple model for predicting the pressure drop and film thickness of non-Newtonian annular flows in horizontal pipes. **Chem. Eng. Sci.**, v. 102, p. 121–128, out. 2013. DOI: [10.1016/j.ces.2013.07.046](https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.07.046).

LIMA, L. E. M. **Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido**. Jul. 2011. 147 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264105>.

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).

PEDRAS, M. H. J. **Atrito interfacial em escoamento anular transicional**. Fev. 1993. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264126>.

SAWANT, P.; ISHII, M.; MORI, M. 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, P.; ISHII, M.; MORI, M. 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).

SHOHAM, O. **Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes**. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2006.

TORRES, F. R. **Caracterização da interface e determinação experimental do fator de atrito interfacial em escoamentos horizontais estratificados**. Dez. 1992. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264084>.

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