

VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DE UMA BOLHA DE TAYLOR COM EQUIVALÊNCIA DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO FLUIDO/TUBO

Aluno: Pedro Gabriel Tavares Vieira
Orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Introdução

Com a crescente demanda energética no Brasil e no mundo, é essencial para a indústria o desenvolvimento de técnicas que promovam um aumento na eficiência do transporte de combustíveis, visto que o Brasil está investindo fortemente na expansão da sua malha de transportes de combustíveis através de dutos. Nesta área, assim como em outras, especialmente na indústria de petróleo, escoamentos bifásicos são comumente encontrados. Em muitos casos, um entendimento maior sobre a física destes escoamentos complexos é de enorme ajuda para a otimização de processos, melhoria de resultados e redução de custos. O escoamento bifásico é também utilizado em indústrias e usinas sendo aplicado para se obter uma melhor eficiência na troca de calor do fluido no interior do tubo.

Tendo essas necessidades em vista, decidiu-se iniciar no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da PUC-Rio uma linha de estudo com o objetivo de desenvolver técnicas de análise experimental de escoamentos bifásicos que em geral apresentam características bastante desafiadoras. Um dos mais comuns desafios encontrados no estudo de escoamento bifásico é a distorção óptica das imagens, obtidas a partir da visualização do escoamento. Isto é consequência da diferença do índice de refração entre o fluido de trabalho e do material que forma o tubo por onde escoar o fluido, além da própria curvatura deste tubo. Problemas desse nível influem negativamente nos resultados obtidos e prejudicam as posteriores análises do escoamento. A partir disso a presente pesquisa fixou-se principalmente em validar a utilização da solução de iodeto de sódio (NaI) como principal instrumento de redução das distorções ópticas e de otimização da visualização do escoamento. Para tal, este estudo foi baseado na visualização de uma bolha de ar ascendente numa tubulação vertical com o fluido líquido estagnado. Este tipo de escoamento é conhecido como escoamento bifásico de uma bolha de Taylor. Foram utilizadas técnicas de iluminação para detecção das fases ar e líquido e a utilização de uma solução que tem o mesmo índice de refração da tubulação utilizada, visando tanto um melhor contraste das fases como também a eliminação de distorções ópticas. Para este fim, foi utilizada uma seção de teste já presente no laboratório que será detalhadamente mostrada ao longo deste resumo.

Objetivo

Objetivo deste trabalho foi relatar a utilização de técnicas de visualização para escoamentos bifásicos ar-líquidos. A primeira técnica baseia-se na iluminação de fundo por uma matriz de LED's. A segunda foi a preparação e utilização de uma solução de Iodeto de Sódio (NaI), assim igualando o índice de refração da tubulação de acrílico utilizada.

Montagem Experimental para Medição do Escoamento Induzido pela Passagem de uma Bolha de Taylor

Visando uma total adequação do projeto às necessidades experimentais, foi muito importante uma cuidadosa escolha dos materiais utilizados e das dimensões adequadas. A figura 1 ilustra toda a estrutura e equipamentos da seção de testes utilizada para o presente trabalho. As subdivisões da seção de testes que merecem descrições exclusivas são: bancada

experimental, seção de testes, caixa de visualização, gerador de bolhas e técnica de iluminação de fundo.

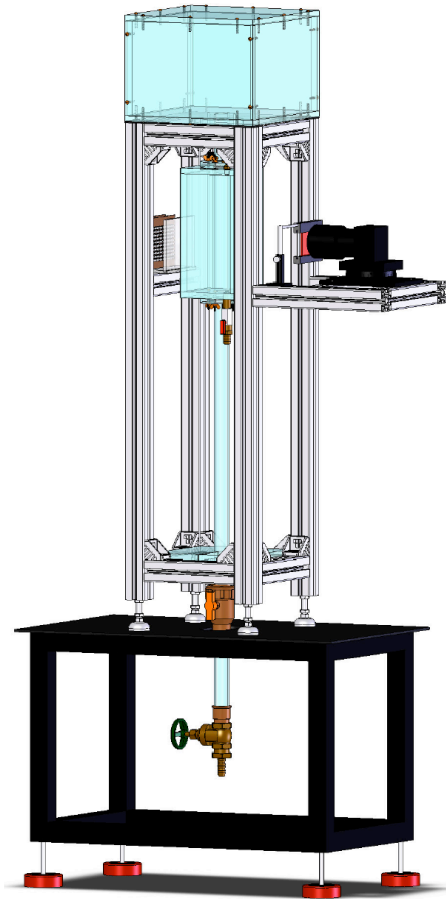


Figura 1. – Desenho da montagem experimental

A. Bancada Experimental

Esse nome é dado à estrutura que suporta a seção de testes e os instrumentos utilizados para medição e visualização. Essa bancada foi construída utilizando perfis (perfil Bosch) de seção quadrada de alumínio de 45 x 45 mm de fabricação Bosch. Os perfis foram dimensionados, e conectados uns aos outros utilizando cantoneiras de 90° e possuía apoios com regulagem de altura para que a estrutura pudesse ser nivelada. A estrutura foi colocada sobre uma bancada de aço com um furo no centro para que pudesse ser acoplada à seção geradora de bolhas. A bancada possui apoios anti-vibração com ajuste de altura.

