



**Ricardo Cavalcanti Linhares**

**Estudo da bolha de Taylor assimétrica contra um escoamento descendente**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro,  
27 de Junho de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Jorge e Marcia, por todo apoio, carinho e ensinamentos que me permitiram chegar até aqui. Sem eles nada seria possível.

À minha irmã Mariana, por estar sempre comigo nas horas que eu precisava.

À Thainá, que ao longo desses anos tornou tudo mais leve e alegre.

Ao meu orientador Igor, por toda paciência, ensinamentos e conselhos, essenciais nesse período final da graduação.

À equipe do laboratório, em especial Marcio, Leo e Alexandre, sempre disponível para me ajudar com as dificuldades encontradas no projeto.

Aos meus amigos, sempre presentes nos momentos mais importantes da minha vida.

## **RESUMO**

### **Estudo da bolha de Taylor assimétrica contra um escoamento descendente**

O presente trabalho é dedicado ao estudo do escoamento ao redor de uma bolha de Taylor subindo contra um escoamento descendente. Nessas condições as bolhas de Taylor podem exibir um comportamento assimétrico e um menor arrasto quando comparadas com as simétricas. Esse padrão de escoamento está presente em diversas aplicações industriais, tais como petroquímica, nuclear, refrigeração entre outras. A caracterização do escoamento é importante para modelar esse problema. Contudo, não existem na literatura experimentos a respeito do escoamento ao redor da bolha de Taylor assimétrica, devido à oscilação da bolha na posição radial. Por esse motivo valores médios são de difícil obtenção. Nesse trabalho, uma diferente configuração da bancada de testes é proposta para fixar a posição radial da bolha. Desse modo, as técnicas de velocimetria por imagem de partículas (PIV) e de processamento de imagem puderam ser aplicadas. Os experimentos foram realizados em um tubo vertical, utilizando água como fluido de trabalho, em regime turbulento desenvolvido. Antes de estimar as velocidades, as imagens obtidas tiveram que ser pré-processadas a fim de detectar e cobrir o contorno da bolha. Os campos médios de velocidade ao redor da bolha, nesse caso específico, são medidos pela primeira vez e comparações com a literatura são apresentadas.

Palavras chave: Bolha de Taylor; Escoamento em golfadas; Escoamento multifásico; PIV; Contra corrente.

## **ABSTRACT**

### **Study of the asymmetric Taylor bubble against a downward flow**

The work is devoted to study the flow around a Taylor bubble rising against a downward flow. At this condition Taylor bubbles can exhibit an asymmetric behavior and a lower drag in comparison with symmetric ones. This flow condition is present in many industrial applications such as petrochemical, nuclear, refrigeration and many others. The characterization of the flow behavior is important for modeling the problem. However, no experiments regarding the flow around asymmetric Taylor bubble can be found in the literature due to radial oscillation of the bubble within the pipe. Therefore, averaged quantities are difficult to be measured. Here a different set-up arrangement is proposed to fix the radial position of the bubble. Thereby, Particle Image Velocimetry (PIV) measurements and image processing techniques could be applied. The experiments were carried out in a vertical pipe, using water as working fluid, at fully developed turbulent regime. Prior to velocity estimation, the images obtained had to be pre-processed in order to detect and to mask the bubble contour. Mean velocity fields around the bubble are measured for the first time and comparisons with the literature are provided.

Key-words: Taylor bubble; Slug flow; Multiphase flow; PIV; Counter current.

## Sumário

1.	Introdução .....	1
2.	Revisão Bibliográfica .....	2
3.	Objetivo.....	5
4.	Revisão Teórica .....	5
4.1	Escoamentos Internos .....	5
4.1.1	Lei de potência .....	7
5.	Procedimento Experimental .....	8
5.1	Instalações & Bancada de Testes .....	8
5.2	Equipamentos.....	11
5.2.1	Controle de temperatura (PID) .....	12
5.2.2	Câmera PIV.....	12
5.2.3	LED .....	12
5.2.4	Laser .....	13
5.2.5	Sensor de Luminosidade.....	13
5.2.6	Sincronizador .....	13
5.2.7	Medidor de vazão.....	13
5.2.8	Bomba & Inversor de Frequência.....	14
5.3	Velocimetria de Imagem por Partículas (PIV) .....	14
5.3.1	INSIGHT & Illuminator.....	17
5.4	Inserção do Distúrbio.....	18
5.5	Etapas da Medição .....	19
5.5.1	Escoamento com a Bolha de Taylor .....	20
□	Fluxo Estagnado .....	21

□ 15 Hz & 19Hz .....	21
□ 32 Hz .....	22
□ 40 Hz .....	22
□ Observações .....	23
6. Processamento .....	23
7. Resultados .....	25
7.1 Escoamento Sem Intrusão .....	25
7.2 Escoamento Com Intrusão .....	27
7.3 Bolha de Taylor em Escoamento Estagnado.....	29
7.4 Bolha de Taylor escoamento 15 Hz.....	33
7.5 Bolha de Taylor escoamento 19 Hz.....	35
7.6 Bolha de Taylor escoamento 32 Hz.....	36
7.7 Bolha de Taylor escoamento 40 Hz.....	38
8. Conclusão .....	39
9. Referências.....	42

## Lista de Figuras

Figura 1: Padrões de Escoamento Segundo Taitel & Duker.....	1
Figura 2: Velocidade de subida da bolha, do estado inicial ao desenvolvido, $\Sigma=0.018$ com $\square U^*=0$ e $\circ U^*=-0.26$ , obtido por B. Figueroa-Espinoza, J.Fabre. ....	4
Figura 3: Perfil de Velocidade se desenvolvendo ao longo do comprimento de entrada. Fonte: R. W.Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard, Ed LTD, 6ª. Ed.vpfd .....	6
Figura 4: Relação expoente n com número de Reynolds. Fonte: R. W.Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard, Ed LTD, 6ª. Ed.vpfd.....	7
Figura 5: Da esquerda para direita: Perspectiva isométrica e frontal da bancada de testes utilizada. ....	9
Figura 6: Imagem esquemática do sistema de PIV. Fonte: <a href="https://www.researchgate.net/figure/Processed-PIV-data-set-corresponding-to-figure-3-obtained-with-LED-illumination_fig2_225001998">https://www.researchgate.net/figure/Processed-PIV-data-set-corresponding-to-figure-3-obtained-with-LED-illumination_fig2_225001998</a> .....	15
Figura 7: Esquema de PIV utilizado no experimento desse trabalho.....	15
Figura 8: Foto obtida pela câmera, sem processamento. ....	16
Figura 9: Imagem adquirida pela câmera após pré-processamento. ....	16
Figura 10: Configurações utilizadas no software Illuminator.....	17
Figura 11: Perfil de velocidade para diferentes profundidades de inserção. ....	18
Figura 12: Esquema de válvulas utilizados no experimento. ....	21
Figura 13: Comparação entre a reta de calibração do fornecedor e afeita experimentalmente por PIV.....	26
Figura 14: Comparação do Perfil médio de velocidade com a Lei de potência para a vazão de 32 Hz.....	27
Figura 15: Comparação entre perfil médio de velocidade para diferentes vazões com intrusão de 4,45 mm no escoamento. ....	28
Figura 16: Comparação do perfil de velocidade com e sem intrusão, casos 15 Hz e 19 Hz.....	29
Figura 17: Comparação do perfil de velocidade com e sem intrusão, casos 32 Hz e 40 Hz.....	29

Figura 18: Bolha de Taylor para o caso estagnado. Imagem obtida pela PIVCAM.....	30
Figura 19: Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para o caso estagnado. ....	31
Figura 20: Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 19. ....	32
Figura 21: Comparação dos resultados obtidos por Nogueira (2006)(a) do presente trabalho (b). ....	33
Figura 22: Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para a vazão de 15 Hz. ....	34
Figura 23: Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 22 .....	34
Figura 24: Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para a vazão de 19 Hz. ....	35
Figura 25: Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 24. ....	36
Figura 26: Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para a vazão de 32 Hz .....	37
Figura 27: Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 26. ....	37
Figura 28: Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para a vazão de 40 Hz. ....	38
Figura 29: Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 28. ....	39



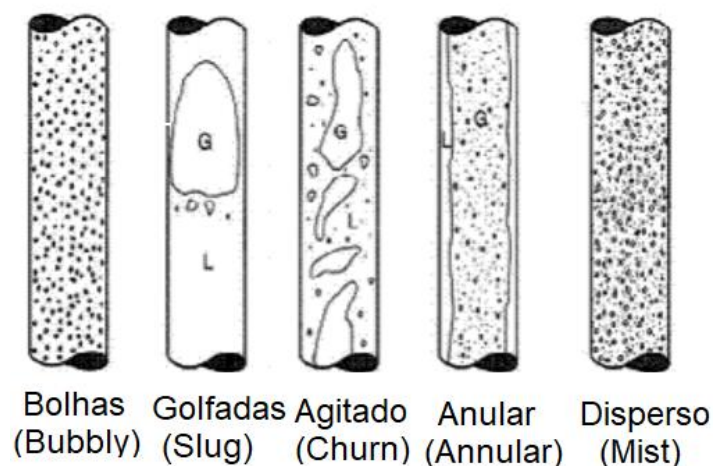
## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Tempo entre aquisição de fotos para diferentes vazões.....	20
--	----

## 1. Introdução

O escoamento em tubos pode ocorrer com diversas configurações diferentes, chamadas de padrões de escoamento. Desses padrões, o mais complexo de ser analisado é o escoamento em golfadas, sendo alguns dos motivos a falta de conhecimento de sua distribuição no duto e devido às grandes variações de velocidade.

O padrão de golfadas ocorre quando existe o escoamento de uma mistura bifásica de gás e líquido em um determinado intervalo de vazões. Ele é caracterizado por um fluido separado por longas bolhas, criando bolsões de ar no escoamento. Na Figura 1 podem ser vistos os padrões de escoamento existentes.



**Figura 1: Padrões de Escoamento Segundo Taitel & Duker.**

O escoamento em golfadas possui diversas aplicações práticas nas indústrias, tais como petroquímica, nuclear e refrigeração. Na extração de petróleo, por exemplo, ao a sonda perfurar o solo, a mistura bifásica por vezes é jorrada através dos dutos devido à alta pressão dos gases contidos nos poços. O entendimento desse escoamento em golfadas é interessante para a regulação da pressão e vazão de saída, de forma a aperfeiçoar a extração gerando economia para as empresas.

Por esse motivo, estudos analíticos e numéricos são realizados para modelar e caracterizar o escoamento em golfadas. O padrão de golfadas é caracterizado pela

presença de bolhas de Taylor na tubulação. Na maior parte das situações, essas bolhas se propagam na direção do escoamento. No entanto, em algumas situações essas bolhas podem se propagar na direção contrária ao escoamento (Fabre e Figueroa-Espinoza, 2014). De acordo com c, nessa situação os modelos baseados em escoamentos axissimétricos não apresentam bons resultados na previsão de perda de carga do sistema. O trabalho de Fabre & Figueroa sugere que isso ocorre devido a assimetria do escoamento, induzida pela bolha. O presente trabalho busca caracterizar o escoamento médio em torno de uma bolha de Taylor com fluxo contrário a direção de propagação dessa bolha. As condições escolhidas favorecem a quebra de simetria do escoamento.

## **2. Revisão Bibliográfica**

O padrão de escoamento em golfadas em tubos verticais é caracterizado por longas bolhas com formato pontudo normalmente conhecido como bolha de Taylor. Dumitrescu (1943) e Davies e Taylor (1950) foram os primeiros a investigar esse padrão e determinar a velocidade do líquido ao seu redor.

Polonsky et al. (1999) fala sobre o efeito do comprimento da bolha na velocidade de translação dela. Porém seus estudos são somente para fluxo estagnado e escoamento ascendente. Nogueira et al. (2006) realizou estudos para o caso estagnado e seu resultados foram compatíveis com o de White e Beardmore (1962) e Polonsky et al. (1999). Ha-Ngoc e Fabre (2004) também realizaram estudos analíticos e numéricos para os casos da bolha em escoamento estagnado e agora também em movimento para o tubo em posição vertical e inclinada.

O formato assimétrico da bolha foi notado em escoamentos descendentes por Griffith e Wallis (1961) e eles observaram que o formato da bolha mudava gradualmente com o aumento da velocidade até se tornar instável. Essa excentricidade da bolha foi justificada como uma tentativa dela de escapar das maiores velocidades do escoamento no centro do tubo. Exatamente por esse motivo, quando ocorre esse deslocamento da bolha para a parede do tubo, é observado um aumento na velocidade dela.

Nicklin et al. (1962), Martin (1976) e Polonsky et al. (1999) também observaram o comportamento assimétrico da bolha em escoamento descendente e Polonsky

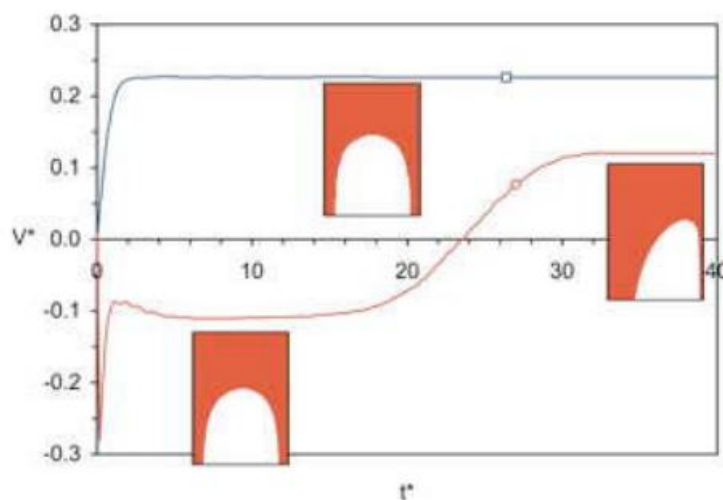
Polonsky et al. (1999) comenta a dificuldade a respeito da oscilação da ponta da bolha de um lado do tubo para o outro.

Grande parte dos estudos realizados tem seu foco no comportamento, formato e parâmetros da bolha de Taylor, porém alguns autores realizaram estudos a respeito do escoamento ao redor da bolha, Goldsmith e Mason (1962) tentaram medir a velocidade do escoamento em frente da bolha e no filme de líquido entre a parede e a bolha. Essa medição foi feita através de fotografias do deslocamento de partículas de alumínio colocadas no escoamento. (Nakoryakov et al. (1986,1989) conseguiu encontrar o perfil de velocidade do escoamento para diferentes vazões. (Kawaji et al. (1993) aplicaram o método de ativação do corante fotocromático para medir o escoamento ao redor da bolha subindo em um líquido estagnado, obtendo a velocidade instantânea na frente, no filme e na parte de trás da bolha. Polonsky et al. (1999) através da técnica de PIV mede o campo de velocidade ao redor da bolha, porém para a parte do filme líquido ele utiliza uma técnica de 'rastros' onde o obturador da câmera é deixado aberto durante um tempo maior para poder visualizar melhor o deslocamento das partículas. Um estudo mais recente de Nogueira et al. (2006) foi capaz de determinar o formato da bolha e os perfis de velocidade através do uso de velocimetria por imagem de partículas (PIV) e técnica da Sombra Pulsada (Pulsed Shadow Technique – PST) ao mesmo tempo.

