

4 Montagem Experimental

Este capítulo dedica-se à apresentação dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho experimental proposto. Primeiramente será apresentada uma visão geral e, em seguida, serão descritos os elementos constituintes do sistema e suas características de operação.

Como já foi mencionado anteriormente, projetou-se uma seção em escala reduzida com diâmetro interno de 15,8 mm, para avaliar as potencialidades da técnica óptica proposta. Depois de garantida a viabilidade da técnica, foi projetada e construída uma nova seção de testes com tubo de diâmetro interno de 50,8 mm, dimensão mais próxima daquelas encontradas em aplicações industriais.

A Figura 4.1 ilustra uma visão geral esquemática do funcionamento da seção de testes construída. O mesmo arranjo geral foi empregado nos ensaios com os dois diferentes diâmetros investigados.

Como indicado esquematicamente na Figura 4.1, a solução de água com rodamina armazenada no tanque de separação é bombeada para a seção de testes formada por um longo tubo de *FEP*. Ar do ambiente externo é bombeado para a seção de testes por meio de um compressor centrífugo. As correntes de ar e água passam por medidores de vazão encontrando-se em um misturador na forma de “T” onde o escoamento bifásico é formado. Após a passagem na tubulação de *FEP* da seção de testes o escoamento bifásico é conduzido ao separador de ar e líquido. O ar é conduzido para o exterior do laboratório enquanto a água é recirculada pela bomba. Ao final da seção de testes encontra-se a caixa de visualização montada em torno do tubo de *FEP*. As medidas ópticas são realizadas na região do tubo envolvido pela caixa, onde incide o plano laser.

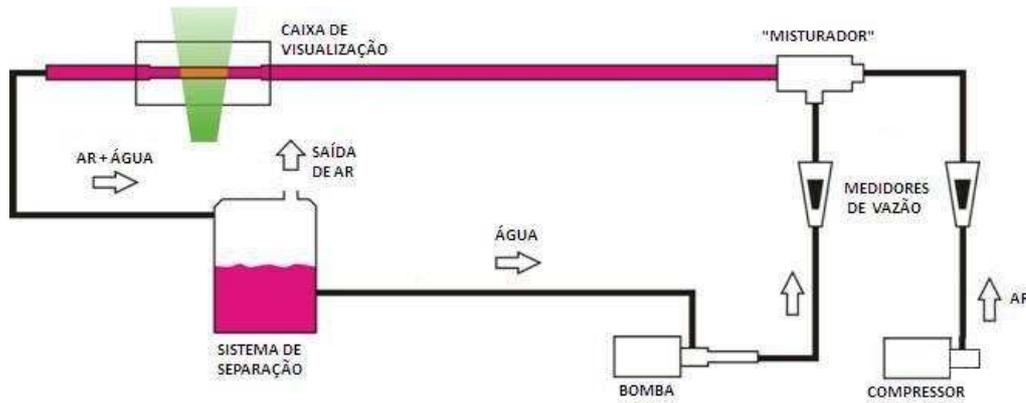


Figura 4.1 - Vista geral esquemática da seção de testes construída.

As subdivisões da seção de testes que merecem descrições exclusivas são a bancada experimental, a tubulação, o sistema de separação ar-água, a caixa de visualização e o sistema *PLIF*. A seguir serão apresentados os componentes que fizeram parte da montagem de cada uma das seções de testes projetadas.

4.1.

Seção de Testes com Tubo de Diâmetro Interno de 15,8 mm

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 apresentam uma visão geral desta seção de testes. As setas azuis e verdes indicam o sentido do escoamento de líquido e gás, respectivamente. Para apoiar toda a tubulação e fixar os equipamentos foi projetada uma estrutura construída com perfis de alumínio Bosch, o que garantiu uma montagem rígida, com possibilidade de controle fino de nível com todas as partes acopladas. Além disso, este tipo de montagem proporciona a liberdade de alterar a configuração facilmente em função de eventuais necessidades de posicionamento dos equipamentos e da seção de testes.

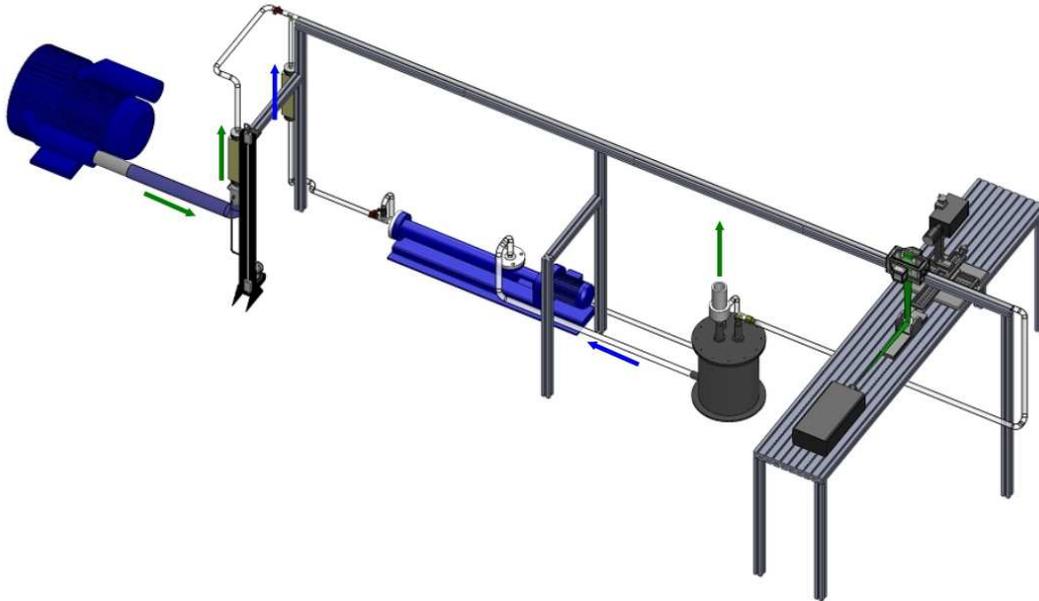


Figura 4.2 - Visão geral da seção de testes com diâmetro de 15,8 mm.

