



2023
XXIX **CREEM**

Congresso Nacional de Estudantes de
Engenharia Mecânica

Goiânia - GO



XXIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
12 a 16 de Junho de 2023, Goiânia, Goiás, Brasil

INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DO TUBO NA VELOCIDADE DE UMA BOLHA DE GÁS ESCOANDO EM LÍQUIDO ESTAGNADO

Bruno Baldykowski, ✉ brunobaldykowski@gmail.com

Leonardo Ienke, ✉ ienke.2019@alunos.utfpr.edu.br

Elen Louise Camargo Cominese, ✉ elencominesi@alunos.utfpr.edu.br

Alysson Henrique Rublesperger de Almeida, ✉ alysson.2018@alunos.utfpr.edu.br

Victor Vaurek Dimbarre, ✉ victordimbarre@alunos.utfpr.edu.br

Luiz Eduardo Melo Lima, ✉ lelima@utfpr.edu.br

Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná — Campus Ponta Grossa —, R. Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, 84017-220, Ponta Grossa, PR, Brasil

Resumo. O escoamento multifásico ocorre em diversas aplicações industriais, como na produção e no transporte de petróleo e gás através de dutos. O escoamento intermitente (slug flow) se destaca entre os diferentes padrões de escoamentos gás-líquido devido a sua complexidade e extensa aplicação em tubulações de diversas inclinações. Neste contexto, foi realizado um conjunto de testes experimentais em diferentes inclinações para obter a velocidade de uma bolha de gás alongada escoando em líquido estagnado usando uma câmera e posterior processamento de vídeo. Os resultados apresentaram boa concordância em comparação com outro conjunto de dados experimentais da literatura, apesar das diferenças e limitações entre as técnicas de medição de cada estudo. Porém, os resultados mostraram divergência em relação a algumas correlações da literatura devido às características e limitações das mesmas. Além disso, os resultados mostraram que a velocidade máxima ocorre em cerca de 45° de inclinação e a mínima ocorre na vertical, seguida da horizontal, semelhante a outros estudos. Essas descobertas demonstram a necessidade de mais conjuntos de dados experimentais para ajudar a prever parâmetros, desenvolver correlações mais abrangentes, além de confirmar que o aparato adaptado empregado pode ser aplicado para realizar novos estudos em diferentes condições.

Palavras chave: Escoamento multifásico. Bolha alongada. Análise experimental.

Abstract. Multiphase flow occurs in several industrial applications, such as the production and transport of oil and gas through pipelines. Intermittent flow (slug flow) stands out among the different gas-liquid flow patterns due to its complexity and extensive application in pipes with different inclinations. In this context, a set of experimental tests was carried out at different inclinations to obtain the velocity of an elongated gas bubble flowing in stagnant liquid using a camera and subsequent video processing. The results showed good agreement when compared to another set of experimental data in the literature, despite the differences and limitations between the measurement techniques of each study. However, the results showed divergence in relation to some correlations in the literature due to their characteristics and limitations. In addition, the results showed that the maximum velocity occurs at about 45° of inclination and the minimum occurs vertically, followed by horizontally, similar to other studies. These findings demonstrate the need for more experimental datasets to help predict parameters, develop more comprehensive correlations, and confirm that the adapted apparatus employed can be applied to perform new studies under different conditions.

Keywords: Multiphase flow. Elongated bubble. Experimental analysis.

1. INTRODUÇÃO

Diversos exemplos de escoamentos multifásicos podem ser encontrados na natureza, como fumaça, poluição, chuva e neve, assim como em muitas aplicações industriais (Wallis, 1969). Devido à necessidade que as indústrias têm de prever custos com perdas de carga e de calor, além da otimização de processos em diversas situações, a simplificação desse tipo de escoamento para um sistema bifásico facilita a compreensão e a realização de cálculos, viabilizando o estudo desse fenômeno físico complexo (Lima, 2011). Suas principais aplicações industriais destacam-se nas indústrias de petróleo, química, nuclear, espacial e geotérmica. Na indústria de petróleo, ocorre durante a produção e o transporte de óleo e gás, por meio do escoamento através de tubulações na horizontal, inclinadas ou na vertical. Além disso, as linhas de transporte podem ter longos comprimentos antes de chegarem as instalações de separação, sendo necessários vários componentes e métodos para controle e processamento do escoamento. Nesses casos, determinar a queda de pressão, a resistência do fluido e as frações volumétricas das fases é fundamental para o projeto e a operação dessas instalações (Shoham, 2006).

Entre os mais complexos padrões de escoamento gás-líquido, destaca-se o padrão intermitente. Esse padrão está presente em uma grande extensão das tubulações com diferentes inclinações, contendo diferentes fluidos de trabalho, onde a maior parcela do gás está localizada em uma bolha alongada que ocupa grande parte da seção do tubo. Essas bolhas são usualmente conhecidas como bolhas de Taylor. A análise desse padrão é relevante para se entender o comportamento físico do escoamento em processos e aplicações de soluções práticas empregadas em rotinas de cálculos de engenharia (Taitel and Barnea, 1990). Dessa maneira, com essa variedade de padrões e de aplicações, evidencia-se a necessidade de estudar e aprofundar técnicas experimentais e instrumentos de medição para alcançar um conhecimento satisfatório sobre esses escoamentos e suas aplicações. Apesar de muito estudado ao longo dos anos, certas limitações operacionais ainda restringem a obtenção desse nível satisfatório de conhecimento que se faz necessário, principalmente em novos cenários de ocorrência desse fenômeno.