Contudo, esses experimentos comentados acima foram somente realizados para escoamentos estagnados e a favor da bolha, casos nos quais a assimetria não é provável de acontecer.

Lu e Prosperetti (2006) realizaram uma análise de estabilidade aproximada para uma bolha subindo em escoamento contra corrente e constataram que com o aumento da vazão, a velocidade relativa entre o fluido e a bolha diminui. O achatamento da ponta da bolha foi atribuído como o principal motivo da instabilidade.

Mais tarde Fabre e Figueroa-Espinoza (2014) realizaram estudos adicionais para diferentes números de Reynolds observando que não somente a excentricidade da bolha aumenta com um número de Reynolds maior, mas como também a sua velocidade.



**Figura 2: Velocidade de subida da bolha, do estado inicial ao desenvolvido,  $\Sigma=0.018$  com  $\square U^*=0$  e  $\circ U^*=-0.26$ , obtido por B. Figueroa-Espinoza, J.Fabre.**

Na Figura 2, Figueroa-Espinoza e Fabre (2011) mostra a transição entre os formatos da bolha para duas velocidades iniciais diferentes.

Outro estudo também feito por eles foi sobre a influência da tensão superficial, onde perceberam que a bolha assimétrica é muito mais sensível a esse parâmetro.

Mas em relação a assimetria da bolha, Collins et al. (1978) apresentou que o fator mais importante para a dinâmica dela é primeiramente o escoamento próximo da ponta da bolha.

Por fim, pode ser visto que existe uma falta de experimentos com respeito à caracterização da bolha de Taylor assimétrica. Isso ocorre devido ao movimento radial da bolha, que não permite uma estimativa média utilizando técnicas padrões de velocidade como Laser Doppler Velocimetry(LDV) e PIV.

Esse trabalho apresenta uma solução para fixar a posição da bolha através da inserção de uma protuberância, acima da seção de testes, antes da bolha, a fim de criar uma pequena distorção no escoamento. Esse método se mostrou ser efetivo 100% das vezes. Por causa disso, foi possível utilizar a técnica de PIV para adquirir o campo de velocidade do fluido ao redor da bolha.

Anteriormente, no Laboratório de Engenharia de Fluidos da PUC-Rio, foram realizados projetos nessa bancada de testes, sendo o mais recente de Koelblinger.

Koelblinger conseguiu observar certa estabilização da assimetria da bolha para velocidades de escoamento mais altas, assim como Figueroa-Espinoza e Fabre (2011).

Porém, os problemas encontrados em projetos passados foram a dificuldade de tirar imagens na mesma posição vertical, já que a ativação da câmera era feita manualmente, e a obtenção de uma grande quantidade de imagens que fosse capaz de fornecer um campo médio mais preciso do escoamento ao redor da bolha.

Para contornar esses problemas foi desenvolvido um método automático para obtenção das imagens da bolha, através de um laser e de um sensor de luz LDR. Desse modo, foi possível realizar o processamento das imagens da bolha na mesma posição, e também a aquisição de uma grande quantidade de imagens, fazendo com que o campo médio das imagens ficasse mais preciso.

Além disso, nos trabalhos passados a água utilizada no experimento era aquecida, mas não havia um controle de sua temperatura, podendo existir uma variação ao longo dos testes, ocasionando na mudança de propriedades do fluido de trabalho.

Esses trabalhos desenvolvidos na PUC-Rio, tem sido capazes de determinar o campo médio de velocidade do escoamento ao redor da bolha pela primeira vez.

### **3. Objetivo**

Realizar a caracterização da bolha de Taylor contra um escoamento descendente através da técnica de velocimetria de imagem por partículas (PIV), apresentando uma solução para o problema da instabilidade da posição radial encontrado por outros autores. Através da técnica de PIV, determinar o campo médio de velocidades do escoamento ao redor da bolha de Taylor para diferentes vazões.

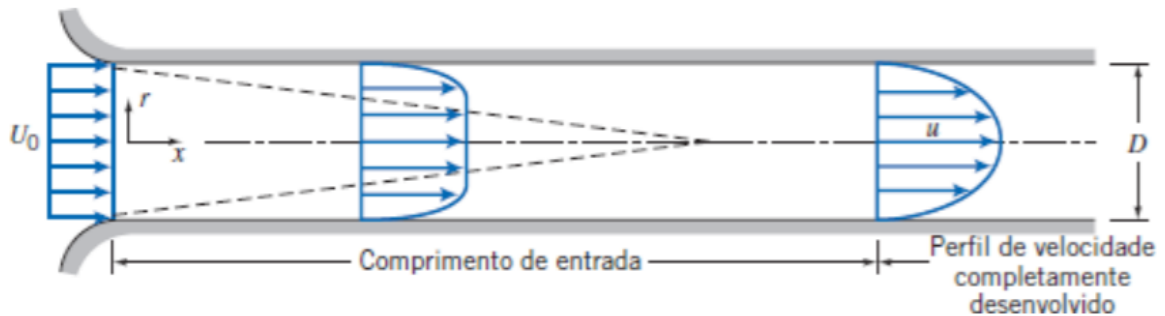
### **4. Revisão Teórica**

Neste capítulo será apresentada a teoria por trás de alguns pontos importantes no sucesso do projeto e para as conclusões expostas nesse trabalho.

#### **4.1 Escoamentos Internos**

Para escoamentos em dutos é possível calcular aproximadamente o comprimento de entrada. A região de entrada é aquela em que o escoamento ainda

não está desenvolvido, seu perfil de velocidade ainda varia (Figura 3). Nessa região, o escoamento apresenta o mesmo comportamento que o escoamento externo.



**Figura 3: Perfil de Velocidade se desenvolvendo ao longo do comprimento de entrada.** Fonte: R. W.Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard, Ed LTD, 6ª. Ed.vpdf

Porém, primeiramente é preciso identificar o regime no qual esse escoamento se encontra, já que o comprimento de entrada é diferente para os regimes laminar e turbulento. O número de Reynolds é o coeficiente que é utilizado para essa identificação. O número de Reynolds pode ser calculado pela seguinte formula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (4.1)$$

Para  $Re < 2000$  o regime é laminar

$2000 < Re < 2400$  o regime se encontra na transição de laminar para turbulento.

$Re > 2400$  o regime é turbulento.

#### ➤ Laminar

No caso laminar  $Re < 2000$ , o comprimento de entrada aproximado é calculado por:

$$\frac{L_e}{D_{int}} = 0,06 \cdot \frac{\rho \cdot u_m \cdot D_{int}}{\mu} \quad (4.2)$$

#### ➤ Turbulento

No caso turbulento  $Re > 2400$ , o comprimento de entrada raramente é maior do que 40 vezes o diâmetro do tubo. Sendo assim, seu cálculo aproximado é:

$$L_e = 4,4 \cdot D_{int} \cdot Re^{\frac{1}{6}} \quad (4.3)$$

A região de entrada para o regime turbulento é menor do que no caso laminar por causa de uma maior transferência de quantidade de movimento envolvida.

#### 4.1.1 Lei de potência

Para um escoamento turbulento o perfil de velocidade pode ser obtido de maneira aproximada utilizando a lei de potencia (equação 4.4).

$$\frac{\bar{u}}{u_{m\acute{a}x}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^n \quad (4.4)$$

A determinação do expoente 'n' depende do  $u_{m\acute{a}x}$ , a velocidade no centro do tubo. No gráfico a seguir (Figura 4) é mostrada a relação entre o numero de Reynolds e o expoente dessa equação.

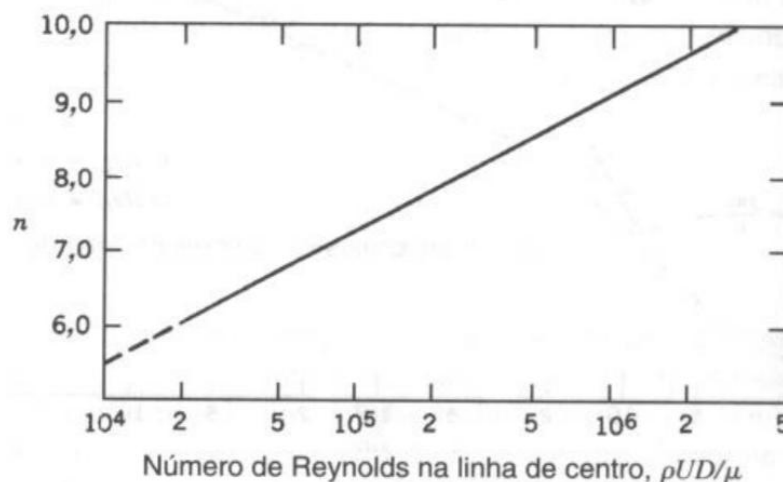


Figura 4: Relação expoente n com número de Reynolds. Fonte: R. W.Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard, Ed LTD, 6ª. Ed.vpfd



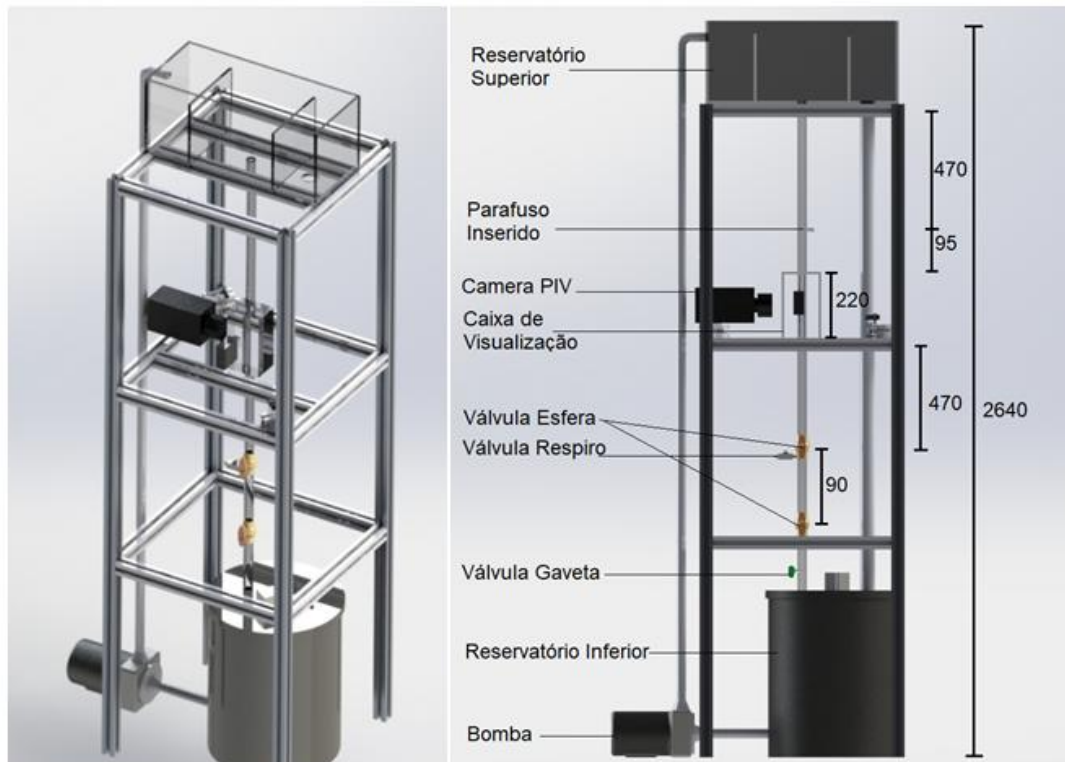
É importante observar que essa aproximação é ideal e não leva em consideração a tensão cisalhante na parede.

## **5. Procedimento Experimental**

Antes de realizar os testes da bolha de Taylor em escoamento contra corrente, foi feita uma verificação da bancada de testes com escoamentos já bem estudados e conhecidos para ver se os resultados realizados em nossas instalações eram coerentes com o que já existe na literatura. Para isso foi feito uma análise de Velocimetria de Imagem de Partículas (PIV) em padrões de escoamento conhecidos: Escoamento normal descendente sem a bolha de Taylor e escoamento estagnado com bolha de Taylor ascendente, tendo sido o primeiro realizado para diferentes vazões. Com o resultado coincidindo com o que já existe na literatura foi possível realizar um experimento confiável para o comportamento da Bolha de Taylor no escoamento que é de interesse desse trabalho, escoamento descendente com bolha de Taylor subindo contra corrente.

### **5.1 Instalações & Bancada de Testes**

O experimento foi realizado no Laboratório de Engenharia de Fluidos da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e a bancada de testes utilizada pode ser vista na Figura 5.



**Figura 5: Da esquerda para direita: Perspectiva isométrica e frontal da bancada de testes utilizada.**

O reservatório de cima (0.65 m x 0.275 m) é feito de acrílico e possui duas placas na transversal, a da esquerda com 0,215 m de altura e a da direita de 0,205 m. As placas servem para manter a coluna d'água acima da tubulação uniforme e consequentemente manter uma pressão constante, não sendo uma variável a afetar o experimento e alterar resultados. O excedente de água que ultrapassar a segunda placa é escoado por um tubo de volta para o reservatório inferior para ser bombeado para o topo novamente.

A turbulência no nosso caso é desejada, pois para realizar o experimento é necessário que o escoamento esteja desenvolvido, e para o caso laminar seria necessária uma tubulação muito maior do que no regime turbulento para isso acontecer, algo que tornaria o experimento inviável para o ambiente que se tinha disponível.

Na seção em que foram tiradas as imagens do escoamento algumas medidas tiveram que ser tomadas para assegurar resultados confiáveis e precisos. Como comentado anteriormente, é preciso que o escoamento esteja desenvolvido para que a bolha de Taylor seja submetida às mesmas condições a cada teste. Para

garantirmos isso, primeiro foi preciso se certificar de que o escoamento de fato estava em regime turbulento utilizando a equação (4.1).

Sendo,

Densidade da água a 30 °C → 995,6 kg/m<sup>3</sup>

A velocidade média do escoamento na vazão mínima utilizada (fornecido pelo medidor de vazão) --> 0,097 m/s

Diâmetro interno do tubo → 0,026 m

Viscosidade dinâmica da água a 30 °C → 0,000798 kg/m.s.

