



CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM PADRÃO SLUG EM DUTOS VERTICAIS COM E SEM BOLHAS DISPERSAS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE IMAGENS

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF SLUG FLOW IN VERTICAL DUCTS WITH AND WITHOUT DISPERSED BUBBLES THROUGH IMAGE ANALYSIS

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL FLUJO DE SLUG EN CONDUCTOS VERTICALES CON Y SIN BURBUJAS DISPERSAS MEDIANTE ANÁLISIS DE IMÁGENES

 <https://doi.org/10.56238/levv17n57-085>

Data de submissão: 24/01/2026

Data de publicação: 24/02/2026

Cristiano Meneghini

Instituição: Universidade do Oeste de Santa Catarina

RESUMO

O escoamento bifásico em padrão *slug* é amplamente observado em aplicações industriais, especialmente em sistemas de produção e transporte de petróleo e gás. Nesse regime, a interação entre bolhas de Taylor e bolhas dispersas de menor escala influencia de maneira significativa a hidrodinâmica local, modificando o comportamento do filme líquido, a morfologia da interface e a estrutura da esteira. Neste estudo, realizou-se uma caracterização experimental detalhada do escoamento ar-água em um duto vertical, empregando filmagem em alta velocidade. A metodologia experimental incluiu filmagem em alta velocidade para análise qualitativa das interfaces. As imagens revelaram regiões de distribuição não uniforme das bolhas dispersas, bem como fenômenos de colisão, deformação e coalescência. Os resultados mostraram que a presença de bolhas de pequena escala altera de forma relevante o escoamento ao redor da bolha de Taylor, reduzindo a intensidade das recirculações na esteira e modificando o perfil de velocidade no filme líquido. Os resultados apresentados contribuem para o entendimento da hidrodinâmica do padrão *slug* e fornecem base experimental para a validação de modelos numéricos multifásicos.

Palavras-chave: Padrão *Slug*. Escoamento Bifásico. Bolha de Taylor.

ABSTRACT

Two-phase slug flow is widely observed in industrial applications, especially in oil and gas production and transportation systems. In this regime, the interaction between Taylor bubbles and smaller-scale dispersed bubbles significantly influences the local hydrodynamics, modifying the liquid film behavior, interface morphology, and wake structure. In this study, a detailed experimental characterization of air-water flow in a vertical duct was performed using high-speed filming. The experimental methodology included high-speed filming for qualitative analysis of the interfaces. The images revealed regions of non-uniform distribution of dispersed bubbles, as well as collision, deformation, and coalescence phenomena. The results showed that the presence of small-scale bubbles significantly alters the flow around the Taylor bubble, reducing the intensity of recirculations in the wake and modifying the velocity profile in the liquid film. The results presented contribute to the

understanding of the hydrodynamics of the slug pattern and provide an experimental basis for the validation of multiphase numerical models.

Keywords: Slug Pattern. Two-Phase Flow. Taylor Bubble.

RESUMEN

El flujo de *slug* bifásico se observa ampliamente en aplicaciones industriales, especialmente en sistemas de producción y transporte de petróleo y gas. En este régimen, la interacción entre las burbujas de Taylor y las burbujas dispersas de menor escala influye significativamente en la hidrodinámica local, modificando el comportamiento de la película líquida, la morfología de la interfaz y la estructura de la estela. En este estudio, se realizó una caracterización experimental detallada del flujo aire-agua en un conducto vertical mediante filmación de alta velocidad. La metodología experimental incluyó filmación de alta velocidad para el análisis cualitativo de las interfaces. Las imágenes revelaron regiones con distribución no uniforme de burbujas dispersas, así como fenómenos de colisión, deformación y coalescencia. Los resultados mostraron que la presencia de burbujas de menor escala altera significativamente el flujo alrededor de la burbuja de Taylor, reduciendo la intensidad de las recirculaciones en la estela y modificando el perfil de velocidad en la película líquida. Los resultados presentados contribuyen a la comprensión de la hidrodinámica del patrón de *slug* y proporcionan una base experimental para la validación de modelos numéricos multifásicos.

Palabras clave: Patrón de *Slug*. Flujo Bifásico. Burbuja de Taylor.

1 INTRODUÇÃO

Escoamento bifásico é um assunto que apresenta uma grande diversidade e desafios na engenharia atual. No meio industrial, uma parte significativa dos processos envolve esse tipo de escoamento. Podemos encontrar escoamentos multifásicos em inúmeras áreas da engenharia. As principais áreas nas quais, reconhecidamente, surgem a maioria das aplicações envolvendo escoamentos multifásicos são a indústria química, de energia nuclear e de conversão de energia em geral, de refrigeração, e na indústria de petróleo e gás. Destaque é dado para esta última área da engenharia, onde o escoamento multifásico se encontra, quiçá, com maior frequência que o escoamento de uma única fase. O padrão de escoamento *slug*, foco deste trabalho, apresenta grande ocorrência em dutos de elevação e transporte de óleo e gás. Um estudo realizado pela Universidade de Calgary (Williams, 1994) demonstrou que aproximadamente 41% dos poços apresentaram este padrão de escoamento nos dutos de produção.

Outro fator importante dos sistemas de transporte de óleo e gás, que vem motivando o estudo, especificamente, do escoamento em padrão *slug*, é a corrosão interna dos dutos, na presença de substâncias como CO_2 e H_2S , que é acelerada na ocorrência de padrão *slug*. Estes compostos reagem quimicamente com a água presente no escoamento, formando os ácidos carbônico e sulfídrico, respectivamente, que atacam as paredes do duto. Este processo é significativamente acelerado no caso de escoamentos intermitentes devido, fundamentalmente, às condições de mistura promovidas por este tipo de escoamento, e as tensões cisalhantes oscilatórias nas paredes do duto.

Além disso, a ocorrência de escoamentos em padrão bifásico na produção de petróleo afeta o funcionamento dos sistemas de controle de produção e de processamento primário. Embora em muitos casos este não possa ser evitado, um conhecimento mais aprofundado dos parâmetros do escoamento é de fundamental importância para o projeto destes sistemas, na presença deste tipo de escoamento.

