



## Estudo experimental da interação entre bolhas de Taylor escoando em líquido estagnado

### Experimental study of the interaction between Taylor bubbles flowing in stagnant liquid

Leonardo Ienke\*, Luiz Eduardo Melo Lima†

#### RESUMO

Escoamentos bifásicos com fases gasosa e líquida têm ampla aplicabilidade industrial, desde a geração de vapor até a produção de energia nuclear e atividades petrolíferas. Portanto, é cada vez mais necessário estudar escoamentos bifásicos para entender como eles se desenvolvem e quais respostas podem ser obtidas com uma determinada forma de fluxo. O presente trabalho tem por objetivo estudar como e de que forma diferentes volumes de bolhas de Taylor de ar afetam o fluxo de outra bolha no mesmo tubo contendo líquido estagnado (água). Para isso, foram realizados testes com três diferentes volumes de bolhas liberadas a partir de um dispositivo construído e acoplado em um aparato projetado para a realização de experimentos de escoamento gás-líquido. A análise da interação entre bolhas ocorreu por meio do processamento de vídeos gravados com celular. A partir da análise dos dados obtidos foi possível perceber que quanto maior o volume da primeira bolha, maior será a interferência no fluxo da segunda bolha, fazendo com que a mesma aumente a velocidade, como consequência da diminuição da força hidrostática.

**PALAVRAS-CHAVE:** escoamento bifásico; bolhas; velocidade.

#### ABSTRACT

Two-phase flows with gaseous and liquid phases have broad industrial applicability, from steam generation to nuclear energy production and petroleum activities. Therefore, it is increasingly necessary to study two-phase flows to understand how they develop and what responses can be obtained with a given flow shape. The present work aims to study how and in what way different volumes of Taylor air bubbles affect the flow of another bubble in the same tube containing stagnant liquid (water). For this, tests were carried out with three bubbles with different volumes released from a device built and coupled to an apparatus designed to conduct gas-liquid flow experiments. The interaction between bubbles was analyzed by processing videos recorded with a cell phone. From the analysis of the data obtained, it was possible to see that the greater the volume of the first bubble, the greater the interference with the flow of the second bubble, causing it to increase in velocity as a consequence of the decrease in hydrostatic force.

**KEYWORDS:** two-phase flow; bubbles; velocity.

## INTRODUÇÃO

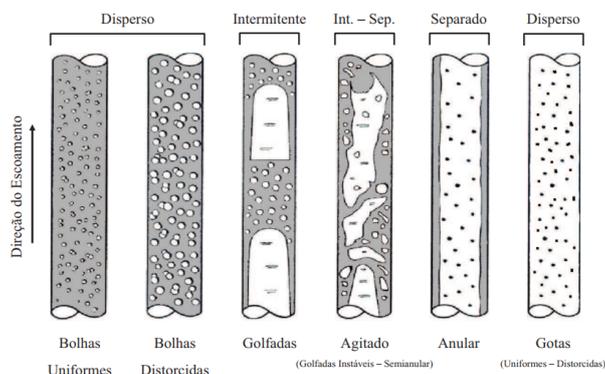
Escoamentos bifásicos gás-líquido estão presentes em diversas áreas da atividade humana. É possível observar a ocorrência deste fenômeno em diversas aplicações industriais que envolvam a presença de água e vapor de água, assim como em usinas nucleares, entre outras atividades. Em indústrias petrolíferas, é possível encontrar outros tipos de escoamentos bifásicos, por exemplo, gás-sólido, líquido-sólido e líquido-líquido. Os escoamentos gás-líquido podem ser agrupados em três diferentes padrões de escoamento (distribuições de fases ou componentes): disperso, intermitente e separado. Entretanto, Taitel, Barnea e Dukler (1980) descreve seis subpadrões para os escoamentos bifásicos na vertical (Figura 1):

\* Voluntário PIBIT.  Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. ✉ ienke.2019@alunos.utfpr.edu.br. ☎ 6085486036465021.