O resultado da equação então, fornece o menor número de Reynolds que será trabalhado nesse experimento que será de 3178, um valor já correspondente ao regime turbulento.

Com isso, é possível agora encontrar o comprimento de entrada desse escoamento. Para escoamento turbulento em dutos, o valor aproximado é encontrado pela equação (4.3).

$$L_e = 4,4 \times 0,026 \times (3178)^{\frac{1}{6}}$$

$$L_{entrada} = 0,44 \text{ m}$$

A seção de testes se encontra 0,565 m abaixo da entrada do tubo, assegurando o desenvolvimento do escoamento antes do local onde as imagens são tiradas.

Na seção de testes, foi utilizada uma caixa de acrílico (0,12 m x 0,095 m x 0,22 m) ao redor do tubo cheia d'água, mesmo fluido realizado para os testes, a fim de reduzir a distorção óptica. Além disso, o tubo dentro da caixa da seção de testes foi usinado reduzindo seu diâmetro externo para 27 mm com o objetivo de também reduzir a distorção óptica.

Com o intuito de alinhar o escoamento e evitar vórtices na entrada da tubulação que gerariam uma instabilidade na posição radial da bolha, foi utilizado um honeycomb logo na entrada da tubulação. Esse honeycomb consiste em um cilindro de acrílico com o diâmetro interno igual ao da tubulação (0.026 m) e canudos de 0,03 m de comprimento e 0,003 m de diâmetro.

Um ponto importante ao construir essa peça foi cortar os canudos com um tamanho não tão grande para que o escoamento dentro deles não se

desenvolvesse, ocasionando em uma relaminarização do escoamento. Para isso foi utilizada a equação (4.3) de escoamento turbulento para o diâmetro de 0,03 mm caso de menor vazão apresentada nesse trabalho, Reynolds de 3178. Com isso, encontramos que o comprimento de entrada será:

$$L_e = 0,05 \text{ m}$$

Como o canudo é menor do que o valor acima, não existe a possibilidade de relaminarização do escoamento. Embaixo dos canudos também foi colocada uma tela de aço para aumentar a turbulência no escoamento.

A fim de melhorar a visualização do contorno da bolha, foi utilizado um painel de LED branco atrás da caixa de acrílico. Com o objetivo de homogeneizar a luz foi colocado uma folha fina de papel entre o painel e a caixa.

No fim do tubo existe um reservatório onde a água é armazenada e bombeada para o reservatório superior. Para evitar possíveis impurezas que pudessem afetar o escoamento, somente água filtrada foi utilizada, e na entrada do reservatório superior foi colocada uma grade. Foram utilizados 60 L de água nesse sistema.

Para tornar possível a utilização do método de PIV, foi necessário colocar partículas traçadoras na água. As partículas utilizadas foram de poliamida com diâmetro de 50  $\mu\text{m}$  da Dantec Dynamics, capazes de espalhar luz suficiente para uma boa aquisição da câmera fotográfica, sem influenciar no escoamento do fluido. Com essas partículas no escoamento é possível visualizar com a câmera a posição inicial (Frame A) e a posição final (Frame B) de cada partícula, permitindo posteriormente através de uma rotina no MATLAB, encontrar o campo de velocidade do escoamento (Ver seção PIV e Processamento). Antes de adicionar as partículas no tanque, essas foram diluídas em um recipiente com algumas gotas de sabão. Como o tanque possui 60 L de água, essas poucas gotas não foram consideradas capazes de interferir nos resultados e na tensão superficial da bolha.

## **5.2 Equipamentos**

Nessa seção, os equipamentos utilizados no experimento serão especificados e para alguns casos será explicado o princípio de funcionamento. Quando necessário, também será abordado o motivo de sua utilização.

### **5.2.1 Controle de temperatura (PID)**

Manter a temperatura da água constante é importante para não ocorrer variações de propriedades do fluido entre os experimentos.

Além disso, foi estabelecida uma temperatura mais alta para que a viscosidade dinâmica da água diminuísse, e que consequentemente, aumentasse o número de Reynolds. Com um Reynolds mais elevado o escoamento fica mais turbulento e desenvolve mais rápido. A relação que mostra que o número de Reynolds é inversamente proporcional com a viscosidade dinâmica é a equação (4.1).

O controlador consiste em uma resistência colocada no fundo do reservatório de água inferior, ligada em um switch que somente permite a passagem de corrente enquanto a temperatura não alcança os 30° C determinado.

Para a determinação precisa da temperatura no interior do reservatório inferior foi utilizado um termopar do tipo K (Cromel/Alumel) que atende a temperaturas de -200 °C a 1200°C.

### **5.2.2 Câmera PIV**

A câmera utilizada nos experimentos foi a PIVCAM 10-30, modelo 630046 da TSI, resolução de 1280 x 1024 pixels. Essa câmera vem acompanhada de um software chamado INSIGHT, da mesma empresa, e é utilizado para realizar a sequência de imagens de PIV.

### **5.2.3 LED**

O LED utilizado foi o IL-105R da HARDsoft, cor vermelha, e software utilizado para determinar o tempo, corrente e outros parâmetros, foi o Illuminator da TSI.

A função do LED nesse trabalho é criar um plano de luz no centro da tubulação para iluminar as partículas no momento em que a câmera for ativada. Por esse motivo o posicionamento do LED deve ser preciso.

Para a exposição à iluminação vermelha não atrapalhar na obtenção de imagens para o PIV, foi utilizado um filtro vermelho na lente da câmera.

#### **5.2.4 Laser**

A fim de identificar quando a bolha se encontra na posição desejada foi utilizado um laser classe 2 saída máxima menor que 5 mW e de comprimento de onda igual a 405 nm que é refletido quando a bolha passa acionando o sensor posicionado do outro lado da seção.

#### **5.2.5 Sensor de Luminosidade**

Foi utilizado um sensor de luz fotossensível - LDR. Seu funcionamento ocorre através de uma resistência fotossensível que envia sinais de 0 e 5V para o sincronizador, 5V enquanto o laser incide sobre ela e 0V no momento que a bolha reflete o laser.

O sensor foi alimentado através de um cabo USB conectado no computador em que foram realizados os experimentos.

#### **5.2.6 Sincronizador**

No momento que o sensor fotossensível apaga, a câmera e o LED devem ser disparados simultaneamente. Para conseguir fazer isso foi utilizado o Synchronizer modelo 610032 da TSI.

#### **5.2.7 Medidor de vazão**

Para medir a vazão do escoamento foi utilizado um Sensor Fluxo Água 1 Polegada P/Arduino/pic/arm modelo FS400A G1, com limite de vazão de 60 L/min e pressão de trabalho menor que 1,2 Mpa. Esse medidor foi colocado no final da tubulação logo antes da água cair no reservatório inferior. Para conseguir identificar a vazão foi preciso realizar uma recalibração, podendo assim transformar o valor dado em frequência em  $\text{m}^3/\text{s}$ . A recalibração foi feita através da técnica de PIV e será explicada na seção de análises e resultados.

### 5.2.8 Bomba & Inversor de Frequência

Foi utilizada uma bomba centrífuga da marca Dancor, modelo CP-4R ½ CV para levar a água contida no reservatório inferior para o reservatório superior. Como a potência da bomba era muito maior do que o necessário para a altura de 2,64 metros da bancada, foi utilizado um inversor de frequência da marca WEG para variar a velocidade de giro do motor.

Para encontrar a rotação ideal da bomba, foi aumentando gradualmente o seu valor até que a água no topo do reservatório ficasse constante na parte central, entre as duas placas, deixando a pressão constante acima da tubulação.

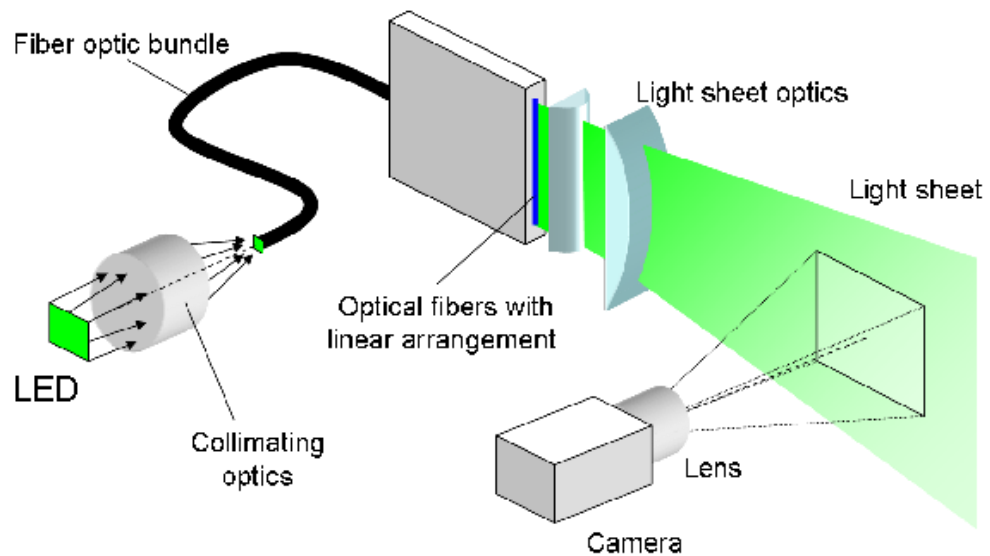
### 5.3 Velocimetria de Imagem por Partículas (PIV)

O PIV é uma técnica não intrusiva utilizada para obter o campo de velocidade de escoamentos.

A técnica consiste na utilização de uma câmera posicionada ortogonalmente a um plano de luz pulsada. A câmera é sincronizada com a iluminação, e duas ou mais imagens são tiradas, sendo necessário conhecer o tempo entre as aquisições dessas imagens. O programa de PIV então identifica as partículas traçadoras contidas na água e encontra a movimentação média de pequenos grupos de partículas através de métodos estatísticos. Uma vez sabendo o deslocamento e o tempo, o vetor velocidade é encontrado por:

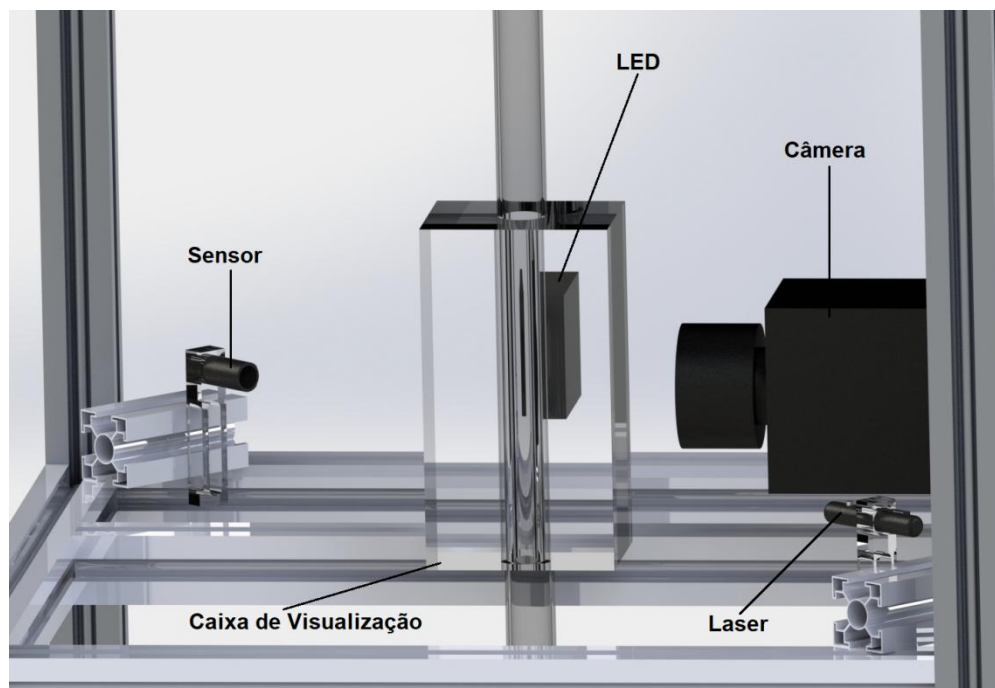
$$\bar{U} = \frac{\Delta \bar{X}(\bar{X}, t)}{M \cdot \Delta T}$$

Onde M é a magnificação da imagem. Esse parâmetro é a razão entre a distância da lente ao filme da câmera e a distância entre a lente e o plano de iluminação. Duas figuras são apresentadas abaixo, uma esquemática da técnica de PIV, e outra da bancada utilizada com os equipamentos utilizados.



**Figura 6: Imagem esquemática do sistema de PIV.**

Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Processed-PIV-data-set-corresponding-to-figure-3-obtained-with-LED-illumination\\_fig2\\_225001998](https://www.researchgate.net/figure/Processed-PIV-data-set-corresponding-to-figure-3-obtained-with-LED-illumination_fig2_225001998)

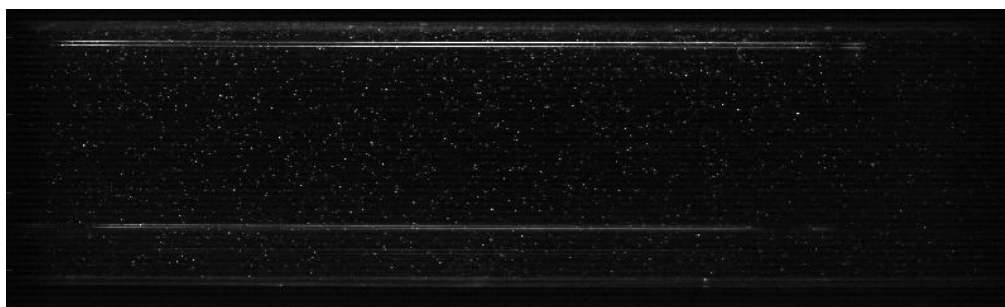


**Figura 7: Esquema de PIV utilizado no experimento desse trabalho**

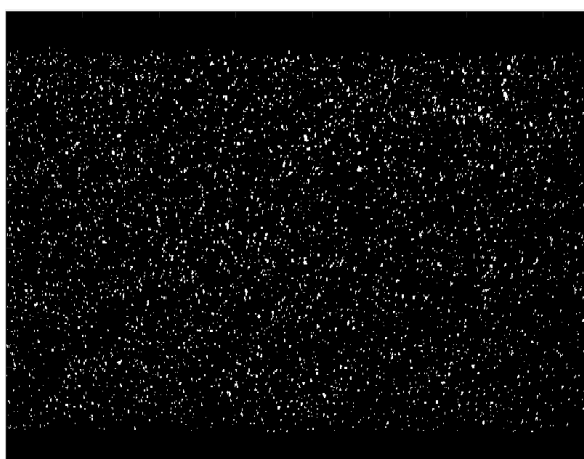
Para a determinação do campo de deslocamento existem diversos métodos de interrogação e o utilizado nesse trabalho foi o de múltiplos passes. Nesse método o processamento começa com uma janela de interrogação maior e utiliza esse resultado como um pré-deslocamento para as janelas menores. Esse método é interessante, pois não possui limitação de pares de imagens perdidas.