Para o desenvolvimento deste trabalho o objetivo principal é determinar as principais propriedades dinâmicas de um escoamento bifásico em duto vertical ascendente em padrão *slug*, para fluido estagnado e fluxo co-corrente na presença de bolhas dispersas, utilizando câmera de alta velocidade. A visualização com câmera de alta velocidade, deverá ser utilizada para analisar qualitativamente o escoamento, particularmente, a interação das bolhas dispersas com as bolhas de Taylor. Além disso, pode ser controlado o tamanho das bolhas de Taylor, que são injetadas separadamente, na corrente de líquido com bolhas dispersas. Utilizando câmera de alta velocidade, obter-se-ão visualizações em diferentes instantes de tempo da bolha de Taylor interagindo com as bolhas dispersas. A intenção desse estudo qualitativo é de entender melhor toda a fenomenologia que ocorre ao redor de uma bolha de Taylor interagindo com as bolhas dispersas, além de entender melhor o fenômeno de coalescência entre bolhas dispersas na bolha de Taylor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

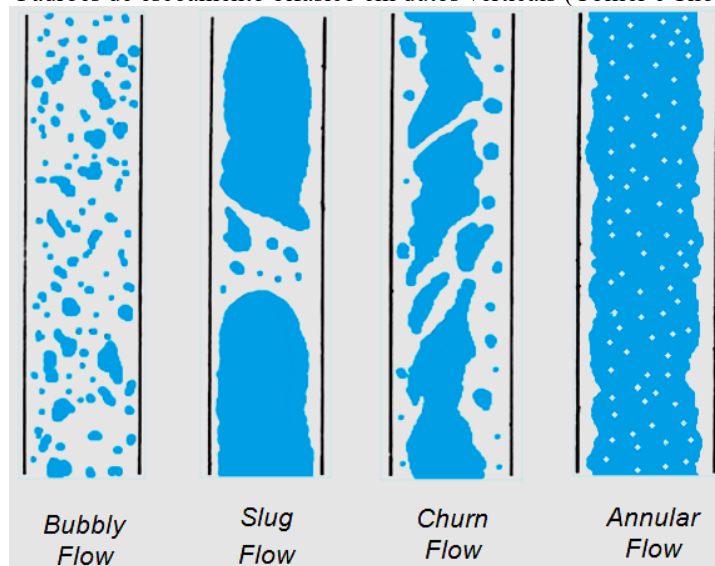
De forma geral, os escoamentos bifásicos de líquido-gás podem ser identificados em duas grandes divisões, do ponto de vista da morfologia das fases presentes: os escoamentos de fases dispersas (*dispersed flows*) e escoamentos de fases separadas (*separated flows*). O escoamento de fases dispersas é constituído de partículas, gotas ou bolhas, presentes em uma fase líquida contínua. Exemplos deste tipo de morfologias encontradas em escoamentos, podem ser os padrões tipo névoa (*mist*) ou padrão de bolhas (*bubbly*). Por outro lado, o escoamento de fases separadas, apresenta duas ou mais fases de fluidos diferentes separados por uma interface, como por exemplo, os padrões estratificados. Entretanto, padrões como o *slug* ou anular com entranhamento, não podem ser enquadrados nesta classificação simples, pois ambas as fases (líquido e gás) se apresentam tanto na forma contínua como dispersa, no escoamento. Este fato representa um importante desafio no estudo do escoamento nestes padrões, tanto na modelagem, como na sua caracterização experimental.

Uma das principais motivações para o desenvolvimento deste trabalho é a obtenção de dados experimentais que servirão de subsídio para a implementação e validação de modelos numéricos de escoamentos bifásicos utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Por outro lado, na caracterização das bolhas dispersas na região do *slug* de líquido, as interfaces são de pequena escala, não sendo geralmente factível sua captura com malhas computacionais praticáveis. Assim, modelos baseados em médias devem ser utilizados para atingir tal objetivo. De forma geral, a modelagem multidimensional de escoamentos apresentando diferentes escalas de interface no mesmo domínio de cálculo, se apresenta como um desafio. Assim, a geração de dados locais de escoamento, como perfis de velocidade, é fundamental para viabilizar a implementação e validação deste tipo de modelos.

Os padrões de escoamentos bifásicos formados em dutos circulares verticais serão descritos nessa seção, de forma a contextualizar o padrão *slug*, foco deste trabalho. Em seguida, uma seção específica será dedicada à descrição mais detalhada deste padrão de escoamento, procurando destacar as diferenças entre o escoamento de bolhas de Taylor e o escoamento em padrão *slug* ou golfadas, que, normalmente, inclui bolhas dispersas e apresentam um comportamento mais caótico. No caso de dutos horizontais, uma descrição dos padrões de escoamento líquido-gás pode ser encontrada em Carey (1992), porém, o seu estudo está além do escopo deste trabalho.

Para uma mistura líquido-gás em dutos verticais, as fases poderão apresentar diversas morfologias no escoamento. Uma breve ilustração qualitativa dos padrões de escoamento apresentados por Collier e Thome (1994), pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Padrões de escoamento bifásico em dutos verticais (Collier e Thome, 1994).



Fonte: Autor.

No padrão de escoamento em bolhas (*Bubbly Flow*), a fase gás encontra-se na forma de bolhas dispersas presentes em uma fase líquida contínua. As bolhas dispersas na maioria das vezes apresentam formato esférico ou distorcido, dependendo das condições do escoamento, tais como velocidade superficial das fases, e tamanho e distribuição das bolhas no meio. Em termos de modelagem numérica, as bolhas dispersas são tratadas como sendo a fase dispersa e o líquido a fase contínua.

Aumentando-se a vazão da fase gás, surge o padrão de escoamento *slug* (*Slug Flow*), sendo este caracterizado por apresentar uma grande bolha de gás que, devido às restrições impostas pelas paredes do duto, adota uma forma alongada, chamada bolha de Taylor, e seguida por um pistão de líquido. A soma do comprimento da bolha de Taylor e do comprimento do *slug* de líquido é chamada de unidade ou célula de *slug*. Na maioria das vezes, a bolha de Taylor ocupa quase toda a área da seção transversal do duto. Na região que separa duas bolhas de Taylor consecutivas (*slug*), geralmente pequenas bolhas dispersas são observadas.

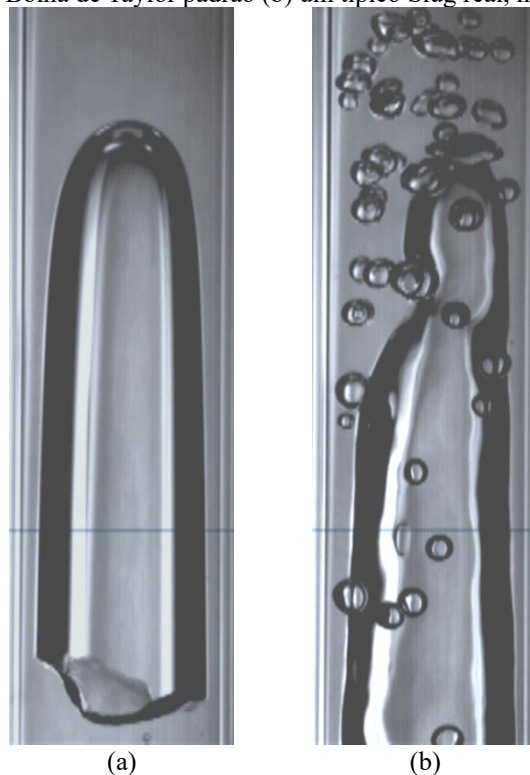
Aumentando ainda mais a vazão de gás, surge o padrão de escoamento agitado (*Churn Flow*), onde as bolhas de Taylor se deformam, ganham aceleração influenciadas pelo aumento da vazão de gás, e se distorcem a ponto de perder a forma característica, em função do aumento da turbulência no escoamento. Resumidamente, pode-se dizer que a fase gasosa encontra-se de um modo caótico na fase líquida, não apresentando uma morfologia de fases definida.