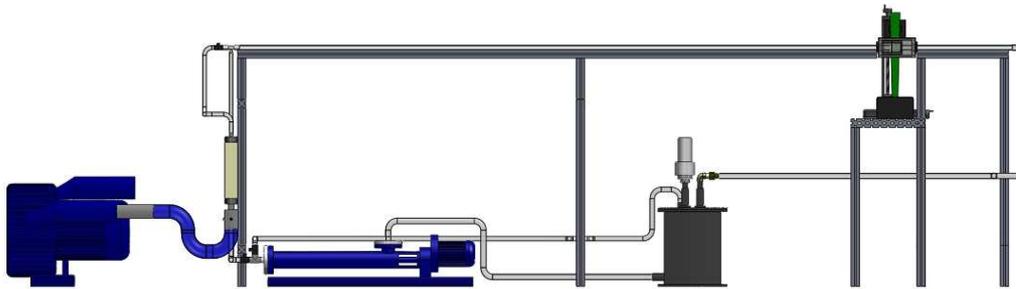


Figura 4.3 - Visão lateral da seção de testes com diâmetro de 15,8 mm.

O perfil de alumínio tinha o objetivo de apoiar o tubo de *FEP* ao longo de todo o seu comprimento. Uma mesa em perfil de alumínio foi montada ortogonalmente ao perfil longo para apoiar o laser, câmera, mesa de coordenadas e componentes ópticos. O comprimento total do tubo de *FEP* era de 4 m, ou 253 diâmetros. A caixa de visualização foi posicionada a 0,5 m da seção de saída do tubo, assim o escoamento dispunha de um comprimento de 222 diâmetros para desenvolver o padrão anular.

4.1.1. Sistema de Escoamento de Água

Foi utilizada uma bomba de cavidades progressivas fabricada pela Weatherford, modelo WHT 24/I, com motor de $\frac{1}{2}$ CV de potência, que oferece uma pressão máxima de 6,0 Kgf/cm². A vazão máxima fornecida pela bomba é de 5,5 m³/h. A bomba era acionada por um inversor de frequência da marca WEG.

Um sistema foi montado com o objetivo de reduzir oscilações geradas pela bomba para baixas rotações do rotor. Válvulas formando um *bypass* foram colocadas após a saída da bomba, oferecendo uma bifurcação para o escoamento. Deste modo, uma parte do escoamento era enviado para a seção de testes enquanto a outra era encaminhada para o reservatório. Com este sistema era possível utilizar rotações elevadas na bomba, garantindo um funcionamento contínuo do rotor e produzindo baixas vazões de líquido.

A vazão era medida por um rotâmetro da marca CONAUT modelo 440RN15 com escala de 0,21 a 2 l/min. A faixa de incerteza fornecida pelo fabricante é indicada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Incerteza do rotâmetro de líquido da marca CONAUT modelo 440RN15 utilizado nos experimentos.

Q (l/min)	$\delta Q/Q$
0,2	0,25%
0,4	0,50%
0,8	0,17%
1,2	0,33%
1,6	0,42%
2,0	0,25%

4.1.2. Sistema de Escoamento de Ar

O escoamento de ar na seção de testes foi produzido por um compressor centrífugo de duplo estágio da marca IBRAM, modelo CRB-14, também controlado por um inversor de frequência da marca WEG. O motor de 23,2 CV fornece uma vazão máxima de 10 m³/min e uma pressão máxima de 4600 mm de coluna de água.

A vazão de ar foi medida com um rotâmetro OMEL, com fundo de escala 50 m³/h, calibrado contra uma placa de orifício construída de acordo com a

norma ASME (2004). O método adotado para a calibração do rotâmetro encontra-se no Apêndice A. Foram medidas pressão e temperatura do ar, para correção da vazão lida no rotâmetro, como será explicado a seguir.

4.1.3. Medição de Pressão e Temperatura

A pressão e a temperatura do ar foram medidas na entrada do rotâmetro, utilizando um manômetro de mercúrio e um termômetro digital, da marca Full Gauge e modelo TI-02, com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$. Essas medidas foram usadas para estimar a massa específica do ar nas condições de operação. A partir das condições de calibração do rotâmetro, realizada usando uma placa de orifício, e da massa específica do ar nas condições do experimento, era feita a leitura correta da vazão no rotâmetro conforme descrito no Apêndice A.

4.1.4. Tubulação da Seção de Testes

Distorções ópticas são minimizadas através da combinação entre o índice de refração da parede do tubo e da água, conforme já discutido no Capítulo 3. Por essa razão, a seção de testes projetada para o experimento empregou tubos fabricados de *FEP*, *Fluorinated Ethylene Propylene*, material que tem índice de refração próximo ao da água, o que permite a visualização do filme líquido nas regiões próximas à parede do tubo (Hewitt et al., 1990). O tubo utilizado na seção de testes possuía diâmetro interno de 15,8 mm e comprimento total de 255 diâmetros.

Os tubos de 15,8 mm de diâmetro fabricados em *FEP* não possuem boa rigidez estrutural, sendo muito maleáveis e podendo ser facilmente avariados ou amassados, impossibilitando a realização do alinhamento dos mesmos, quando fixados a bancada experimental. Com objetivo de melhorar a resistência mecânica do tubo de *FEP* e de viabilizar a centralização, fixação e o alinhamento da seção de testes na bancada experimental, este foi inserido em um tubo de PVC transparente com diâmetro interno de 18 mm. Este revestimento foi utilizado em toda a extensão da seção com exceção da região de visualização.

Água e ar entram na tubulação por um misturador de PVC na forma de “T” com diâmetro de $\frac{3}{4}$ ”, conectado no tubo de *FEP*, como pode ser visto na Figura 4.4.

