MONTAGEM DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DE INTERAÇÕES ENTRE DUAS BOLHAS ALONGADAS DE AR ESCOANDO EM LÍQUIDO ESTAGNADO EM UM TUBO VERTICAL

Klisman Auer [(1)] (auer.1998@alunos.utfpr.edu.br),
Beatriz Mohr Rosa Ribeiro [(1)] (biamohr03@gmail.com),
Mariana Lopes Camilo [(1)] (mariana.lopes.camilo@gmail.com),
Luiz Eduardo Melo Lima [(1)] (lelima@utfpr.edu.br)

[(1)] Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); Campus Ponta Grossa; Departamento Acadêmico de Mecânica

RESUMO: *Escoamentos multifásicos ocorrem em diversas aplicações industriais e seu entendimento é essencial para aperfeiçoar os vários processos executados em tais aplicações. O conhecimento empírico desempenha um papel significativo na compreensão destes escoamentos, de suas configurações de fases e de suas consequências. Assim, o presente trabalho visa realizar a montagem e o teste de um aparato experimental para estudar bolhas alongadas de ar escoando em líquido (água) estagnado em tubos verticais. O aparato é composto por uma estrutura de perfis de alumínio para sustentação de tubos de acrílico (seção de testes) com 6 m de comprimento e 26 mm de diâmetro interno, além de dois dispositivos (para liberação de bolhas e para preenchimento de líquido), entre outros. Esta configuração deve permitir a observação e análise do comportamento de tais escoamentos gás-líquido em diversas condições. Notavelmente, o aparato experimental foi projetado para ser econômico, fácil de operar e adaptável a diferentes configurações experimentais. O desenvolvimento de metodologias simplificadas para montagem e uso aumenta ainda mais sua utilidade em uma variedade de aplicações em estudos de escoamentos em tubos. Este aparato mostrou-se válido para avançar na compreensão de fenômenos relevantes de escoamentos multifásicos.*

PALAVRAS-CHAVE: *Escoamento Multifásico, Análise Dimensional, Tubos — Dinâmica dos Fluidos.*

ASSEMBLY OF AN EXPERIMENTAL APPARATUS TO STUDY INTERACTIONS BETWEEN TWO ELONGATED AIR BUBBLES FLOWING IN STAGNANT LIQUID IN A VERTICAL PIPE

ABSTRACT: *Multiphase flows occur in several industrial applications, and their understanding is essential to improve the various processes carried out in such applications. Empirical knowledge plays a significant role in understanding these flows, their phase configurations, and their consequences. Thus, the present work aims to assemble and test an experimental apparatus to study elongated air bubbles flowing in stagnant liquid (water) in vertical pipes. The apparatus consists of a structure of aluminum profiles to support acrylic pipes (test section) measuring 6 m in length and 26 mm in internal diameter, in addition to two devices (for releasing bubbles and filling liquid) between others. This configuration should allow the observation and analysis of the behavior of such gas-liquid flows under different conditions. Notably, the experimental apparatus was designed to be cost-effective, easy to operate, and adaptable to different experimental setups. The development of simplified methodologies for assembly and use further increases their usefulness in various applications in pipe flow studies. This apparatus proved valid for advancing the understanding of relevant phenomena of multiphase flows.*

KEYWORDS: *Multiphase Flow, Dimensional Analysis, Pipes — Fluid Dynamics.*

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos podem ser encontrados na natureza (sangue escoando em veias e artérias, tempestades de areia, chuva, etc.), no setor petrolífero (transporte de gás e óleo em poços, tubulações e equipamentos, conforme a Figura 1), na indústria energética (plantas de energia geotérmica e reatores nucleares), entre outros (SHOHAM, 2006).

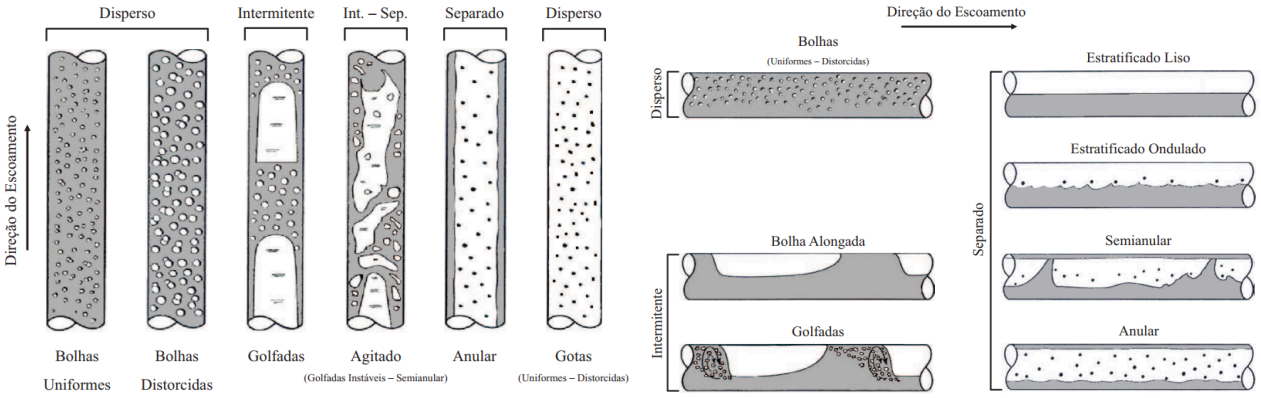
FIGURA 1. Tubulações para escoamentos multifásicos em uma refinaria de petróleo.



Fonte: Salau (2016).

