

INFLUÊNCIA DA LIBERAÇÃO DE BOLHAS DE TAYLOR COM DIFERENTES VOLUMES EM LÍQUIDO ESTAGNADO

Beatriz Mohr Rosa Ribeiro*, Klisman Auer†, Luiz Eduardo Melo Lima‡

RESUMO: Escoamentos gás-líquido ocorrem em diversas aplicações industriais e podem ser classificados em três padrões principais: disperso, separado e intermitente. O padrão intermitente é caracterizado por uma estrutura constituída por um pistão de líquido aerado seguido por uma bolha de gás alongada (ou bolha de Taylor) em paralelo com um filme de líquido, que se repetem ao longo da tubulação. Como a interação entre bolhas de Taylor impacta significativamente esse padrão e sua transição, é imprescindível entender essa relação e suas implicações voltadas às aplicações industriais. Este trabalho visa observar experimentalmente a coalescência de bolhas de Taylor escoando em líquido estagnado. Para isto, foram realizados testes com pares de bolhas de diferentes tamanhos e espaçamentos entre as mesmas. A metodologia empregada consistiu na gravação das bolhas escoando na seção de testes com uma câmera, seguida pelo processamento dos dados obtidos dos vídeos sobre a distância de coalescência, ou seja, a distância ao longo da qual elas se fundem. A análise detalhada dos dados, comparando tamanhos de bolhas e espaçamentos entre as mesmas com a distância de coalescência, revelou que o espaçamento entre bolhas tem uma influência mais significativa na distância de coalescência do que os tamanhos das bolhas. Estas conclusões, condizentes com a literatura, promovem avanços significativos no entendimento desse fenômeno. Em síntese, este trabalho contribui na área de escoamentos gás-líquido no padrão intermitente e sua transição, oferecendo resultados experimentais e conclusões importantes que podem auxiliar no desenvolvimento de modelos teóricos mais precisos e na otimização de processos industriais relacionados a este fenômeno.

Palavras-chave: escoamento bifásico; interações de bolhas; análise experimental.

1 INTRODUÇÃO

Escoamentos gás-líquido em tubos verticais são usualmente classificados em padrões, como bolhas uniformes, bolhas distorcidas, golfadas, agitado e anular (Taitel; Barnea; Dukler, 1980). O fenômeno denominado célula unitária refere-se a um escoamento (intermitente) de golfadas (*slug flow*) totalmente desenvolvido, onde uma estrutura estável formada pelo pistão, filme e bolha alongada se repete quase que periodicamente ao longo do tubo (Wallis, 1969). As interações entre bolhas alongadas constituem um tema relevante, conforme

*  Discente (Bolsista PIBIT/CNPq) do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica.  Departamento Acadêmico de Mecânica do Campus Ponta Grossa.  beatrizmohr@alunos.utfpr.edu.br.

†  Discente (Colaborador) do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica.  Departamento Acadêmico de Mecânica do Campus Ponta Grossa.  auer.1998@alunos.utfpr.edu.br.

‡  Docente (Orientador) do Cursos de Bacharelado e Mestrado em Engenharia Mecânica.  Departamento Acadêmico de Mecânica do Campus Ponta Grossa.  lelima@utfpr.edu.br.

observado em alguns trabalhos da literatura. Moassis e Griffith (1962) e Campos e Carvalho (1988) destacam a importância do perfil de velocidade do líquido e da distância mínima de separação entre as bolhas. Pinto e Campos (1996) e Talvy, Shemer e Barnea (2000) confirmam ainda que a velocidade e a aceleração da bolha secundária são influenciadas pela sua proximidade com a bolha primária, particularmente em bolhas longas. Shemer, Gulitski e Barnea (2007) e Araújo, Miranda e Campos (2013) concordam que a bolha secundária pode alcançar velocidades mais altas à medida que se aproxima da bolha primária, em condições estagnadas ou laminares. Estes estudos, entre outros da literatura, enfatizam a relevância de aperfeiçoar o entendimento sobre este tema.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar experimentalmente a influência dos tamanhos das bolhas alongadas e dos espaçamentos entre as mesmas, escoando em líquido estagnado, a fim de determinar a distância de coalescência entre as mesmas e sua relação com estes parâmetros.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O aparato experimental utilizado neste trabalho apresenta uma estrutura de sustentação, uma seção de testes, um dispositivo de liberação de bolhas e um dispositivo de preenchimento de líquido, descritos na sequência. Além disso, o procedimento dos testes realizados é apresentado.