O escoamento de gás em líquidos vem sendo estudado em diversos trabalhos experimentais desde o início do Século XX. Porém, os trabalhos anteriores a Davies and Taylor (1950) apresentavam resultados inexpressivos a ponto de não serem aplicáveis em uma ampla variedade de volumes de gás. Assim, eles desenvolveram um dos primeiros estudos a respeito da ascensão de bolhas alongadas de ar em líquido estagnado. Para isso, utilizaram três tubos de vidro com mesmo comprimento, mas diferentes diâmetros, posicionados verticalmente sobre um recipiente com água. Então, aplicaram sucção na ponta superior dos tubos de vidro com um tubo de borracha, fazendo com que a água do recipiente alcançasse o topo desses para serem fechados. Assim, pode-se abrir a extremidade inferior dos tubos para analisar o escoamento que ocorreu através de uma cortina tubular ao redor do diâmetro, enquanto se formava uma bolha que ascendia em direção ao topo. Com isso, pode-se medir a velocidade do escoamento da bolha cronometrando a passagem dessa por marcações definidas ao longo do tubo.

Zukoski (1966) analisou a influência da viscosidade do líquido, da tensão superficial e do ângulo de inclinação dos tubos na movimentação das bolhas em líquidos estagnados. Utilizaram-se diversos líquidos e tubos de vidro com diâmetros distintos, medindo-se a velocidade a partir do tempo de passagem por duas marcações definidas ao longo do tubo. Também conseguiu relacionar os parâmetros do problema com os números adimensionais de Froude (Fr), Eötvös (Eo) e Reynolds (Re). Conforme a inclinação do tubo diminuía, o formato da bolha modificava-se gradativamente. Em inclinações menores que 45° da horizontal, a maioria do líquido descia pela parte inferior do tubo, enquanto o formato do corpo da bolha na parede aumentava. A traseira da bolha tornou-se cada vez mais plana à medida que a inclinação diminuía, até que a área ocupada pelo líquido se aproximava da metade inferior do tubo e a bolha de gás ocupava a metade superior, para inclinação próxima de zero. Contudo, analisar o efeito do ângulo de inclinação na taxa de propagação da bolha torna-se muito complexo devido a essas mudanças de geometria ocorridas. Ainda assim, notou-se que a taxa de propagação das bolhas (ou seja, a velocidade) alcançou um valor máximo com a inclinação em posição de 45° da vertical e decresceu conforme a redução da inclinação. Quando Zukoski (1966) relacionou a taxa de propagação da bolha com a tensão superficial em inclinações de 0° , 45° e 90° , notou-se que a velocidade tendia a ficar normalizada conforme a tensão superficial se aproximava de zero para a inclinação de 90° . Contudo, para 0° e 45° a velocidade continuava aumentando, deixando claro que para tubos verticais há uma taxa limitante conforme a tensão superficial se aproxima de zero. Sugeriu-se então que isso ocorre devido ao raio de curvatura do nariz da bolha, que para a posição vertical, com menores valores de tensão superficial, diminui suavemente até tender a ficar constante. Já para as inclinações de 0° e 45° essa mudança é muito mais drástica, diminuindo o raio de curvatura em uma proporção de até dois para um em relação à tensão superficial.

De maneira semelhante, Maneri and Zuber (1974) injetaram ar pressurizado em tubos de vidro com líquido estagnado. Realizaram medições por meio de técnicas fotográficas e de iluminação em diferentes inclinações até 90° , que possibilitaram analisar a influência das propriedades do fluido para as diferentes inclinações. Concluíram que não houve mudança na velocidade terminal da bolha em tubulação vertical, mas para os escoamentos inclinados, com o efeito da tensão superficial, a mudança na geometria do nariz da bolha fez com que alterasse o escoamento. Concluíram também que as propriedades do fluido alteram o escoamento conforme as condições de inclinação das instalações. Para inclinações de 0° a 10° , o escoamento independe das condições do fluido para grandes diâmetros. De 10° a 30° começa a sofrer influência das propriedades do fluido. Por fim, de 30° a 90° o escoamento é influenciado pelas propriedades do fluido apenas para grandes diâmetros.

Weisman and Kang (1981) realizaram experimentos por meio de um aparato com tubos de vidro de aproximadamente seis metros e diferentes diâmetros, que possibilitavam inclinações de até 7° em relação à vertical ou à horizontal. Analisaram o escoamento por meio de medidores de orifício à pressão atmosférica, constatando que a inclinação da tubulação afeta o comportamento dos padrões de escoamento.

Do ponto de vista de versatilidade experimental, Bendiksen (1984) aprofundou mais em seu trabalho, desenvolvendo um aparato com tubos de acrílico suportados por barras de alumínio que, sendo pivotadas, possibilitava inclinações de 180° com a horizontal. Com válvulas para controle constante da pressão, a velocidade da bolha foi medida por detectores ao longo dos tubos conectados a um sistema eletrônico. Realizou pelo menos 50 testes para cada inclinação de tubo, para determinar a velocidade de escoamento, introduzindo a bolha de gás usando ar pressurizado, mantendo demais condições constantes, como temperatura. Conseguiu correlacionar o número de Froude (Fr) com a inclinação (θ) conforme a Eq. (1), considerando os números de Froude na horizontal ($Fr_H = 0,542$) e na vertical ($Fr_V = 0,345$):

$$Fr(\theta) = Fr_H \cos \theta + Fr_V \sin \theta \quad (1)$$

Comparando com os resultados apresentados por Zukoski (1966), há concordância em torno de 1% com os valores propostos por Bendiksen (1984), visto que os dados foram coletados aplicando os mesmos parâmetros de coeficientes em todos os valores de Froude, negligenciando efeitos de expansão da bolha e erros experimentais.