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

bolhas uniformes, bolhas dispersas, golfadas, agitado e anular. Na horizontal, ocorrem alguns subpadrões semelhantes aos observados na vertical. A realização de estudos e o desenvolvimento de equipamentos têm uma grande importância para melhorar a compreensão destes escoamentos, agregando valor ao produto final ou diminuindo custos nos processos.

**Figura 1 – Padrões de escoamento na vertical**



**Fonte: Shoham (2006)**

O fenômeno do escoamento da bolha alongada (bolha de Taylor) que ocorre no padrão intermitente (golfadas) foi descoberto por Davies e Taylor (1950), que realizaram testes com diferentes diâmetros de tubos para uma altura de 1,80 m, utilizando ar atmosférico e água como fluidos de trabalho. Verificaram que o formato da bolha diferia de bolhas comuns, apresentando nariz arredondado e um corpo cilíndrico até a sua calda.

Além da forma da bolha e outras características relevantes, a interação entre bolhas tem um impacto significativo para o padrão intermitente. Deste modo, diversos estudos foram realizados para compreender a dinâmica dessa interação e suas consequências. Pinto e Campos (1996) constataram que o escoamento da primeira bolha independe da segunda, ou seja, a primeira bolha escoava em movimento uniforme, não apresentando alterações em sua velocidade e forma. Por outro lado, a segunda bolha sofre interferência da primeira bolha conforme a distância entre as mesmas. Quanto maior a proximidade entre bolhas, maior é a interação entre as mesmas e mais rapidamente ocorre a coalescência de bolhas.

Talvy, Shemer e Barnea (2000) constataram a formação de vórtices próximos à cauda da bolha enquanto a mesma escoava. Os vórtices são responsáveis por alterar o campo de pressão do líquido estagnado, fazendo com que a primeira bolha interaja com a segunda bolha, aumentando a velocidade da segunda bolha, diminuindo a distância entre as mesmas e favorecendo a coalescência.

