

Projeto e construção de um aparato experimental para determinação da velocidade de uma bolha de gás em um líquido estagnado

Design and construction of an experimental apparatus for determining the velocity of a gas bubble in a stagnated liquid

RESUMO

O escoamento multifásico tem sido estudado há muitas décadas devido às suas aplicações em setores da indústria, como em atividades petrolíferas, no ramo de energia nuclear, em ciclos de refrigeração, entre outros. O estudo de uma bolha de gás alongada escoando em líquido estagnado no interior de tubulações é de grande importância para a análise e compreensão de modelos de escoamento. Muito do conhecimento a respeito de padrões de escoamento tem sido obtido de forma empírica, o que deixa evidente a importância de estudar e aperfeiçoar métodos experimentais a respeito do tema. Este trabalho tem por objetivo realizar o projeto e a construção de um aparato experimental para visualização e determinação da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado. O equipamento é composto por uma estrutura de alumínio e tubos de acrílico fixados por meio de abraçadeiras e válvulas tipo esfera. Por meio deste aparato, pode-se verificar a influência do diâmetro e da inclinação do tubo, assim como da viscosidade do líquido, na velocidade de ascensão de uma bolha de gás. A velocidade da bolha de gás pode ser medida utilizando sensores capacitivos. O aparato se mostra simples de construir, com baixo custo material e fácil operação.

PALAVRAS-CHAVE: Escoamento multifásico. Projeto experimental. Tubulação.

ABSTRACT

Multiphase flow has been studied for many decades due to its applications in industry sectors, such as in petroleum activities, in the nuclear energy sector, in refrigeration cycles, among others. The study of an elongated gas bubble flowing in the stagnated liquid inside pipes is of great importance for the analysis and understanding of flow models. Much of the knowledge regarding flow patterns have been obtained empirically, which makes evident the importance of studying and improving experimental methods on the subject. This work aims to carry out the design and construction of an experimental apparatus for visualizing and determining the speed of a gas bubble flowing in stagnated liquid. The equipment is composed of an aluminum structure and acrylic tubes fixed employing clamps and ball valves. Through this apparatus, it is possible to verify the influence of the diameter and inclination of the pipe, as well as the liquid viscosity, on the rising velocity of a gas bubble. The gas bubble velocity can be measured using capacitive sensors. The apparatus is simple to build, with low material cost and easy operation.

KEYWORDS: Multiphase flow. Experimental design. Piping.

André Vinícius Segall Ando

andre_segall@hotmail.com

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. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico tem sido estudado há muitas décadas devido às suas aplicações em setores da indústria, como em atividades petrolíferas, no ramo de energia nuclear, em ciclos de refrigeração, entre outros (SHOHAM, 2006). A importância do estudo desse tipo de fenômeno surge da necessidade das indústrias de dimensionar tubulações e sistemas de bombeamento, a fim de aperfeiçoar os processos de produção. Em diversas situações, devido à alta complexidade da modelagem de escoamentos com mais de duas fases, o sistema pode ser simplificado para um escoamento bifásico dependendo da quantidade relativa de fases presentes na tubulação, o que facilita os cálculos e a compreensão, mas ainda se trata de um fenômeno complexo (LIMA, 2011).

Segundo Bratland (2010), um dos aspectos mais desafiadores de escoamentos multifásicos é o fato de que podem assumir muitas formas ou padrões diferentes. O estudo de uma bolha de gás alongada no padrão intermitente (ou em líquido estagnado) escoando no interior de tubulações, conhecida como bolha de Taylor (DAVIES; TAYLOR, 1950), é de grande importância para a análise e compreensão de modelos de escoamentos (VINHAS, 2015). Muito do conhecimento a respeito desses padrões de escoamento tem sido obtido de forma empírica, o que deixa evidente a importância de estudar e aperfeiçoar métodos experimentais para determinação de características importantes deste tipo de escoamento (WEISMAN; KANG, 1981).

A Tabela 1 apresenta alguns trabalhos experimentais da literatura realizados com o intuito de estudar a ascensão de bolhas de gás em líquido estagnado. As características desses trabalhos que são descritas na Tabela 1 são: comprimento (L), diâmetro (D) e inclinação (θ) do tubo; fluidos de trabalho; instrumentos de medição da velocidade da bolha de gás.