Weber *et al.* (1986) realizaram experimentos para calcular a velocidade da bolha de Taylor em tubos de diferentes diâmetros para sete diferentes inclinações de tubulações, de 0° a 90° com variações de 15°. Utilizando água destilada como líquido, fecharam a extremidade inferior com uma rolha de borracha, acoplaram uma mangueira flexível na parte superior para encher os tubos para abrir a parte inferior, permitindo o escoamento e a formação da bolha de Taylor, posteriormente. Cronometrando os tempos de ascensão da bolha em pontos específicos da tubulação, observaram que a relação obtida por Bendiksen (1984) apresentou resultados discrepantes para fluidos mais viscosos ou para escoamentos com baixo número de Eötvös. Assim, propuseram um termo adicional de correção (Q) para a Eq. (1) proposta Bendiksen (1984) em função de ΔFr ($\equiv Fr_V - Fr_H$), que diminuiu a discrepância dos valores experimentais de 15% para 10%, conforme a Eq. (2):

$$Q = \begin{cases} 0 & \text{se } \Delta Fr \leq 0 \\ 1,37(\Delta Fr)^{2/3} \sin \theta (1 - \sin \theta) & \text{se } \Delta Fr > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Alves *et al.* (1993) realizam experimentalmente uma análise da velocidade da bolha alongada pela abordagem de Benjamin. Em tubos de PVC de 5,1 cm e 7,6 cm de diâmetro e 15 m de comprimento. Analisaram o comportamento de uma bolha de gás em líquido estagnado, sendo esse o querosene, por ser um fluido com características semelhantes à água, mas com baixo teor corrosivo. Analisou-se valores de velocidade por um sistema detector de variação de pressão e, assim, conclui-se que de 0° a 90°, variando a cada 10°, o valor máximo da velocidade ocorre para inclinação de 40° dependendo de dois principais parâmetros, o número de Eötvös e o número de viscosidade inversa.

Crew *et al.* (1995) realizaram experimentos com diversos tubos de diâmetros distintos, fixados a uma estrutura metálica em formato de "A", sendo pivotados pelo seu centro no centro da estrutura. Preencheram parcialmente os tubos com os líquidos de interesse, mantendo gás suficiente para formar a bolha de Taylor e, assim, rotacionaram rapidamente a tubulação para a inclinação desejada. Por meio de um cronômetro automatizado por sensores óticos infravermelhos, mediram a velocidade da bolha. Assim, para os diâmetros de 0,0216 m e 0,178 m e elevado número de Reynolds, concluíram que com o aumento da viscosidade e da tensão superficial, mesmo em escoamentos inclinados, ocorre uma diminuição da velocidade de ascensão da bolha. Tal comportamento é regido pela correlação proposta por eles na Eq. (3), onde z corresponde a coordenada axial:

$$\log \left[\frac{Fr(Eo, \theta, Re)}{Fr(Eo, \theta, \infty)} \right] = \frac{1}{4} \left\{ z \sqrt{\left(\frac{\log Re - 1,08}{z} \right)^2 + 1} + (\log Re - 1,08) \right\} \quad (3)$$

Fagundes Netto *et al.* (1999) realizaram um estudo teórico-experimental com um tubo de PVC de 90 m de comprimento e 53 mm de diâmetro na horizontal. Tanto o ar quanto a água foram injetados por uma bomba, proporcionando ao líquido uma velocidade variável (não estagnado). Observaram dois diferentes tipos de formato de bolha, responsáveis por dois diferentes tipos de escoamento. Por fim, analisaram por meio de sensores as velocidades das bolhas em diferentes condições de escoamento e correlacionaram cada velocidade com o formato da bolha e suas características.

Cook and Behnia (2001) relacionaram um estudo experimental com um numérico para analisar o escoamento intermitente gás-líquido, obtendo melhores resultados sobre variação de pressão e troca de calor envolvidos nesse fenômeno. Usaram tubos de 32 mm e 50 mm de diâmetro com possibilidade de inclinação de 0° a 10°, utilizando eletrodos condutores para identificar o início e o fim da bolha e, conseqüentemente, suas respectivas velocidades.

Shi *et al.* (2005) optaram por realizar uma análise tanto nos escoamentos bifásicos quanto nos escoamentos trifásicos. Assim, observaram água e gás (nitrogênio), óleo (querosene) e água e óleo, água e gás. Para isso, utilizou-se uma tubulação de vidro com 15 cm de diâmetro e 11 m de comprimento, variando em oito diferentes inclinações de 0° a 92°. Utilizaram sondas que detectam variação de pressão para determinar a condição de escoamento dos diferentes fluidos em suas respectivas inclinações.