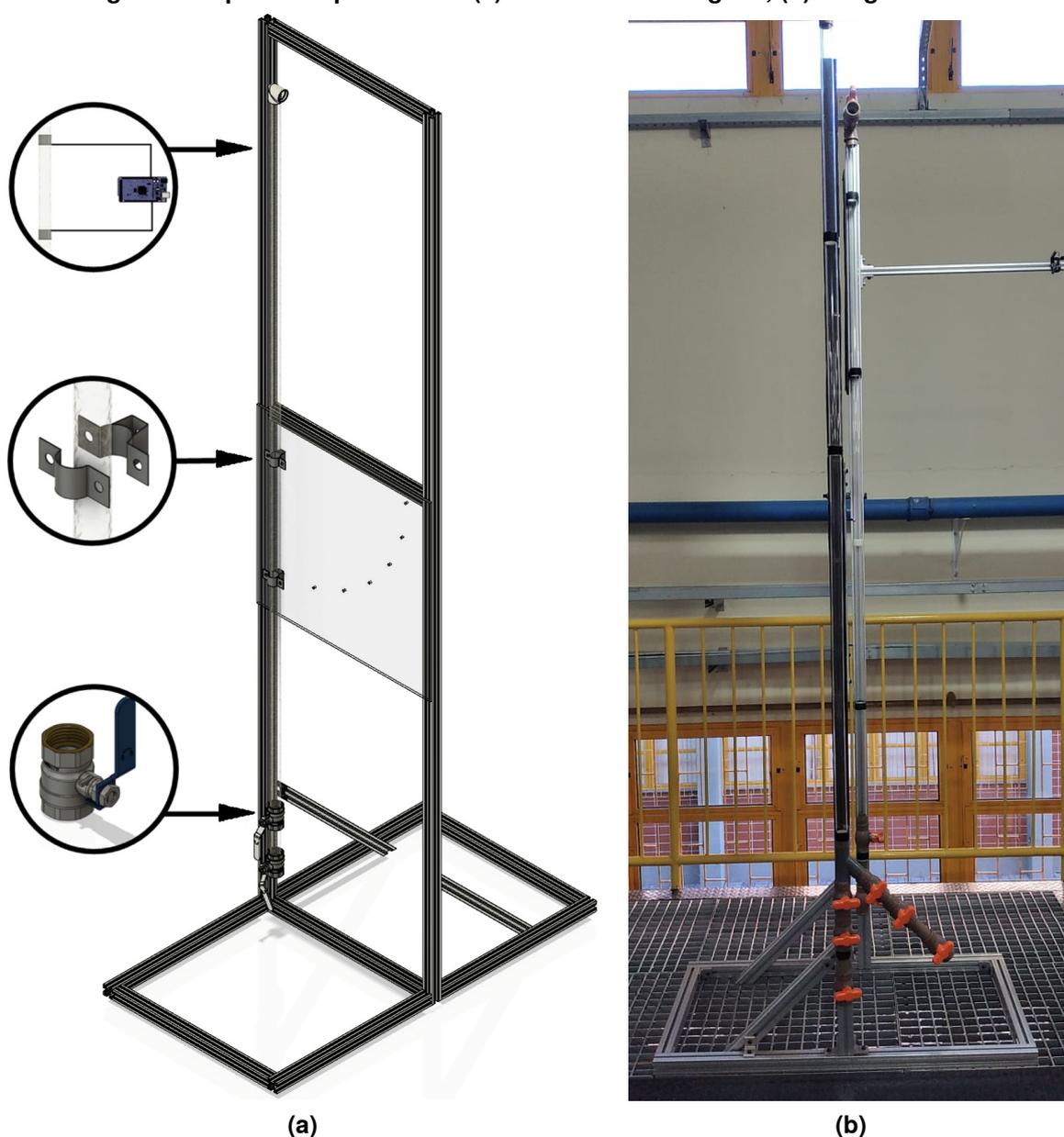
Ando (2021) desenvolveram um aparato experimental para estudar escoamentos gás-líquido e apresentaram uma revisão da literatura bastante abrangente sobre o escoamento de bolhas de gás em líquido estagnado. Realizou vinte testes, dez com inclinação de 45° e dez com inclinação de 90°, e os resultados para a velocidade da bolha foram comparados com dados experimentais e uma correlação, ambos da literatura, apresentando uma melhor concordância com os dados experimentais, por consequência das diferenças entre métodos aplicados em cada estudo (ANDO; MUZZO; LIMA, 2021).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a influência dos volumes de duas bolhas de Taylor, escoando em líquido estagnado, na interação entre as mesmas, adaptando o aparato experimental projetado e construído por Ando (2021), permitindo tal análise a partir do processamento de vídeos dos testes experimentais.

## MATERIAL E MÉTODOS

O aparato experimental de Ando (2021) encontra-se instalado no Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos (LabMF), do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC), do Campus Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). O aparato é constituído por uma estrutura de perfis de alumínio (40 mm × 40 mm), devido à robustez, leveza e custo-benefício. Esta estrutura se assemelha a um “T” invertido, quando observada pela sua vista lateral conforme Figura 2(a), e apresenta duas partes retangulares, a menor posicionada horizontalmente ao solo (1,0 m × 0,5 m) e a maior verticalmente (2,5 m × 0,5 m). A tubulação utilizada por Ando (2021) é de acrílico transparente, para facilitar a visualização do escoamento, com 26 mm de diâmetro interno ( $D$ ) e 2,0 m de comprimento ( $L$ ).