2.1 Estrutura de sustentação e seção de testes

A estrutura de sustentação é formada por perfis estruturais de alumínio, contendo uma coluna vertical fixada ao chão por cantoneiras de alumínio, parafusos, porcas e buchas. Outros dois perfis horizontais são usados para fixar a coluna vertical à parede. Um outro perfil horizontal está fixado na primeira parte da estrutura por meio de cantoneiras de alumínio, para adicionar um suporte para câmera.

A seção de testes possui três tubos de acrílico (PMMA — polimetilmetacrilato ou *polymethyl methacrylate*), unidos por duas luvas de acrílico, usando adesivo plástico para PVC (policloreto de vinila ou *polyvinyl chloride*). As três seções de tubos estão fixadas na estrutura de sustentação por meio de quatro abraçadeiras de grampo clique.

2.2 Dispositivos de liberação de bolhas e de preenchimento de líquido

O dispositivo de liberação de bolhas está conectado na extremidade inferior da seção de testes por meio de uma junção Y de 45°, conforme a Figura 1(a), sendo composto por duas seções: primária e secundária. A primária apresenta três tubos (1-PY, 1-P1 e 1-P2) e três

válvulas de esfera (1-V1, 1-V2 e 1-V3). A segunda apresenta cinco tubos (2-PY, 2-PV, 2-PS, 2-P1, 2-P2) e cinco válvulas de esfera (2-V1, 2-V2, 2-V3, 2-V4 e 2-V5; as duas últimas não são usadas) e duas luvas (2-S1 e 2-S2). Cada seção está fixada na estrutura por meio de abraçadeiras de grampo clique (1-C, 2-C1 e 2-C2).

O dispositivo de preenchimento de líquido está conectado à extremidade superior da seção de testes e contém uma luva (F-S) e duas reduções (F-R1 e F-R2), ambas de PVC, conforme a Figura 1(b). As mangueiras de poliuretano (PU) de entrada e saída (F-H1 e F-H2) de água se conectam a F-R1 usando dois engates rápidos (F-Q3 e F-Q4). Uma válvula de esfera de aço inox (F-V) conectada à F-H1 por meio de dois engates rápidos (F-Q3 e F-Q4), conforme a Figura 1(c), permite o funcionamento do dispositivo de preenchimento de água da seção de testes, mantendo uma altura de coluna de água constante em todos os testes.