Perron *et al.* (2006) aprofundaram a relação entre ar e água determinando a forma, o volume e o número de Froude da bolha em um escoamento em superfície plana de vidro, variando a inclinação de 0° a 10°, com influência da gravidade em escoamento descendente. Com uma câmera de alta resolução, observaram que o volume da bolha variou de 0,3 cm³ a 9 cm³ e determinaram uma típica correlação entre a velocidade, o volume da bolha e a inclinação do escoamento.

A teoria do potencial de escoamento, aplicada em escoamentos bifásicos para encontrar velocidade da bolha, chegava em correlações que negligenciavam a tensão do escoamento e a viscosidade dos fluidos. Assim, Gokcal *et al.* (2008) realizaram um experimento para analisar os efeitos da viscosidade do óleo na velocidade da bolha em tubos inclinados. Utilizaram uma tubulação que permite escoamento em ciclo, com diâmetro de 50,8 mm e 9,15 m de comprimento em acrílico transparente. Em diferentes inclinações, variando de 0° a 90°, conseguiram propor uma correlação que se aproximou de maneira muito satisfatória aos experimentos físicos, principalmente relacionados aos fluidos de alta viscosidade.

Gómez-Bueno (2010) estudou a influência da inclinação de tubulações em escoamentos de líquido-gás. Com um aparato mais robusto, realizou experimentos usando uma tubulação de acrílico fixada em uma treliça articulada de 8,5 m de extensão, com a inclinação variando de 0° a 90°, a cada 15°, controlado por meio de um sistema de monitoramento computadorizado. Uma correção devido ao efeito da expansão volumétrica que ocorre quando a coluna hidrostática diminui e a bolha de gás expande foi aplicada nos resultados, pois com a variação de volume também varia-se a velocidade. Os resultados obtidos por ele concordaram com os demais trabalhos publicados que analisaram a interferência da inclinação dos tubos nos escoamentos. A maior mudança de aumento de velocidade da bolha se mostrou ocorrer entre 30° e 75° de inclinação da horizontal, sendo seu valor máximo em 60°.

Lizarraga-Garcia *et al.* (2016) realizaram estudos sobre drenagem de filme e critério de ruptura de bolhas de Taylor em escoamentos lentos, com tubos de policarbonato. Utilizando metanol e etanol em diversas inclinações, determinaram a velocidade de ascensão da bolha por meio de um câmara digital de alta velocidade.

Rodrigues *et al.* (2019) analisaram experimentalmente frequência, velocidade, formato e comprimento da bolha em inclinações de -4° a -13°, em escoamentos intermitentes. Com sensores de tela em tubos transparentes de 25,8 mm de diâmetro interno, chegaram a quatro diferentes valores de velocidade: 0,02 m/s (-13°); 0,01 m/s (-10°); 0,01 m/s (-7°); 0,03 m/s (-4°).

Tihon and Ezeji (2019) utilizaram um duto com perfil retangular e câmeras de alta velocidade para determinar a velocidade da bolha em líquido estagnado. Realizaram testes em canais de diferentes proporções e inclinações, depois compararam os resultados obtidos com resultados anteriores (analíticos) e concluíram que os valores sugerem que a velocidade segue uma escala com base na altura do canal. Com a análise experimental realizada, desenvolveram um modelo para previsão da velocidade de ascensão da bolha, baseado nas velocidades limites da bolha na horizontal e na vertical. Com isso, o modelo apresenta previsões com precisão suficiente em regime inercial.

de Azevedo *et al.* (2020) estudaram experimentalmente a bolha de Taylor em líquido estagnado composto por água e glicerina. Observaram a velocidade e formato da bolha em tubulações circulares que variam de 0° a 15°, por meio de técnicas de pulso ultrassônico. Concluíram, assim como os demais estudos citados, que a velocidade da bolha aumenta conforme o aumento do ângulo de inclinação e que o comprimento da bolha não causa influência nessa grandeza. Além disso, várias correlações foram testadas para a variação de inclinação analisada.

Notando instabilidades causadas pelo padrão intermitente com duas fases, Cazarez-Candia and Benítez-Centeno (2020) analisaram experimentalmente o escoamento de água e ar em tubos de acrílico com 6 m de comprimento e 0,01905 m de diâmetro interno. Por meio de sensores que interpretavam sinais de diferença de potencial conforme a passagem das bolhas, conseguiram determinar, entre outros parâmetros, a vazão do ar para as inclinações de 0°, 3°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90°, realizadas diversas vezes. Com isso, concluíram que o comprimento da bolha da Taylor diminui com o aumento da inclinação e, além disso, constataram o aumento da turbulência entre a bolha de Taylor e a parede do tubo conforme aumento da inclinação.

Livinus and Verdin (2021) analisaram o comportamento da bolha em movimento ascendente em tubulações com inclinação de até 10° usando diodos detectores. Observaram a velocidade da bolha e sua dependência de fatores como a viscosidade do fluido, assim como a inclinação e o diâmetro do tubo. Assim, concluíram também que a velocidade da bolha cresce conforme aumenta a inclinação. Puderam assim comparar com resultados obtidos em demais estudos e desenvolver correlações para esse caso específico.