Algumas vezes é necessário realizar um pré-processamento das imagens para poder identificar com mais clareza as partículas. A remoção da imagem média das figuras, o aumento da intensidade das partículas e a redução de ruído, são alguns exemplos de pré-processamento empregados. A utilização deles é de grande importância principalmente quando existem outros objetos além das partículas onde ajudam a evidenciá-las.



**Figura 8: Foto obtida pela câmera, sem processamento.**



**Figura 9: Imagem adquirida pela câmera após pré-processamento.**

Como pode ser visto nos exemplos de imagens acima, após o pré-processamento as partículas aumentam muito a sua visibilidade.

É necessário que a iluminação seja feita como um plano de luz para que não exista sobreposição de partículas e para que seja possível identificar em qual região do tubo os resultados estão sendo observado.

A iluminação mais comumente utilizada é o laser, porém para esse trabalho foi utilizado uma luz de LED vermelha, uma opção mais econômica e que atende as necessidades desse projeto.

### 5.3.1 INSIGHT & Illuminator

Para realizar os testes através do método de PIV, 2 softwares foram utilizados, o INSIGHT 6.0 da TSI e o Illuminator.

O illuminator é o software do LED utilizado no experimento e as configurações utilizadas para os testes podem ser vistas na Figura 10.

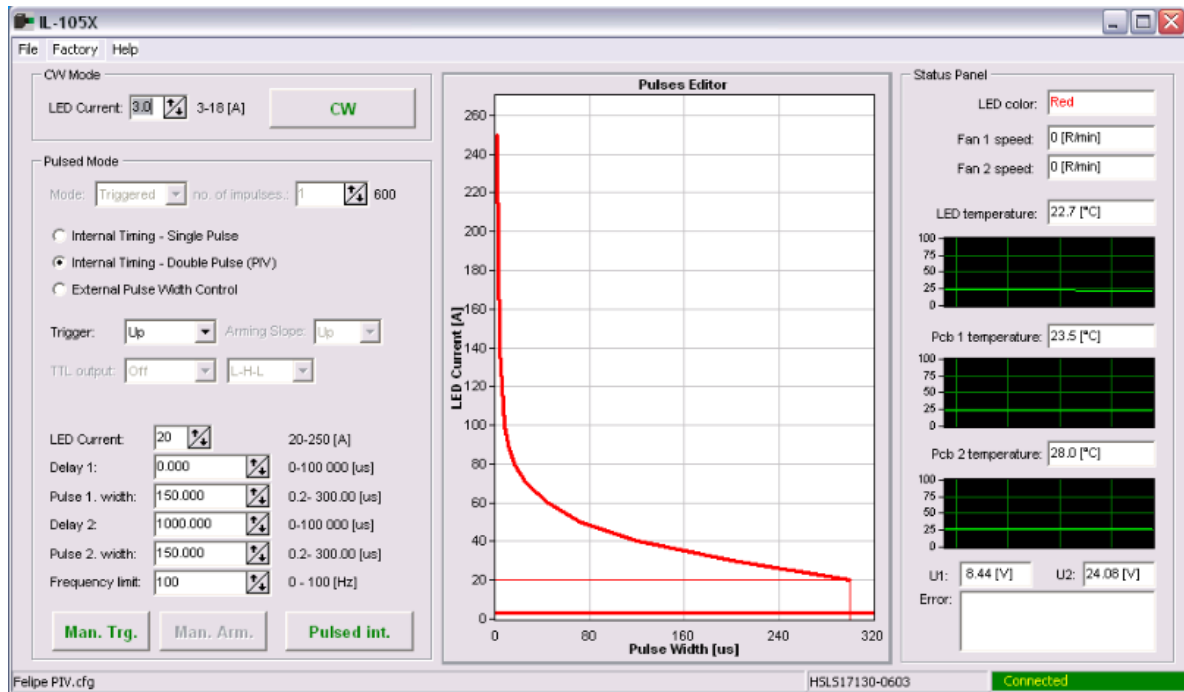


Figura 10: Configurações utilizadas no software Illuminator.

O único dado variável entre os testes nessa configuração é o tempo entre disparos do LED no campo “second delay”, que variou de 400  $\mu$ s a 3000  $\mu$ s nos testes desse experimento.

O INSIGHT é o programa que acompanha a câmera PIVCAM 10-30 e nele são configurados os sensores externos e quantidade de imagens a serem tiradas e outras configurações da câmera.

É importante apontar que é essencial anotar os Delays de cada teste para posteriormente ser possível realizar a conversão da posição em pixels para a velocidade.

## 5.4 Inserção do Distúrbio

O método encontrado para fixar a bolha de Taylor em uma posição radial foi utilizando um parafuso de 29,5 mm de comprimento. O parafuso foi inserido somente o necessário para que a variação radial da bolha não ocorresse mais, de forma que o escoamento não fosse muito alterado e que não comprometesse os resultados obtidos.

Estudos anteriores feitos por Felipe Araujo, mostraram que o número ideal de voltas para que ocorresse a fixação da bolha foi de aproximadamente 4 voltas a partir da parede do tubo, o que equivale a 4,23 mm de intrusão.

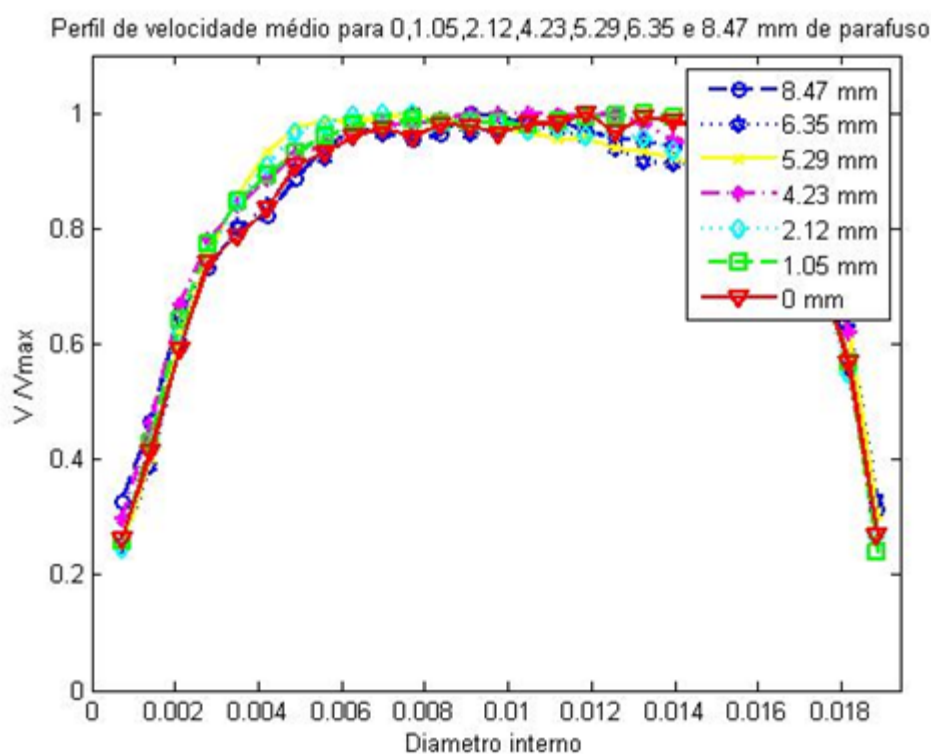


Figura 11: Perfil de velocidade para diferentes profundidades de inserção.

Para inserir o parafuso com precisão, foi utilizado um paquímetro. Sabendo que o diâmetro externo da luva é 48,3 mm e que o diâmetro interno do tubo é 26 mm, o parafuso foi inserido de forma que sobrassem para fora 14 mm de seu corpo.

Para evitar vazamento de água durante o experimento, foi colocada uma pequena quantidade de parafina ao redor do parafuso antes de inseri-lo.

## 5.5 Etapas da Medição

Para realizar o experimento é preciso primeiro ligar o controle de temperatura e esperar a água alcançar a temperatura desejada de 30°C.

Foi observado que após algumas semanas de testes, a tela de aço que fica abaixo dos canudos cortados do honeycomb por vezes entupia, principalmente no centro, e isso gerava um distúrbio no escoamento, causando até mesmo uma redução na vazão. Para contornar esse problema foi feita a limpeza frequente dessa tela, principalmente antes de aquiritar dados, sempre verificando se a frequência máxima indicada no multímetro era compatível com a vazão máxima adquirida anteriormente.

Após ligar a bomba na rotação ideal, como discutido na seção Bomba & Inversor de Frequência, é preciso esperar o tanque superior encher completamente até que o nível da água sobre a tubulação fique constante.

Após essa etapa é necessário se certificar que não existe ar preso no tubo entre o honeycomb e o reservatório inferior que possa interferir no escoamento. Para limpar o tubo de eventuais bolhas, a válvula de cima é fechada e a válvula respiro é aberta para despressurizar toda a região inferior do tubo. Após reabrir a válvula de cima, a diferença de pressão é maior que anteriormente, aumentando momentaneamente a vazão e trazendo eventuais bolhas de ar presas no tubo. Essa limpeza foi realizada com frequência durante todos os testes com frequência para não existir variação de resultados.

Sempre antes de aquiritar os dados do escoamento e da bolha é preciso ver se os parâmetros escolhidos como tempo entre fotos e número de pulsos estão selecionados de maneira adequada como explicado na seção de PIV. Uma tabela com o tempo entre cada foto e o número de imagens tiradas para cada tipo de teste realizado pode ser encontrada abaixo.

**Tabela 1: Tempo entre aquisição de fotos para diferentes vazões.**

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Tempo(ms)</b>
0(Estagnado)	3000
15	1000
19	1000
32	1000
40	1000
50	800
70	400
90	400

Apesar de as luzes sempre estarem apagadas na sala onde o experimento foi realizado, para evitar superexposição das imagens a luzes do corredor externo, a seção de testes foi coberta com um pano preto.

Para cada teste é escolhida a vazão do escoamento desejada utilizando a válvula gaveta e o multímetro que permite sua visualização em hertz, posteriormente transformada em  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Para as imagens tiradas do escoamento simples com ou sem a intrusão do parafuso, foi somente realizado esse ajuste da vazão. Para os ensaios com a bolha de Taylor foram necessárias outras medidas comentadas na subseção abaixo.

### **5.5.1 Escoamento com a Bolha de Taylor**

Todos os testes da bolha de Taylor foram realizados com o Pino inserido a 4,45 mm de distância da parede da tubulação.

Antes de gerar a bolha, o laser e o sensor precisam estar ligados e alinhados para ativar automaticamente a câmera e o LED quando a bolha passar na seção de testes.

Para a geração da bolha de Taylor foi utilizado um sistema de válvulas mostrado na Figura 12. Primeiro a válvula superior é fechada interrompendo o fluxo de água. Com as duas válvulas inferiores abertas, a válvula respiro é aberta até que o volume de ar no interior do tubo alcance a marca de  $100 \text{ cm}^3$ . É importante notar

que caso as válvulas inferiores estiverem fechadas não será possível a entrada de ar pela válvula respiro.

Um cuidado importante para realizar os testes foi não permitir que a bolha chegasse ao honeycomb no topo da tubulação, evitando que bolhas de ar ficassem presas, ocasionando em uma distorção no escoamento.

É importante sempre anotar o tempo entre as aquisições do par de imagens de cada teste para posteriormente fazer a conversão da posição em pixels para a velocidade.

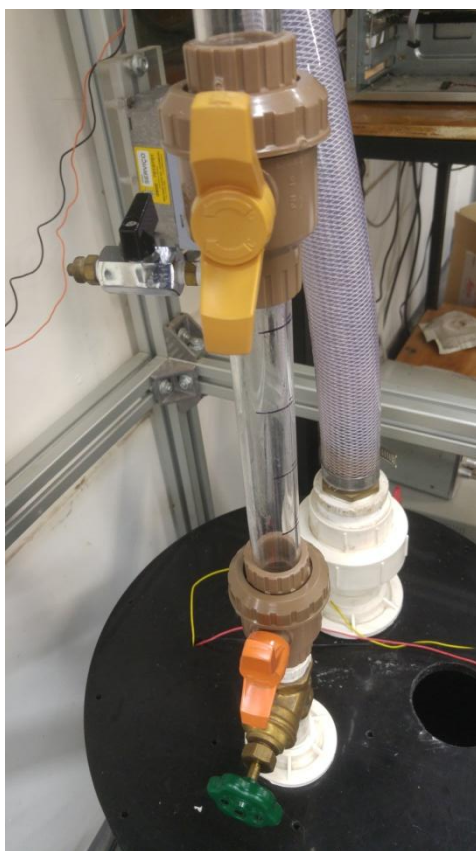


Figura 12: Esquema de válvulas utilizados no experimento.

#### ➤ Fluxo Estagnado

No caso do fluxo estagnado, após gerar a bolha, a válvula esfera inferior é fechada e em seguida a superior é aberta. Para recomençar o processo é preciso simplesmente abrir a válvula esfera inferior.

#### ➤ 15 Hz & 19Hz

Para essas vazões escolhidas a bolha assume um comportamento ascendente. Antes de gerar a bolha, a vazão é ajustada para um valor próximo de 15 Hz para

facilitar depois o ajuste após soltar a bolha. Mesmo na bolha de escoamento igual a 19 Hz a vazão ajustada antes de soltar a bolha deve ser igual ou menor que 15 Hz, pois foi observado que para valores superiores a esses no momento em que a bolha é solta, a bolha fica presa na válvula superior.

Para os casos em que a bolha foi reutilizada foi tomado o cuidado de retonar ela para uma posição próxima da válvula superior para que assim a bolha ficasse um tempo maior na vazão final escolhida e que tivesse tempo de se estabilizar.

Além disso, todas as transições de vazões foram realizadas da maneira mais rápida possível, porém sempre com movimentos sutis e graduais, tendo sido notado que mudanças abruptas para a vazão desejada gerava instabilidade da bolha, o que afetava o correto posicionamento dela na parede do tubo.

### ➤ 32 Hz

Nessa vazão escolhida o comportamento da bolha é descendente. Para realizar os testes na vazão de 32Hz, é preciso antes posicioná-la acima da seção de testes, por isso, após gerar a bolha de Taylor, foi colocada um vazão mais baixa que permitisse que a bolha subisse antes da válvula superior ser aberta.