Conforme Azzopardi (2006), o escoamento multifásico descreve o fenômeno de condução de misturas contendo gases, líquidos e sólidos, podendo ser composto pela mesma substância (multifásico) ou por substâncias distintas e imiscíveis (multicomponente). A classificação dos escoamentos gás-líquido é frequentemente dividida em três padrões principais: disperso, separado e intermitente. Esta distribuição das fases gasosa e líquida é influenciada pelas características do duto, propriedades dos fluidos, vazões das fases, entre outros parâmetros. Pode-se perceber pela Figura 2(a), que em tubulações horizontais ocorre uma subclassificação em sete padrões distintos: bolhas, bolhas alongadas, golfadas, estratificado liso, estratificado ondulado, semianular e anular (SHOHAM, 2006). Para escoamentos verticais, a Figura 2(b) destaca a utilização comum da classificação proposta por Taitel, Barnea e Dukler (1980), que divide o fenômeno em cinco padrões: bolhas uniformes, bolhas distorcidas, golfadas, agitado e anular. Além destes, é possível identificar o padrão de gotas, frequentemente conhecido como nevoeiro, que ocorre subsequentemente ao padrão anular quando a fase líquida está completamente atomizada (BRENNEN, 2005).

FIGURA 2. Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações: horizontais (a) e verticais (b).



(a) (b)

Fonte: adaptada de Shoham (2006) por Lima (2011).

Dentre os padrões de escoamento gás-líquido, destaca-se o padrão golfadas (*slug flow*) devido a sua frequente ocorrência em aplicações industriais e sua complexidade relativa a outros padrões. Além disso, diversos fenômenos relevantes ocorrem neste padrão, como a interação entre bolhas e sua consequente transição (padrão agitado) para o padrão anular. O escoamento de golfadas contém sucessivas bolhas de gás alongadas (ou de Taylor), escoando em paralelo com um filme de líquido, e separadas entre si por pistões de líquido aerados. Já no escoamento agitado, tais bolhas são deformadas e usualmente coalescem devido ao rompimento do pistão entre as mesmas (LIMA, 2011). Deste modo, diversos estudos experimentais foram realizados para fornecer uma melhor compreensão da cinemática e da dinâmica deste tipo de escoamento gás-líquido, alguns destes são descritos na sequência.

Ando (2021) e Ando, Muzzo e Lima (2021) apresentaram uma revisão da literatura sobre escoamentos de bolhas alongadas em líquido estagnado, desde o precursor Davies e Taylor (1950) até os mais atuais, como os de Bendiksen (1984), Jeyachandra *et al*. (2012) e Azevedo, Faccini e Su (2020). Estes trabalhos mais atuais assumem particularizadas condições operacionais, como diferenças de diâmetro, comprimento e inclinação de tubo, de fluidos utilizados e de métodos e técnicas empregados para obtenção dos resultados. Além de apresentar essa revisão da literatura, eles também desenvolveram um aparato experimental para analisar tais escoamentos. Posteriormente, Baldykowski (2023) e Baldykowski *et al*. (2023) efetuaram ajustes no aparato experimental de Ando (2021) e Ando, Muzzo e Lima (2021) para possibilitar análises em várias inclinações (de horizontal a vertical, em intervalos de 15°), cujos resultados alcançados apresentaram uma boa concordância com a literatura, corroborando na viabilidade do aparato experimental para este tipo de análise.

Azevedo (2016) e Azevedo, Faccini e Su (2020) conduziram estudos experimentais sobre a ascensão de bolhas de Taylor em tubos verticais e inclinados, utilizando as técnicas ultra sônicas de pulso-eco e visualização com câmera de vídeo de alta velocidade. Para os tubos verticais, foram utilizados diferentes fluidos (água destilada pura, glicerina pura e misturas de ambos) em tubos de vidro com 1,5 m de comprimento e tubos de acrílico com 2 m de comprimento. Os diâmetros internos dos tubos foram de 0,019 m, 0,024 m e 0,034 m, conectados a um sistema de injeção de ar. Já para os tubos inclinados, foram realizados estudos experimentais semelhantes, utilizando os mesmos fluidos, em tubos cilíndricos de acrílico com 2 m de comprimento e os mesmos diâmetros internos. Os tubos foram fechados nas extremidades por tampões de borracha e conectados ao mesmo sistema de injeção de ar. Os resultados indicaram que os filmes líquidos ao redor das bolhas tendem a alcançar uma espessura constante. Nos tubos inclinados, observou-se que a velocidade das bolhas aumenta com o ângulo de inclinação, sendo influenciada pelas propriedades do fluido. Diferentes perfis de espessura do filme foram identificados e a inclinação promove uma reorganização do escoamento do líquido, contribuindo para o aumento da velocidade de ascensão das bolhas nos tubos.

Sousa, Pinto e Campos (2007) realizaram experimentos nos quais pares de bolhas de Taylor foram injetadas em um tubo vertical em diferentes momentos, para analisar a interação entre as mesmas durante a sua ascensão. Eles utilizaram quatro soluções de carboximetilcelulose (CMC), com concentrações de 0,10, 0,30, 0,40 e 0,80, e duas soluções de poliacrilamida (PAA), com concentrações de 0,10 e 0,20. O experimento foi conduzido em uma coluna vertical de acrílico com 7 m de comprimento e diâmetro interno de 32 mm. Para a injeção das bolhas, foram utilizados dois tubos laterais conectados à coluna principal na parte inferior, cada um equipado com duas válvulas de esfera. Seis conjuntos de diodos lasers/fotocélulas foram posicionados ao longo da coluna para medir a velocidade, o comprimento e a distância entre as bolhas. Para as soluções de CMC menos concentradas (0,10, 0,30 e 0,40), a interação mostrou-se semelhante àquela encontrada em fluidos newtonianos, onde a velocidade da bolha secundária depende principalmente da velocidade do líquido na esteira da bolha primária. Para a solução de CMC de 0,8, forma-se uma esteira negativa (região de fluido com velocidade reduzida ou mesmo na direção oposta ao movimento ascendente das bolhas) atrás das bolhas de Taylor, inibindo a coalescência, já que as bolhas mantêm uma distância mínima de cerca de 1D entre si durante a ascensão. Já para as soluções de PAA, os comprimentos de esteira mais longos são responsáveis pela aceleração da bolha secundária a maiores distâncias da bolha primária.