As figuras 2 e 3 mostram os desenhos técnicos da bancada experimental, todos cotados em milímetros.

No intuito de centralizar e dar rigidez à seção de testes em relação à bancada experimental, foram usinadas duas placas de acrílico simétricas como mostram as figuras , para serem encaixadas na parte inferior da estrutura de alumínio sem necessidade de desmontar a seção de testes, , figura 4, e o desenho técnico, figura 5

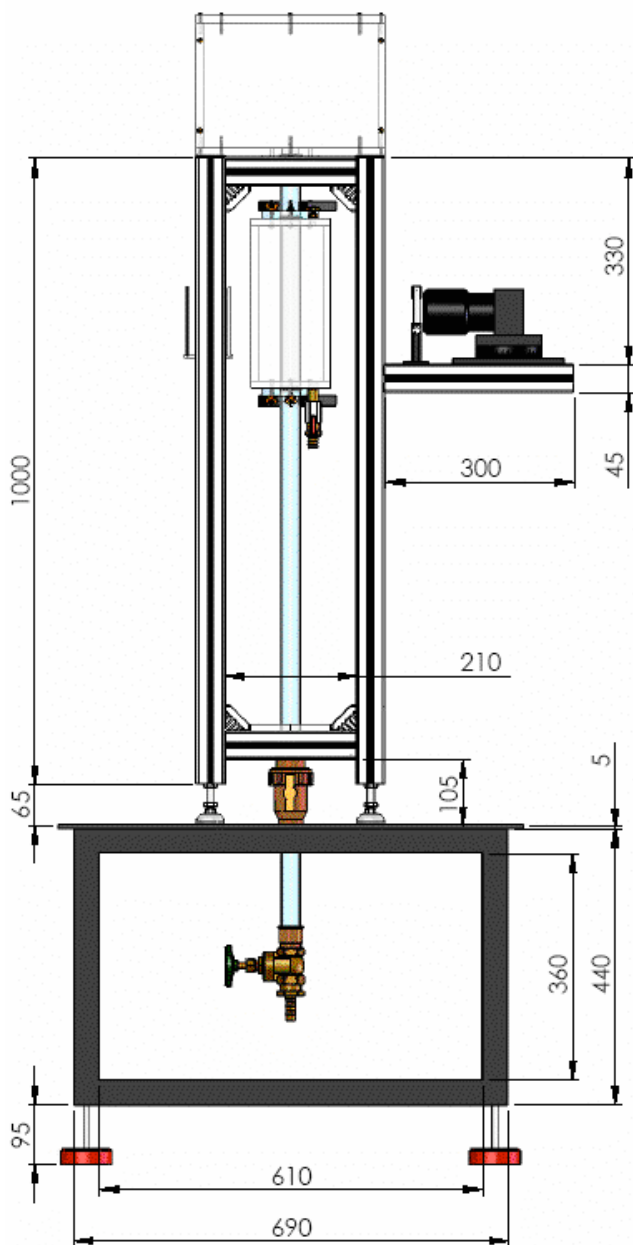


Figura 2. Desenho técnico da bancada experimental (vista frontal)