Por fim, o escoamento anular (*Annular Flow*), caracterizado pela presença de uma fase gasosa que escoar no centro do duto, contendo gotas de líquido entranhadas (processo que ocorre devido ao cisalhamento da fase gás sobre as cristas das pequenas ondas do filme de líquido que se formam na interface do filme de líquido). Já a fase líquida, escoar paralelamente de maneira a formar uma fina camada ondulada, que fica colapsada junto às paredes do duto, podendo conter pequenas bolhas de gás.

O padrão de escoamento *slug* é uma das principais morfologias de fases líquido-gás, que se apresenta para uma ampla faixa de velocidades superficiais de líquido e gás. Para dutos verticais, esse padrão é caracterizado pela presença de uma bolha alongada, chamada bolha de Taylor, seguido de um pistão de líquido contendo bolhas dispersas. A formação de bolhas dispersas em tal padrão de escoamento, não ocorre quando o diâmetro do duto é muito pequeno, ou as velocidades superficiais das fases são muito pequenas, sendo esse um facilitador da coalescência das pequenas bolhas dispersas, nas grandes bolhas de Taylor. A Figura 2 (a) ilustra a imagem de uma bolha de Taylor em situação "comportada" no meio líquido, e na Figura 2 (b) a fotografia de um típico padrão *slug* real, onde bolhas de pequena escala estão presentes no meio líquido, afetando significativamente a forma da bolha de Taylor, assim como a estrutura do escoamento ao redor da mesma. As imagens foram obtidas a partir de visualização com câmera de alta velocidade, com e sem a presença de bolhas dispersas, de uma bolha de Taylor individual.

Embora existam diversos trabalhos na literatura apresentando medidas e correlações para parâmetros globais (como perda de carga e fração de vazio) para o padrão *slug* real, a caracterização teórica e experimental de parâmetros locais (como perfis de velocidades) deste padrão de escoamento é, normalmente tratada, considerando o escoamento ao redor de bolhas de Taylor sem a presença de bolhas dispersas.

Figura 2 - Imagens de (a) Bolha de Taylor padrão (b) um típico Slug real, na presença de bolhas dispersas.



Fonte: Autor.

Entretanto, na maioria das aplicações reais a ocorrência de bolhas dispersas é comum. O padrão *slug* origina-se a partir da coalescência de bolhas dispersas, levando à formação de bolhas de Taylor. Contudo, uma porcentagem do gás ainda escoar na corrente multifásica na forma de bolhas dispersas. Elas interagem com a bolha de Taylor, e podem modificar parâmetros fundamentais do escoamento, como velocidade terminal da bolha e distribuição de tensão cisalhante na parede. Esses impactam diretamente em parâmetros de engenharia, como a distribuição de fração de vazio, perda de carga e taxas de corrosão, sendo este último associado à presença de CO₂, ou H₂S. No entanto, a maioria dos trabalhos disponíveis na literatura que procuram caracterizar os campos de velocidades ao redor das bolhas de Taylor, apresentam resultados para um padrão *slug* "comportado". Geralmente obtidos através de um baixo N_f (número de viscosidade inversa, $N_f = \sqrt{(\rho^2 g D^3) / \mu^2}$) ou em dutos de pequeno diâmetro, no qual as bolhas de Taylor escoam sem a presença de bolhas dispersas e ainda, as interfaces são bem comportadas, não apresentando oscilações e mantendo a forma das bolhas uniformes, praticamente inalterada ao longo do seu escoamento no duto.

Diversos trabalhos na literatura apresentam estudos detalhados do escoamento ao redor de uma bolha de Taylor, avaliando o campo de velocidades ao redor da mesma. Bugg e Saad (2002) aplicaram a técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas - PIV (do inglês, *Particle Image Velocimetry*) para obter o campo de velocidade no nariz, filme de líquido e na esteira da bolha de Taylor, para condições de líquido estagnado em duto vertical.

Como o padrão *slug* apresenta elevada complexidade, torna-se um verdadeiro desafio escolher e aplicar técnicas de medição confiáveis e robustas. Assim, num escoamento *slug*, diversas abordagens podem ser adotadas com o intuito de caracterizar o escoamento ao redor da bolha de Taylor. A proposta para este trabalho de dissertação, consiste em caracterizar o padrão de escoamento *slug*, focando na estrutura do escoamento ao redor da bolha de Taylor e no pistão de líquido, por meio de técnicas ópticas, considerando a presença de uma fase dispersa (bolhas entranhadas) no *slug* de líquido.

Moissis e Griffith (1962) desenvolveram um estudo envolvendo o padrão *slug*, especificamente, sobre os efeitos que a região da esteira influencia nas bolhas subsequentes do escoamento. Os autores obtiveram resultados acerca dos perfis de velocidades, em várias posições axiais na região da esteira. Eles obtiveram duas importantes observações, onde a velocidade da bolha é afetada pelo perfil de velocidades no líquido acima do nariz, e que a "bolha secundária" (*trailing bubble*) acelera com o decréscimo da distância entre duas bolhas de Taylor consecutivas.

A formação do filme de líquido é dada, pela mudança na direção do escoamento logo acima do nariz da bolha devido ao deslocamento do líquido pela bolha de Taylor e a restrição imposta pelas paredes do duto, tendo como principal consequência a formação de um escoamento reverso, com intensas recirculações e elevado gradiente de velocidade na esteira da bolha de Taylor. De Jesus et al. (1995) obtiveram informações qualitativas e quantitativas do escoamento ao redor da bolha de Taylor,

onde concluiu que os perfis de velocidade no filme de líquido para bolhas de comprimentos diferentes são similares. Segundo o autor, a fase líquida move-se de maneira mais rápida na interface da bolha do que perto da parede, o que prova uma força cisalhante desprezível existente na interface líquido-gás.

O líquido que escoar na região do filme, entra na região da esteira da bolha de Taylor sofrendo um escoamento reverso, ocasionado pelo gradiente de pressão adverso, resultando numa intensa formação de vórtices, principal característica dessa região. O padrão de escoamento e tamanho da região de recirculação depende fortemente, das propriedades do líquido e do diâmetro do duto.

Num escoamento real de padrão *slug*, pequenas bolhas de gás na região da esteira enfrentam inúmeros fenômenos de colisão e coalescência entre si e com a cauda da bolha de Taylor, elevando assim os níveis de turbulência. Diante da complexidade do fenômeno, e até então das limitações das técnicas disponíveis, a região da esteira por muito tempo foi estudada apenas de maneira qualitativa. Recentemente, alguns autores apresentaram resultados quantitativos (Nogueira et al., 2006; Bugg e Saad, 2002; van Hout et al., 2002), em situações comportadas de escoamento, o que ainda é muito distante de um padrão *slug* real.