1.1 Justificativas

A principal motivação deste trabalho se deve à necessidade de aprimoramento de métodos experimentais empregados na análise de escoamento gás-líquido. Como observado, um grande desafio no estudo de escoamentos multifásicos é a variedade de formas e padrões que ocorrem e sua identificação, além da complexidade dos fenômenos envolvidos, geralmente obtidos empiricamente (BRATLAND, 2010). Portanto, investigar o comportamento de bolhas de Taylor e sua interação com o ambiente circundante é essencial para progredir no conhecimento sobre os escoamentos gás-líquido e aumentar o desempenho de uma ampla gama de processos industriais.

1.2 Objetivos

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar a montagem e o teste de um aparato experimental para analisar a interação entre bolhas alongadas escoando em líquido estagnado, para determinar parâmetros relevantes ao escoamento.

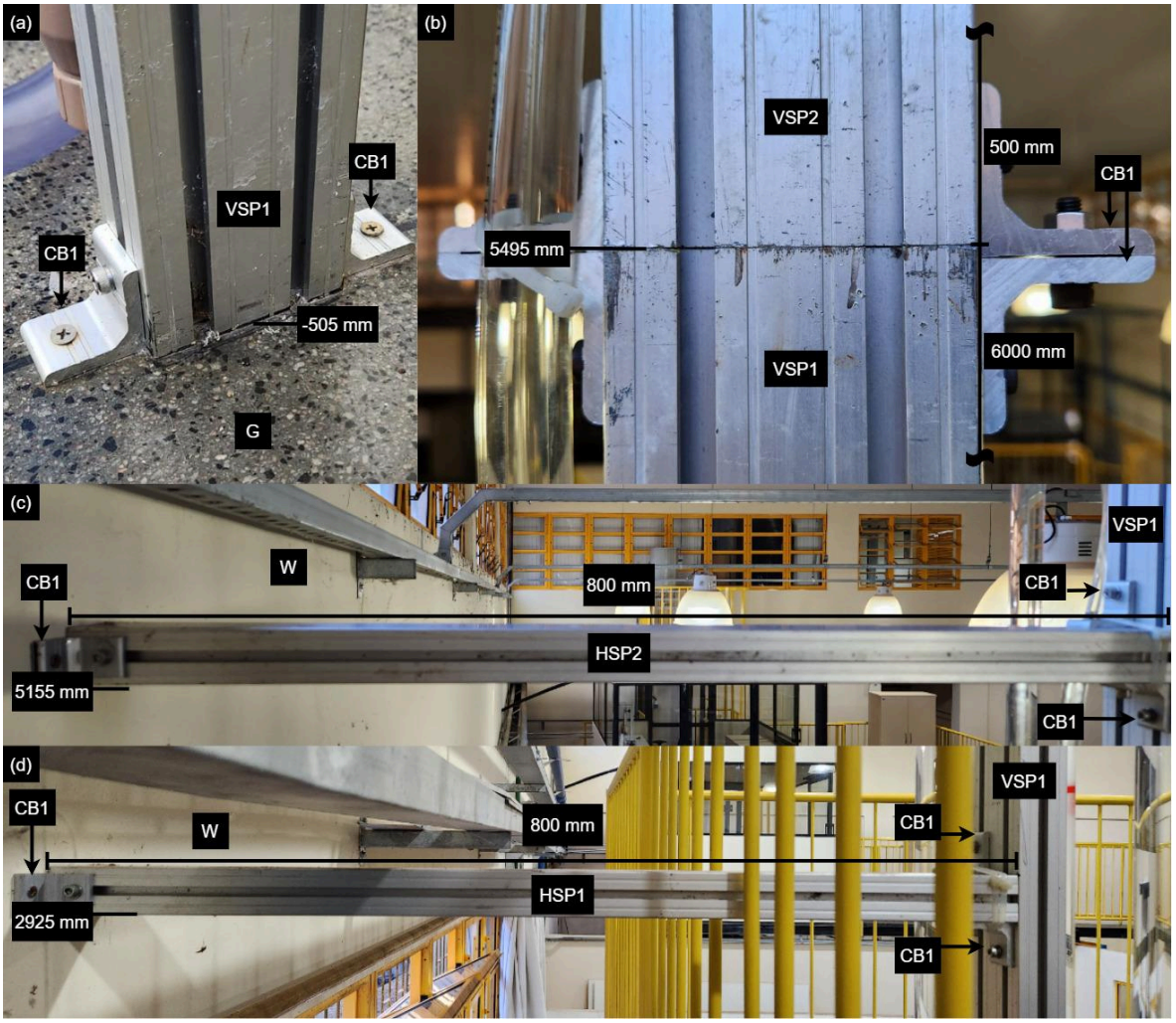
2. MATERIAIS E MÉTODOS

O aparato experimental desenvolvido neste trabalho foi construído e instalado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (LabMF) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) no Campus Ponta Grossa (PG) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Na sequência, são apresentados: estrutura de sustentação, seção de testes, dispositivo de liberação de bolhas e dispositivo de preenchimento de líquido.

2.1 Estrutura de sustentação

É constituída por perfis estruturais de alumínio. A coluna principal (VSP1) está firmemente fixada no chão (G) por meio de cantoneiras de alumínio (CB1), além de parafusos, porcas e buchas, conforme ilustrado na Figura 3(a). Semelhantemente, também está fixada na parede (W) por meio de dois perfis na horizontal (HSP1 e HSP2), conforme as Figuras 3(c) e figura 3(d). Para aumentar a altura total da coluna em 500 mm, foi adicionado outro perfil na vertical (VSP2), fixado à VSP1 usando cantoneiras de alumínio (CB1), além de parafusos e porcas, como mostrado na Figura 3(b). O perfil horizontal (HSP3) está fixado na primeira parte da estrutura por meio de cantoneiras de alumínio (CB2), para adicionar um suporte para câmera, conforme a Figura 4(a). A Tabela 1 apresenta informações sobre cada componente da estrutura de sustentação (z é a posição vertical e L é o comprimento).