Foi observado que quando a bolha passa ou alcança a intrusão do parafuso antes de se aumentar a vazão para ela descer, a bolha se fixa na posição contrária da das vazões de 15 Hz e 19 Hz. Por esse motivo, é necessário para os testes desse caso que a bolha alcance a vazão de 32 Hz na região entre a protuberância e a posição do laser na seção de testes.

O trigger da câmera nos comportamentos descendentes da bolha é acionado somente quando a região inferior da bolha passa pelo laser. Dessa maneira, quando a ponta da bolha finalmente deixar de refletir o laser, o sensor identificará um sinal de 5 V acionando a câmera para a obtenção das imagens.

Novamente para essa vazão notou-se que as transições da vazão para 32 Hz devem ser feitas de maneira sutil e gradual, de maneira que a bolha não fique instável e afete seu posicionamento na hora de adquirir as imagens.

### ➤ 40 Hz

No caso da vazão de 40 Hz, não foi possível realizar manualmente uma transição sutil de uma vazão mais baixa para a desejada entre o parafuso inserido e

a posição do laser, o que gerava uma instabilidade na bolha não permitindo a aquisição de imagens na posição adequada. Para contornar esse problema, foi necessário ultrapassar o parafuso para realizar as medições nessa vazão. Como comentado anteriormente, ao elevar a bolha acima da intrusão, ela era atraída pela protuberância fazendo a bolha se fixar na parede contrária a das vazões anteriores. Por esse motivo, as imagens obtidas por esses testes se encontram em posição contrária à das vazões anteriores.

### ➤ **Observações**

A água a ser utilizada no experimento deve ser filtrada para evitar impurezas que possam afetar o escoamento.

Para evitar o surgimento de algas na água do reservatório, foi acrescentar periodicamente um pouco de algicida e um pouco de água sanitária.

Não foi possível realizar testes para a bolha de Taylor descendo em um escoamento a 32 Hz com posição inicial acima do parafuso, com nos testes de 40 Hz, pois por se movimentar muito devagar, ela ficava presa no parafuso.

Algumas vezes na abertura da válvula superior, pequenas bolhas apareciam no acima da bolha de Taylor gerada. Todas as vezes que esse fenômeno ocorria a bolha de 100 cm<sup>3</sup> era refeita.

Para todos os casos comentados acima as bolhas foram reutilizadas antes de descenderem para o tanque inferior, porém se atentando à perda de massa delas. As bolhas não foram reutilizadas mais de 5 vezes para evitar resultados diferentes devido a mudanças em seu volume.

O posicionamento do LED é um importante fator para se obter valores precisos na calibração da vazão e gráficos coerentes após o processamento. Caso o plano de luz não esteja corretamente alinhado com o centro do tubo, na hora de se fazer o fator de conversão de pixel para milímetros não será possível realiza-l de forma correta já que a imagem vista não será do diâmetro do tubo.

## **6. Processamento**

Foi utilizada uma rotina no MATLAB para processar as imagens pelo método de PIV. No programa são carregados os pares de imagens obtidas pela câmera e



após escolher o método de interrogação desejado, o programa retorna o campo de velocidade desse escoamento.

Contudo, como somente se é desejada a movimentação das partículas ao redor da bolha, foi necessário realizar um pré-processamento das fotos para escurecer a região em que ela se encontra. Quando esse procedimento não é aplicado o programa tenta identificar movimentações de partícula dentro do corpo da bolha gerando resultados não desejados.

Por causa do disparo automático da câmera utilizando o laser e o sensor de luminosidade, foi possível tirar imagens na mesma posição vertical do tubo, o que permite obter o campo de velocidade médio, sem precisar realizar um recorte, e de maneira mais precisa.

Para os casos das bolhas assimétricas foi utilizada uma rotina no MATLAB para a identificação delas no escoamento. Os passos utilizados no programa foram os seguintes:

- Aplicação de um filtro mediano de 4 pixels para borrar a imagem;
- Binarizar a imagem;
- Comando 'imerode' até sumir com as partículas e ficar somente com a bolha;
- Comando 'imdilate' para aumentar os pontos restantes da imagem no caso, serão os correspondentes à bolha;
- Finalmente para preencher os espaços e regiões que foram fechados ao expandir os pontos com o comando anterior, foi utilizado o comando 'imfill'.

Pelo fato do formato da bolha ser diferente para cada vazão, a sua intensidade de reflexão também muda e por causa disso, os parâmetros mencionados acima devem variar seus valores para conseguir remover a bolha.

Para o caso da bolha simétrica, como a sua posição variava muito pouco entre as imagens, foi possível fazer uma máscara com posição constante. Contudo, para melhorar sua precisão, a máscara essa foi feita por cima da imagem média das fotos da bolha, escurecendo a região manualmente.

Além disso, para todos os casos, foi retirada a imagem média das fotos para remover o contorno do tubo e reflexos existentes devido ao LED sendo pulsado entre as fotos.

Após realizar esse pré-processamento foi utilizada a rotina de MATLAB para realizar a técnica de PIV com o método de interrogação de múltiplos passos de Hart com janela inicial de 32 pixels e janela final 16 pixels.

## 7. Resultados

### 7.1 Escoamento Sem Intrusão

Como o medidor de vazão utilizado no experimento fornece o resultado da vazão em hertz, através do multímetro, a conversão de Hertz para m<sup>3</sup>/s é dada pela curva do fornecedor. Com o objetivo de recalibrar o medidor que estava a muito tempo sem ser usado, foi utilizado o PIV para determinar a vazão correspondente para cada frequência.

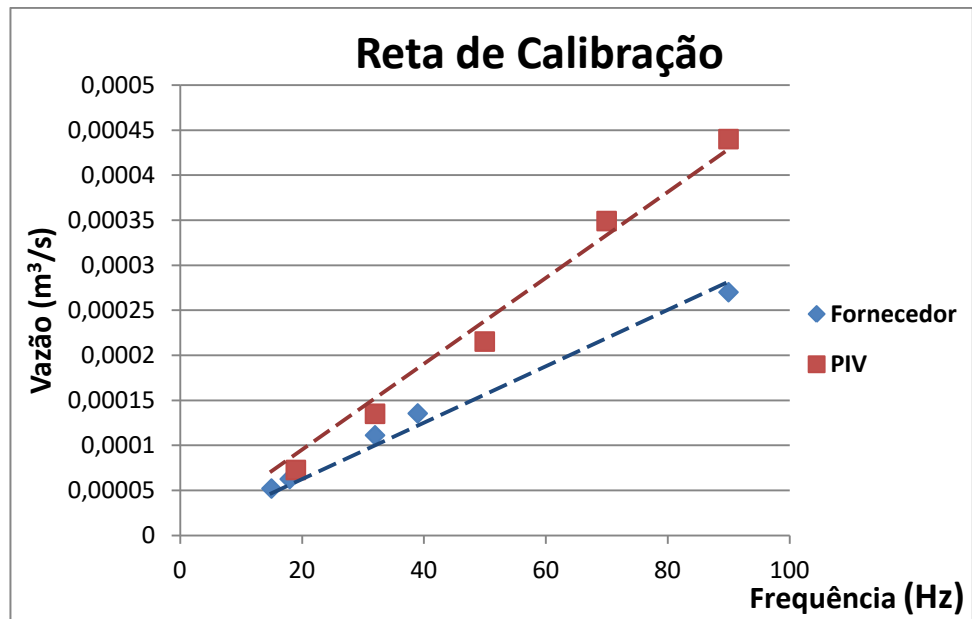
Como o método de PIV fornece o valor médio das velocidades e seus pontos correspondentes no eixo y, é possível realizar uma integral para encontrar a vazão correspondente. A integral da vazão pode ser vista na equação (7.1).

$$Q = \int_{-r}^r \int_0^{\pi} v \cdot r \cdot dr \quad (7.1)$$

Foi utilizado o método numérico da regra do trapézio para encontrar essa vazão. O programa foi desenvolvido no MATLAB.

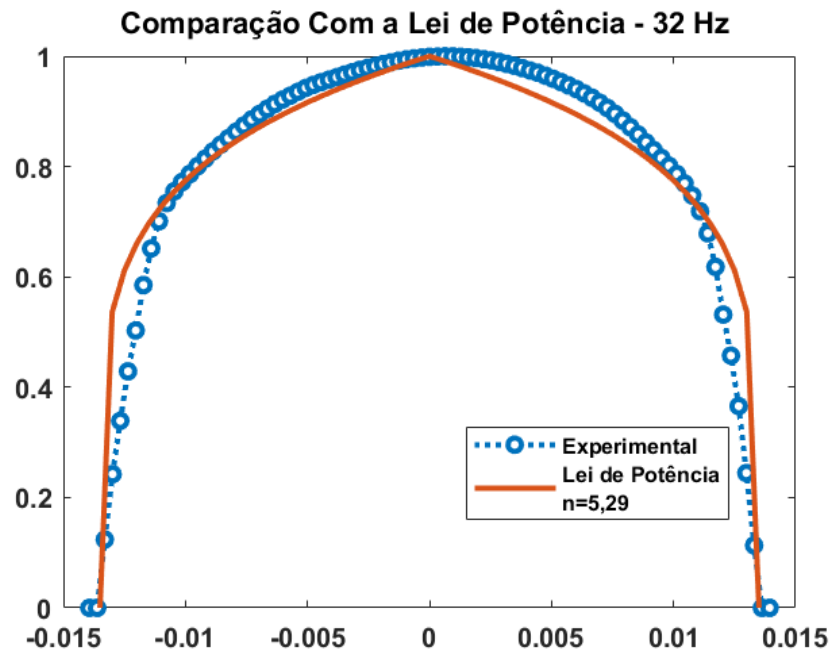
$$\left( \frac{V(i+1) + V(i)}{2} \right) \cdot \pi \cdot \text{raio}(i) \cdot (\text{raio}(i+1) - \text{raio}(i))$$

Uma comparação da reta de calibração do fornecedor com a reta obtida pela recalibração com o PIV pode ser vista abaixo.



**Figura 13: Comparação entre a reta de calibração do fornecedor e afeita experimentalmente por PIV**

Além disso, esse teste serviu para garantir que o escoamento na seção de testes estava de fato como o desejado. Para conferir que o regime observado é o turbulento foi utilizada a lei de potência. A fim de determinar o coeficiente 'n' da equação (4.4), foi utilizada a reta da Figura 4 sendo calculado o Reynolds específico de cada vazão.



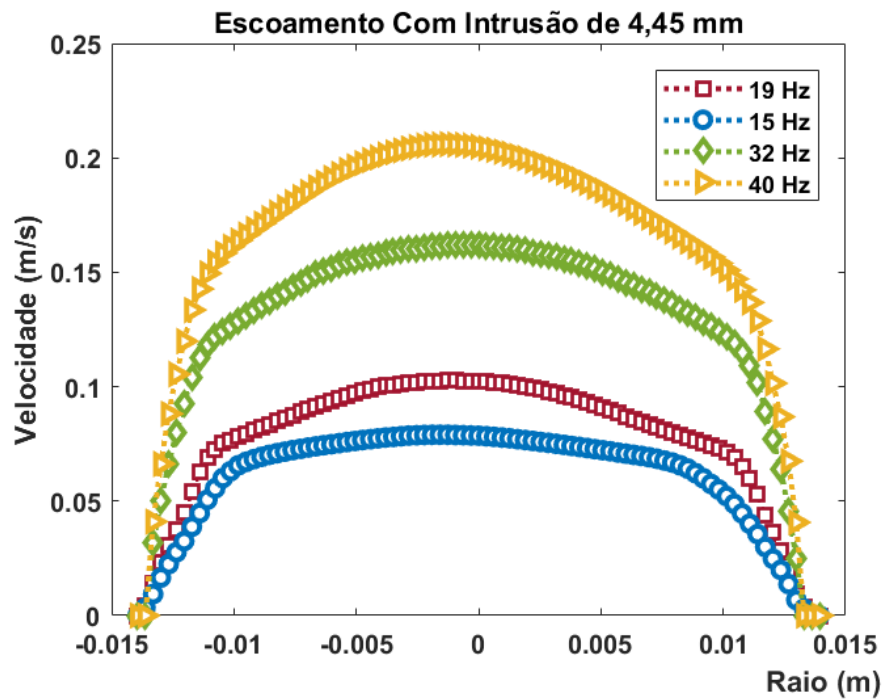
**Figura 14: Comparação do Perfil médio de velocidade com a Lei de potência para a vazão de 32 Hz.**

Como pode ser observado na Figura 14, o escoamento está de acordo com a lei de potência, apresentando um perfil de escoamento turbulento como desejado para esse experimento. As pequenas variações existentes observadas entre o experimental e o teórico são pelo fato do teórico considerar condições ideais no escoamento, não levando em conta as tensões cisalhantes na parede.

É possível também observar que para todas as vazões escolhidas nesse experimento o escoamento é turbulento.

## **7.2 Escoamento Com Intrusão**

Através de um método intrusivo, com a inserção de um parafuso no escoamento, foi possível fixar a posição radial da bolha de Taylor. A fim de verificar a distorção do escoamento devido a essa protuberância foi utilizado o método de PIV.



**Figura 15: Comparação entre perfil médio de velocidade para diferentes vazões com intrusão de 4,45 mm no escoamento.**

Observando as imagens pode ser visto a diferença entre os perfis de velocidade para diferentes vazões com a intrusão, sendo possível ver em todos os casos uma assimetria em relação ao eixo em  $y=0$ . Porém, As Figura 16 Figura 17 mostram por um outro lado, que as mudanças no escoamento não são tão grandes, o que indica que os resultados obtidos para o vetor velocidade ao redor da bolha podem ser considerados próximos aos de um escoamento real sem intrusão.