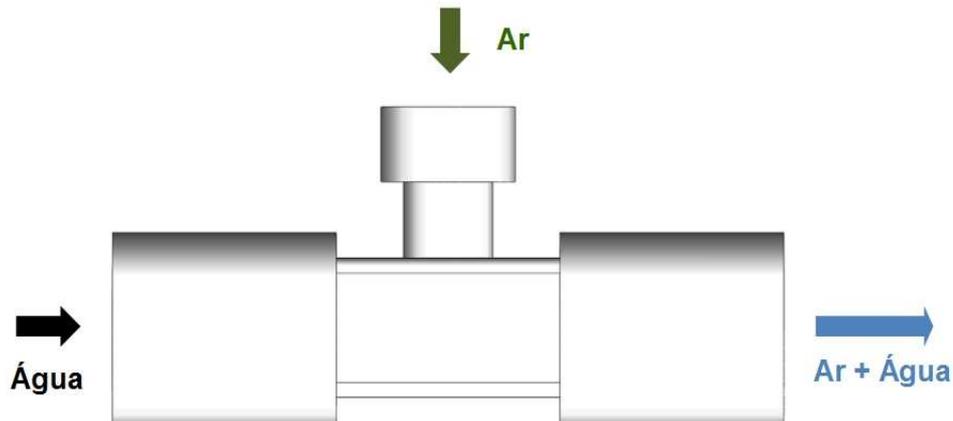


Figura 4.4 - Misturador ar-água

A tubulação foi apoiada em perfis Bosch com dimensões de 45x45 mm. Estes perfis, selecionados devido à sua excelente linearidade e facilidade de montagem, foram conectados a outros perfis iguais através de cantoneiras.

4.1.5. Tanque de Separação

A separação entre ar e água após a passagem na seção de testes foi realizada utilizando-se um tanque separador de aço inox com capacidade para 50 litros, que possuía uma entrada e duas saídas, conectado no final da seção de testes por uma mangueira.

A mistura de ar e água entrava pela parte superior do tanque e era conduzida para o fundo deste por um tubo em forma de “L”. Como pode ser visto na Figura 4.5, este tanque possui uma placa separadora no seu interior que impedia que a água saísse pela abertura de ar superior na forma de gotículas. A água depositava-se então no fundo do tanque, e depois era conduzida para a bomba por uma mangueira localizada na parte inferior. O ar era eliminado para fora do laboratório por uma mangueira conectada na abertura da parte superior do tanque.



Figura 4.5 - Vista do tanque com destaque para a placa separadora em seu interior.

4.1.6. Sistema de Medição por Fluorescência Induzida por Laser – *PLIF*

Os equipamentos utilizados para a medição pela técnica de fluorescência induzida por laser – *PLIF* – estão ilustrados na Figura 4.6 abaixo. A seguir será feita uma descrição dos elementos constituintes para aplicação desta técnica: laser, corante fluorescente, caixa de visualização, sincronizador, câmera digital, lentes, filtros ópticos e espelho.

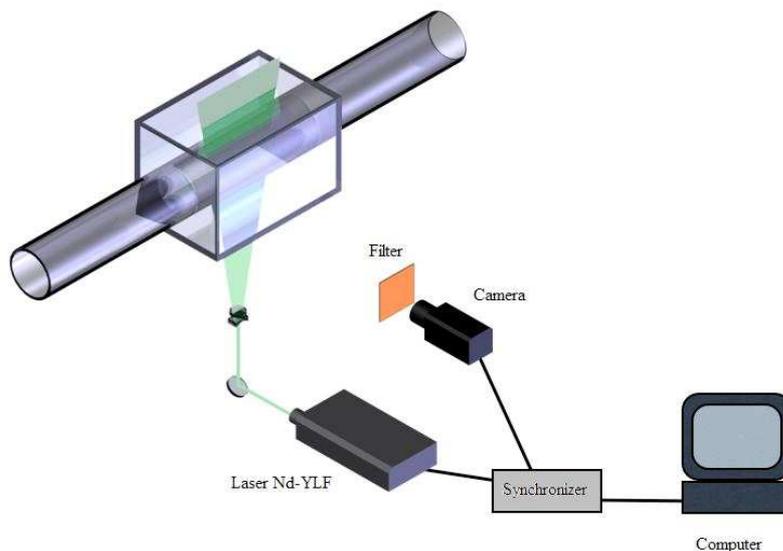


Figura 4.6 - Esquema da montagem óptica para aplicação da técnica *PLIF*.

4.1.6.1. Laser

Foi utilizado um laser pulsado de dupla cavidade e alta taxa de repetição do tipo Nd:YLF, da marca New Wave[®]. O laser emite em comprimento de onda igual a 527 nm com pulsos de 5 ns de duração, e sua energia varia com a taxa de repetição, de acordo com o gráfico da Figura 4.7.

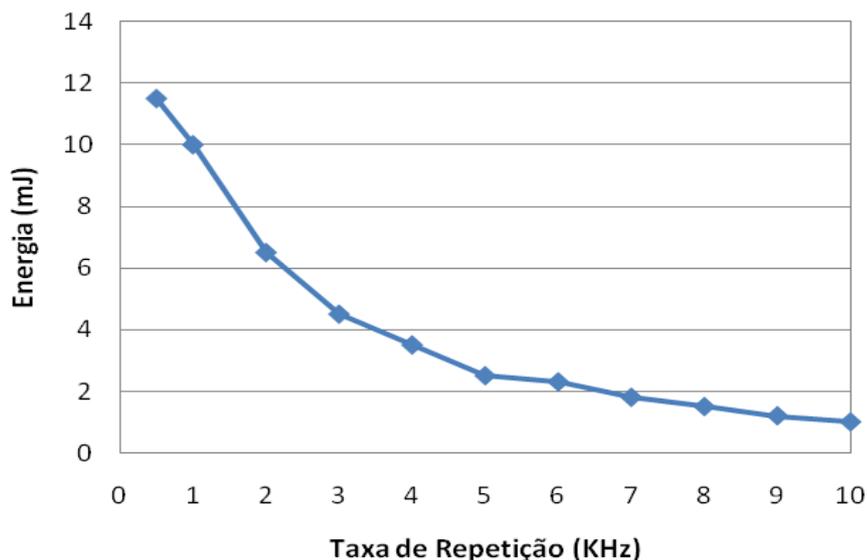


Figura 4.7 - Energia emitida por cada pulso do laser em função da taxa de repetição.