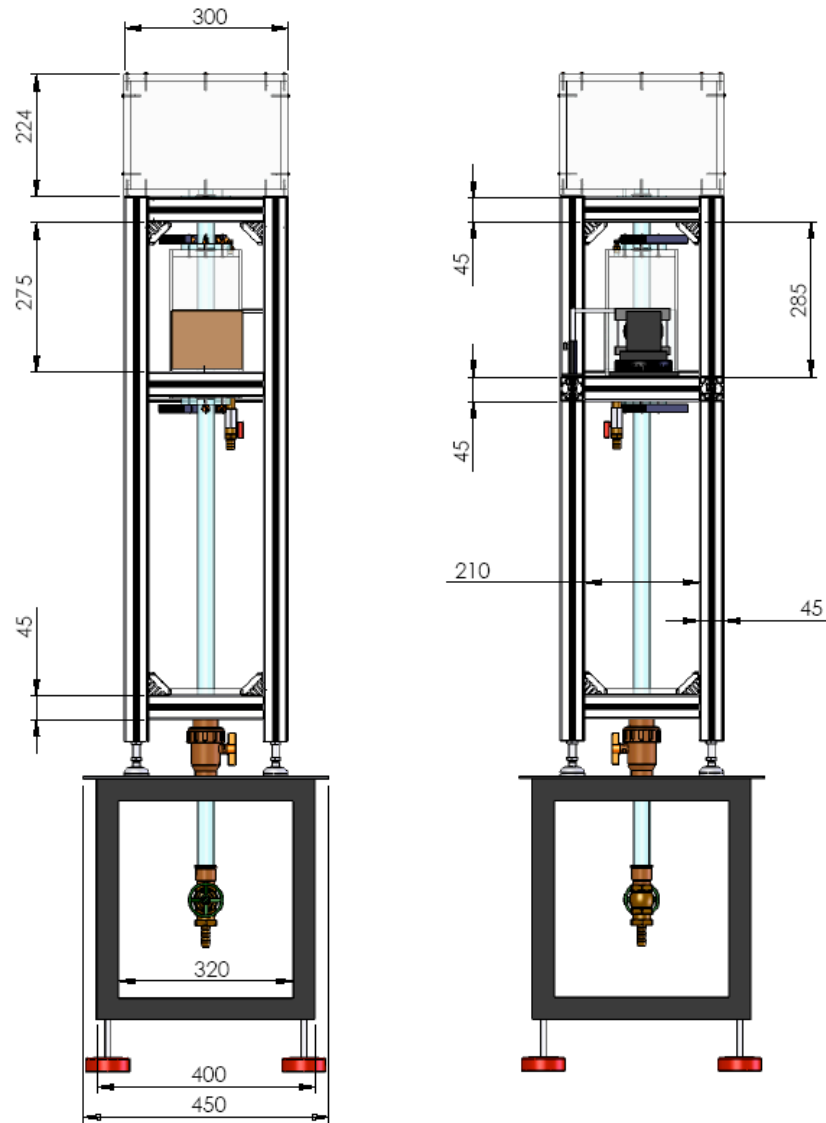


Figura 3. Desenho técnico da bancada experimental (vistas laterais)

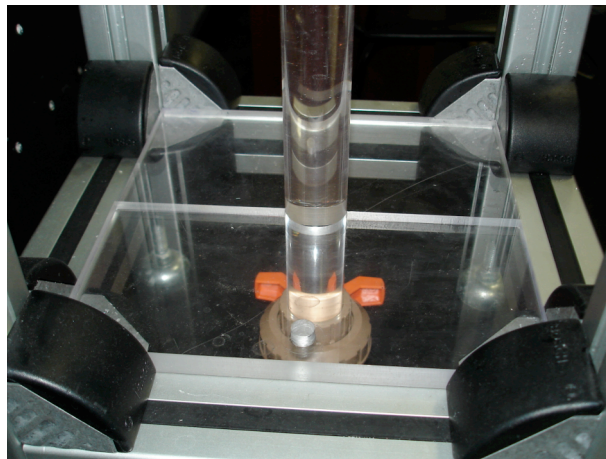


Figura 4. Foto das placas de acrílico montadas na bancada experimental

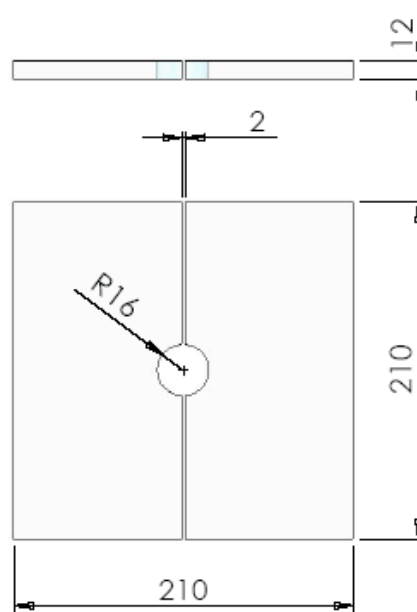


Figura 5. Desenho técnico das placas de acrílico

B. Seção de Teste

Para que fosse possível a visualização e medição do escoamento foi necessário um tubo transparente. Para isso utilizou-se um tubo cilíndrico de acrílico com as seguintes dimensões 32 x 2,5 x 1000 mm (diâmetro externo, espessura de parede, comprimento). Na parte superior do tubo foi acoplado o reservatório de fluido por meio de um flange. Antes de acoplar o flange foi encaixada a caixa de visualização, que será detalhada no próximo item. Na parte inferior do tubo foi colado um flange macho de PVC para acoplar o gerador de bolhas. A figura 6 mostra o desenho técnico da seção de testes.

O reservatório de fluido é uma caixa de acrílico com um furo no centro da parte inferior, a montagem foi realizada utilizando-se parafusos e cola de silicone para garantir a vedação. O acoplamento ao tubo de acrílico, foi feito por um flange aparafusado com um o-ring para vedação. A figura 7 apresenta uma foto do reservatório de fluido e a figura 8 mostra o desenho técnico com as dimensões da caixa todas em milímetros.