3 METODOLOGIA

A seguir, será discutida a metodologia envolvida na busca dos resultados propostos, bem como as principais técnicas de medição usadas no desenvolvimento desta dissertação, juntamente com a descrição detalhada do aparato experimental, e sua funcionalidade. Utilizou-se uma câmera de alta velocidade para registrar, de forma não intrusiva, o comportamento dinâmico das bolhas de Taylor e da fase líquida ao seu redor, bem como a interação com as bolhas dispersas. A aquisição sequencial de imagens em alta taxa de quadros permitiu realizar uma análise detalhada das estruturas de escoamento no nariz, filme e esteira da bolha. Os aspectos construtivos da bancada, os critérios de seleção dos equipamentos, o funcionamento do sistema de sincronização e a descrição geral da instrumentação utilizada serão apresentados ao longo deste capítulo.

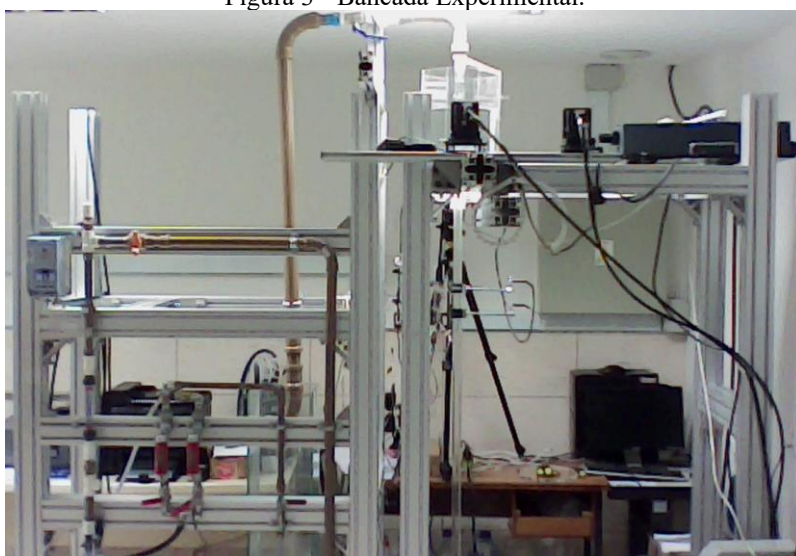
Apresenta-se nesta seção, uma breve descrição quanto à funcionalidade do aparato experimental, a fim de obter os objetivos traçados inicialmente. Uma das primeiras etapas do trabalho foi a elaboração do projeto e a construção da bancada experimental. Para tal propósito, utilizou-se a estrutura já disponível no Laboratório de Medição em Escoamentos Multifásicos do SINMEC, localizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. A Figura 3 ilustra a bancada através de uma fotografia do local. No aparato é possível obter diversos padrões de escoamentos, entre eles, o *bubbly*, *slug*, *churn* e *annular*, através da combinação das vazões de cada fase, de acordo com o mapa de padrões de escoamento.

Na Figura 4, é possível observar o circuito hidráulico, bem como os principais instrumentos de medição e controle, por meio de um desenho esquemático. Dentre eles, está o reservatório de fluido (com capacidade de 35 litros), uma bomba centrífuga com rotor e carcaça em aço inoxidável AISI 304 (modelo BL10, potência de 1 HP e capacidade de operação entre 0,5 e 7 m³/h), transmissores de pressão e temperatura, válvulas solenóides, etc. O uso de uma bomba construída em aço inoxidável é para evitar qualquer tipo de contaminação que uma bomba comum poderia causar ao fluido, ocasionado pelo contato com peças de metal possivelmente oxidadas.

O fluido de trabalho é conduzido para a seção de teste através de dutos e mangueiras convencionais. A vazão mássica da fase líquida (água destilada), que passa pela seção de teste, é controlada por um conversor de frequência (modelo WEG CFW), que regula a rotação da bomba, permitindo assim obter uma faixa de velocidades superficiais da fase líquida.

Um rotâmetro de água instalado posteriormente à bomba, fornece a vazão em l/h da fase líquida. Tal rotâmetro (Modelo SED 750, capacidade de operação entre 60 e 600 l/h), possui certificado de calibração de fábrica, e apresenta incerteza de $\pm 2\%$ no fundo de escala, segundo o fabricante.

Figura 3 - Bancada Experimental.



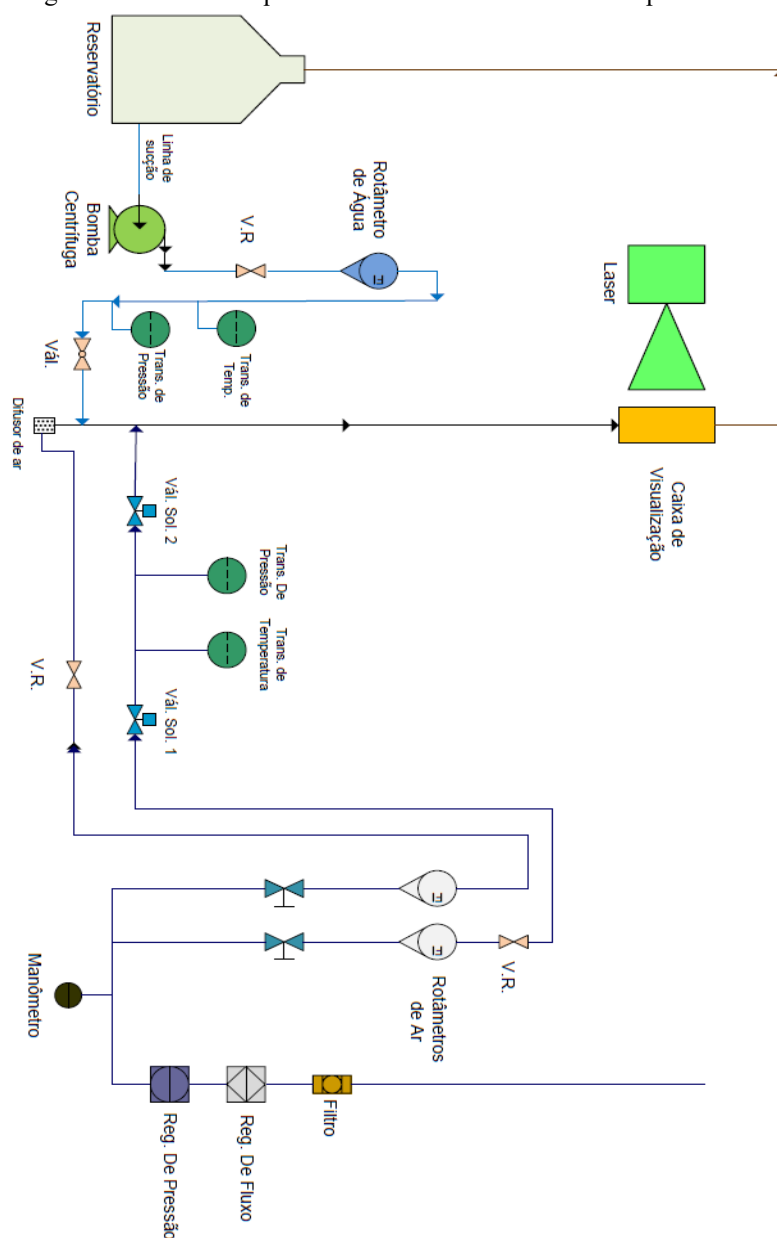
Fonte: Autor.