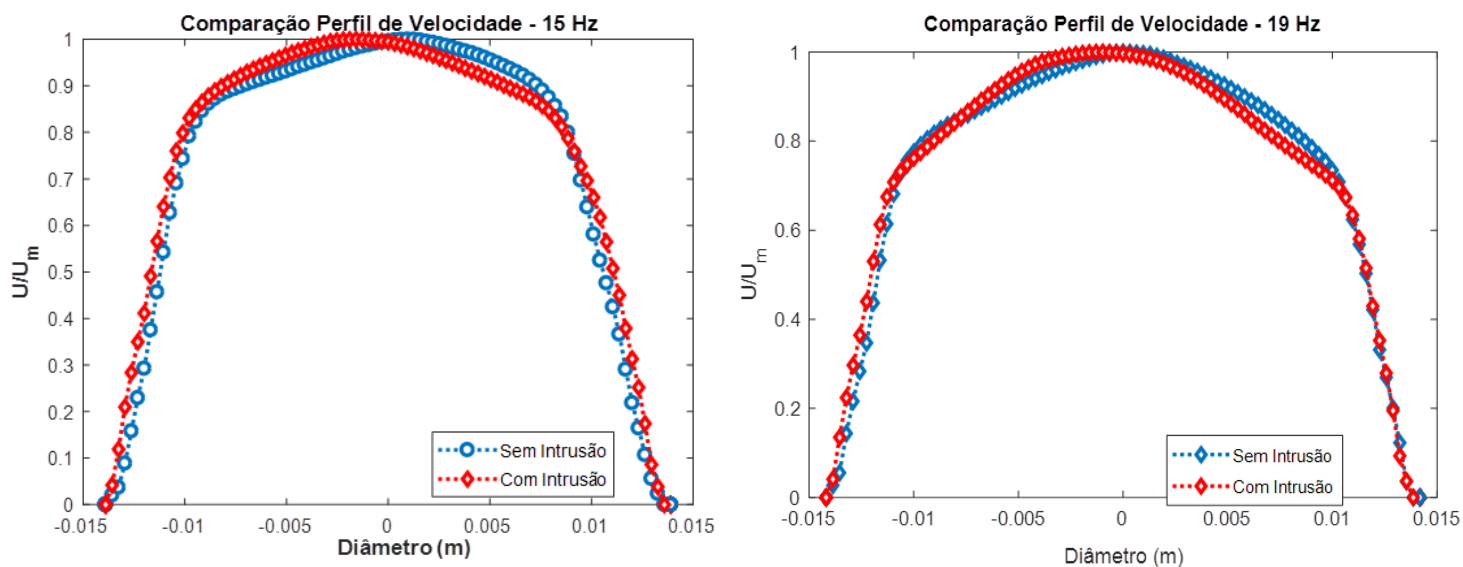


Figura 16: Comparação do perfil de velocidade com e sem intrusão, casos 15 Hz e 19 Hz.

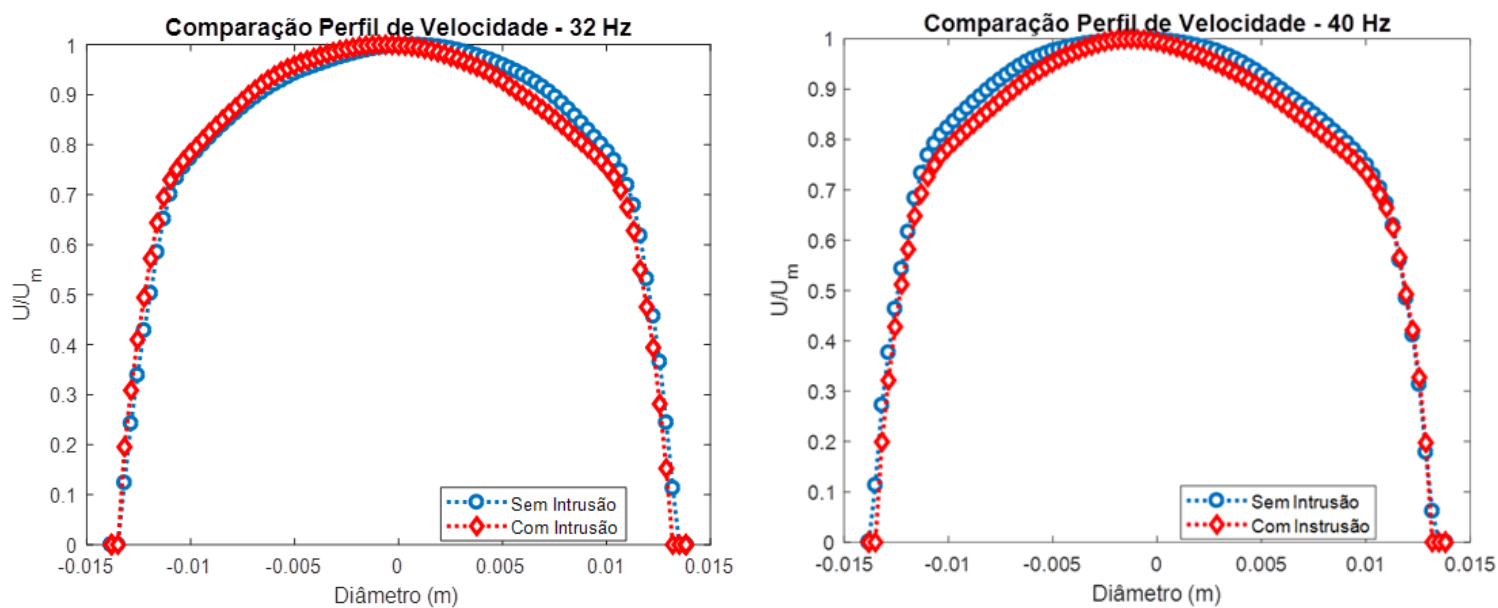
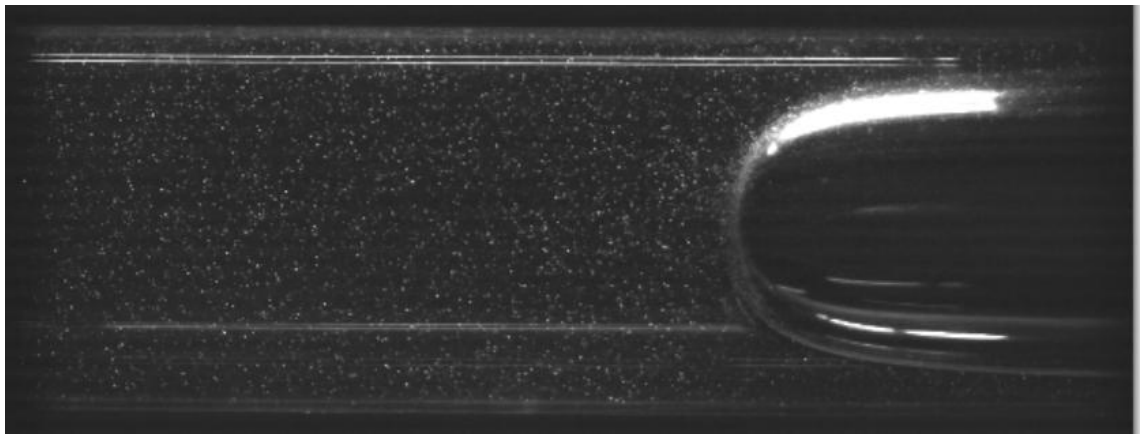


Figura 17: Comparação do perfil de velocidade com e sem intrusão, casos 32 Hz e 40 Hz.

Na próxima seção serão apresentados os efeitos desse escoamento na bolha de Taylor para os diferentes casos e vazões.

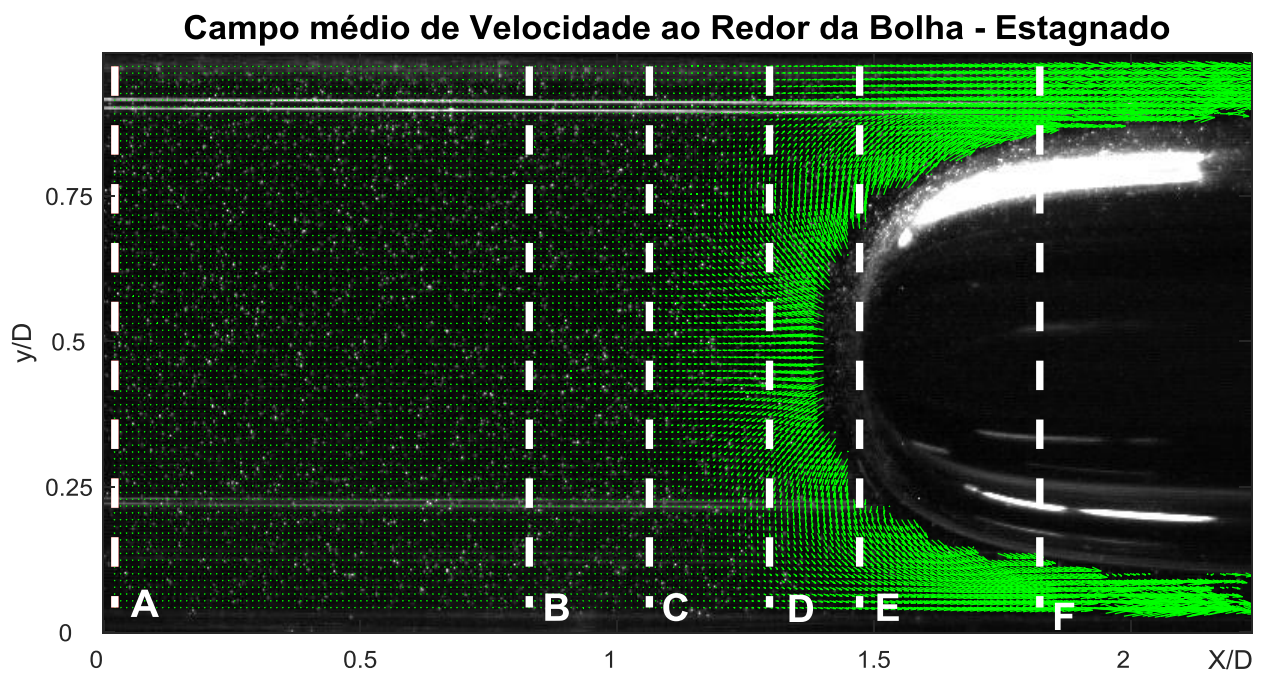
### 7.3 Bolha de Taylor em Escoamento Estagnado

Para comprovar que as instalações e métodos utilizados nesse experimento fornecem resultados confiáveis, primeiramente foram realizados testes que já são conhecidos na literatura e que possuem resultados conhecidos e confirmados pela quantidade de material existente a respeito. Por esse motivo foram reproduzidos experimentos da bolha de Taylor ascendente em fluxo estagnado. Um exemplo de imagem desse caso pode ser vista abaixo.



**Figura 18: Bolha de Taylor para o caso estagnado. Imagem obtida pela PIVCAM.**

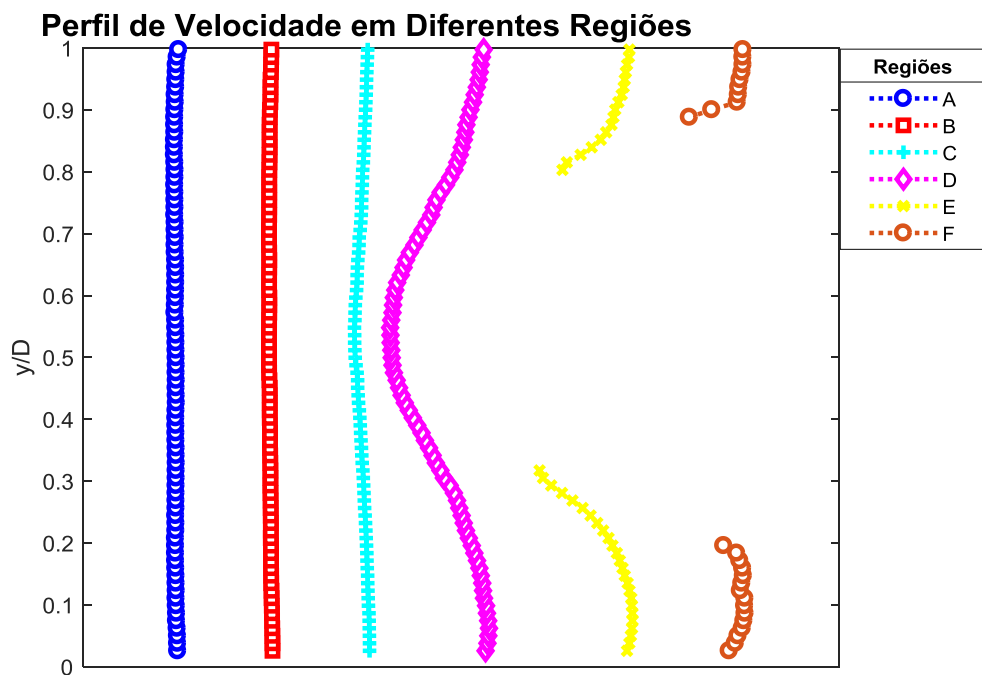
Como pode ser visto na Figura 18, a bolha aparenta ter um formato axissimétrico. O que vemos na imagem anterior pode ser comprovado pelo resultado obtido com a técnica de PIV mostrado abaixo. Além disso, é possível ver os reflexos do tubo e da bolha na imagem, o que atrapalha na hora de identificar mais precisamente as partículas no escoamento.



**Figura 19: Campo de velocidade dobre imagem da bolha de Taylor para o caso estagnado.**

Os perfis de velocidade das regiões mostradas na Figura 19 foram colocados em uma janela gráfica para visualizar melhor não só a simetria da bolha, mas como também para ver o aumento de velocidade nas laterais dela.

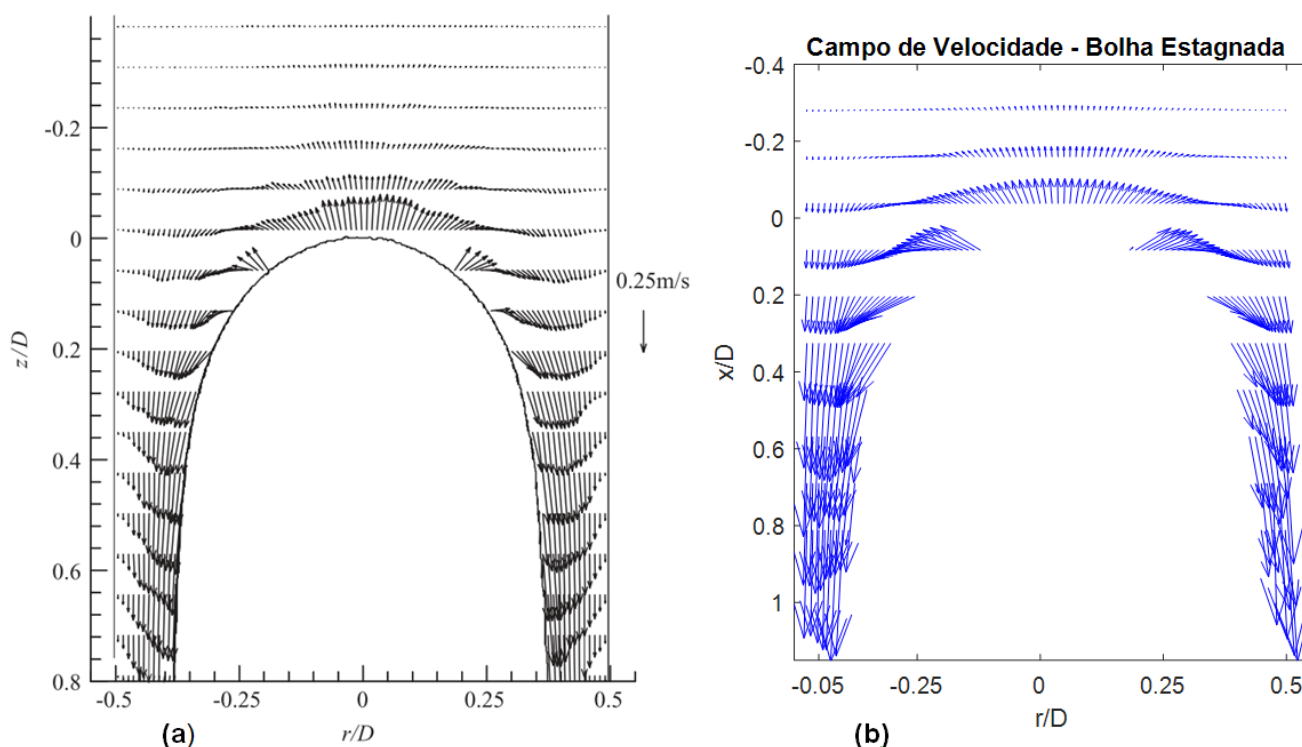




**Figura 20: Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 19.**

Podemos ver na Figura 20 que os vetores estão distribuídos igualmente ao redor da bolha e que o valor deles também reflete o eixo de simetria, mostrando que o escoamento ao redor da bolha passa com a mesma velocidade em ambos os lados. Como esperado para o caso de escoamento estagnado, o perfil de velocidade para as posições afastadas da bolha são zero, mas pode se observar que próximo da bolha, ele sofre uma perturbação, aumentando sua velocidade.