(Fonte: www.new-wave.com).

4.1.6.2. Corante Fluorescente

O fluido utilizado foi uma mistura de água com o corante *Rhodamine 610 Chloride*, produzido por Exciton a uma concentração de 500 µg/l. A escolha da concentração da mistura foi realizada a partir de testes preliminares. Ao ser iluminada com o laser, a rodamina fluoresce, emitindo luz a um comprimento de 610 nm. Testes realizados indicaram que a massa específica e viscosidade da água não foram alteradas com a adição do corante.

4.1.6.3. Caixa de Visualização

Um dos grandes desafios impostos às técnicas utilizadas neste estudo são as distorções ópticas que ocorrem devido aos diferentes índices de refração dos meios em questão. Além da utilização de material do tubo com índice de refração próximo ao da água, foi também adotada uma solução baseada no

uso de uma caixa de visualização ao redor do tubo de *FEP*. Esta foi preenchida com água para minimizar as distorções ópticas da curvatura do tubo.

A Figura 4.8 apresenta o desenho da caixa de visualização montada em acrílico, com exceção das partes inferior e superior que possuíam janelas de vidro. O vidro foi utilizado para resistir à potência do feixe de laser incidente evitando assim a queima das faces de acrílico da caixa. As vedações com o tubo de PVC que atravessava a caixa foram feitas utilizando flanges aparafusados com O-rings. A caixa de visualização foi instalada a uma distância de 222 diâmetros da entrada da tubulação.

O formato da caixa foi projetado de forma a possibilitar a visualização longitudinal e transversal do escoamento. Para reduzir distorções ópticas suas faces foram dispostas de modo que a câmera estivesse sempre montada ortogonalmente à parede de vidro para ambas as configurações de medição (longitudinal e transversal). Para a medição estereoscópica, as câmeras eram dispostas com um ângulo de 45° em relação ao eixo do tubo.

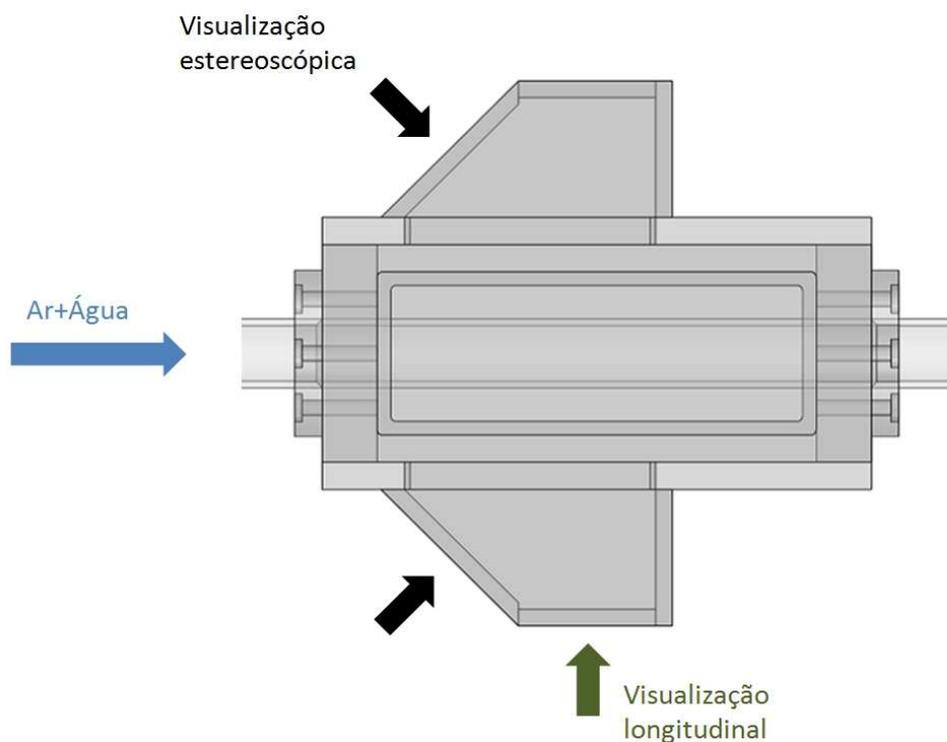


Figura 4.8 - Vista superior da caixa de visualização da seção com tubo de 15,8 mm de diâmetro.

4.1.6.4. Sincronizador de Sinais

Um sincronizador de sinais foi utilizado para realizar a tarefa de controle e ativação dos sinais, garantindo a precisa sincronização do disparo do laser e a captura das imagens pela câmera digital. Para isso, foi utilizado o sincronizador da TSI modelo 610035 programado pelo *software* Insight 3G[®] versão 9.0.5.1.

4.1.6.5. Câmera Digital e Lentes Objetivas

Para a realização das medidas do comportamento dinâmico da altura do filme de líquido no escoamento anular pelo método óptico proposto, é necessário utilizar uma câmera digital que seja capaz de registrar imagens com boa resolução espacial a elevadas taxas de aquisição. A câmera digital utilizada encontrava-se disponível no laboratório fazendo parte de um sistema *PIV* de alta frequência de aquisição de imagens. Este sistema também utiliza câmeras de alta frequência, boa resolução espacial, sincronizadas a lasers pulsados de alta taxa de repetição. Assim, a câmera disponível era perfeitamente adequada para os propósitos do presente trabalho.