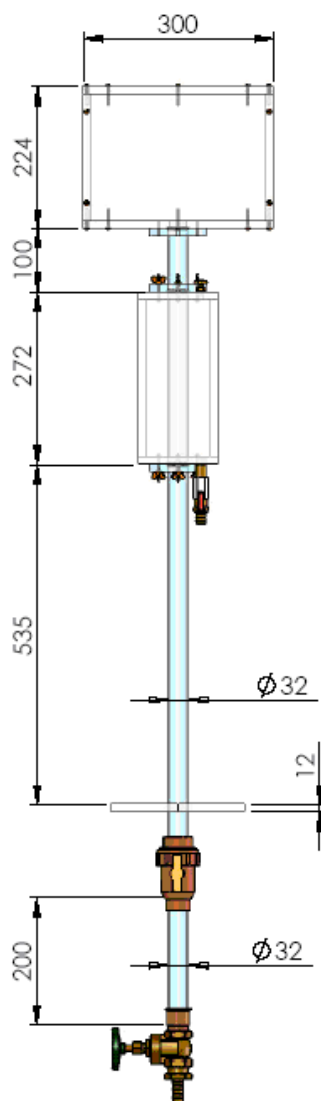


Figura 6. Desenho técnico da seção de testes

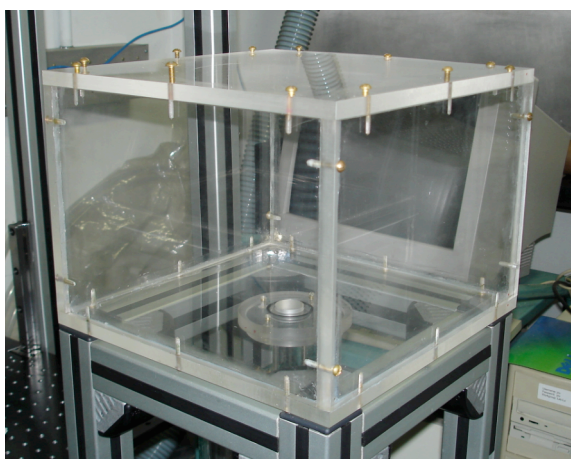


Figura 7. Foto do reservatório de fluido

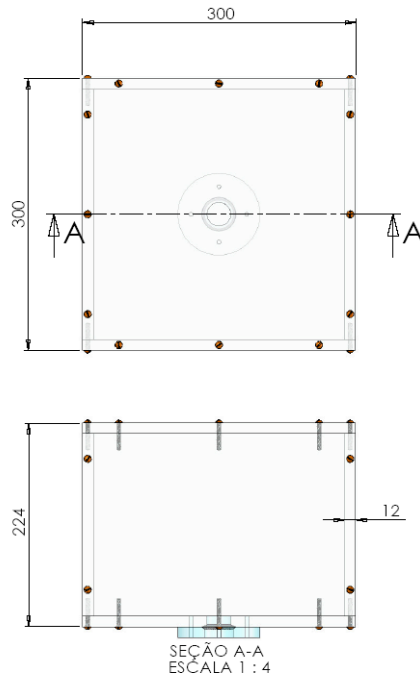


Figura 8. Desenho técnico do reservatório de fluido

C. Caixa de Visualização

Como já dito anteriormente, o grande desafio imposto às técnicas utilizadas neste estudo são as distorções ópticas. Um dos primordiais meios para redução desse problema é utilização de uma caixa de visualização ao redor do tubo de acrílico. Essa caixa de visualização é preenchida com o mesmo fluido utilizado no experimento.

A figura 9 apresenta o desenho técnico da caixa de visualização, que foi montada com a parte superior, inferior e duas laterais em acrílico, e as outras duas laterais em vidro, todas vedadas entre si com cola de silicone. Uma das laterais de vidro foi utilizada para incidência da iluminação proveniente do laser na seção de testes a outra para visualização da seção a partir da câmera digital.

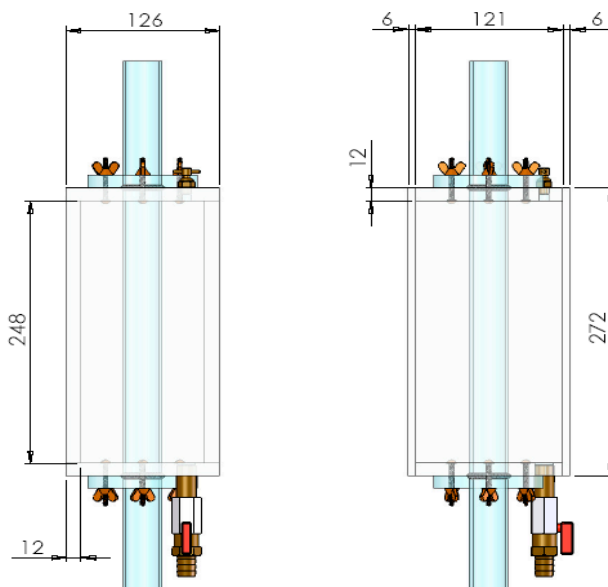


Figura 9. Desenho técnico da caixa de visualização

A caixa de visualização possui uma entrada para o fluido na parte inferior e um suspiro para saída de ar na parte superior. Suas vedações com o tubo de acrílico foram feitas utilizando flanges aparafusados com o-rings, figura 10.