FIGURA 3. Estrutura de sustentação do aparato experimental:
fixação no chão (a), prolongamento (b) e fixações na parede (c) e (d).



Fonte: autores.

TABELA 1. Componentes da estrutura de sustentação.

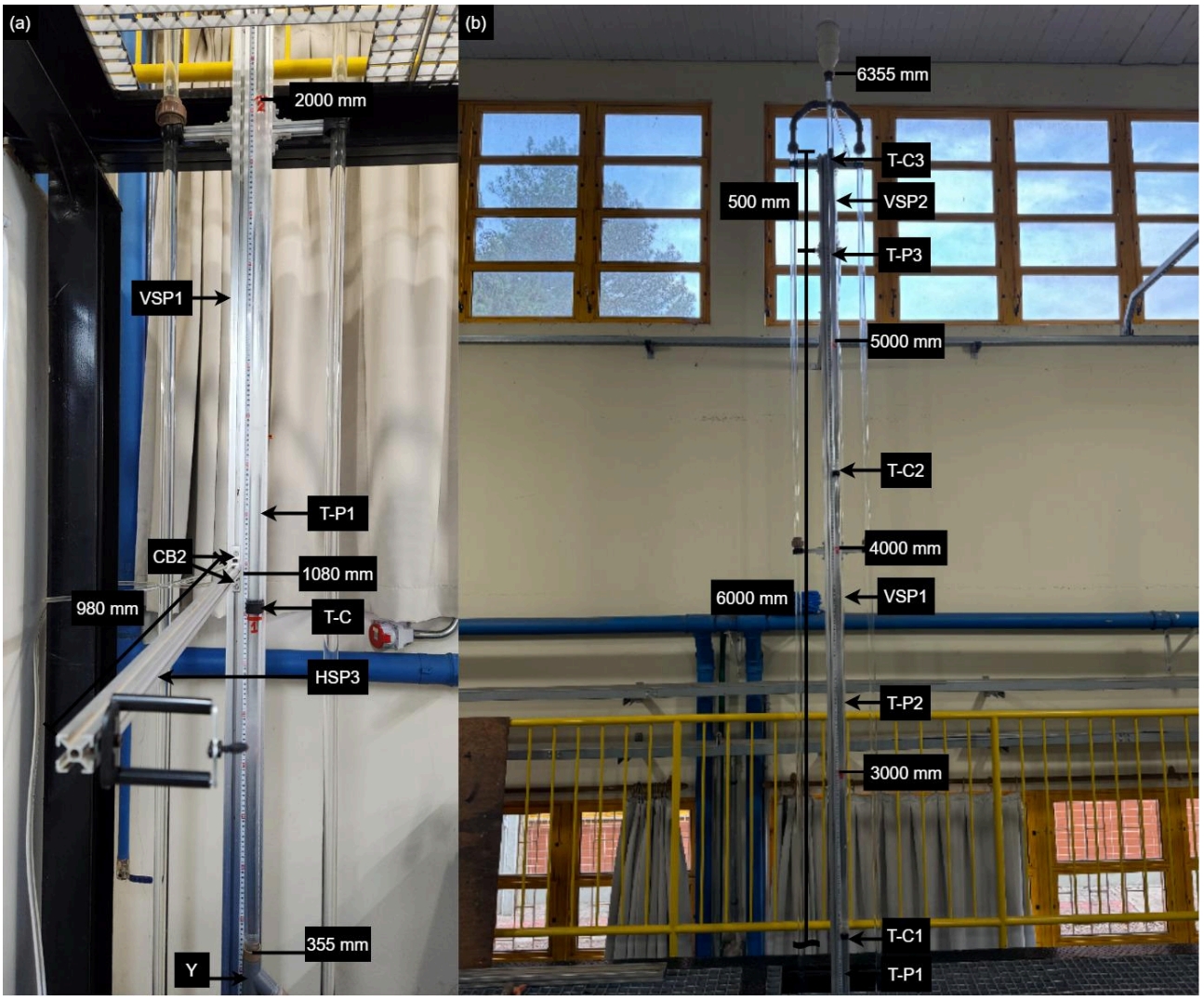
Item	Descrição	Dimensões	*z* / (mm)	*L* / (mm)
VSP1	Perfil estrutural vertical	(80 × 40) mm	-505	6000
VSP2	Perfil estrutural vertical	(80 × 40) mm	5495	500
HSP1	Perfil estrutural horizontal	(80 × 40) mm	2925	800
HSP2	Perfil estrutural horizontal	(80 × 40) mm	5155	800
HSP3	Perfil estrutural horizontal	(20 × 20) mm	1080	980
CB1	Cantoneiras	(38 × 6) mm	–	28
CB2	Cantoneiras	(38 × 6) mm	–	15

Fonte: autores.

2.2 Seção de testes

É composta por três tubos de acrílico (PMMA – *polymethyl methacrylate* ou polimetilmetacrilato), denominados T-P1, T-P2 e T-P3, unidos por meio de luvas de acrílico (T-S1 e T-S2), facilitando a visualização do escoamento. A seção de testes é fixada na estrutura de sustentação por quatro abraçadeiras grampo click de policloreto de vinila (PVC – *polyvinyl chloride*), denominadas T-C, T-C1, T-C2 e T-C3, que estão posicionadas ao longo da estrutura, conforme mostrado na Figura 4. Todos os componentes foram colados com adesivo plástico para PVC. A Tabela 2 apresenta informações sobre cada componente da seção de testes.

FIGURA 4. Seção de testes do aparato experimental:
primeiro trecho (a) e segundo e terceiro trechos (b).



Fonte: autores.