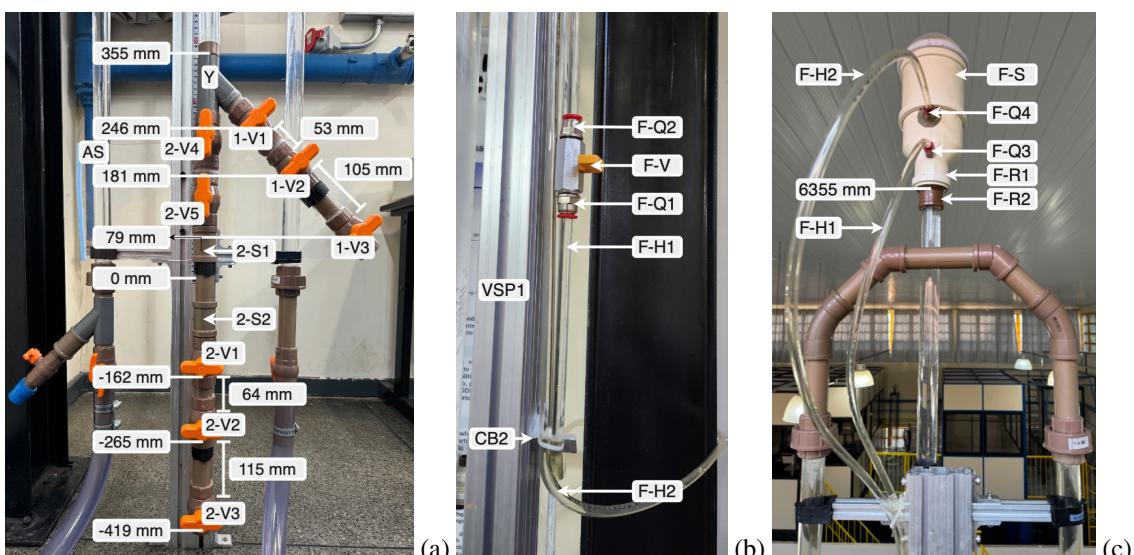


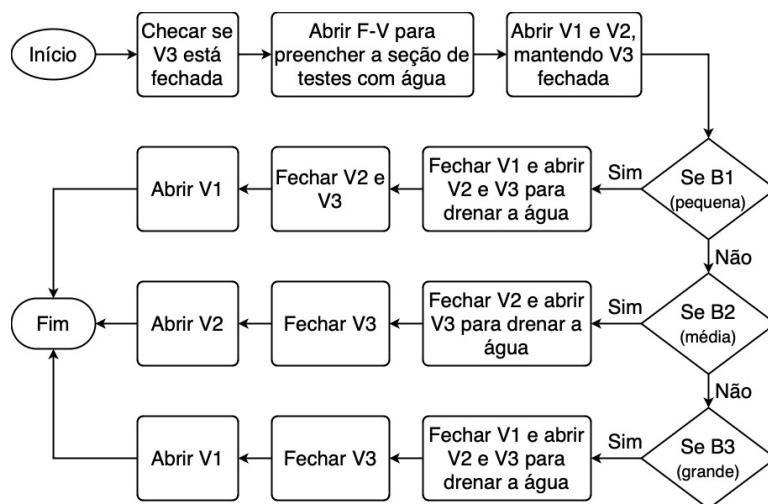
Figura 1 – Dispositivos: (a) de liberação de bolhas e (b) e (c) de preenchimento de líquido.

Fonte: autoria própria (2024).

2.3 Procedimento de testes

O procedimento para liberar bolhas de todos os volumes (pequeno, médio e grande) é mostrado no Fluxograma 1. Começa com o enchimento da seção de testes e a drenagem dos volumes equivalentes de água de ambas as seções do dispositivo de liberação de bolhas mostrado na Figura 1(a). O passo final de liberação de cada bolha deve ser feito simultaneamente em ambas as seções (primária e secundária) do dispositivo de liberação de bolhas. Para cada novo teste, o procedimento descrito deve ser repetido.

A determinação das posições de coalescência de bolhas (z_{coal}) se dá a partir de vídeos gravados com duas câmeras de *smartphone*, com resolução de 1080p e 30 fps



Fluxograma 1 – Procedimento de liberação de bolhas.

Fonte: autoria própria (2024).

(*frames per second*). Sendo uma fixada no suporte horizontal da estrutura, para capturar o escoamento no primeiro trecho da seção de testes, e outra fixada em um tripé, distante o suficiente para capturar o escoamento no resto da seção de testes. As imagens das coalescências de bolhas são analisadas no aplicativo ImageJ², comparando uma distância de 1000 mm, conhecida na escala de referência do aparato experimental, com uma escala em pixels da imagem referente à posição de coalescência, retornando esta posição convertida em milímetros para determinar a distância de coalescência (L_{coal}).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nove testes foram realizado em triplicata combinando os diversos tamanhos de bolhas primária e secundária. O Gráfico 1 permite uma visualização dos resultados obtidos.

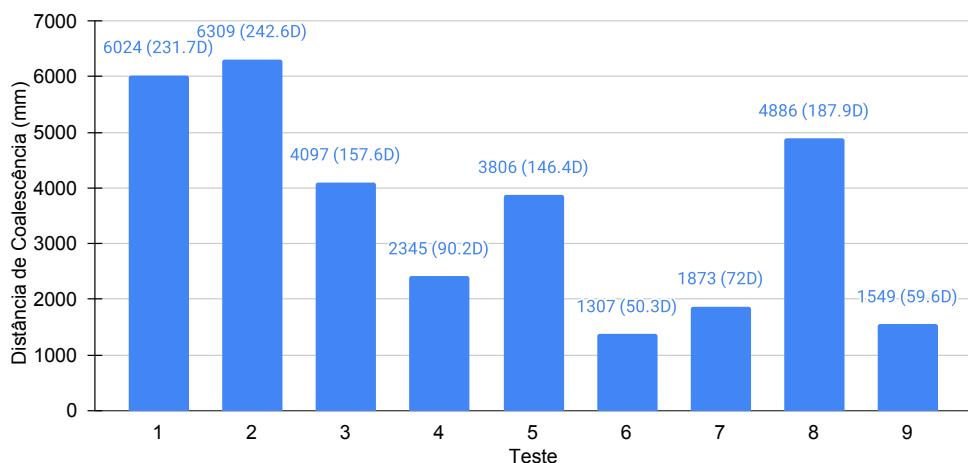


Gráfico 1 – Distância de coalescência para os testes realizados.

Fonte: autoria própria (2024).

Para os Testes 1 e 7, com mesma posição de bolha primária ($z_{B(1-B)} = 9,5D$) e tamanho de bolha secundária ($L_{B(2-B)} = 3,1D$), a coalescência ocorre primeiro no Teste 7, com maior $L_{B(1-B)}$ e menor L_S . Esse comportamento é consistente com a relação inversa entre a razão de velocidades $V_{\infty(2-B)}/V_{\infty(1-B)}$ e L_S , conforme Moissis e Griffith (1962). Resultados semelhantes foram observados nos Testes 2 e 8 e Testes 3 e 9.