Figura 10. Vista explodida da caixa de visualização

D. Gerador de Bolhas

O gerador de bolhas empregado no experimento foi feito utilizando-se duas válvulas interligadas por um tubo de acrílico com 32 mm de diâmetro externo, onde a bolha é formada, figura 11. A válvula superior é uma válvula do tipo esfera de PVC e tem a função de liberar a bolha. A válvula inferior é do tipo gaveta sendo utilizada para o controle do volume de ar da bolha a ser investigada. O gerador de bolha construído permite a produção de bolhas com volume uniforme e controlado.



Figura 11. Foto gerador de bolhas

Técnica de Iluminação de Fundo

Esta técnica consiste numa iluminação uniforme, constante e de fundo a partir de uma matriz de LED's de alta capacidade de iluminação. Essa técnica proporciona o contraste das bolhas de ar presentes no escoamento. O escoamento é iluminado com uma fonte constante de luz por trás, para que os espaços preenchidos por ar ganhem uma coloração mais escura do que restante da imagem preenchida por a interface líquido-ar mais nítido e com maior contraste (figura 13 mostra o desenho esquemático do sistema de iluminação de fundo com LED).

Nos primeiros testes com painel de LED's, foi observado a não uniformidade da luz emitida, que se tornando pontual, impedia que a imagem obtivesse uma iluminação homogênea. Para solucionar esse problema, foi utilizada uma placa uniformizadora feita de vidro jateado que foi instalado na frente da matriz de LED'S para homogeneizar a luz emitida, como mostra a figura 12.

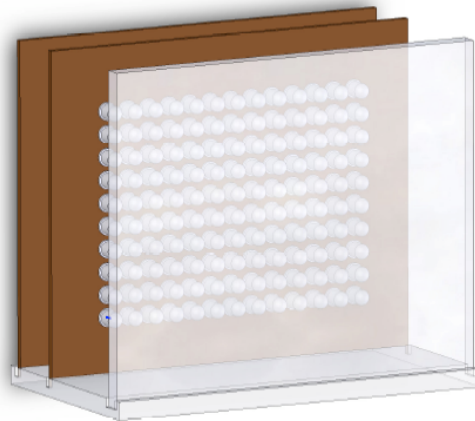


Figura 12. Desenho esquemático do sistema de iluminação de fundo

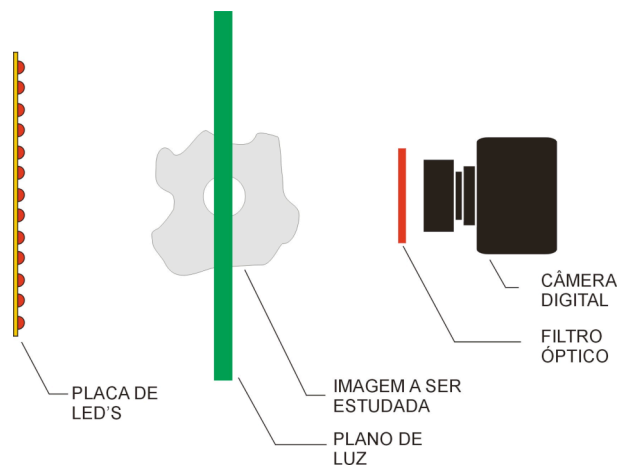


Figura 13. Esquema de aplicação da técnica de iluminação de fundo

Solução de Iodeto de Sódio (NaI)

A fim de se resolverem os problemas ópticos já tratados neste relatório, há algum tempo tem-se utilizado (Uzol *et al*, 2001), em pesquisas relacionados à medição de escoamentos, a solução de NaI em água que reduz significativamente os problemas de distorções ópticas relacionados a diferença de índices de refração entre o fluido e a tubulação. O índice de refração da solução de NaI depende, entre outras coisas, principalmente da temperatura em

que o fluido esta exposto(T), da concentração de NaI na solução (c) e do comprimento de onda (λ) da luz usada para captura das imagens. Segundo Kadambi *et al*,1998, o índice de refração da solução de NaI varia linear e moderadamente com a temperatura. Em relação a concentração de NaI, o índice de refração também varia linearmente, no entanto tem uma taxa de variação bem mais elevada. Com esses dados, somados a relação da variação do índice de refração da solução de NaI com o comprimento de onda[$\Delta n((\lambda) \propto \lambda^2$]dado por Pedrotti and Pedrotti,1987, Kadambi et al 1998, chegou na equação geral para a variação do índice de refração da solução de NaI em função dos parâmetros T, c, λ :

$$n_{\text{NaI}}(T, c, \lambda) = 1.252 - (2.91 \times 10^4 \text{C}^{-1}) \times T + (0.365) \times c + (5542) \text{nm}^{-2} \times \lambda^{-2}$$

No trabalho de Uzol *et al*, 2001, foi utilizada uma concentração de 64% em massa de NaI. Com isso, foi obtido o índice da solução de 1.49, igualando ao índice do tubo de acrílico. Um dos problemas desta solução é a formação de íons de I_3^- em presença do oxigênio de da luz. Porém a estabilização da solução é obtida através da adição de 0.1% em massa de Tiosulfato de Sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$).