A câmera empregada, modelo *Motion Pro X3* fabricada pela *IDT*, utiliza tecnologia de sensores de imagem CMOS, oferecendo resolução espacial máxima de 1280x1024 *pixels*. A câmera era controlada pelo programa *IDT Motion Studio*[®]. As imagens capturadas eram armazenadas na memória da câmera e depois transferidas para o computador. A memória máxima disponível era de 8 Gb, o que limitava o número máximo de imagens que podiam ser capturadas.

As imagens longitudinais do filme de líquido inferior foram obtidas com uma resolução espacial de 512x512 *pixels*. Nesta configuração a câmera era montada em uma mesa de coordenadas tri-axial fixada na bancada do lado oposto ao laser.

Para o caso da visualização estereoscópica, foram usadas duas câmeras *IDT Motion Pro X3*, posicionadas a 45° em relação ao tubo, como já foi mencionado no Capítulo 3. As câmeras foram montadas em dois suportes giratórios, que permitiram o ajuste dos ângulos de observação, que foram fixados em uma mesa posicionada ortogonalmente a seção de testes. As imagens transversais do escoamento foram capturadas com uma resolução de 1280x1024 *pixels* para que toda a seção reta do tubo fosse registrada.

Lentes com diferentes distâncias focais e ampliações foram utilizadas nas medições de espessura de filme e velocidade de propagação das ondas, sendo os resultados obtidos comparados. Um procedimento de calibração realizado para cada lente e ampliação utilizados, fornecia a relação entre a medida em milímetros no domínio do escoamento com o número de *pixels* no sensor da câmera. Os procedimentos de calibração das imagens longitudinais e transversais serão descritos nos Capítulos 5 e 6, respectivamente. Para cada aplicação específica – medida de altura de filme, frequência de ondas ou velocidade de ondas – era escolhida a resolução espacial mais adequada. A definição da resolução espacial adequada para cada aplicação era guiada pelo procedimento de análise de incertezas experimentais descrito no Apêndice B.

Nos estudos realizados foram utilizadas nas câmeras, lentes objetivas Nikon/Nikkor com distâncias focais de 105 mm e 60 mm, gerando diferentes resoluções espaciais. Quando não era possível ter acesso óptico à seção de testes com a câmera e conciliar a distância focal da lente com a resolução espacial ideal, anéis de extensão eram adaptados às lentes para ampliar a imagem. Obviamente, cada conjunto de lente e anéis de extensão era calibrado para determinar a resolução espacial produzida pelo conjunto.

4.1.6.6. Filtros Ópticos

A luz do feixe laser refletida na interface ar-água e nas paredes do tubo é muito mais intensa que a luz emitida pelo efeito de fluorescência da rodamina, misturada no líquido. Para evitar que a luz verde refletida atinja a câmera saturando o sensor e impedindo o registro do sinal de fluorescência, um filtro óptico passa-alta foi fixado na caixa de visualização, na frente da lente objetiva da câmera.

O filtro selecionado foi o modelo FSQ-OG550 fabricado pela Melles Griot e apresenta as características indicadas na Figura 4.9. Nota-se na figura que o comprimento de onda de corte do filtro é da ordem de 550 nm adequado para bloquear a luz verde do laser com comprimento de onda da ordem de 527 nm, deixando passar a luz da fluorescência com comprimento de 610 nm. A Figura 4.10 foi preparada para ilustrar o efeito da utilização do filtro óptico passa-alta na imagem capturada.

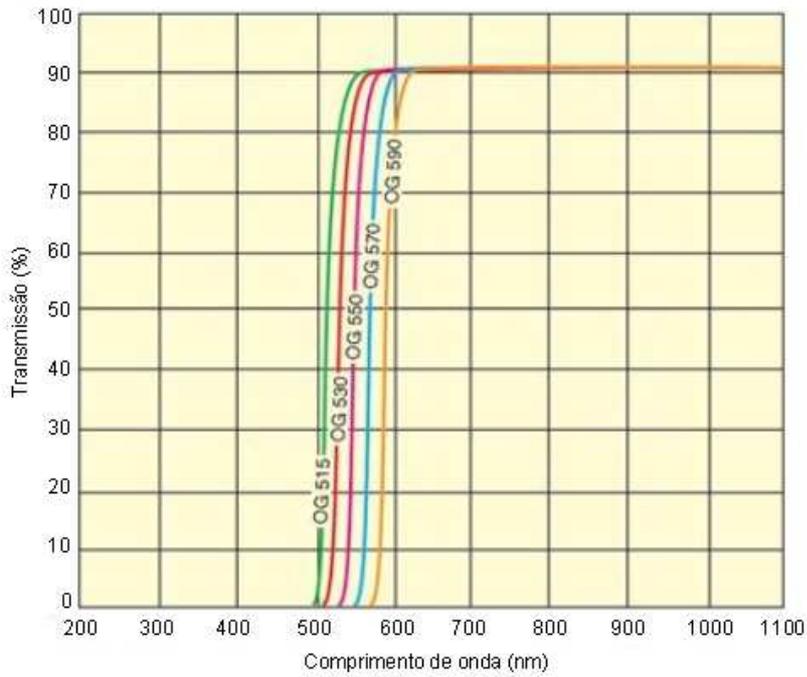


Figura 4.9 - Curva de transmissividade do filtro óptico utilizado (Fonte: www.mellesgriot.com).

A figura apresenta as imagens de um alvo de calibração metálico introduzido dentro da tubulação preenchida com a mistura de água e rodamina e iluminada por um feixe cilíndrico de luz laser verde. A Figura 4.10(a) foi capturada com a utilização do filtro passa-alta posicionado na frente da câmera, enquanto a imagem da Figura 4.10(b) foi obtida sem a utilização do filtro. A eliminação das reflexões fica evidente na comparação entre as duas imagens.