Os resultados obtidos estão de acordo com os de Nogueira et al. (2006). Uma imagem comparando os resultados obtidos com o dele é apresentada na Figura 21.



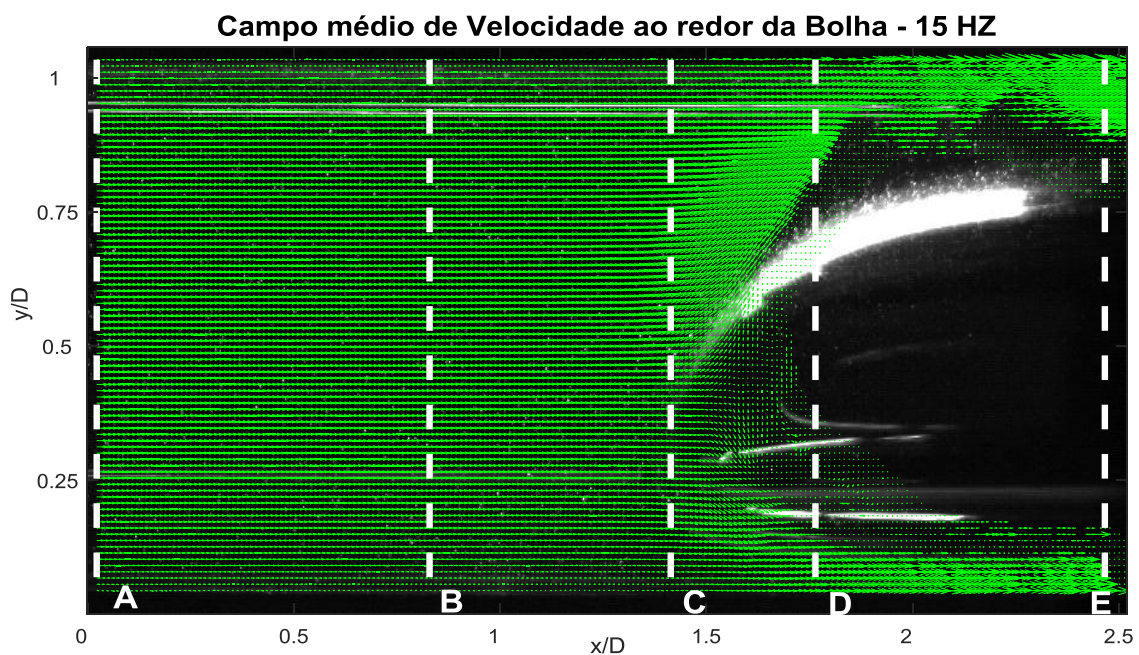
**Figura 21: Comparação dos resultados obtidos por Nogueira (2006)(a) do presente trabalho (b).**

Como observado acima os resultados estão compatíveis e o contorno da bolha pode ser visto. É importante observar que no experimento de Nogueira et al. (2006) o fluido de trabalho era uma solução de glicerol, enquanto que o desse trabalho é água.

Polonsky et al.(1999) também observou em suas imagens a mudança de direção do escoamento, identificando na interface da bolha um aumento da velocidade na direção radial que gradativamente se inverte, até se tornar o escoamento do filme de líquido. Esse aumento da velocidade radial pode ser atribuído pelo fato da bolha empurrar o escoamento para os lados.

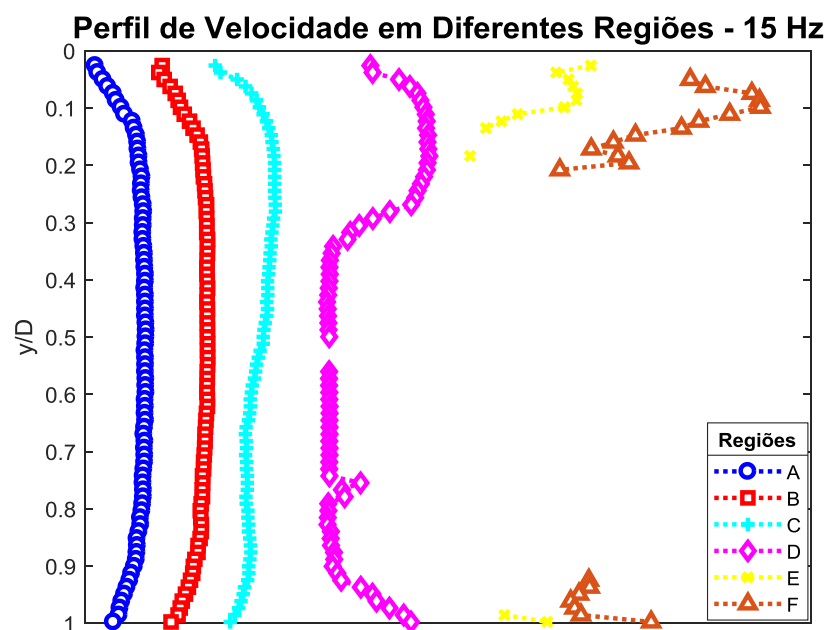
#### **7.4 Bolha de Taylor escoamento 15 Hz**

Esse é um dos casos que a bolha tem um comportamento ascendente e já apresenta certa assimetria. Isso pode ser observado nos estudos realizado a seguir.



**Figura 22:** Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para a vazão de 15 Hz.

Como pode ser visto na Figura 22, a máscara para esse caso não conseguiu seguir tão precisamente o contorno da bolha, mas ainda assim, algumas informações úteis podem ser obtidas analisando as regiões sinalizadas na imagem acima.

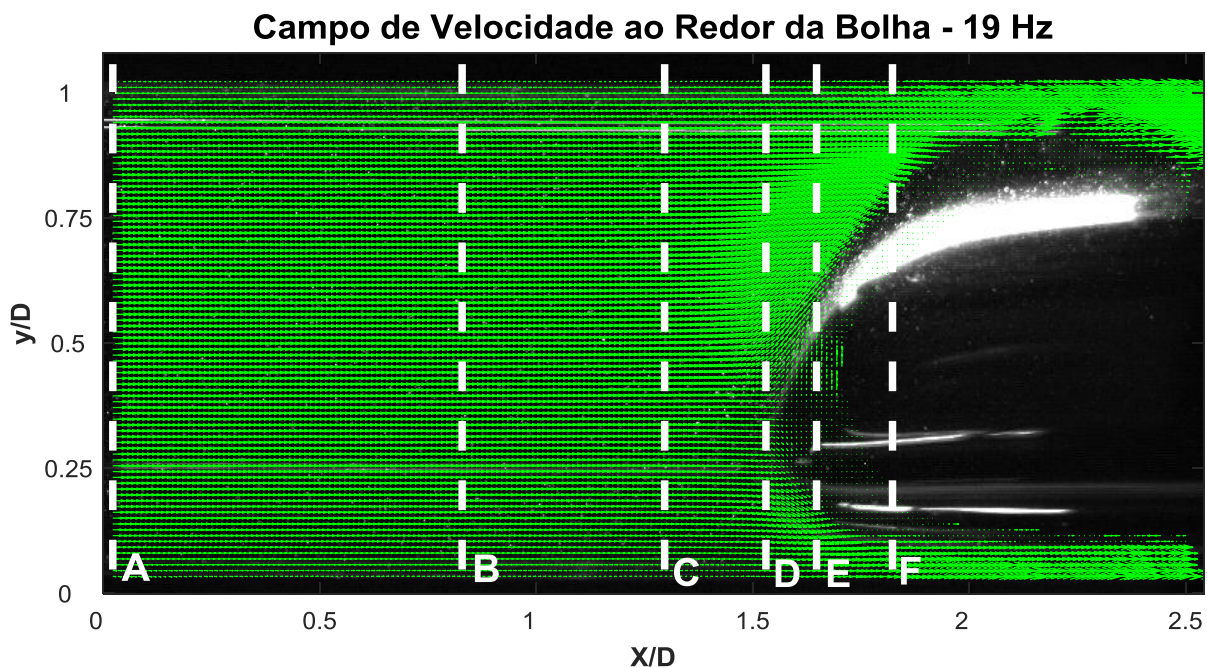


**Figura 23:** Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 22

Na Figura 23 pode ser visto que a bolha de Taylor possui um perfil assimétrico. A assimetria do escoamento já pode ser vista desde a região A, se intensificando na região C. No perfil de velocidade das regiões E e F, é possível ver o aumento da velocidade, satisfazendo a equação da continuidade.

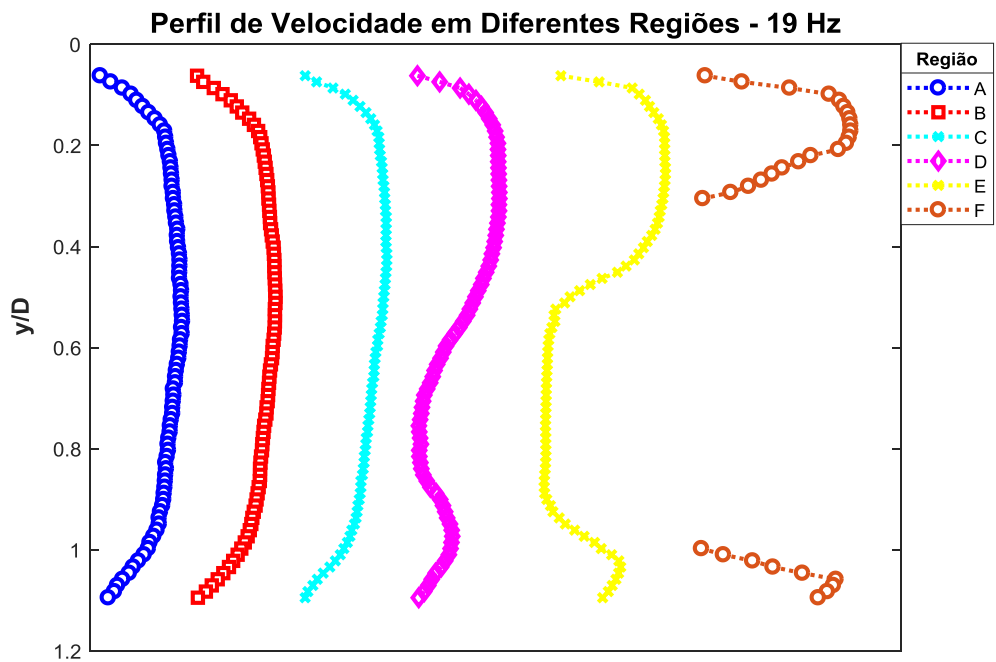
### 7.5 Bolha de Taylor escoamento 19 Hz

O comportamento do escoamento nessa vazão ainda é ascendente, porém visualmente a bolha aparenta estar subindo bem mais devagar.



**Figura 24: Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para a vazão de 19 Hz.**

A máscara apresentada na Figura 24 conseguiu seguir bem o contorno da bolha. Os vetores espúrios que podem ser visualizados entrando na bolha podem ser retirados depois no gráfico dos perfis de velocidade nas regiões apontadas.



**Figura 25: Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 24.**

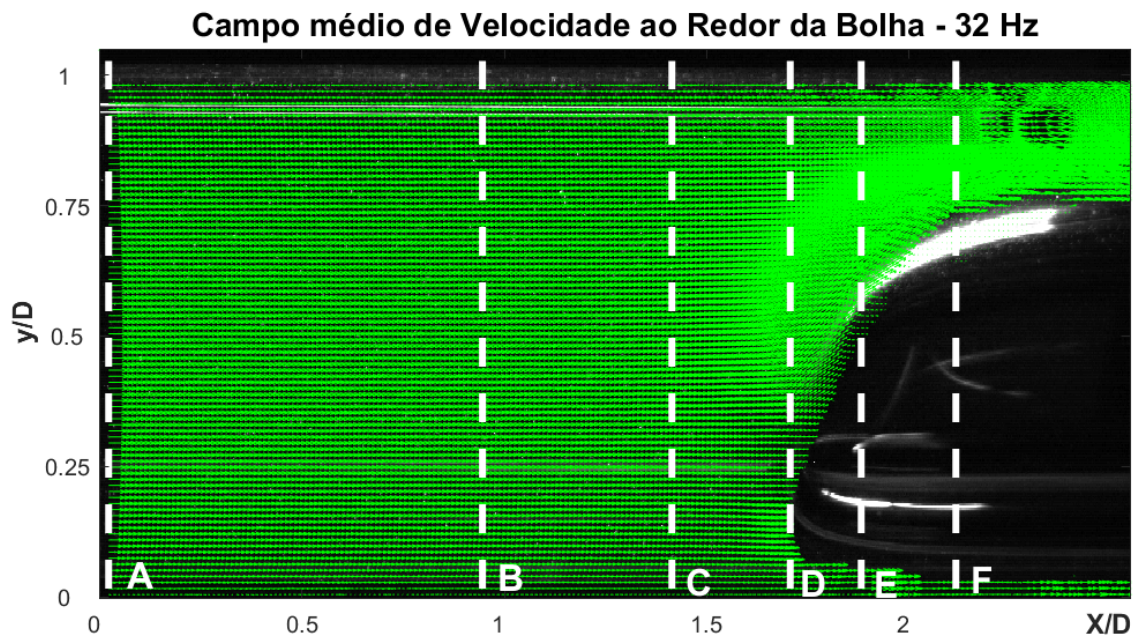
É interessante notar que no gráfico de 19 Hz o perfil de velocidade apresenta mais claramente uma pequena deformação já na região 'A'. Essa assimetria do perfil é devido a intrusão do parafuso. O que pode ser observado é que a bolha nesse caso se fixou na posição onde a velocidade do escoamento é menor, sendo compatível com a análise feita por Fabre e Figueroa-Espinoza (2014).