TABELA 2. Componentes da estrutura de sustentação.

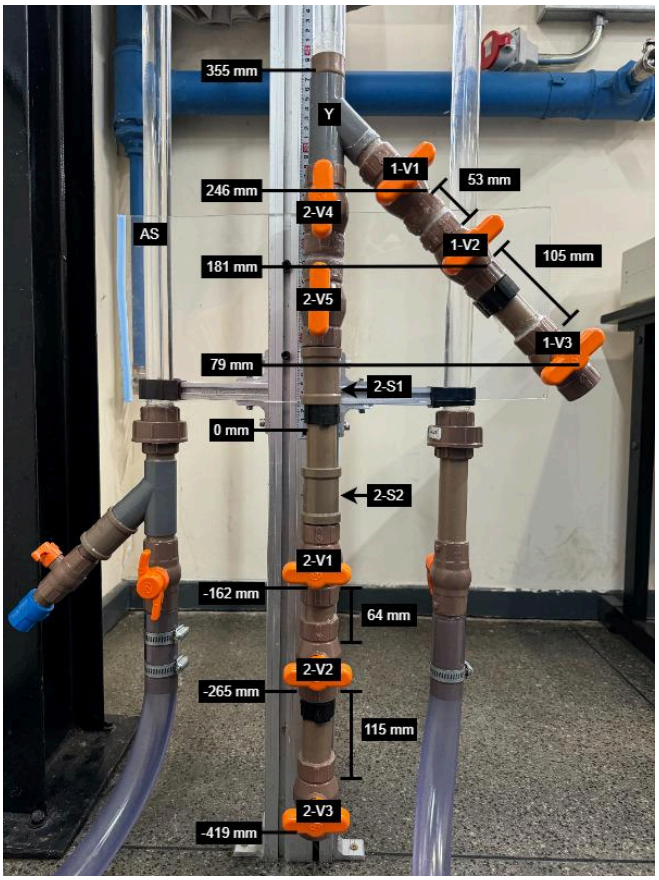
Item	Descrição	Dimensões	*z* / (mm)	*L* / (mm)
T-P1	Tubo: trecho 1	(30 × 2) mm	355 (13,7*D*)	2000 (76,9*D*)
T-P2	Tubo: trecho 2	(30 × 2) mm	2355 (90,6*D*)	2000 (76,9*D*)
T-P3	Tubo: trecho 3	(30 × 2) mm	4355 (167,5*D*)	2000 (76,9*D*)
T-S1	Luva	(40 × 5) mm	2332 (89,7*D*)	47 (1,6*D*)
T-S2	Luva	(40 × 5) mm	4332 (166,6*D*)	47 (1,6*D*)
T-C	Abraçadeira grampo click: início de T-P1	1"	1010 (38,8*D*)	20 (0,8*D*)
T-C1	Abraçadeira grampo click: T-P1	1"	2335 (89,8*D*)	20 (0,8*D*)
T-C2	Abraçadeira grampo click: T-P2	1"	4335 (166,7*D*)	20 (0,8*D*)
T-C3	Abraçadeira grampo click: T-P3	1"	5975 (229,8*D*)	20 (0,8*D*)

Fonte: autores.

2.3 Dispositivo de liberação de bolhas

É composto por duas seções unidas por uma junção Y de 45°, como mostrado na Figura 5. A seção primária é composta por três válvulas de esfera (1-V1, 1-V2 e 1-V3) unidas por tubos (1-PY, 1-P1 e 1-P2). A seção secundária possui cinco válvulas de esfera (2-V1, 2-V2, 2-V3, 2-V4 e 2-V5; as duas últimas não são usadas, somente foram aproveitadas de um aparato experimental anterior) unidas por tubos (2-PY, 2-PV, 2-PS, 2-P1 e 2-P2) e fixada na estrutura de sustentação por duas abraçadeiras grampo click (2-C1 e 2-C2). 2-V5 e 2-V1 se conectam por meio de duas luvas (2-S1 e 2-S2) separadas por um tubo (2-PS). 2-V1, 2-V2 e 2-V3 são unidas por tubos (2-P1 e 2-P2). Para melhorar a estabilidade do dispositivo, uma chapa de acrílico (AS) aparafusada na estrutura de sustentação foi usada para fixar a seção primária com uma abraçadeira grampo click (1-C), auxiliando na operação das válvulas. Todos os componentes foram colados com adesivo plástico para PVC e silicone. A Tabela 3 apresenta informações sobre cada componente do dispositivo de liberação de bolhas, sendo todos de PVC, exceto a chapa de acrílico usada para fixação da seção primária.

FIGURA 5. Dispositivo de liberação de bolhas do aparato experimental.



Fonte: autores.

TABELA 3. Componentes do dispositivo de liberação de bolhas.

Item	Descrição	Dimensões	*z* / (mm)	*L* / (mm)
Y	Junção Y de 45°	DN 32 mm	265 (10,2*D*)	85 (3,3*D*)
1-V1	Válvula de esfera [(1)]: nariz de 1-B1 ou 1-B3 (base)	DN 32 mm	246 (9,5*D*)	39 (1,5*D*)
1-V2	Válvula de esfera [(1)]: nariz de 1-B2 (base) ou cauda de 1-B1 (topo)	DN 32 mm	181 (7*D*)	39 (1,5*D*)
1-V3	Válvula de esfera [(1)]: cauda de 1-B2 ou 1-B3 (topo)	DN 32 mm	79 (3*D*)	39 (1,5*D*)
1-PY	Tubo [(1)]: entre Y e 1-V1	DN 32 mm	274 (10,5*D*)	30 (1,2*D*)
1-P1	Tubo [(1)]: entre 1-V1 e 1-V2	DN 32 mm	209 (8*D*)	53 (2*D*)
1-P2	Tubo [(1)]: entre 1-V2 e 1-V3	DN 32 mm	107 (4,1*D*)	105 (4*D*)
1-C	Abraçadeira grampo click [(1)]: 1-P2	1"	165 (6,3*D*)	20 (0,8*D*)
2-V1	Válvula de esfera [(2)]: nariz de 2-B1 ou 2-B3 (base)	DN 32 mm	-162 (-6,2*D*)	39 (1,5*D*)