Para o controle e medição da pressão no escoamento da fase líquida, foi instalado um transmissor de pressão do tipo piezo-resistivo a montante da seção de teste. Foi utilizado um transmissor de pressão do tipo *Warme* WTPI 2500 com indicação local, construído em aço inoxidável, possuindo certificado de calibração de fábrica, e sua incerteza segundo o fabricante é de $\pm 0,25\%$.

Para a verificação da variação da temperatura da fase líquida, foi instalado um transmissor de temperatura no aparato experimental. Como não é o interesse estudar o campo de temperaturas do escoamento bifásico ar-água, foram utilizados transmissores de temperatura em ambas as fases apenas para controle desta variável, uma vez que a temperatura do fluido de trabalho pode ser afetada pela

bomba centrífuga, devido ao atrito viscoso, elevando-se com seu uso contínuo. A temperatura foi medida utilizando um transmissor de temperatura (modelo Warme WTTI 4400 tipo PT 100), calibrado de fábrica para faixas de operação de 0 até 60°C. A variação máxima de temperatura verificada em todos os experimentos foi de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, o que praticamente não afetou as propriedades da fase líquida. A temperatura no ambiente foi controlada em aproximadamente 22°C durante os experimentos. A temperatura da fase líquida teve registros médios de 23°C, enquanto que a fase gasosa teve registro médio de 22°C.

Figura 4 - Desenho esquemático do circuito da bancada experimental.

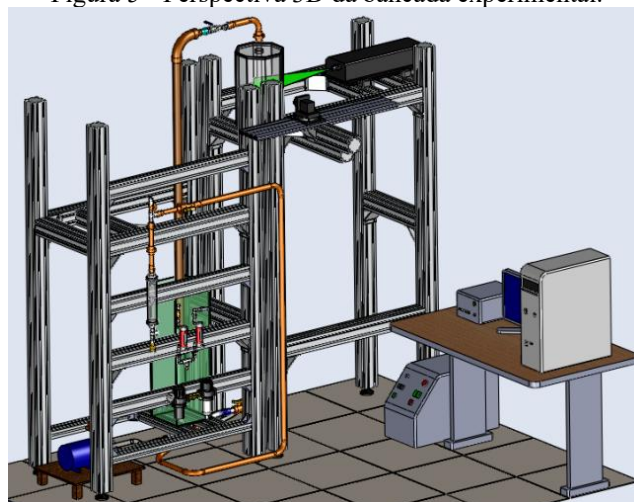


Fonte: Autor.

A Figura 5 ilustra a bancada num desenho em três dimensões. Um detalhe do sistema de geração das bolhas dispersas e de injeção das bolhas de Taylor, pode ser visto nas Figuras 6 (a) e (b). Na injeção das bolhas dispersas, Figura 6 (a), a fase gasosa é conduzida até o duto vertical, através de mangueiras

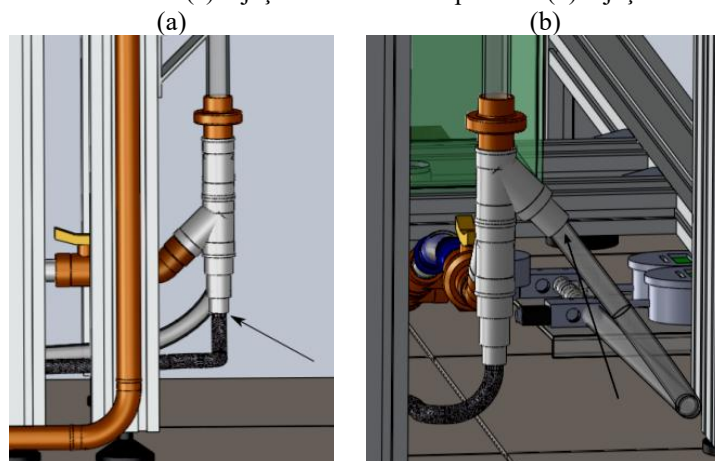
convencionais. No final desta mangueira foi instalado um difusor de ar (material poroso) responsável pela formação das pequenas bolhas dispersas, que irão entrar na coluna de líquido. A bolha de Taylor é injetada por um sistema formado por um duto de volume conhecido, entre duas válvulas acionadas eletricamente, de forma que o volume da bolha possa ser controlado através da pressão e temperatura do ar confinado neste volume. Um sistema eletrônico controla e comanda os ciclos de injeção das bolhas de Taylor, bem como o comando de abertura e fechamento das válvulas. Através de um potenciômetro instalado no sistema eletrônico, ajusta-se a frequência ou o intervalo de tempo de produção das bolhas.

Figura 5 - Perspectiva 3D da bancada experimental.



Fonte: Autor.

Figura 6 - Detalhes da bancada: (a) injeção das bolhas dispersas e (b) injeção das bolhas de Taylor.



Fonte: Autor.

Depois de sair do reservatório e passar pela bomba, a fase líquida circula em direção à seção de teste em uma tubulação de PVC, com diâmetro interno de 29 mm. Nessa mesma seção da bancada, um transmissor de pressão e um transmissor de temperatura, descritos anteriormente, medem em tempo real a pressão e temperatura respectivamente. A seção de teste principal foi construída a partir de um duto em acrílico, com seção transversal de 26,2 mm de diâmetro médio interno. Tal tubulação foi

instalada verticalmente, com 2 metros de altura, sendo o local de visualização a 1,9 metros do ponto de injeção das bolhas de Taylor, resultando em $72D$ de comprimento até a seção de teste onde são realizadas as medições dos campos de velocidade. Bugg e Saad (2002), utilizaram em seu trabalho $74D$ de comprimento de desenvolvimento para o estudo de bolhas de Taylor.

Além disso, a bancada foi projetada de forma a viabilizar investigações detalhadas do escoamento de bolhas de Taylor na presença de bolhas dispersas, com a utilização da técnica de PIV (*Particle Image Velocimetry*), permitindo a obtenção de campos médios de velocidade em distintas regiões do escoamento e possibilitando uma caracterização mais abrangente da hidrodinâmica associada ao padrão *slug*.