Tabela 1 – Descrição de alguns trabalhos da literatura relacionados ao tema

Referência	L (m)	D (mm)	θ (°)	Fluidos de trabalho	Instrumentos de medição
Davies e Taylor (1950)	1,8	12,3; 21,6; 79,4	90	Ar-água	Cronômetro manual
Nicklin, Wilkes e Davidson (1962)	–	2,54	90	Ar-água	–
Zukoski (1966)	–	5,0–178,0	0–90	Ar-vários líquidos	Cronômetro manual
Maneri e Zuber (1974)	0,914	(63,5; 152,4; 863,6) x (9,53; 12,7)	5–90	Ar-água e metanol	Câmera fotográfica
Bendiksen (1984)	4,0; 7,0; 10,0	19,2; 24,2; 50,0	-90–90	Ar-Água	Transistores
Weber, Alarie e Ryan (1986)	1,2	6,0; 8,1; 9,1; 10,5; 13,5; 22,1; 37,3	0–90	Ar-vários líquidos	Cronômetro manual
Carew, Thomas e Johnson (1995)	–	25,0; 45,0; 70,0	0–90	Ar-várias soluções	Sensores de infravermelho
Hout, Barnea e Shemer (2002)	10,0	24,0; 54,0	0–90	Ar-água	Sondas de fibra ótica e câmera

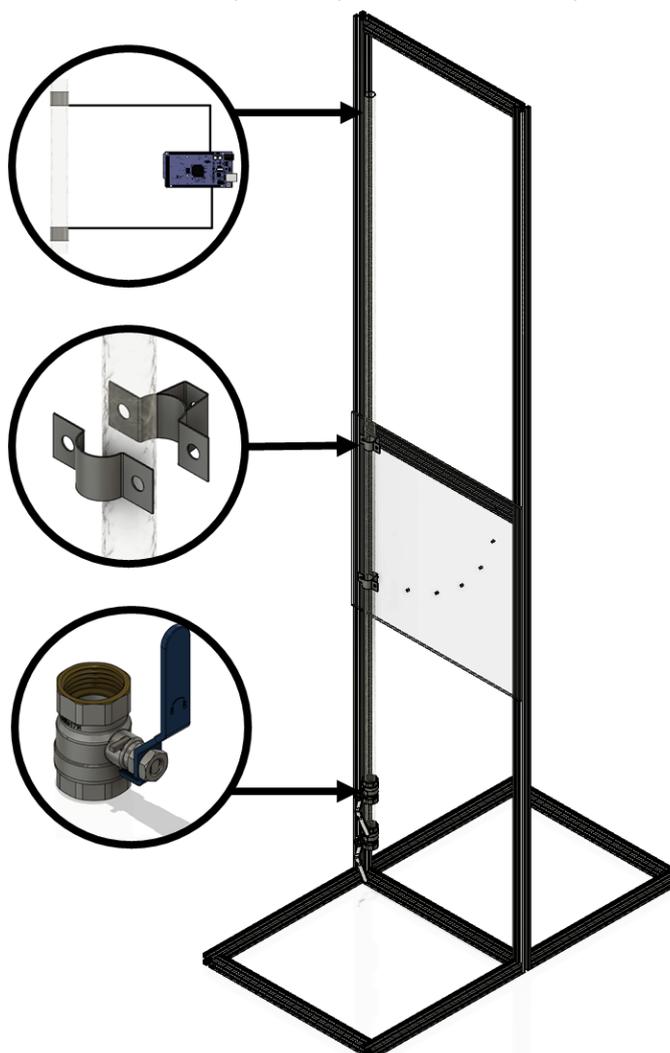
Fonte: autoria própria (2020).

Este trabalho tem por objetivo realizar o projeto e a construção de um aparato experimental para visualização e determinação da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado.

MATERIAL E MÉTODOS

As atividades de projeto e construção do aparato, assim como o procedimento de medição da velocidade, baseiam-se nos experimentos conduzidos pelos diversos trabalhos da literatura. O aparato é constituído por uma estrutura de perfis de alumínio, tubos de acrílico transparente, com diferentes diâmetros e fixados utilizando abraçadeiras metálicas que permitem rotação, e válvulas de esfera para liberação da fase gasosa. Por meio deste tipo de aparato, pode-se verificar a influência do diâmetro e da inclinação do tubo, bem como da viscosidade do líquido, na velocidade de ascensão de uma bolha de gás, que pode ser medida empregando sensores capacitivos não intrusivos. Um desenho assistido por computador (CAD, do inglês *Computer-Aided Design*) do referido aparato foi feito em um aplicativo e pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – Desenho do aparato experimental feito em aplicativo CAD



Fonte: autoria própria (2020).