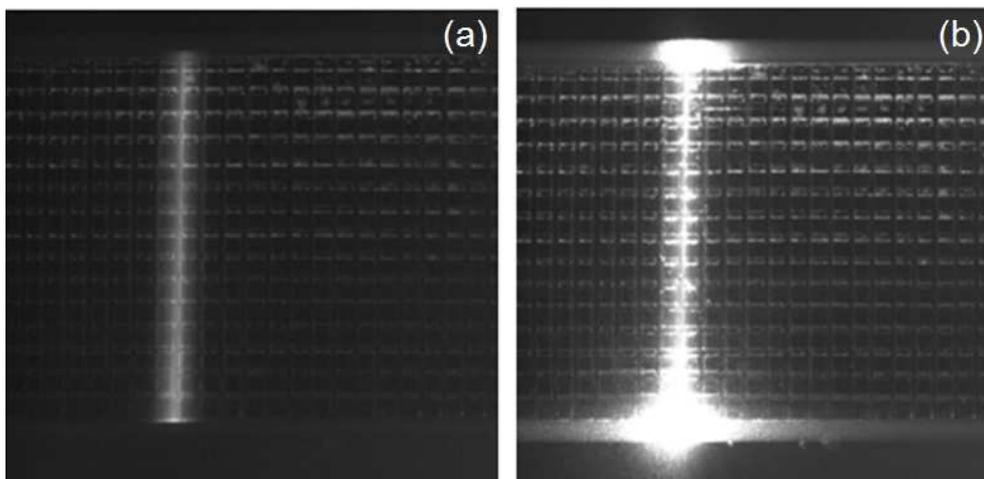


Figura 4.10 - Imagens do alvo de calibração posicionado dentro do tubo preenchido com solução de água e rodamina e iluminado com um feixe cilíndrico de luz verde proveniente do laser. (a) com filtro óptico passa-alta e (b) sem filtro óptico.

4.1.6.7.

Conjunto de Lentes Formadoras do Plano de Luz e Espelho

Como já foi dito anteriormente, o laser emitido pelo sistema de iluminação apresenta uma seção reta aproximadamente cilíndrica. Para obter um plano de luz de pequena espessura, indispensável para a aplicação da técnica *PLIF*, o feixe de luz laser passa por um jogo de lentes esférica e cilíndrica que controlam as dimensões da área iluminada, como ilustrado na Figura 4.11.

A lente cilíndrica controla a divergência do plano de luz e não tem efeito sobre sua espessura. O laser diverge em apenas uma direção quando atravessa uma lente cilíndrica de distância focal negativa. A escolha desta lente depende da dimensão do plano a ser iluminado. A lente esférica de distância focal positiva reduz minimamente esta divergência no plano. Tipicamente, o comprimento focal da lente esférica é muito maior que o da lente cilíndrica, fazendo com que a seleção das lentes seja independente uma da outra. As lentes esféricas são empregadas para controlar a espessura do plano de luz, convergente apenas até o comprimento focal da lente.

A imagem é capturada na zona do ponto focal mencionada onde a espessura do plano de luz é mínima, região onde a intensidade da luz é maior.

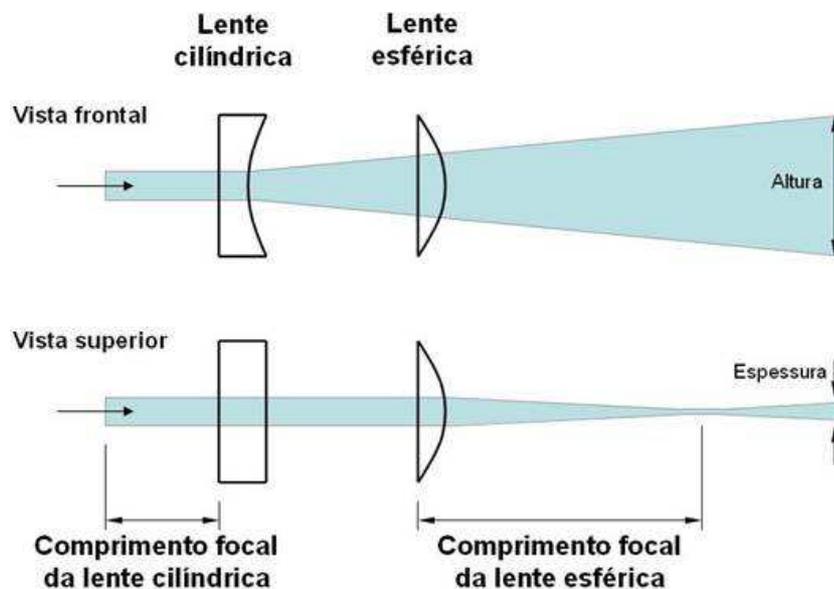


Figura 4.11 - Diagrama de lentes para formação do plano de luz com um laser (Aniceto P. H. S., 2007).

No caso das medições longitudinais do filme de líquido, foi usada uma lente cilíndrica, de -50 mm, e uma esférica, com distância focal de 1000 mm. Na visualização transversal do escoamento, as distâncias focais das lentes cilíndrica

e esférica foram, respectivamente, -25 mm e 500 mm. Essa opção entre as lentes a serem utilizadas era determinada de acordo com a dimensão da região de interesse e a distância do caminho óptico entre a objetiva da câmera e a seção de testes. Esses conjuntos permitem gerar um plano de espessura de aproximadamente 0,5 mm.

No caso da montagem longitudinal, foi utilizado um espelho fixado em um suporte com ângulo de 45°, abaixo da seção, para que o feixe de laser fosse direcionado à seção de testes, iluminando-a de baixo para cima. Para esta tarefa foi selecionado um espelho de reflexão na primeira superfície modelo 10Q20HE.2 da Newport com capacidade de suportar o nível de energia produzido pelo laser utilizado.

Na montagem estereoscópica, diferentes configurações de iluminação foram testadas. O arranjo que forneceu melhor visualização do escoamento foi a iluminação incidente pela parte superior da caixa de visualização, na qual a maior intensidade do laser incidia primeiramente no filme líquido de menor espessura. Isto foi essencial uma vez que a fluorescência é proporcional à quantidade de líquido na região excitada. Nesta configuração o laser iluminava o filme líquido ao longo de toda a circunferência do tubo. A comparação entre as imagens iluminadas com as diferentes configurações de iluminação é apresentada na Seção 6.3.