Figura 2 – Aparato experimental: (a) desenho CAD original; (b) fotografia atual



Fonte: (a) Ando (2021) e (b) autoria própria (2023)

## ADAPTAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Para estudar a interação entre bolhas, foi desenvolvido um dispositivo de liberação de bolhas composto por duas partes. Cada parte contém três seções de tubos de PVC (Policloreto de Vinila, do Inglês PolyVinyl Chloride), com comprimentos  $2D$ ,  $2D$  e  $4D$ , respectivamente, e três válvulas de esfera, ambos com  $D = 25,4$  mm (1 in). Estas duas partes estão conectadas com uma das extremidades de um tubo de acrílico transparente ( $D = 26$  mm,  $L = 2$  m e contendo água) por meio de uma conexão “Y” assimétrica, conforme Figura 2(b). Próximo a outra extremidade deste tubo de acrílico, foram colocadas duas marcações distantes entre si por 0,5 m, a fim de permitir a determinação das velocidades das bolhas, por meio do processamento e da análise dos vídeos gravados durante os testes realizados, utilizando o aplicativo Shotcut<sup>2</sup>. Em uma das colunas da estrutura de perfil de alumínio, um fundo escuro foi colocado para facilitar a visualização do escoamento, antes da fixação do tubo de acrílico e do dispositivo de liberação usando abraçadeiras de PVC. Entre as válvulas de esfera, fica contido o gás (ar em condições atmosféricas) para fornecer os volumes de 120 ml, para as bolhas grandes (G), 70 ml, para as bolhas médias (M), e 35 ml, para as bolhas pequenas (P).

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram realizados nove testes experimentais, cada um em triplicata, combinando os diferentes volumes de bolhas, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Testes experimentais realizados

Bolha	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Teste 6	Teste 7	Teste 8	Teste 9
Primária	G	G	G	M	M	M	P	P	P
Secundária	G	M	P	G	M	P	G	M	P

Fonte: autoria própria (2023)

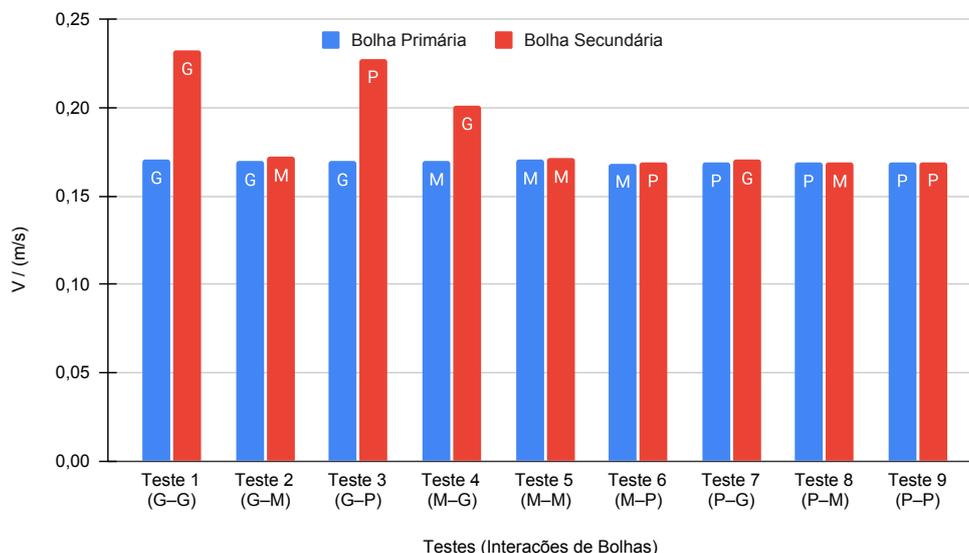
Antes de iniciar os testes, determinou-se e marcou-se uma distância de aproximadamente  $15D$  a partir da seção de entrada do tubo de acrílico na qual o nariz da primeira bolha deve passar antes de liberar a segunda bolha, a fim de evitar a coalescência antes da seção de saída do tubo de acrílico e garantir que as bolhas secundárias são liberadas aproximadamente ao mesmo tempo. Os testes descritos no Quadro 1 foram realizados liberando as bolhas primária e secundária por meio da abertura das válvulas de esfera contendo os respectivos volumes. Os escoamentos de ambas as bolhas foram filmados com a câmera de um *smartphone* com resolução de 1080p e taxa de 30 quadros por segundo (fps), fixado em um tripé a uma distância suficiente para conseguir capturar todo o tubo de acrílico.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para as velocidades médias ( $V$ ) das bolhas dos testes apresentados no Quadro 1 são mostrados no Gráfico 1. Nota-se que todos os volumes de bolhas secundárias seguindo uma bolha primária grande apresentam aumento significativo nas velocidades das bolhas (Testes 1, 2 e 3); porém, o Teste 2 (G–M) foi o que teve o menor aumento entre os três. Por outro lado, não houve um aumento significativo nas velocidades de bolhas secundárias para as bolhas primárias média e pequena, exceto no Teste 4 (M–G).