Item	Descrição	Dimensões	*z* / (mm)	*L* / (mm)
2-V2	Válvula de esfera [2]: nariz de 2-B2 (base) ou cauda de 2-B1 (topo)	DN 32 mm	-265 (-10,2*D*)	39 (1,5*D*)
2-V3	Válvula de esfera [2]: cauda de 2-B2 ou 2-B3 (topo)	DN 32 mm	-419 (-16,1*D*)	39 (1,5*D*)
2-V4	Válvula de esfera [2]: entre Y e 2-S1	DN 32 mm	203 (7,8*D*)	39 (1,5*D*)
2-V5	Válvula de esfera [2]: entre Y e 2-S1	DN 32 mm	112 (4,3*D*)	39 (1,5*D*)
2-PY	Tubo [2]: entre Y e 2-V4	DN 32 mm	242 (9,3*D*)	23 (0,9*D*)
2-PV	Tubo [2]: entre 2-V4 e 2-V5	DN 32 mm	151 (5,8*D*)	52 (2*D*)
2-PS	Tubo [2]: entre 2-S1 e 2-S2	DN 32 mm	-123 (-4,7*D*)	235 (9*D*)
2-P1	Tubo [2]: entre 2-V1 e 2-V2	DN 32 mm	-226 (-8,7*D*)	64 (2,5*D*)
2-P2	Tubo [2]: entre 2-V2 e 2-V3	DN 32 mm	-380 (-14,6*D*)	115 (4,4*D*)
2-S1	Luva [2]: entre 2V-5 e 2-V1	DN 32 mm	29 (1,1*D*)	60 (2,3*D*)
2-S2	Luva [2]: entre 2V-5 e 2-V1	DN 32 mm	-100 (-3,8*D*)	60 (2,3*D*)
2-C1	Abraçadeira grampo click [2]: 2-PS	1"	9 (0,3*D*)	20 (0,8*D*)
2-C2	Abraçadeira grampo click [2]: 2-P2	1"	-285 (-11*D*)	20 (0,8*D*)
AS	Chapa	(50 × 5) mm	3	20

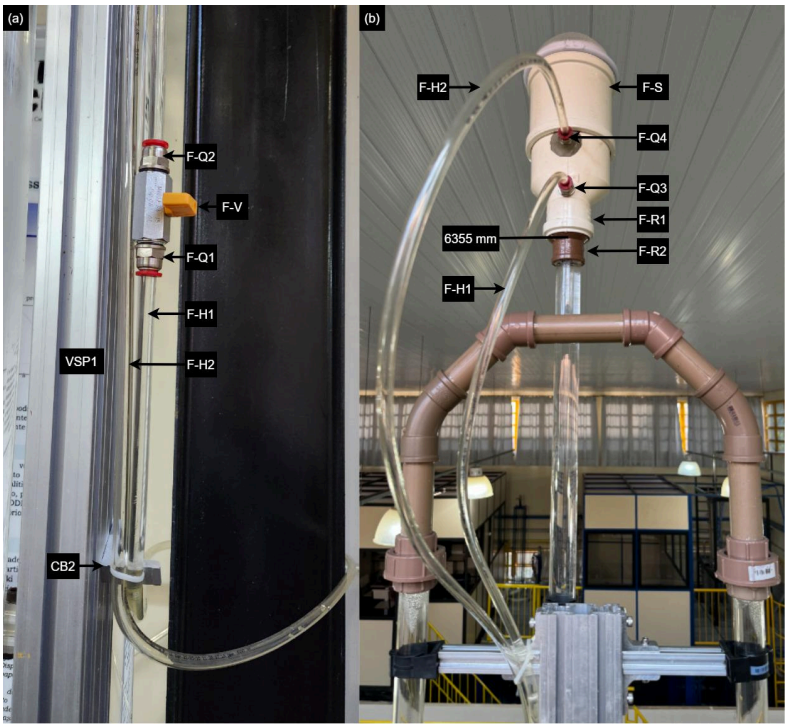
[1] seção primária; [2] seção secundária.

Fonte: autores.

2.4 Dispositivo de preenchimento de líquido

Pode ser considerado composto em duas partes principais: a superior e a inferior. A parte inferior é representada pela Figura 6(a) e contém uma válvula de esfera de aço inox (F-V), que controla o fluxo de entrada de água através de uma mangueira de poliuretano (F-H1), sendo conectadas por meio de duas conexões do tipo engate rápido de aço inox e plástico (F-Q1 e F-Q2). As mangueiras de poliuretano (F-H1 e F-H2, para entrada e saída de água) estão fixadas à estrutura por meio de uma cantoneira de alumínio (CB2) e abraçadeiras de nylon. A parte superior pode ser visualizada na Figura 6(b), sendo formada por uma luva de PVC (F-S), conectada a uma redução de PVC (F-R1), que por sua vez está conectada a outra redução de PVC (F-R2), que finalmente se conecta ao tubo de acrílico (T-P3). F-R1 possui duas adaptações feitas com adesivo de massa epóxi, onde foram adicionadas conexões do tipo engate rápido de aço inox e plástico (F-Q3 e F-Q4), para conexão das mangueiras de poliuretano (F-H1 e F-H2, para entrada e saída de água), respectivamente. A Tabela 4 apresenta informações sobre cada componente do dispositivo de preenchimento de líquido.

FIGURA 6. Dispositivo de preenchimento de líquido: parte inferior (a) e parte superior (b).



Fonte: autores.

TABELA 4. Componentes do dispositivo de preenchimento de líquido.