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma adequação em um aparato experimental, desenvolvido por Ando (2021), para permitir analisar o efeito da inclinação do tubo na velocidade de ascensão de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado. A partir do planejamento e da realização de um conjunto de testes experimentais torna-se possível comparar os resultados obtidos com outros disponíveis na literatura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para analisar a influência da inclinação do tubo na velocidade de ascensão de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado, utiliza-se no presente trabalho um aparato experimental desenvolvido por Ando (2021), que se encontra atualmente 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 composto por uma estrutura de alumínio (robusta, leve e de satisfatório custo-benefício) que é responsável por sustentar tubos de diferentes diâmetros, que podem ser preenchidos com diferentes tipos de líquidos. No que lhe concerne, os tubos devem ser de acrílico transparente, para possibilitar a visualização do fenômeno e atender os requisitos de fácil fabricação e instalação, além de baixo custo. Para o controle da liberação da fase gasosa (ou líquido imiscível menos denso) na parte inferior do tubo, utiliza-se duas válvulas de esfera de PVC (Policloreto de Vinila, do inglês *PolyVinyl Chloride*) que permitem a liberação total de fluxo. As válvulas também fazem a conexão entre o líquido estagnado e a fase gasosa, armazenados na tubulação de acrílico e em uma seção menor de tubo de PVC, respectivamente. A Figura 1 apresenta um desenho do aparato experimental feito em aplicativo de CAD (Desenho Assistido por Computador, do inglês *Computer Aided Design*), com detalhes nas válvulas de esfera, nas abraçadeiras metálicas e nos sensores de medição (que podem ser instalados em trabalhos futuros) (Ando, 2021), assim como uma fotografia atual do mesmo com detalhes.

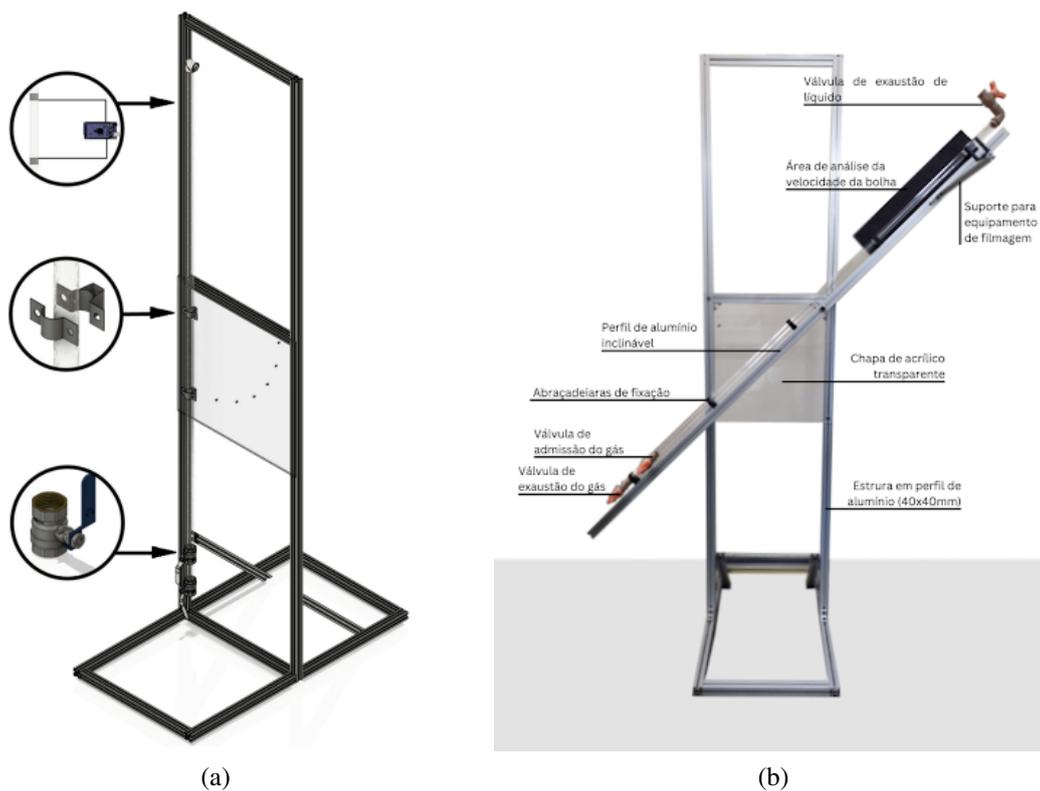


Figura 1. Aparato experimental: (a) desenho elaborado em aplicativo CAD (Ando, 2021) e (b) fotografia atual.

Na porção inferior do tubo de acrílico transparente, encontram-se as válvulas de esfera que podem liberar ou reter através do tubo, de forma rápida e imediata, a vazão do gás que se encontra armazenado em uma seção menor de tubo de PVC, permitindo a ascensão da bolha de gás através do líquido estagnado no tubo (Ando, 2021).

2.1 Determinação da velocidade

Como foi possível observar na Introdução, os principais métodos para determinação da velocidade consistem em analisar a passagem do nariz da bolha por dois pontos predeterminados na tubulação com distância conhecida. A partir dessa referência, pode-se cronometrar o tempo como fizeram Davies and Taylor (1950) e Zukoski (1966), por exemplo. Ainda, têm-se exemplos que realizaram a demarcação nos tubos com sensores que identificam a passagem da bolha e possibilita o cálculo da velocidade a partir disso, como Bendiksen (1984) e Carew *et al.* (1995).