Ao redor da bolha também se consegue ver que a velocidade aumenta muito em relação ao perfil de velocidade inicial.

## 7.6 Bolha de Taylor escoamento 32 Hz

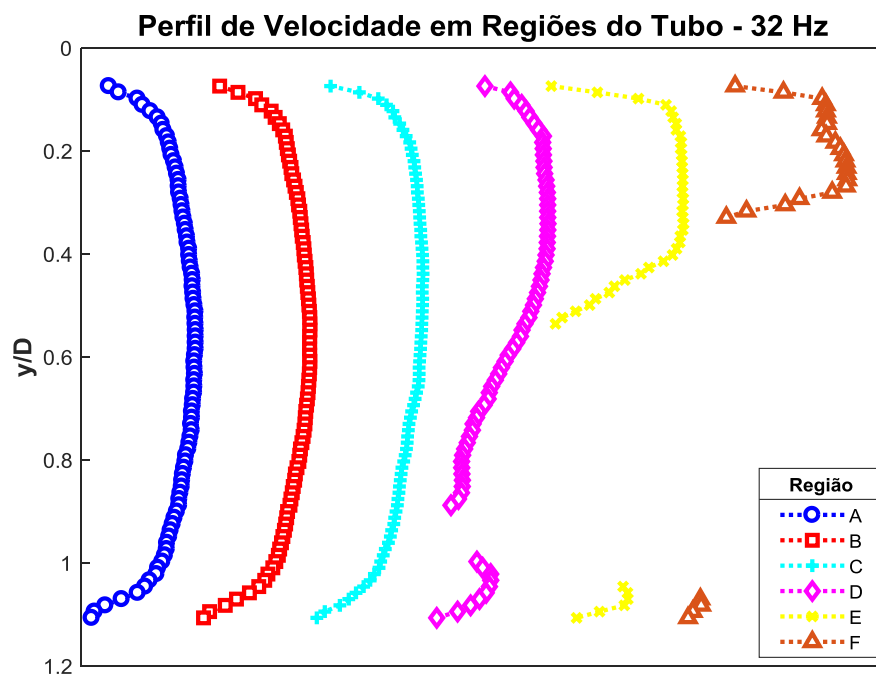
Esse é o primeiro caso estudado que a bolha apresenta um comportamento descendente.





**Figura 26:** Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para a vazão de 32 Hz

A Figura 26 mostra que a máscara feita conseguiu cobrir de maneira bem precisa a bolha.



**Figura 27:** Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 26.

Novamente na Figura 27 é possível visualizar a assimetria logo na região A e a tendência da bolha fugir do escoamento com maior velocidade. É possível ver bem nesse caso o contorno da bolha através do perfil de velocidade das regiões 'D', 'E' e 'F'.

Para essas últimas 3 regiões, também é possível ver o aumento significativo da velocidade no topo da bolha quando comparados com as 3 primeiras regiões, satisfazendo a equação da continuidade.

### 7.7 Bolha de Taylor escoamento 40 Hz

Nessa vazão o comportamento da bolha é descendente, e esse foi o caso em que pelo fato da velocidade de translação da bolha ser mais rápido, não foi possível ajustar a vazão final antes de passar a intrusão (Detalhes na seção Etapas de Medição). Por esse motivo as imagens apresentadas a seguir estarão na posição oposta das outra 3 vazões anteriores. Acredita-se que o motivo para que a bolha se fixe na posição contrária das vazões anteriores é o de que a bolha é atraída pelo parafuso ao passar por ele.

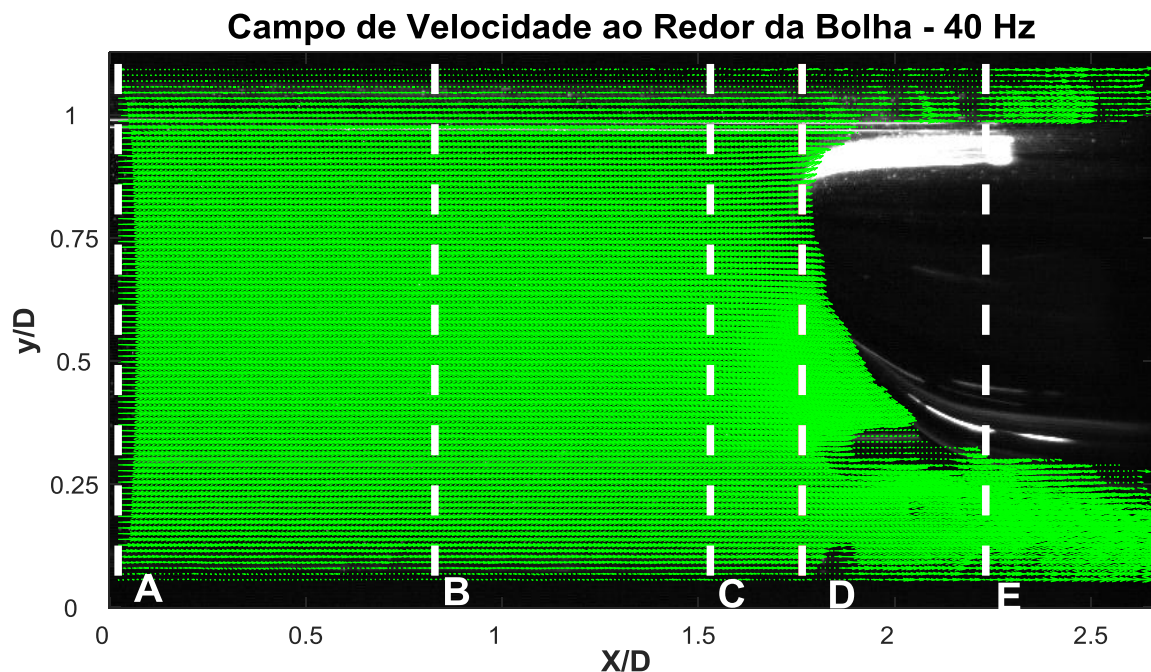
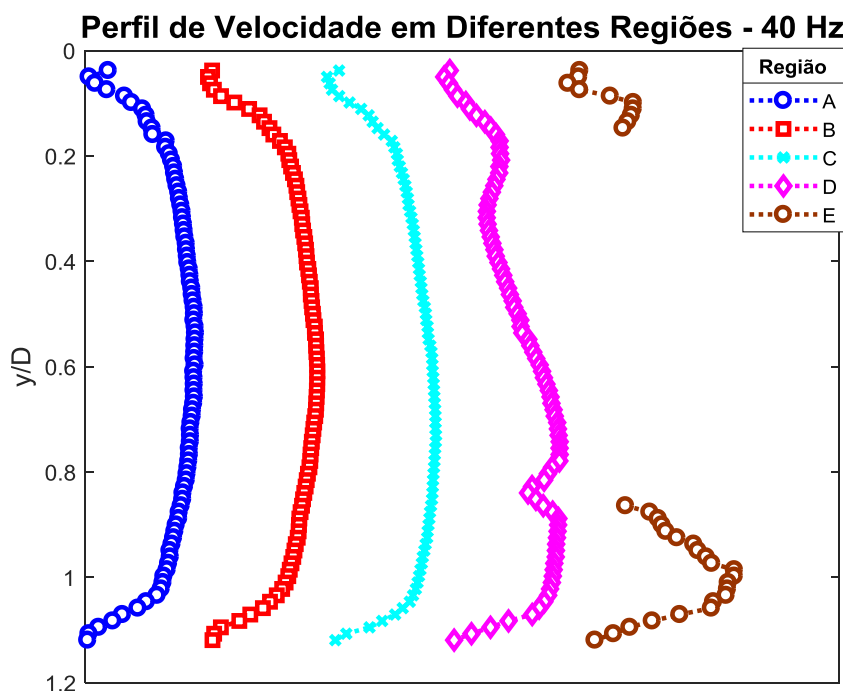


Figura 28: Campo de velocidade sobre imagem da bolha de Taylor para a vazão de 40 Hz.

Mais uma vez a máscara conseguiu contornar bem a bolha, porém entre a região D e F o campo de velocidade se encontra com uma falha, possivelmente devido a reflexão da bolha.



**Figura 29: Perfil de velocidade nas regiões definidas na figura 28.**

A assimetria do perfil que vai de encontro com a bolha pode ser claramente visto na região C, mostrando novamente que a bolha se fixa na posição em que a velocidade do escoamento é menor. Mais uma vez o aumento da velocidade ao redor da bolha é visível. Em aproximadamente 0.8 Diâmetros é possível ver o efeito da falha do campo médio de velocidade comentada anteriormente.

## 8. Conclusão

Foi possível através da técnica de PIV encontrar o campo de velocidade ao redor da bolha, obtendo resultados novos para o entendimento do fenômeno.

Foi observado que através da de uma intrusão no escoamento antes do encontro com a bolha, o perfil de velocidade desse escoamento se distorce de maneira sutil, mas de forma suficiente a fixar a bolha de Taylor sempre em uma mesma posição.



A utilização de um sistema de identificação da bolha para o disparo automático da câmera foi implementado com sucesso, permitindo a aquisição de imagens dela na mesma posição axial.

No presente trabalho também foi identificado um possível motivo para o posicionamento da bolha de Taylor na parede contrária, quando essa apresenta um comportamento descendente. Foi observado que essa mudança de posicionamento somente ocorre quando a bolha entra em contato com o parafuso inserido.

A teoria de Fabre e Figueroa-Espinoza (2014), de que a bolha tende a fugir da maior velocidade de escoamento foi comprovada, e também indicam que o principal fator que determina o posicionamento da bolha é o escoamento a sua frente (Collins et al., 1978).

É preciso se atentar que o caso estudado nesse trabalho, analisa uma bolha de Taylor em um plano 2D, por esse motivo, quando a bolha é vista no plano, apenas o seu maior formato se torna visível. Contudo, os resultados observados servem como um avanço inicial no estudo a respeito das bolhas de Taylor assimétrica em um escoamento descendente.

Para próximos trabalhos seria interessante realizar a técnica de PIV para analisar o comportamento de uma bolha de Taylor subindo contra corrente, porém em escoamento laminar. Como o perfil de velocidade é diferente os resultados podem trazer informações novas para o problema. Outro caso que poderia ser feito seria um escoamento turbulento com uma velocidade muito alta de forma que a bolha fique completamente achatada na parede, podendo assim, descobrir se o formato da bolha muda de maneira mais acentuada ou se de fato tende a estabilizar como observado para os casos apresentados nesse trabalho.

O fato de ter sido desenvolvido um disparo automático da câmera e do LED no momento em que a bolha passa, facilitou na obtenção de uma grande quantidade de imagens, porém a realização do ajuste da vazão manualmente, de maneira gradual e sem movimentos bruscos, acabou dificultando o processo. Por causa disso, seria interessante desenvolver um método para ajustar a vazão do escoamento de modo automático.

Como pode ser visto nas imagens tiradas da bolha, pelo fato dela refletir a luz pulsante que incide sobre seu corpo, a identificação de partículas se torna mais

difícil. A utilização de partículas fluorescentes no fluido de trabalho poderia ajudar na identificação delas ao utilizar o programa de PIV.

Outra pesquisa interessante seria realizar os experimentos para uma bolha de volume menor, o que poderia diminuir a amplitude de oscilação da bolha e gerar resultados interessantes.

## 9. Referências

COLLINS, R. et al. The motion of a large gas bubble rising through liquid flowing in a tube. **Journal of Fluid Mechanics**, 1978.

DAVIES, R. M.; TAYLOR, G. The Mechanics of Large Bubbles Rising through Extended Liquids and through Liquids in Tubes. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 1950.

DUMITRESCU, D. T. Strömung an einer Luftblase im senkrechten Rohr. **ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik**, 1943.

FABRE, J.; FIGUEROA-ESPINOZA, B. Taylor bubble rising in a vertical pipe against laminar or turbulent downward flow: symmetric to asymmetric shape transition bubble rising in a vertical pipe against laminar or turbulent downward flow: symmetric to asymmetric shape transition. v. 755, p. 485–502, 2014.

Felipe Pereira de Araújo, “Medição do campo de velocidade médio de uma bolha de Taylor, utilizando PIV”, Monografia de trabalho final – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FIGUEROA-ESPINOZA, B.; FABRE, J. Taylor bubble moving in a flowing liquid in vertical channel: transition from symmetric to asymmetric shape The velocity and shape of Taylor bubbles moving in a vertical channel in a. 2011.

GOLDSMITH, H. L.; MASON, S. G. The movement of single large bubbles in closed vertical tubes. **Journal of Fluid Mechanics**, 1962.

HA-NGOC, H.; FABRE, J. Test-case number 29a: The velocity and shape of 2D long bubbles in inclined channels or in vertical tubes (PA, PN) Part I: in a stagnant

liquid 1 Practical significance and interest of the test-case. [s.d.].

HA-NGOC, H.; FABRE, J. **Test-case number 29b: The velocity and shape of 2D long bubbles in inclined channels or in vertical tubes (PA, PN) Part II: in a flowing liquid 1 Practical significance and interest of the test-case**, 2004.

KAWAJI, M. et al. Flow visualization of two-phase flows using photochromic dye activation method. **Nuclear Engineering and Design**, 1993.

KOELBLINGER, B. "Caracterização de bolha de Taylor em fluxo descendente quanto a sua geometria" Monografia de trabalho final – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LU, X.; PROSPERETTI, A. Axial stability of Taylor bubbles. **J. Fluid Mech**, v. 568, p. 173–192, 2006.

MARTIN, C. S. Vertically Downward Two-Phase Slug Flow. **Journal of Fluids Engineering**, 1976.

NAKORYAKOV, V. E.; KASHINSKY, O. N.; KOZMENKO, B. K. Experimental study of gas-liquid slug flow in a small-diameter vertical pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, 1986.

NICKLIN, D. J.; WILKES, M. A.; DAVIDSON, J. F. Two-Phase Flow in Vertical Tubes. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, 1962.

NOGUEIRA, S. et al. 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, p. 845–857, 2006.

POLONSKY, S.; SHEMER, L.; BARNEA, D. The relation between the Taylor bubble motion and the velocity field ahead of it. **International Journal of**

**Multiphase Flow**, 1999.

WHITE, E. T.; BEARDMORE, R. H. The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes. **Chemical Engineering Science**, 1962.