Item	Descrição	Dimensões	*L* / (mm)
F-V	Válvula de esfera	3/8" (BSP fêmea)	40 (5,7*D*)
F-H1	Mangueira: entrada	(10 × 1,5) mm	8000 (1142,9D)
F-H2	Mangueira: saída	(10 × 1,5) mm	7000 (1000*D*)
F-S	Luva	DN 100 mm	110 (1,1*D*)
F-R1	Redução	DN 100 mm p/ DN 50 mm	130 (1,3*D*)
F-R2	Redução	DN 50 mm p/ DN 32 mm	70 (1,4*D*)
F-Q1	Engate rápido para mangueira: entrada em F-V	10 mm p/ 3/8" (BSP macho)	–
F-Q2	Engate rápido para mangueira: saída em F-V	10 mm p/ 3/8" (BSP macho)	–
F-Q3	Engate rápido para mangueira: entrada em F-S	10 mm p/ 3/8" (BSP macho)	–
F-Q4	Engate rápido para mangueira: saída em F-S	10 mm p/ 3/8" (BSP macho)	–

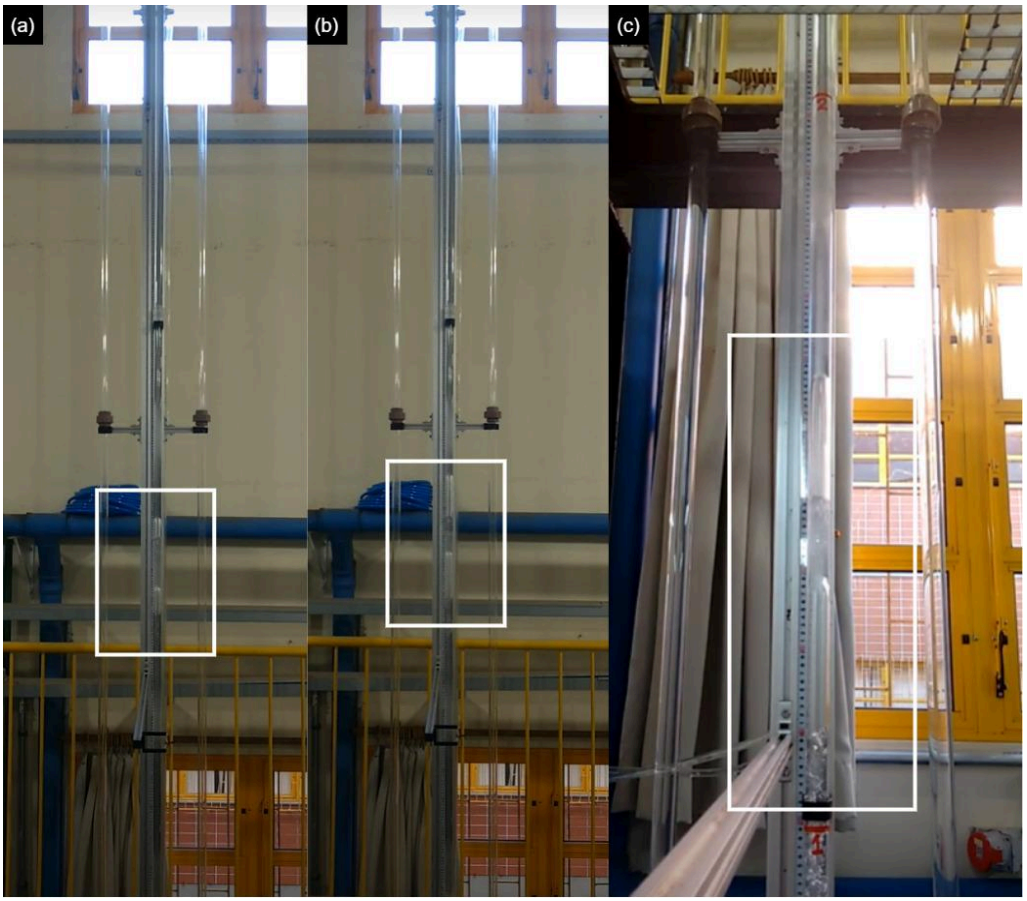
Fonte: autores.

3. RESULTADOS

A estrutura de sustentação foi o passo inicial na montagem do aparato experimental. Utilizando perfis estruturais de alumínio, esta estrutura proporciona firmeza e estabilidade, além de oferecer uma base modular e versátil que facilita a inclusão de novos componentes ao sistema. Esta modularidade permite adaptações e aperfeiçoamentos no presente aparato e também a montagem de outros aparatos ou circuitos experimentais. Por exemplo, um sistema de escoamento de gás e de líquido, ambos dinâmicos, está atualmente em desenvolvimento no laboratório.

A seção de testes foi construída com tubos de acrílico, material que apresenta suficiente resistência à pressão hidrostática para o sistema em questão e permite uma boa visualização do escoamento devido à sua transparência, como se pode observar na Figura 7. A união dos componentes foi realizada com adesivo plástico para PVC e não apresentou vazamentos durante os testes realizados.

FIGURA 7. Testes realizados no aparato experimental:
duas bolhas pequenas (a), duas bolhas médias (b) e duas bolhas grandes (c).



Fonte: autores.

O dispositivo de liberação de bolhas permite as combinações de três diferentes tamanhos de bolhas (pequena, média e grande) considerando as seções primária e secundária. Para a primária, têm-se bolhas com volumes de 35 mL, 66 mL e 116 mL, respectivamente. Para a seção secundária, têm-se bolhas com volumes de 43 mL, 73 mL e 128 mL, respectivamente. Estes volumes nas duas seções do dispositivo possibilitam nove combinações de tamanhos de bolhas que devem ser liberadas simultaneamente em condições atmosféricas locais. Para ilustrar o funcionamento deste dispositivo, três testes foram realizados: duas bolhas pequenas, Figura 7(a), que coalesceram a 6024 mm (231,7*D*); duas bolhas médias, Figura 7(b), que coalesceram a 3806 mm (146,4*D*); duas bolhas grandes, Figura 7(c), que coalesceram a 1549 mm (59,6*D*).