Metodologia aplicada no processo de visualização da bolha de Taylor

Para implementação da técnica de visualização da bolha, foi utilizado um painel composto por 120 LED's (figura 14). O LED usado foi de alta potencia (3500candelas), com um ângulo de emissão de 30° e comprimento de onda emitido de 660nm. Esse painel era alimentado por uma fonte de corrente contínua.

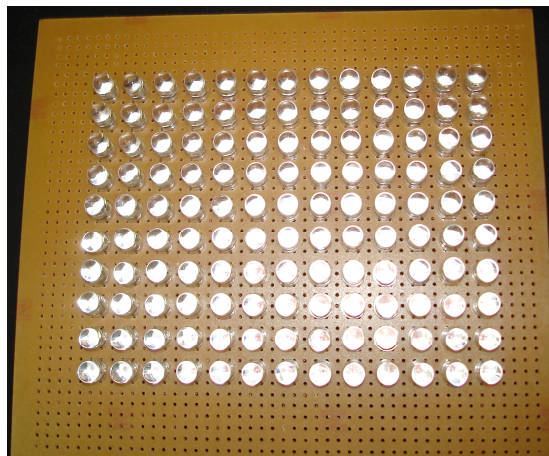


Figura 14. Foto do painel de LED's

A bolha de ar era produzida manipulando-se as válvulas e permitindo a entrada de ar em contrapartida com a saída da solução. O tamanho da bolha desejado era controlado pela drenagem do fluido, abrindo a válvula inferior e posicionando um béquer graduado onde era medido o volume do fluido que saia e conseqüentemente o volume da bolha que seria formada (figura 15b). Ao obter o tamanho da bolha desejado a válvula inferior era fechada (figura 15c). Então para gerar a bolha a válvula superior era subitamente aberta (figura 15d).

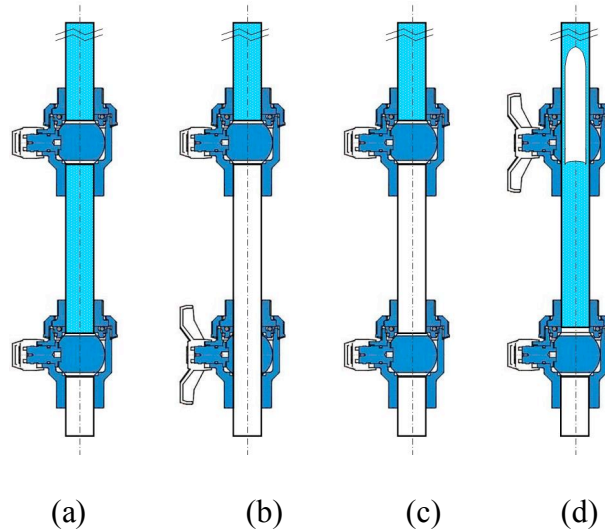


Figura 15. Sistema de geração da bolha de Taylor

As imagens da bolha e do fluido foram capturadas por uma câmera de alta frequência, modelo Motion Pro-X3. Para as imagens capturadas foram utilizadas bolhas de 110 ml 75 ml e 50 ml. Também foram obtidas imagens da passagem de duas bolhas consecutivas formadas com intervalo de 2 segundo entre elas. As imagens e os resultados obtidos serão detalhadamente mostrados nos próximos tópicos. Foram obtidas cerca de 2000 imagens por experimento, com uma taxa de aquisição de 1500 quadros por segundo. Vale ressaltar que em razão da alta frequência de aquisição das imagens, estas apresentavam um alto nível de detalhamento, permitindo uma análise mais exata dos fenômenos físicos ocorrentes.

Resultados Obtidos

Nas figuras 16a, 16b e 16c podemos ver as imagens da parede do tubo de acrílico, cabeça da bolha, parte anular e esteira da bolha respectivamente usando como fluido de trabalho a solução de NaI a 64% em massa. Nas figuras 17a, 17b e 17c se observa as mesmas partes da bolha e do tubo de acrílico obtidas pela visualização feita por Rabello (2007), que no entanto utiliza como fluido de trabalho uma solução de 50% em peso de glicerina em água. Além disso, as imagens feitas por Rabello (2007) possuem partículas fluorescentes inseridas no fluido e uma iluminação pulsada do laser do PIV.