4.2. Seção de Testes com Tubo de Diâmetro Interno de 50,8 mm

A seção de testes com diâmetro de 50,8 mm tem um funcionamento semelhante ao da seção com tubo de 15,8 mm, descrita acima. A seguir serão apresentados os equipamentos que fizeram parte da montagem desta bancada de testes. A Figura 4.12 apresenta uma visão geral desta seção.



Figura 4.12 - Visão geral da seção de testes com tubo de diâmetro de 50.8 mm.

4.2.1. Sistema de Escoamento da Água

A bomba utilizada para circular a água foi uma bomba de cavidades progressivas Weatherford, modelo WHT 32/I, com motor de 1 CV de potência, que fornece uma pressão máxima de 6,0 Kgf/cm² e uma vazão máxima de 12 m³/h.

A rotação da bomba era controlada por um inversor de frequência da marca WEG. A vazão foi medida por um medidor de turbina da marca Contech, com faixa de operação de 0,67 à 6,8 m³/h cuja incerteza na medição é de 1%.

4.2.2. Sistema de Escoamento de Ar

Para o escoamento do ar foi utilizado o mesmo compressor centrífugo utilizado na seção de 15,8 mm. A tubulação de saída do compressor era compatível com as entradas de ar das duas seções, que era conectada no início da realização dos testes.

A vazão de ar foi medida com um medidor de turbina da marca Contech, com faixa de operação de 85 à 850 m³/h, cuja incerteza na medição é de 0,6 %.

4.2.3. Medição de Pressão e Temperatura

A pressão e a temperatura do ar foram medidas em duas posições – na entrada do medidor de vazão de ar, logo após o misturador, e no final da seção – utilizando um manômetro de mercúrio e termômetros digitais da marca Full Gauge e modelo TI-02, com resolução de 0,1°C. Essas medidas foram utilizadas para corrigir a massa específica do ar com as condições de operação e verificar possíveis variações de temperatura entre o início e o fim do escoamento.

4.2.4. Tubulação da Seção de Testes

A seção de testes de maior diâmetro projetada também empregou tubo fabricado de *FEP*. Um tubo de diâmetro interno de 50,8 mm, espessura de 1,6 mm e comprimento total de 217 diâmetros foi utilizado. Esse diâmetro se aproxima das dimensões encontradas nas aplicações industriais. Por ter o dobro da espessura da tubulação da seção descrita anteriormente, o tubo de *FEP*

apresentava rigidez estrutural satisfatória e não foi necessário revesti-lo com o tubo de PVC.

Os tubos de *FEP* estão disponíveis comercialmente em trechos com comprimentos de 7 m. Para emendar os trechos sem produzir desníveis internos, utilizou-se um sistema de luvas usinadas em polipropileno que se adaptavam ao diâmetro externo dos tubos de *FEP* permitindo o encaixe de topo entre os tubos. A vedação da junção era promovida por o-rings montados na face interna da luva.

A água e o ar entravam na tubulação por um misturador de PVC na forma de “T” com diâmetro de 2”, conectado no tubo de *FEP* por uma conexão em polipropileno. No início da seção de testes, antes do misturador, uma válvula anti-retorno foi colocada na tubulação de ar para impedir o retorno da água. Essa válvula foi essencial, pois em testes anteriores com escoamento monofásico de água, havia a possibilidade de retorno da água para a linha de ar.

A tubulação de *FEP* foi apoiada em perfis Bosch com dimensões de 45x60 mm montados na mesma estrutura da base da seção de 15,8 mm. Este arranjo paralelo foi uma forma de melhor otimizar o espaço disponível no laboratório aproveitando parte da montagem óptica preparada para a seção de 15,8 mm. A Figura 4.13 ilustra as duas seções de testes acopladas montadas em paralelo sobre as bases.

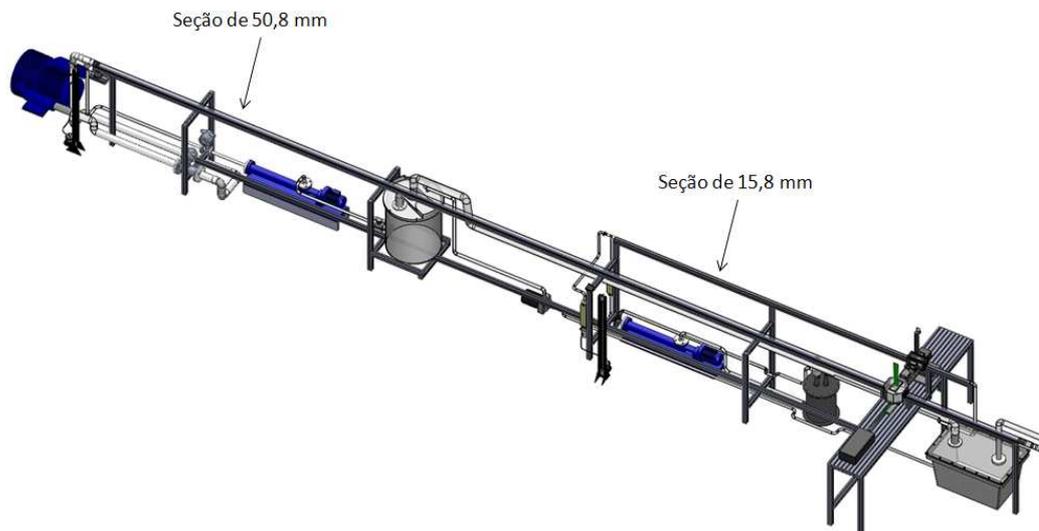


Figura 4.13 - Acoplamento entre a base das duas seções de testes.