4 RESULTADOS

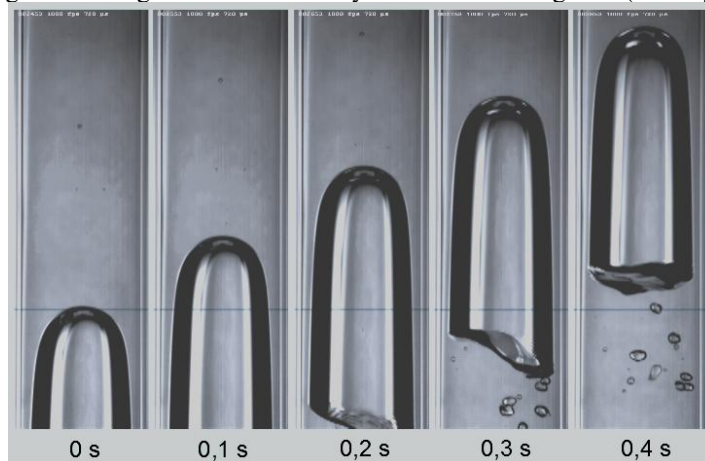
Nesta seção, apresentam-se resultados qualitativos, a partir da análise de imagens sequenciais obtidas do escoamento em padrão *slug*, para diferentes velocidades superficiais da fase líquida e gasosa, adquiridas com auxílio de câmera de alta velocidade. Nas figuras apresentadas são exibidos os instantes de tempo, em segundos, de cada imagem disposta na sequência.

A Figura 7 mostra uma sequência de imagens da bolha de Taylor em fluido estagnado, para diferentes intervalos de tempo, dando ênfase ao comportamento uniforme do nariz, principalmente, ao longo do eixo vertical. Para baixos números de *Eötvös* (Eo), o nariz apresenta tendência de formato semiesférico, indicando que a velocidade terminal foi atingida. Esse efeito é governado pela tensão superficial. Já a cauda da bolha não consegue manter um formato constante, pois abaixo dela está a região da esteira, que é marcada por intensa recirculação da fase líquida como descrito por diversos autores (Nogueira et al. 2006, Campos et al. 2003, Bugg e Saad 2002), o que instabiliza a forma da cauda, para estas situações, onde N_f é elevado. A não uniformidade da cauda, pode ser explicada pelo elevado número da viscosidade inversa ($N_f \approx 13235$ para a Figura 7). Nogueira et al (2006) observaram que a cauda da bolha permanece plana ao longo de sua ascensão em dutos verticais, nos casos onde $N_f = 200$. Já para $N_f = 8078$, os autores encontraram uma cauda instável e oscilatória, como também observado no presente estudo.

No entanto, quando as bolhas de Taylor escoam em fluxo co-corrente, nota-se que o nariz da bolha assume um formato mais agudo (com menor curvatura), como observado na Figura 8. Tal efeito é explicado pela diminuição da velocidade relativa entre a fase líquida e a bolha de Taylor, na ponta da bolha, que, no caso de escoamento laminar, é ainda menor, pelo fato do perfil ser parabólico. Assim, a pressão na ponta da bolha é menor que no caso de fluido estagnado, e a tensão superficial age diminuindo o raio de curvatura.

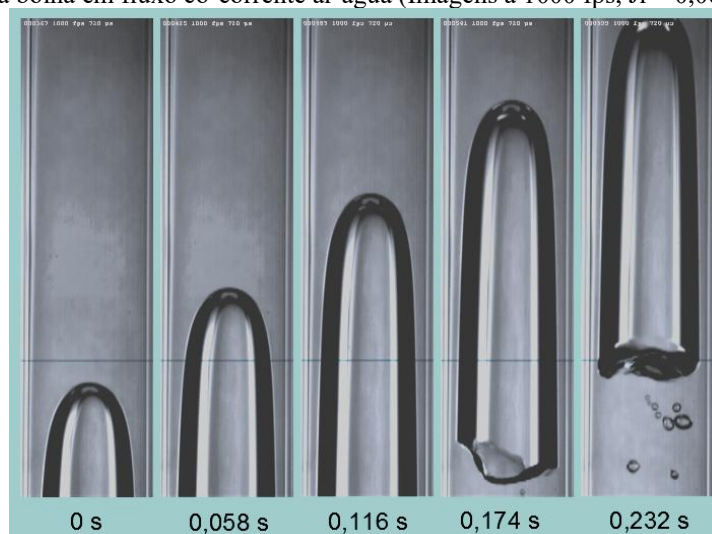
Nas figuras a seguir, J_{gd} refere-se à velocidade superficial das bolhas dispersas apenas, lembrando que, nos estudos realizados, a bolha de Taylor é injetada separadamente em um escoamento de bolhas dispersas.

Figura 7 - Imagens da Bolha de Taylor em fluido estagnado (1000 fps).



Fonte: Autor.

Figura 8 - Imagens da bolha em fluxo co-corrente ar-água (Imagens a 1000 fps, $J_l = 0,0644$ m/s e $J_{gd} = 0$ m/s).



Fonte: Autor.

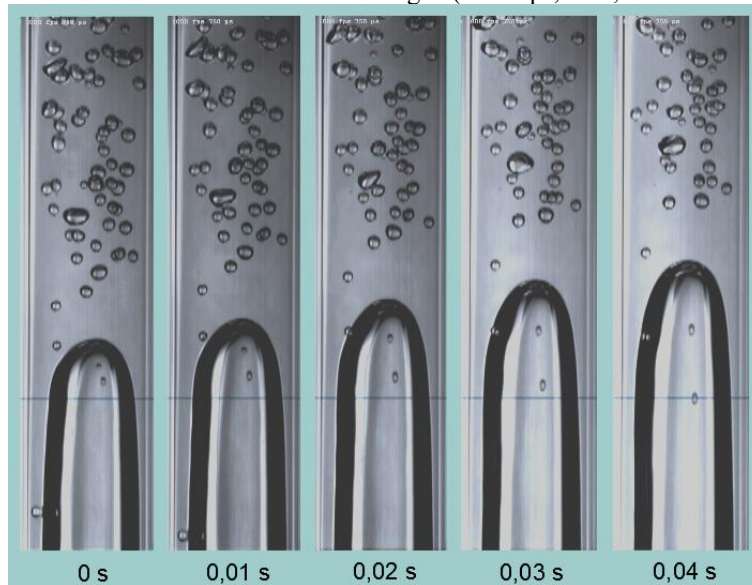
Quando a bolha de Taylor encontra-se num escoamento de bolhas dispersas, a morfologia da interface entre a bolha de Taylor e a fase líquida se altera significativamente, devido à intensa interação entre a fase de pequena escala (bolhas dispersas) com a fase de grande escala (bolha de Taylor). Na Figura 9, pode-se observar uma sequência de imagens de uma bolha de Taylor, em fluxo co-corrente na presença de bolhas dispersas, para um $J_l = 0,0644$ m/s e $J_{gd} = 0,0155$ m/s. Nota-se que a distribuição da fase de pequena escala apresenta-se relativamente homogênea, com bolhas de tamanho uniforme e predominantemente esféricas, excetuando-se alguns casos em que assumem formato elíptico em decorrência de colisões e interações hidrodinâmicas entre as próprias bolhas dispersas.