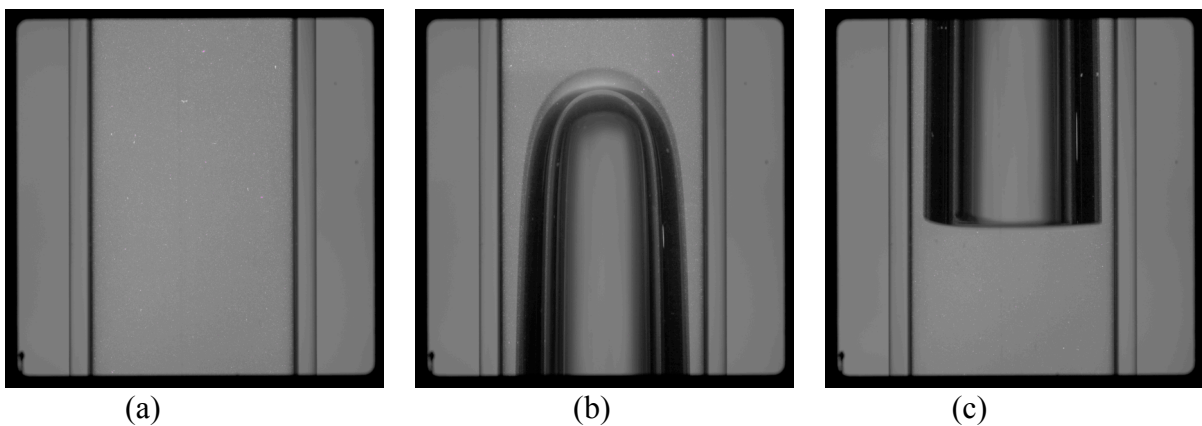


Figura 16. (a) Tubo com líquido estagnado (solução de 50% em peso de glicerina em água) ; (b) Parte superior da bolha (Nariz da bolha) e parte do filme líquido entre bolha e tubo de acrílico (parte anular); (c) Cauda da bolha de Taylor e parte anular da bolha

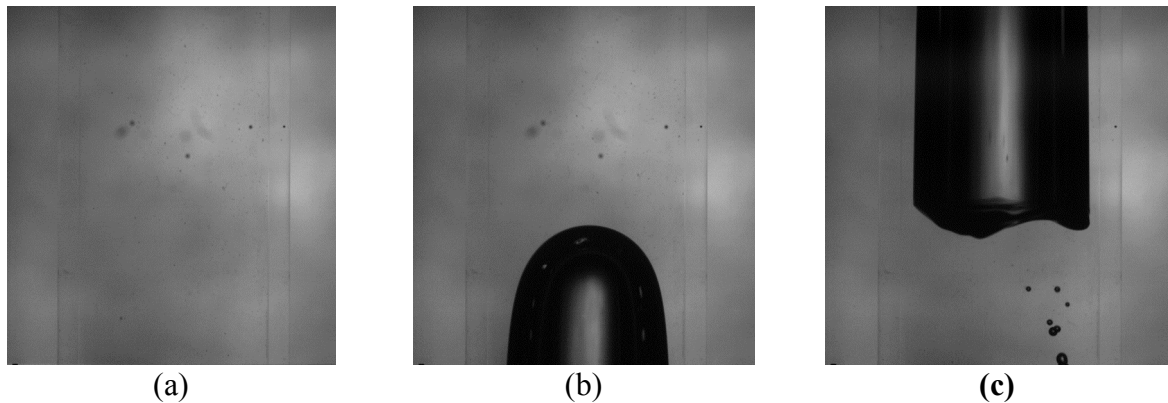


Figura 17. a) Tubo com líquido estagnado (solução de NaI em 64% em massa); b) Parte anterior da bolha (Nariz da bolha, 75ml); c) Cauda da bolha e parte do filme líquido entre a bolha (75 ml) e o tubo e acrílico.

Comparando os dois blocos de imagens, nota-se importantes diferenças que consistem basicamente na redução das distorções ópticas, resultado da igualação do índice de refração ocasionado pela solução NaI utilizada como fluido de trabalho.

Como exemplo dessa distorção óptica, podemos citar que nas imagens de Rabello o sombreamento próximo a parede interna do tubo de acrílico dificulta a delimitação entre o fluido e tubo, como mostra a figura 16a 16b. Fica nítida a dificuldade de se demarcar a transição entre líquido e tubo de acrílico, assim como líquido e bolha. Como consequência, tem-se uma visualização limitada da espessura do filme líquido na parte anular do escoamento. Com isso, análises físicas mais detalhadas nessa região são também prejudicadas. Como exemplo, cita-se a dificuldade de aplicação do processamento de campos de velocidade, utilizando a técnica do PIV, próximo à parede interna do tubo de acrílico.

As imagens 17a e 17b mostram nitidamente o efeito de igualação do índice de refração. O sombreamento junto a parede interna do tubo foi completamente eliminado e as interfaces entre as duas fases de fluido ficaram mais perceptíveis.

Com a redução das principais distorções ópticas foi possível adquirir imagens de maior complexidade como se observa nas figuras 18a, 18b, 18c, 18d. Nessas, tem-se imagens do comportamento em diferentes etapas do escoamento de duas bolhas de diferentes volumes, que escoam consecutivamente ao longo do tubo. Estas bolhas foram formadas com intervalo aproximadamente de 2 segundos. Pela rapidez do processo de formação de bolhas, não foi possível uma determinação mais precisa do volume de ambas as bolhas, no entanto visualmente tem-se absoluta clareza que elas possuem volumes diferentes, sendo a primeira menos extensa do que a segunda. A imagem 18a mostra a primeira bolha antes da aproximação da segunda. A 18b mostra a segunda bolha se aproximando e também deixa claro uma deformação da cabeça e do formato da segunda bolha, que sofre ação hidrodinâmica da esteira da primeira bolha. Vale ressaltar que a segunda bolha escoava com uma velocidade escalar, antes do choque, maior que da primeira bolha. Já na figura 18c tem-se a imagem do momento logo após o choque, mostrando as variações de formato das bolhas. Por último, a figura 18d exibe a esteira da bolha resultante do encontro das duas bolhas anteriores. Note-se que esta bolha resultante, possui uma esteira bem mais instável do que em outras, mostrando uma recirculação de um volume bem maior de fluido deslocado.