A estrutura deve suportar um tubo preenchido com líquido de forma robusta ao mesmo tempo em que deve ser leve e de baixo custo. Por isso, perfis de alumínio extrudados devem ser empregados na montagem da estrutura, semelhante a do experimento de Bendiksen (1984). A geometria da estrutura tem formato semelhante a do experimento de Carew, Thomas e Johnson (1995), cujo centro do tubo está pivotado verticalmente ao centro da estrutura, permitindo rotação. No aparato deste trabalho, o ponto de pivotamento do tubo deve ser posicionado a pouco mais de 1 m de altura em relação à base da estrutura, permitindo a utilização de tubos com até 2 m de comprimento.

Assim como nos experimentos de Bendiksen (1984) e Hout, Barnea e Shemer (2002), este aparato utiliza tubos de acrílico transparente, pois são de fácil fabricação e apresentam baixo custo, para que seja possível visualizar a bolha alongada. Os tubos empregados apresentam diâmetros internos de 16 mm e 26 mm e comprimento de 2 m, semelhantes aos de Davies e Taylor (1950), sendo suficientes para o desenvolvimento da bolha e medição da sua velocidade.

A mudança de inclinação do tubo (de 0° a 90°) deve ser realizada por meio da rotação da abraçadeira metálica, instalada no ponto de pivotamento, de forma que permita rotação em torno do parafuso central de fixação da abraçadeira na estrutura. Uma segunda abraçadeira metálica é utilizada para garantir a fixação da seção de maior comprimento do tubo e evitar vibrações que atrapalham o desenvolvimento da bolha de gás. Ambas as abraçadeiras devem ser presas em uma chapa de acrílico transparente, fixa na região central do aparato.

Para retenção e liberação do gás (ou um líquido imiscível menos denso) na parte inferior do tubo, devem ser utilizadas duas válvulas de esfera, por permitirem liberação total do fluxo sem a necessidade de um controle de vazão a priori, além de serem de fácil instalação e apresentarem baixo custo. As válvulas também são os conectores entre as seções maiores de tubos, onde está o líquido estagnado, e as seções menores, onde se encontram os volumes de gás inicialmente, sendo responsáveis pela liberação do gás e inicialização do processo de ascensão da bolha.

Neste trabalho, pretende-se utilizar sensores capacitivos para determinar a velocidade média a partir do intervalo de tempo registrado e do comprimento de tubo entre os dois sensores. Além disso, a plataforma de prototipagem eletrônica deve armazenar os dados de velocidade média para cada inclinação do tubo.