Por outro lado, Vinhas (2015) determinou a velocidade gravando vídeos com câmeras digitais do processo de ascensão da bolha e analisando os vídeos com processamento posterior. Mostra-se um processo com fácil aplicabilidade e satisfatório grau de precisão para utilização. Para isso, faz-se necessário a utilização de aplicativos de processamento de vídeos para permitir a análise. Deste modo, a metodologia para determinação da velocidade da bolha do presente trabalho é semelhante à empregada por Vinhas (2015), utilizando o aplicativo **Shotcut** para processamento e análise dos vídeos gravados durante os experimentos.

2.2 Adequação do aparato experimental

Para análise do escoamento em diferentes inclinações de tubo, Ando (2021) projetou um sistema baseado em uma chapa de acrílico transparente fixada ao centro da estrutura, com diversos furos a fim de variar a inclinação de 0° a 90° em intervalos de 15° . O tubo é fixado na estrutura por meio de abraçadeiras metálicas, sendo uma delas pivotada no centro da estrutura por meio de um parafuso e a outra aparafusada em um dado furo na chapa de acrílico conforme a inclinação que se deseja analisar. Num sistema idealizado, isso possibilitaria manter a estrutura fixada em diferentes inclinações e, ainda, evitaria vibrações durante o escoamento.

Contudo, verifica-se que esse sistema apresenta dificuldades na horizontal e em inclinações próximas à horizontal, demonstrando a necessidade de alterações no sistema. Observa-se a falta de pontos de apoio no tubo de acrílico, visto que o mesmo tende a oscilar e curvar, especialmente aqueles com paredes menos espessas, devido a sua menor resistência.

Assim, neste trabalho foi projetado e realizado uma adequação no aparato experimental para evitar os problemas mencionados, de modo que seja possível executar diferentes medições com as inclinações propostas, permitindo a comparação dos resultados obtidos com a literatura.

2.3 Procedimento experimental

Para a realização de cada análise, inicia-se preenchendo com líquido o tubo, em posição horizontal, a partir da extremidade superior do mesmo, sendo necessário fechar as válvulas de passagem antecipadamente. Com isso, pode-se posicionar o tubo na inclinação desejada, fixando por meio das estruturas responsáveis para tal. Depois, abre-se a válvula superior que permitirá a passagem do gás armazenado, ocorrendo a formação e o escoamento da bolha. Na sequência, observa-se a passagem da bolha pelas duas marcações ao longo do tubo, registrando-se um vídeo para posterior processamento e análise. Por fim, fecha-se a válvula superior e abre-se a válvula inferior, a fim de recolher o líquido armazenado na seção menor de tubo de PVC.

Com o vídeo registrado do fenômeno de ascensão da bolha, utiliza-se o aplicativo de processamento de vídeo **Shotcut** para determinar o intervalo de tempo da passagem do nariz da bolha pelas duas marcações ao longo do tubo.

Para cada inclinação analisada, deve ser realizado no mínimo três determinações da velocidade, ou seja, três testes experimentais, a fim de verificar a reprodutibilidade dos resultados, por meio da análise da média e do desvio padrão dos valores de velocidade da bolha determinados.

Este procedimento é repetido para as diversas inclinações analisadas, a fim de se obter vários conjuntos de dados, para permitir a realização de comparações com dados disponíveis na literatura. A partir da comparação dos resultados torna-se possível verificar a aplicabilidade do aparato experimental e suas adequações para realização de outros estudos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do procedimento descrito anteriormente, realizou-se 35 testes para as sete diferentes inclinações; portanto, cinco testes para cada inclinação. A tubulação possui diâmetro interno de 26 mm e comprimento de 2 m. Em relação aos fluidos de trabalho, utilizou-se água como líquido estagnado para observação da ascensão da bolha alongada de ar. Com isso, as filmagens foram realizadas por meio da câmera de um *smartphone* com resolução de 1080p e 30 fps, para posterior análise do tempo percorrido pela bolha na distância previamente estabelecida de 0,5 m.

3.1 Comparação dos resultados

Na Tabela 1, têm-se os valores do número de Froude para cada inclinação, obtidos a partir das medições realizadas no aparato experimental do presente trabalho, bem como os respectivos valores obtidos experimentalmente por Gómez-Bueno (2010), para comparação por meios dos valores de desvio relativo entre os dados.

Tabela 1. Comparação entre os dados experimentais obtidos no presente trabalho e da literatura.

Inclinação, θ (°)	Fr		Desvio relativo (%)
	Presente trabalho	Gómez-Bueno (2010)	
90	0,3496	0,345	1,33
75	0,3957	0,401	1,32
60	0,4489	0,447	0,42
45	0,4849	0,479	1,23
30	0,4930	0,483	2,07
15	0,4625	0,459	0,77
0	0,3946	0,434	9,08

Apesar dos valores baixos de desvio relativo entre os dados obtidos no presente trabalho e os de Gómez-Bueno (2010), os mesmos se devem à aplicação de distintos métodos de medição nos dois trabalhos. No presente trabalho, utilizou-se filmagem e pós-processamento de vídeos. Gómez-Bueno (2010) realizou a determinação da velocidade de ascensão usando sondas de impedância. Além da precisão na passagem da bolha pelo ponto exato do tubo analisado, os vídeos apresentam limitações relativas à qualidade e, principalmente, taxa de quadros por segundo, fazendo com que variações de milissegundos no tempo de passagem da bolha não fossem percebidos na análise.