O dispositivo de preenchimento de líquido foi desenvolvido tendo como objetivo uma fácil operação para garantir que a altura de coluna de água na seção de testes se mantenha constante para todos os testes. Sempre que a válvula F-V é aberta, a seção de testes é preenchida por meio da mangueira de entrada F-H1 em F-Q3, com água proveniente de uma torneira do laboratório, até que atinja o nível em F-Q4 da mangueira de saída F-H2. Assim, quando a água sai pela mangueira de saída F-H2 e descarrega em um reservatório disponível no laboratório, a válvula F-V deve ser fechada, permitindo a realização de cada teste.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como finalidade montar e testar um aparato experimental para analisar a interação entre duas bolhas alongadas de ar escoando em líquido (água) estagnado. A montagem e os testes realizados foram bem-sucedidos, pois o aparato não apresentou vazamentos de fluido nem problemas de funcionalidade, e conta com uma construção simplificada e de baixo custo, além de permitir uma fácil operação. O aparato demonstrou ser funcional e possui potencial para a realização de diversos estudos, além do desenvolvimento de adaptações e aprimoramentos, como:

- Estudar a influência dos tamanhos de bolhas e dos espaçamentos entre as mesmas na distância de coalescência ao longo da seção de testes (este estudo já está sendo realizado em outro trabalho), para permitir correlacionar tais parâmetros e determinar valores limites de distância de coalescência no sistema em questão.
- Determinar as variações de velocidades das bolhas (primária e secundária) e de espaçamentos entre as mesmas ao longo da seção de testes, para permitir correlacionar tais parâmetros e determinar valores limites de espaçamentos entre bolhas que sejam estáveis.
- Analisar as formas (nariz e cauda) e das esteiras das bolhas (primária e secundária) e como uma bolha afeta a outra, verificando mecanismos importantes como regime de escoamento (laminar, transição e turbulento), entre outros.

- Instrumentar este aparato com sensores capacitivos, transmissores de pressão, entre outros, para permitir a aquisição e a análise de parâmetros relevantes do fenômeno com automação e maior precisão.
- Substituir as válvulas de esfera usadas para a liberação das bolhas por válvulas de acionamento rápido, a fim de aumentar a precisão e a reprodutibilidade dos resultados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Brasil (Edital UTFPR/PROPPG n.º 05/2023 – PIVIT).

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDO, André Vinícius Segall. Desenvolvimento de um aparato experimental para determinação da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado. 2021. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2021. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25994. Acesso em: 15 dez. 2023.

ANDO, André Vinícius Segall; MUZZO, Luiz Eduardo; LIMA, Luiz Eduardo Melo. Design and construction of an experimental apparatus for velocity determination of a gas bubble flowing in stagnant liquid. In: FLORIANÓPOLIS, SC: UFSC. PROCEEDINGS of the 26th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM). Rio de Janeiro, RJ: ABCM, 2021. p. 10. DOI: 10.26678/ABCM.COBEM2021.COB2021-0545.

AZEVEDO, Marcos Bertrand de. Estudos experimentais da ascensão de bolhas de Taylor individuais em tubos verticais e ligeiramente inclinados. 2016. 227 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: http://carpedien.ien.gov.br:8080/handle/ien/1731. Acesso em: 15 dez. 2023.

AZEVEDO, Marcos B. de; FACCINI, José L. H.; SU, Jian. Experimental study of single Taylor bubbles rising in vertical and slightly deviated circular tubes. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 116, p. 110109, 2020. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110109.

AZZOPARDI, Barry J. Gas-Liquid Flows. New York, NY, USA: Begell House, 2006.

BALDYKOWSKI, Bruno. Análise experimental da velocidade de ascensão de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado: influência da inclinação do tubo. 2023. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2023.

BALDYKOWSKI, Bruno *et al*. Influência da inclinação do tubo na velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado. In: GOIÂNIA, GO: UFG. ANAIS do XXIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica (CREEM). Rio de Janeiro, RJ: ABCM, 2023. p. 8. DOI: 10.26678/ABCM.CREEM2023.CRE2023-0115.

BENDIKSEN, Kjell H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. International Journal of Multiphase Flow, v. 10, n. 4, p. 467–483, 1984. DOI: 10.1016/0301-9322(84)90057-0.

BRATLAND, Ove. Pipe Flow 2: Multi-Phase Flow Assurance. 1. ed. [*S. l.*]: Dr. Ove Bratland's Flow Assurance Site, 2010. Disponível em: http://www.drbratland.com/. Acesso em: 15 dez. 2023.

BRENNEN, Christopher E. Fundamentals of Multiphase Flow. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005. ISBN 9780521848046.

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

JEYACHANDRA, B. C. C. *et al*. Drift-velocity closure relationships for slug two-phase high-viscosity oil flow in pipes. SPE Journal, v. 17, n. 2, p. 593–601, 2012. DOI: 10.2118/151616-pa.

LIMA, Luiz Eduardo Melo. Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido. 2011. 147 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP, 2011. DOI: 10.47749/t/unicamp.2011.804225.

SALAU, Sulaimon. Govt plans independent ownership of oil pipelines: commences arrangement to legalize illegal refineries. The Guardian, 2016. Disponível em: https://guardian.ng/business-services/govt-plans-independent-ownership-of-oil-pipelines/. Acesso em: 15 dez. 2023.

SHOHAM, Ovadia. Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2006. ISBN 9781555631079.

SOUSA, R. G.; PINTO, A. M. F. R.; CAMPOS, J. B. L. M. Interaction between Taylor bubbles rising in stagnant non-Newtonian fluids. International Journal of Multiphase Flow, v. 33, n. 9, p. 970–986, 2007. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.03.009.

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