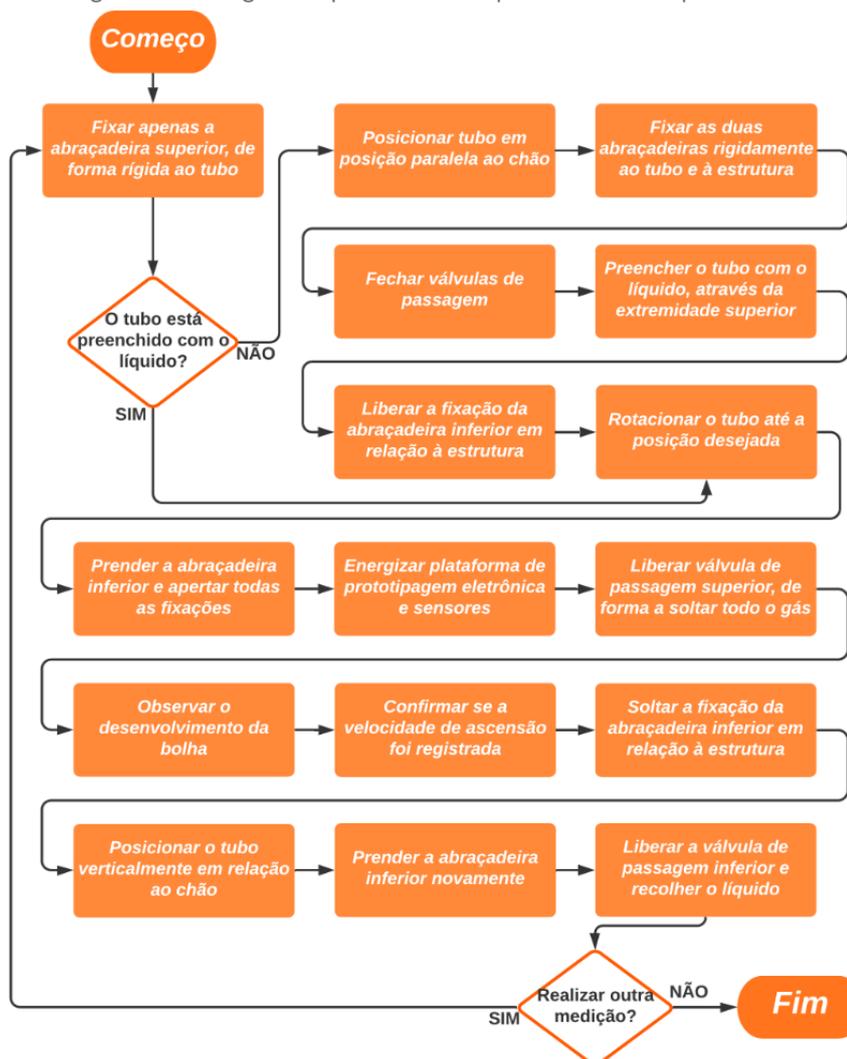
Na sequência, tem-se uma lista que mostra o detalhamento de materiais necessários à montagem do aparato experimental. A lista não inclui os materiais utilizados para a fabricação dos sensores capacitivos, plataforma de prototipagem eletrônica e itens relacionados, pois estes estão sendo desenvolvidos paralelamente em outro trabalho do grupo de pesquisa vinculado ao presente trabalho.

- a) 10 m de alumínio perfilado em barras;
- b) 5 pés niveladores (reguláveis);
- c) 20 cantoneiras, junções em “T” ou buchas internas para alumínio perfilado em barras;
- d) 45 parafusos, 45 porcas e 90 arruelas (quantidade e tamanho variam em função do sistema de fixação definido);

- e) 2 tubos de acrílico transparente de 2 m de comprimento e diâmetros nominais de 1/2 polegada e 1 polegada, respectivamente;
- f) 2 tubos de policloreto de vinila (PVC) de 0,1 m de comprimento e diâmetros nominais de 1/2 polegada e 1 polegada, respectivamente;
- g) 2 válvulas tipo esfera com diâmetro interno de 1/2 polegada;
- h) 2 válvulas tipo esfera com diâmetro interno de 1 polegada;
- i) 1 chapa de acrílico transparente com dimensões aproximadas de 560 mm por 560 mm e espessura de 5 mm;
- j) 2 cotovelos de 90° para tubos, com diâmetros nominais de 1/2 polegada e 1 polegada, respectivamente;
- k) 2 abraçadeiras para tubos do tipo união horizontal ou colar.

O procedimento experimental previsto para a utilização do aparato pode ser visualizado na Figura 2, que exhibe as tarefas de modo sequencial no formato de um fluxograma.

Figura 2 – Fluxograma apresentando o procedimento experimental



Fonte: autoria própria (2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da revisão da literatura e do dimensionamento realizado em aplicativo CAD (Figura 1), o desenvolvimento deste trabalho mostra um projeto de aparato experimental viável tecnicamente. Este projeto se torna interessante por diversos motivos, entre eles, a possibilidade de se construir um protótipo de baixo custo, considerando a lista de materiais apresentada na seção “MATERIAL E MÉTODOS”. O aparato experimental também é de fácil operação, dado o procedimento experimental descrito por meio do fluxograma apresentado na Figura 2. Além disso, o projeto apresenta grande potencial de aplicabilidade em estudos do escoamento tubular e suas variações, de acordo com a literatura descrita no presente trabalho.