A bolha secundária torna-se sensível ao escoamento do filme fino de líquido em torno da bolha primária, que afeta o campo de pressões do líquido estagnado entre as

**Gráfico 1 – Velocidades médias das bolhas para os testes realizados**



**Fonte: autoria própria (2023)**

bolhas e vórtices podem ser gerados na traseira da bolha primária, conforme observado por Talvy, Shemer e Barnea (2000). Quanto maior a bolha primária, menor o volume de líquido entre as bolhas, diminuindo a força hidrostática e tornando as perturbações no líquido mais significativas, aumentando a velocidade da bolha secundária. Além disso, também foram observadas deformações no nariz das bolhas secundárias como consequência desta mudança no campo de pressões do líquido estagnado entre bolhas, devido à diminuição da força hidrostática, como constatado por Araújo, Miranda e Campos (2015).

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho experimental, é possível concluir que o aumento do volume da bolha primária diminui o volume de líquido estagnado entre bolhas e acelera o filme fino de líquido entre a bolha primária e a parede do tubo, aumentando a velocidade bolha secundária. Isto se deve à diminuição da força hidrostática e o aumento das perturbações na traseira da bolha primária. As divergências observadas podem estar relacionadas com as vibrações na estrutura durante o processo de liberação das bolhas e a desaceleração da bolha primária na liberação da bolha secundária.

## Agradecimentos

O autor Leonardo lenke agradece primeiramente a Deus pela saúde e boas condições de vida, ao professor Luiz Eduardo Melo Lima pelo incentivo no estudo do tema e no desenvolvimento deste trabalho e, por último, a sua família pelo apoio com a faculdade e com os deveres. O presente trabalho foi realizado com apoio da UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná — Brasil (Edital UTFPR/PROPPG n.º 04/2022 — PIVIT).

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

ANDO, André Vinícius Segall. **Desenvolvimento de um aparato experimental para determinação da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado**. 2021. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, mar. 2021. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25994>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ANDO, André Vinícius Segall; MUZZO, Luiz Eduardo; LIMA, Luiz Eduardo Melo. Design and construction of an experimental apparatus for velocity determination of a gas bubble flowing in stagnant liquid. *In*: FLORIANÓPOLIS, SC: UFSC. PROCEEDINGS of the 26<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering (COBEM). Rio de Janeiro, RJ: ABCM, 2021. 10 p. DOI: 10.26678/abcm.cobem2021.cob2021-0545.

ARAÚJO, J. D. P.; MIRANDA, J. M.; CAMPOS, J. B. L. M. CFD study of the hydrodynamics of slug flow systems: interaction between consecutive Taylor bubbles. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 13, n. 4, p. 541–549, 2015. DOI: 10.1515/ijcre-2014-0161.

DAVIES, R. M.; TAYLOR, Geoffrey Ingram. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 200, n. 1062, p. 375–390, 1950. DOI: 10.1098/rspa.1950.0023.

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.

SHOHAM, Ovadia. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers, 2006.

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.

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.