A ocorrência de coalescência entre essas bolhas também é observada, fenômeno amplamente descrito na literatura de escoamentos bifásicos verticais (Pinto et al., 2000; Campos et al., 2006). Além disso, verifica-se uma região de menor concentração de bolhas dispersas imediatamente acima do nariz da bolha de Taylor, estendendo-se por aproximadamente $0,5D$. Esse comportamento está associado ao aumento local da velocidade do líquido provocado pelo deslocamento da fase contínua na vizinhança da interface da bolha, mecanismo consistente com estudos clássicos da estrutura do escoamento no nariz (Brown, 1965; van Hout et al., 2002).

Observa-se também que parte das bolhas dispersas é capturada pelo filme de líquido que circunda a bolha de Taylor, modificando o escoamento local e influenciando o perfil de velocidade do filme. Tal efeito já foi relatado por diversos autores que investigaram filmes anulares e interação entre escalas de interface em escoamentos *slug* (Kawaji et al., 1997; Nogueira et al., 2006). Essas alterações tornam-se ainda mais evidentes quando técnicas ópticas, como a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), são empregadas para quantificar gradientes de velocidade e recirculações na região do filme.

No entanto, quando a fração de gás em fase dispersa aumenta, o comportamento do nariz da bolha visivelmente torna-se caótico, como visto na Figura 10. O contato das bolhas dispersas com a bolha torna-se mais intenso, contrário ao que foi visto no caso anterior. Observa-se também na Figura 10, que o nariz da bolha desloca-se completamente para o lado direito do duto, tomando uma forma assimétrica. Nessas condições, a bolha ganha aceleração, ocasionando um aumento significativo na velocidade terminal da bolha.

Figura 9 - Imagens da bolha em fluxo co-corrente ar-água (1000 fps, $Jl=0,0644$ m/s e $Jgd = 0,0155$ m/s).



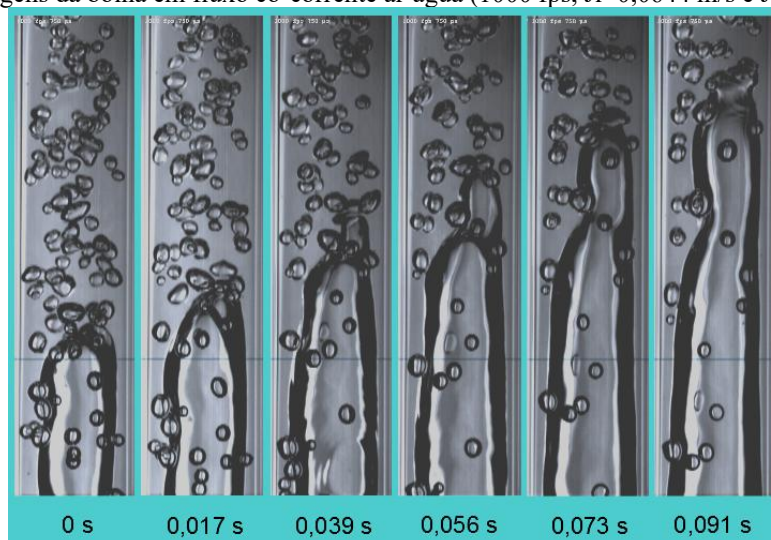
Fonte: Autor.

Outro importante fenômeno observado, é a coalescência das bolhas dispersas com a própria bolha de Taylor. As Figuras 11 e 12 ilustram o fenômeno em questão, através de imagens sequenciais.

Na Figura 11 a bolha de pequena escala coalesce aproximadamente na metade da bolha de Taylor. A propagação das ondas formadas na interface, após a coalescência, está claramente visível nas imagens. Esse fenômeno, pode interferir no desenvolvimento do perfil no filme de líquido, já que a hipótese de um filme plenamente desenvolvido a partir de um determinado comprimento do filme é muito utilizada em modelos de escoamento de bolhas de Taylor. Na Figura 12, observa-se que as bolhas dispersas podem coalescer próximo à cauda da bolha. Não foi notada, durante as inúmeras aquisições de imagens sequenciais, a coalescência de bolhas dispersas na região do nariz da bolha, ou em regiões próximas desta.

Nota-se, na Figura 12, que existe uma grande concentração de bolhas dispersas logo abaixo da cauda, em uma região aproximadamente $1D$. Essas bolhas dispersas ficam recirculando e colidindo constantemente na cauda da bolha, algumas chegando a coalescer na cauda, enquanto outras se desprendem da bolha de Taylor e vice-versa. As bolhas dispersas que ficam no centro do duto na região da esteira, entram a todo instante na zona de recirculação, característica principal da esteira.

Figura 10 - Imagens da bolha em fluxo co-corrente ar-água (1000 fps, $Jl=0,0644$ m/s e $Jgd = 0,0309$ m/s).



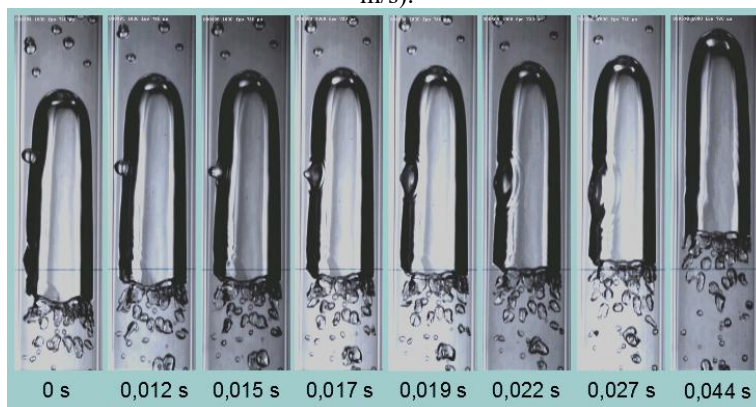
Fonte: Autor.

Observou-se também o desprendimento de bolhas de pequena escala da cauda da bolha de Taylor, juntando-se com o escoamento de bolhas dispersas na região da esteira. Como observado na Figura 13, algumas bolhas dispersas escoam no filme de líquido.

Ainda, quando as bolhas dispersas chegam na cauda da bolha de Taylor, as mesmas provocam uma distorção no formato da cauda, ocasionado pelo arraste que a bolha dispersa causa pelo contato com a bolha de Taylor. Essa distorção na cauda, acaba na maioria das vezes, ajudando no processo de quebra da bolha de Taylor em pequenas bolhas dispersas. Kockx et al. (2005) apresentaram uma discussão detalhada deste processo de desprendimento que acontece devido à interação do filme de líquido com a cauda da bolha, mesmo sem presença de bolhas dispersas. Entretanto, o que se observa

aqui é que a presença de bolhas dispersas no filme de líquido, pode ajudar na instabilidade da interface da bolha de Taylor, que leva ao entranhamento de bolhas dispersas (Figura 13).

Figura 11 - Coalescência de uma bolha dispersa e a bolha de grande escala (1000 fps, $Jl = 0,0644$ m/s e $Jgd = 0,0093$ m/s).