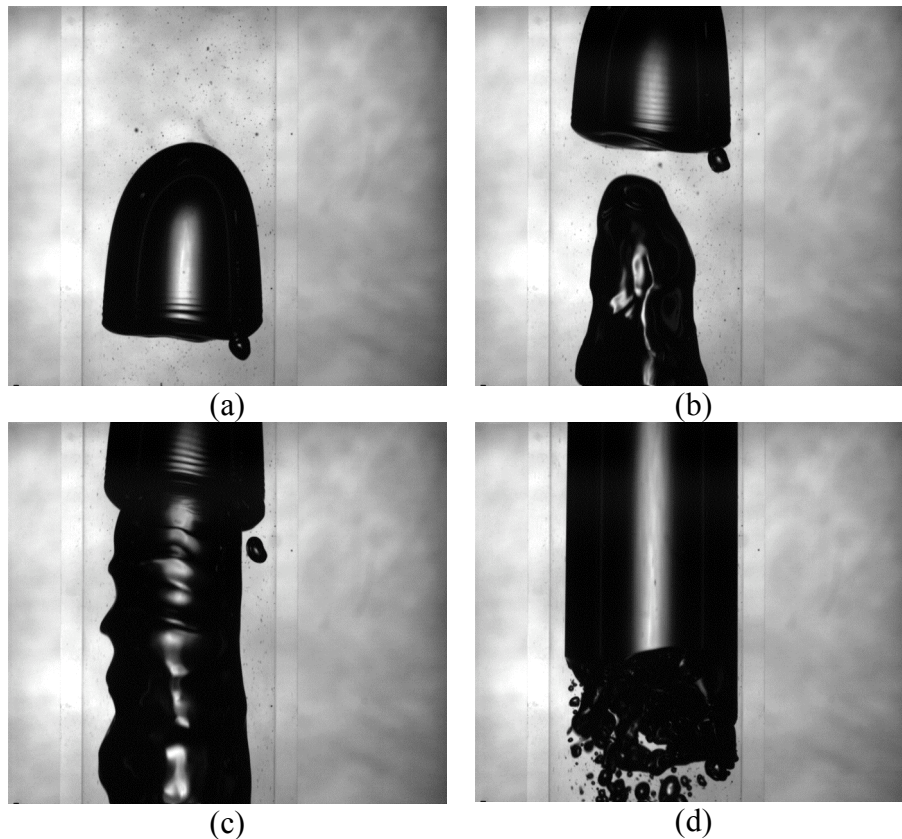


Figura 18. Sequência de imagens de uma bolha em ascensão seguida por uma segunda bolha maior.

Conclusão e resultados obtidos

O presente trabalho possibilitou validar a utilização do sal NaI, em solução aquosa, como principal instrumento de redução das distorções ópticas produzidas pela diferença entre o índice de refração entre o fluido (água) e o acrílico. As imagens obtidas com a técnica de iluminação e com a solução salina de NaI foram de maior contraste e definição da interface entre as duas fases, quando comparadas com as imagens obtidas por Rabello (2007). Além disso, as bordas escuras presentes nas imagens de Rabello (2007) na parede interna do tubo foram totalmente eliminadas através da igualação dos índices de refração. Com isso, a definição da parede interna da tubulação através de um processamento de imagens irá ocorrer de forma mais exata, trazendo benefícios na utilização de técnicas futuras, como Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV).

Referências Bibliográficas

- [1] RABELLO, P.C.. **Visualização e velocimetria de escoamento Bifásicos Utilizando fluorescência induzida a laser**. Rio de Janeiro 2007. Monografia de trabalho final –Faculdade de Engenharia Mecânica -Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ).
- [2] UZOL, O., CHOW, Y.-C., KATZ, J., MENEVEAU, C.. **Unobstructed particle image velocimetry measurements within an axial turbo-pump using liquid and blades with matched refractive indices**. Journal of Experiment and Fluids, vol.33, n. 3, 2002.
- [3] Aniceto, P.. **Desenvolvimento de Técnica Baseada em Fluorescência Induzida por Laser para Medição de Escoamento Bifásico em Regime Pistonado**. Rio de Janeiro 2007. Dissertação de mestrado Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

[4] NARRW, T.L., YODA, M., ABDEL-KHALIK, S.I. **A simple model for the refractive index of sodium iodide aqueous solutions.** Journal of Experiments in Fluids, 2000.