Na horizontal, ou seja, na inclinação de 0°, apresenta-se o mais elevado valor de desvio relativo entre os dados devido ao comportamento da bolha. Com a tendência da bolha não se movimentar em líquido estagnado na horizontal, em virtude da ausência da força de empuxo, utilizou no presente trabalho a técnica de drenagem do líquido na extremidade aberta da tubulação (Taitel and Barnea, 1990). Com isso, foi observado o deslocamento da bolha formada no sentido contrário do escoamento (drenagem) do líquido. Contudo, Gómez-Bueno (2010) realizou medidas até a inclinação de 5° e extrapolou para a inclinação de 0°.

A Figura 2 apresenta uma comparação dos valores obtidos experimentalmente no presente trabalho com algumas correlações disponíveis na literatura, sendo a correlação de Weber *et al.* (1986) a que apresentou resultados mais próximos.

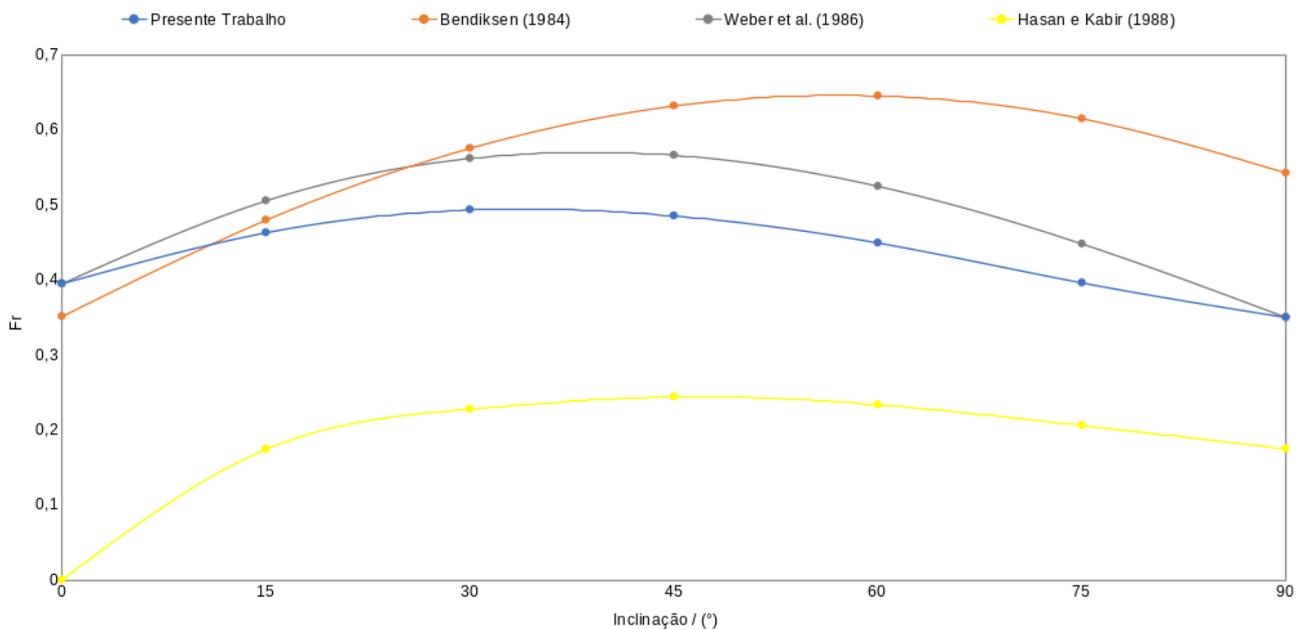


Figura 2. Comparação entre os dados experimentais obtidos no presente trabalho e os valores calculados com correlações da literatura.

4. CONCLUSÕES

Com a finalidade de adequar o aparato experimental para análise da velocidade da ascensão da bolha de gás escoando em líquido estagnado sobre a influência da inclinação do tubo, mostrou-se a partir dos resultados que o projeto e montagem das adequações foram satisfatórias. Além de obter os resultados experimentais, foi possível analisar a dinâmica da bolha e demais efeitos relevantes no fenômeno estudado.

Especificamente sobre os resultados, os valores de desvio relativo em relação aos dados da literatura nas inclinações de 15° a 90° foram satisfatórios. Ainda, mostrou-se uma margem de melhoria no processo experimental para a análise na inclinação horizontal para que o valor de desvio relativo se torne mais satisfatório como os demais.

Conclui-se que os objetivos propostos foram cumpridos e, além disso, melhorias foram propostas para realização em trabalhos futuros, tanto nas mesmas condições, como em condições diferentes, por exemplo, diferentes fluidos de trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — Brasil (Edital UTFPR/PROPPG n.º 04/2021 — PIBITI). Os autores também agradecem à UTFPR.