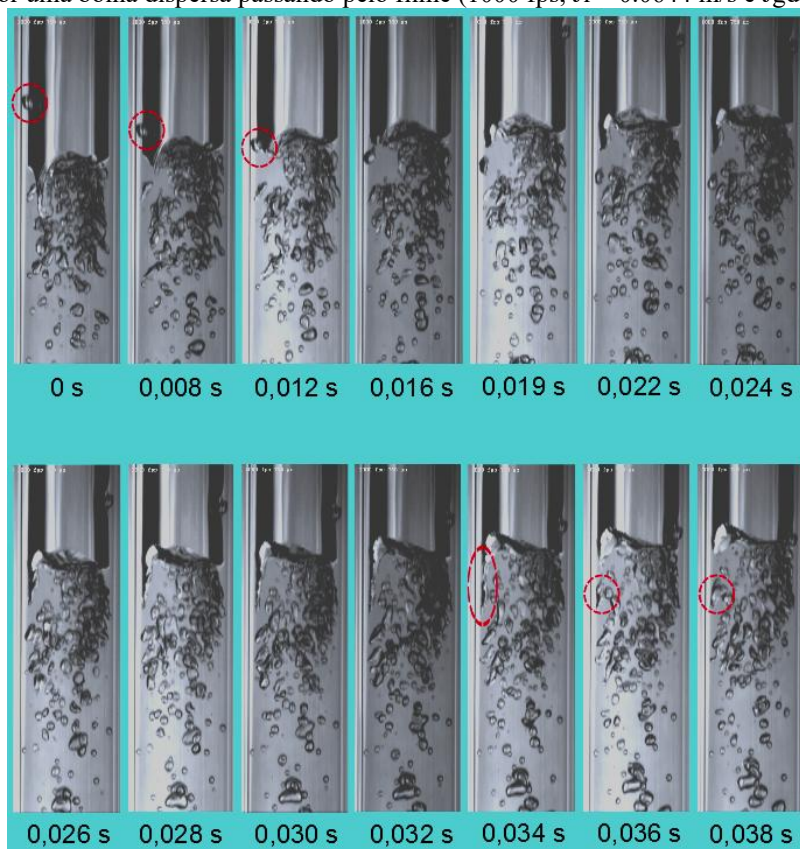
Fonte: Autor.

Figura 12 - Coalescência de uma bolha dispersa com a bolha de Taylor na região perto da cauda (1000 fps, $Jl = 0,0644$ m/s e $Jgd = 0,0093$ m/s).



Fonte: Autor.

Figura 13 - Desprendimento de uma bolha de pequena escala da bolha de Taylor na região perto da cauda da bolha ocasionado por uma bolha dispersa passando pelo filme (1000 fps, $Jl = 0.0644$ m/s e $Jgd = 0.0155$ m/s).



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente estudo forneceu uma caracterização detalhada do escoamento bifásico em padrão *slug* em um duto vertical, considerando simultaneamente a presença de bolhas de Taylor e de bolhas dispersas de pequena escala. Os resultados mostram que a distribuição das bolhas dispersas exerce influência direta sobre a hidrodinâmica do escoamento. Observou-se que as bolhas menores apresentam-se predominantemente esféricas e relativamente homogêneas, porém interações como colisões, deformações elípticas e coalescência são frequentes, especialmente nas regiões de maior concentração da fase gasosa. A existência de uma zona de menor presença de bolhas dispersas logo acima do nariz da bolha de Taylor, associada ao aumento local da velocidade da fase líquida, evidencia a forte interação entre escalas de interface. Esse comportamento confirma tendências reportadas em estudos clássicos da literatura sobre escoamentos slug em dutos verticais.

A análise mostrou que parte dessas bolhas é incorporada ao filme líquido que envolve a bolha de Taylor, alterando sua espessura, sua velocidade relativa e a intensidade das recirculações na região da esteira. Tais alterações hidrodinâmicas demonstram que a presença de múltiplas escalas de interface modifica de maneira significativa a estrutura do padrão *slug*, diferenciando-o substancialmente do escoamento envolvendo apenas bolhas isoladas. Os resultados derivados desse procedimento apresentam grande potencial para servir como base de validação para modelos numéricos multifásicos,



especialmente aqueles voltados à simulação de escoamentos com interface deformável e coexistência de múltiplas escalas.

De forma geral, os dados obtidos ampliam o entendimento físico do escoamento bifásico vertical e fornecem subsídios relevantes para o desenvolvimento de modelos mais precisos para aplicações industriais, notadamente nas áreas de petróleo e gás, processos químicos e escoamentos multifásicos em geral.

REFERÊNCIAS

BROWN, R.A.S. The Mechanics of Large Gas Bubbles in Tubes - 1. Bubble Velocities in Stagnant Liquids, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v.43, pp. 217-223, 1965.

BUGG, J.D.; SAAD, G.A. The velocity Field around a Taylor Bubble rising in a stagnant viscous fluid: numerical and experimental results. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 28, pp 791-803, 2002.

CAMPOS, J.B.L.M.; NOGUEIRA, S.; RIETHMULLER, M.L.; PINTO, A.M.F.R. Flow in the nose region and annular film around a Taylor bubble rising through vertical columns of stagnant and flowing Newtonian liquids. *Chemical Engineering Science*, v. 61, pp. 845-857, 2006.

CAMPOS, J.B.L.M.; MAYOR, T.S.; FERREIRA, V.; PINTO, A.M.F.R. Hydrodynamics of Gas-Liquid Slug Flow Along Vertical Pipes in Turbulent Regime – An Experimental Study. *Chemical Engineering Science*, v. 61, pp. 845-857, 2008.

DE JESUS, J.M.; AHMAD, W.R.; KAWAJI, M. Experimental Study of Flow Structure in Vertical Slug Flow. *Advances in Multiphase Flow*, pp. 105–118, 1995.

KAWAJI, M., DEJESUS, J.M., TUDOSE, G. Investigation of flow structures in vertical slug flow. *Nuclear Engineering and Design*, v. 175, pp. 37-48, 1997.

MOISSIS, R.; GRIFFITH, P. Entrance effects in a two-phase slug flow. *Journal of Heat Transfer*, v. 84, pp. 29–39, 1962.

NOGUEIRA, S.; RIETHMULLER, M.L.; CAMPOS, J.B.L.M.; PINTO, A.M.F.R. Flow patterns in the wake of a Taylor bubble rising through vertical columns of stagnant and flowing Newtonian liquids: An experimental study. *Chemical Engineering Science*, v. 61, pp. 7199-7212, 2006.

PINTO, A.M.F.R.; PINHEIRO, M.N.; NOGUEIRA, S.; FERREIRA, V.D.; CAMPOS, J.B.L.M. Experimental study on the transition in the velocity of individual Taylor bubbles in vertical upward co-current liquid flow. *Chemical Engineering Research and Design*. v. 83, pp. 1103–1130, 2000.

VAN Hout, R.; GULITSKY, A.; BARNEA, D.; SHEMER, L., 2002. Experimental investigation of the velocity field induced by a Taylor bubble rising in stagnant water. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 29, pp.579–596.