Para os Testes 1 e 3, com o mesmo tamanho de bolha primária e espaçamento ($L_{B(1-B)} = 2,5D$), ($L_S = 13,2D$), a bolha secundária mais longa no Teste 3 apresenta maior velocidade e coalesce antes, devido à influência dos vórtices turbulentos gerados pela esteira da bolha primária, conforme Talvy, Shemer e Barnea (2000). Resultados similares foram observados nos Testes 4 e 6 e Testes 7 e 9.

Os Testes 1, 5 e 9 apresentam bolhas primária e secundária de tamanhos próximos em condições iniciais. Entre os Testes 1 e 5, observam-se aumentos de 88% de $L_{B(1-B)}$ e 69% de $L_{B(2-B)}$, assim como diminuições de 6% de L_S e 36% de L_{coal} . Já entre os Testes 5 e 9, observam-se aumentos de 76% de $L_{B(1-B)}$ e 76% de $L_{B(2-B)}$, assim como diminuições de 41% de L_S e 60% de L_{coal} . Finalmente, observam-se aumentos de 230% de $L_{B(1-B)}$ e 198% de $L_{B(2-B)}$, assim como diminuições de 44% de L_S e 74% de L_{coal} , entre os Testes 1 e 9. Com isto, verifica-se que o espaçamento inicial entre bolhas tem um efeito mais significativo que os tamanhos das bolhas.

4 CONCLUSÕES

- Maiores espaçamentos entre bolhas resultam em maiores distâncias de coalescência, pois o pistão de líquido se mantém mais estável, evitando que a bolha secundária seja afetada pela esteira turbulenta da bolha primária.
- Menores tamanhos de bolha primária resultam em maiores espaçamentos entre as bolhas e, consequentemente, em maiores distâncias de coalescência. Segundo a literatura, o tamanho da bolha primária afeta a velocidade do filme de líquido ao redor, o que influencia a turbulência na sua cauda, impactando a bolha secundária.
- Menores tamanhos de bolha secundária resultam em razões de velocidade entre as bolhas secundária e primária próximas à unidade, o que leva a maiores espaçamentos e, consequentemente, a maiores distâncias de coalescência, conforme descrito na literatura.
- Por fim, os espaçamentos entre bolhas apresentam uma influência mais significativa na distância de coalescência do que os tamanhos das bolhas, conforme a análise de resultados realizada.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — Brasil (Edital UTFPR/PROPPG n.º 04/2023 — PIBIT).

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. D. P.; MIRANDA, J. M.; CAMPOS, J. B. L. M. Flow of two consecutive Taylor bubbles through a vertical column of stagnant liquid—A CFD study about the influence of the leading bubble on the hydrodynamics of the trailing one. **Chemical engineering science**, v. 97, p. 16–33, 2013. DOI: [10.1016/j.ces.2013.04.014](https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.04.014).

CAMPOS, J. B. L. M.; CARVALHO, J. R. F. Guedes de. An experimental study of the wake of gas slugs rising in liquids. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 196, p. 27–37, 1988. DOI: [10.1017/S0022112088002599](https://doi.org/10.1017/S0022112088002599).

MOISSIS, R.; GRIFFITH, P. Entrance effects in a two-phase slug flow. **Journal of Heat Transfer**, v. 84, n. 1, p. 29–38, 1962. DOI: [10.1115/1.3684284](https://doi.org/10.1115/1.3684284).

PINTO, A. M. F. R.; CAMPOS, J. B. L. M. Coalescence of two gas slugs rising in a vertical column of liquid. **Chemical Engineering Science**, v. 51, n. 1, p. 45–54, 1996. DOI: [10.1016/0009-2509\(95\)00254-5](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00254-5).

SHEMER, L.; GULITSKI, A.; BARNEA, D. Movement of two consecutive Taylor bubble in vertical pipes. **Multiphase science and technology**, v. 19, n. 2, p. 99–120, 2007. DOI: [10.1016/s0301-9322\(00\)00004-5](https://doi.org/10.1016/s0301-9322(00)00004-5).

TAITEL, Yehuda; BARNEA, Dvora; DUKLER, A. E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, v. 26, n. 3, p. 345–354, 1980. DOI: [10.1002/aic.690260304](https://doi.org/10.1002/aic.690260304).

TALVY, C. Aladjem; SHEMER, L.; BARNEA, D. On the interaction between two consecutive elongated bubbles in a vertical pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 26, n. 12, p. 1905–1923, 2000. DOI: [10.1016/s0301-9322\(00\)00004-5](https://doi.org/10.1016/s0301-9322(00)00004-5).

WALLIS, Graham B. **One-Dimensional Two-Phase Flow**. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1969. ISBN 9780070679429.