6. REFERÊNCIAS

- Alves, I.N., Shoham, O. and Taitel, Y., 1993. “Drift velocity of elongated bubbles in inclined pipes”. *Chemical Engineering Science*, Vol. 48, No. 17, pp. 3063–3070. DOI 10.1016/0009-2509(93)80172-M.
- Ando, A.V.S., 2021. *Desenvolvimento de um aparato experimental para determinação da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado*. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em engenharia mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR. URL <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25994>.
- Bendiksen, K.H., 1984. “An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes”. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 10, No. 4, pp. 467–483. DOI 10.1016/0301-9322(84)90057-0.
- Carew, P.S., Thomas, N.H. and Johnson, A.B., 1995. “A physically based correlation for the effects of power law rheology and inclination on slug bubble rise velocity”. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 21, No. 6, pp. 1091–1106. DOI 10.1016/0301-9322(95)00047-2.
- Cazarez-Candia, O. and Benítez-Centeno, O.C., 2020. “Comprehensive experimental study of liquid-slug length and Taylor-bubble velocity in slug flow”. *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 72, p. 101697. DOI 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101697.
- Cook, M. and Behnia, M., 2001. “Bubble motion during inclined intermittent flow”. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 22, No. 5, pp. 543–551. DOI 10.1016/S0142-727X(01)00113-8.

- Davies, R.M. and Taylor, G.I., 1950. “The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes”. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 200, No. 1062, pp. 375–390. DOI 10.1098/rspa.1950.0023.
- de Azevedo, M.B., Faccini, J.L.H. and Su, J., 2020. “Experimental study of single Taylor bubbles rising in vertical and slightly deviated circular tubes”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 116, p. 110109. DOI 10.1016/j.expthermflusci.2020.110109.
- Fagundes Netto, J.R., Fabre, J. and Peresson, L., 1999. “Shape of long bubbles in horizontal slug flow”. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 25, No. 6-7, pp. 1129–1160. DOI 10.1016/S0301-9322(99)00041-5.
- Gokcal, B., Al-Sarkhi, A.S. and Sarica, C., 2008. “Effects of high oil viscosity on drift velocity for upward inclined pipes”. In *All Days*. Society of Petroleum Engineers (SPE), Denver, Colorado, USA, pp. SPE-115342-MS. DOI 10.2118/115342-MS.
- Gómez-Bueno, L.G., 2010. *Estudo experimental de escoamentos líquido-gás intermitentes em tubulações inclinadas*. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. DOI 10.47749/T/UNICAMP.2010.771387. URL <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1612461>.
- Lima, L.E.M., 2011. *Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido*. Tese (doutorado em engenharia mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. DOI 10.47749/T/UNICAMP.2011.804225. URL <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1615845>.
- Livinus, A. and Verdin, P.G., 2021. “Experimental study of a single elongated bubble in liquid in under 10-degree upwardly inclined pipes”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 120, p. 110247. DOI 10.1016/j.expthermflusci.2020.110247.
- Lizarraga-Garcia, E., Buongiorno, J. and Bucci, M., 2016. “An analytical film drainage model and breakup criterion for Taylor bubbles in slug flow in inclined round pipes”. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 84, pp. 46–53. DOI 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.03.020.
- Maneri, C.C. and Zuber, N., 1974. “An experimental study of plane bubbles rising at inclination”. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, No. 5, pp. 623–645. DOI 10.1016/0301-9322(74)90022-6.
- Perron, A., Kiss, L.I. and Poncsák, S., 2006. “An experimental investigation of the motion of single bubbles under a slightly inclined surface”. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 32, No. 5, pp. 606–622. DOI 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.02.001.
- Rodrigues, R.L.P., Bertoldi, D., dos Santos, E.N., Schneider, F.A., Neto, M.A.M., da Silva, M.J. and Morales, R.E.M., 2019. “Experimental analysis of downward liquid-gas slug flow in slightly inclined pipes”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 103, pp. 222–233. DOI 10.1016/j.expthermflusci.2019.01.017.
- Shi, H., Holmes, J.A., Diaz, L.R., Durlofsky, L.J. and Aziz, K., 2005. “Drift-flux parameters for three-phase steady-state flow in wellbores”. *SPE Journal*, Vol. 10, No. 02, pp. 130–137. DOI 10.2118/89836-PA.
- Shoham, O., 2006. *Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes*. Society of Petroleum Engineers (SPE).
- Taitel, Y. and Barnea, D., 1990. “Two-phase slug flow”. In J.P. Hartnett and T.F. Irvine Jr., eds., *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, Vol. 20, pp. 83–132. DOI 10.1016/s0065-2717(08)70026-1.
- Tihon, J. and Ezeji, K., 2019. “Velocity of a large bubble rising in a stagnant liquid inside an inclined rectangular channel”. *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 11, p. 113301. DOI 10.1063/1.5123043.
- Vinhas, P.A.M., 2015. *Estudo do movimento da bolha de Taylor em coluna vertical e ligeiramente inclinável de líquido estagnado utilizando uma técnica de visualização*. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado em engenharia nuclear), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. URL <http://www.monografias.polu.ufrj.br/monografias/monopoli10013780.pdf>.
- Wallis, G.B., 1969. *One-dimensional two-phase flow*. McGraw-Hill.
- Weber, M.E., Alarie, A. and Ryan, M.E., 1986. “Velocities of extended bubbles in inclined tubes”. *Chemical Engineering Science*, Vol. 41, No. 9, pp. 2235–2240. DOI 10.1016/0009-2509(86)85073-4.
- Weisman, J. and Kang, S.Y., 1981. “Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines”. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 7, No. 3, pp. 271–291. DOI 10.1016/0301-9322(81)90022-7.
- Zukoski, E.E., 1966. “Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes”. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 25, No. 4, pp. 821–837. DOI 10.1017/s0022112066000442.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.