Deste modo, pretende-se realizar a montagem deste projeto de aparato experimental assim que possível, em um Trabalho de Conclusão de Curso a ser realizado pelo acadêmico, pois a maior parte do material já se encontra disponível para montagem no Laboratório de Escoamentos Multifásicos (LabEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) — Câmpus Ponta Grossa. Depois de construído, este aparato experimental deve permitir a sua utilização em muitos estudos experimentais envolvendo escoamento de fluidos, mais especificamente escoamentos gás-líquido, que vem sendo desenvolvidos no grupo de pesquisa “Engenharia de Sistemas Térmicos”.

CONCLUSÃO

Devido aos problemas causados pela pandemia da doença COVID-19 resultante do novo coronavírus (SARS-CoV-2), não foi possível a completa realização de algumas atividades previstas no plano de trabalho da Iniciação Científica. Na atividade de “Projeto e construção do aparato experimental e cálculos de dimensionamento”, não foi possível a construção do aparato. Na atividade de “Análise teórica e verificação dos resultados obtidos”, não foi possível a verificação dos resultados obtidos. As demais atividades foram concluídas com êxito. Apesar disso, o dimensionamento do projeto, os desenhos em aplicativo CAD, a lista de materiais e o fluxograma do procedimento experimental demonstram a viabilidade técnica para aplicação do projeto desenvolvido em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária (FA), pela bolsa de Iniciação Tecnológica e Inovação (Edital PROPPG 03/2019 — PIBITI) concedida ao acadêmico André Vinícius Segall Ando, e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pelos recursos disponibilizados.

REFERÊNCIAS

BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. *Int. J. Multiphase Flow*, v. 10, n. 4, p. 467–483, 1984. DOI: [10.1016/0301-9322\(84\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0301-9322(84)90057-0).

BRATLAND, O. **Pipe flow 2: multi-phase flow assurance**. 1. ed. Singapore: Dr Ove Bratland Systems Pte. Ltd., 2010. 354 p. Disponível em: <http://www.drbratland.com/>. Acesso em: 15 mar. 2020.

CAREW, P. S.; THOMAS, N. H.; JOHNSON, A. B. A physically based correlation for the effects of power law rheology and inclination on slug bubble rise velocity. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 21, n. 6, p. 1091–1106, 1995. DOI: [10.1016/0301-9322\(95\)00047-2](https://doi.org/10.1016/0301-9322(95)00047-2).

DAVIES, R. M.; TAYLOR, G. I. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes. **Proc. Roy. Soc. London**, v. 200, n. 1062, p. 375–390, 1950. DOI: [10.1098/rspa.1950.0023](https://doi.org/10.1098/rspa.1950.0023).

HOUT, R. van; BARNEA, D.; SHEMER, L. Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 28, n. 8, p. 1333–1350, 2002. DOI: [10.1016/s0301-9322\(02\)00027-7](https://doi.org/10.1016/s0301-9322(02)00027-7).

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. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264105>. Acesso em: 15 mar. 2020.

MANERI, C. C.; ZUBER, N. An experimental study of plane bubbles rising at inclination. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 1, n. 5, p. 623–645, 1974. DOI: [10.1016/0301-9322\(74\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0301-9322(74)90022-6).

NICKLIN, D. J.; WILKES, J. O.; DAVIDSON, J. F. Two-phase flow in vertical tubes. **Trans. Inst. Chem. Eng.**, v. 40, p. 61–68, 1962.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. 1. ed. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2006. 396 p.

VINHAS, P. A. M. **Estudo do movimento da bolha de Taylor em coluna vertical e ligeiramente inclinável de líquido estagnado utilizando uma técnica de visualização**. Fev. 2015. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10013780.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2020.

WEBER, M. E.; ALARIE, A.; RYAN, M. E. Velocities of extended bubbles in inclined tubes. **Chem. Eng. Sci.**, v. 41, n. 9, p. 2235–2240, 1986. DOI: [10.1016/0009-2509\(86\)85073-4](https://doi.org/10.1016/0009-2509(86)85073-4).

WEISMAN, J.; KANG, S. Y. Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 7, n. 3, p. 271–291, 1981. DOI: [10.1016/0301-9322\(81\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0301-9322(81)90022-7).

ZUKOSKI, E. E. Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. **J. Fluid Mech.**, v. 25, n. 4, p. 821–837, 1966. DOI: [10.1017/s0022112066000442](https://doi.org/10.1017/s0022112066000442).