4.2.5. Sistema de Separação

Foram utilizados dois tanques para realizar o processo de separação do ar e da água provenientes da mistura bifásica. O primeiro tanque, com capacidade para 100 litros, foi conectado na saída da tubulação através de uma mangueira. Este tanque tinha a função de receber o escoamento bifásico, pressurizado e com vazões de ar e água elevadas. Através de uma saída superior, a pressão interna do tanque era aliviada e o ar ainda com gotículas era conduzido para um segundo tanque. Pela abertura inferior do tanque, a mistura de água e rodamina era bombeada também para o segundo tanque, com capacidade para 150 litros. Essa mistura ainda apresentava ar na solução e inviabilizava a conexão direta com a bomba de cavidades progressivas, como foi feito na seção com menor diâmetro. Uma bomba centrífuga intermediária de $\frac{3}{4}$ cv era responsável por bombear a mistura de um tanque para o outro.

O segundo reservatório recebia a mistura ar-água e o ar ainda presente na solução era eliminado por uma saída superior. A bomba de cavidades progressivas era então alimentada por uma mangueira conectada na parte inferior do segundo tanque. Nesse estágio, apenas a água era depositada no tanque, o que eliminava a entrada de ar na sucção da bomba. A Figura 4.14 ilustra o sistema de separação ar-água em dois estágios.

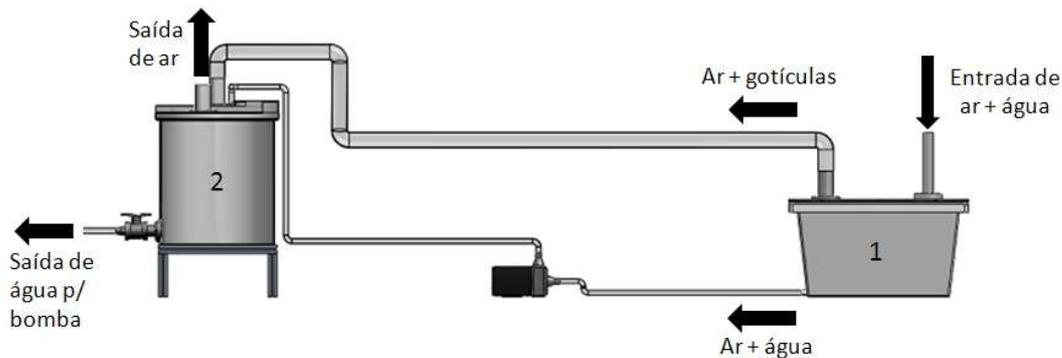


Figura 4.14 - Sistema de separação ar-água em dois estágios.

4.2.6. Sistema de Medição por Fluorescência Induzida por Laser – PLIF

O laser, a câmera, o corante fluorescente, o sincronizador de sinais e o filtro óptico empregados nos ensaios com a seção de 50,8 mm foram os mesmos utilizados na seção de menor diâmetro. Alterações que merecem destaque estão na caixa de visualização e lentes utilizadas e serão descritas a seguir.

4.2.6.1. Caixa de Visualização Octogonal

Devido à necessidade de projetar uma nova caixa de visualização que se adaptasse à seção de maior diâmetro, uma nova configuração foi concebida com o objetivo de facilitar e melhorar a visualização do escoamento no interior do tubo. Uma caixa octogonal em acrílico foi projetada e construída para permitir a visualização longitudinal e futuramente, uma configuração estereoscópica com diferentes campos de visualização. Assim como a caixa anteriormente descrita, houve a preocupação em se colocar janelas de vidro na parte inferior e superior para evitar que a alta potência do laser queimasse as paredes de acrílico da caixa.

Esta concepção da caixa de visualização permitiu que as lentes das câmeras fossem montadas ortogonalmente às paredes da caixa, o que diminuiu as distorções nas imagens. A Figura 4.15 apresenta o desenho da caixa de visualização construída.

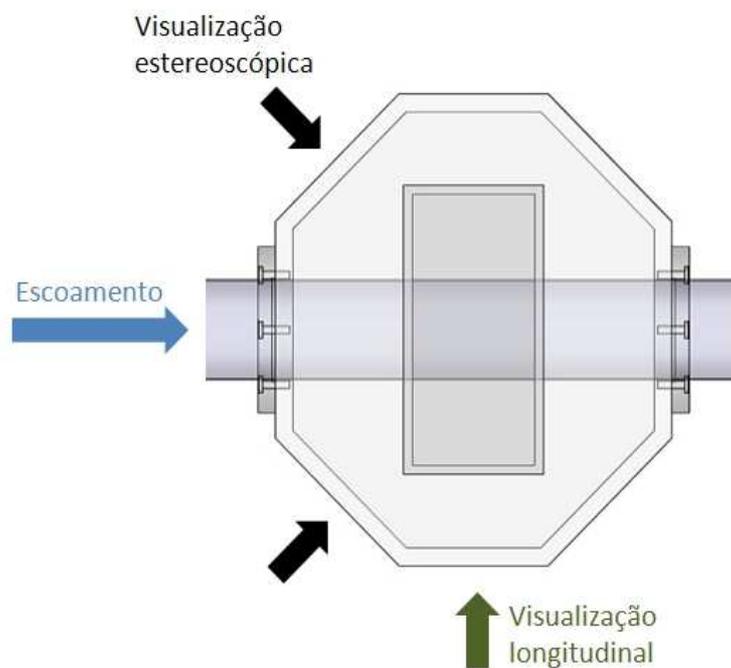


Figura 4.15 - Vista superior da caixa de visualização construída para a seção de 50,8 mm. Setas indicam as faces da caixa para realizar a visualização longitudinal e transversal.

4.2.6.2. Lentes Objetivas

Optou-se por utilizar a lente objetiva Nikon/Nikkor de distância focal de 60 mm para todas as medições. Esta lente foi utilizada em todos os testes, pois garantia uma ampliação menor que a lente de 105 mm, e toda a seção transversal do tubo pôde ser capturada pelas câmeras.