

4 Montagem Experimental

Este capítulo dedica-se à apresentação da montagem utilizada para o desenvolvimento do trabalho experimental proposto. Primeiramente será apresentada uma visão geral da montagem experimental utilizada neste trabalho. Em seguida, serão descritos os elementos constituintes do sistema e suas características de operação.

Uma visão geral do experimento é apresentada na Figura 4.1. Água e ar escoam separados, tendo as suas respectivas vazões medidas por rotâmetros e, depois se encontram em um misturador passando a escoar juntos numa tubulação de acrílico com diâmetro interno de 24 mm e 10 metros de comprimento. As setas indicadas em azul representam o caminho percorrido pelo ar, enquanto que as setas em verde representam o escoamento da água. Ao final da tubulação (400 diâmetros em relação à entrada) estava situado o sistema de aquisição de imagens que foi utilizado para as medições dos perfis de velocidade do escoamento através da técnica de PIV anteriormente explicada. A montante da posição da seção de medição com a técnica PIV, o sistema de interruptores de feixe estava posicionado, tendo sido utilizado, tanto para caracterização das variáveis globais do escoamento, quanto para o acionamento do laser. Ao final da tubulação foi instalado um tanque, onde água e ar eram separados por gravidade e retornavam ao sistema multifásico individualmente, através de uma bomba e um compressor, respectivamente.

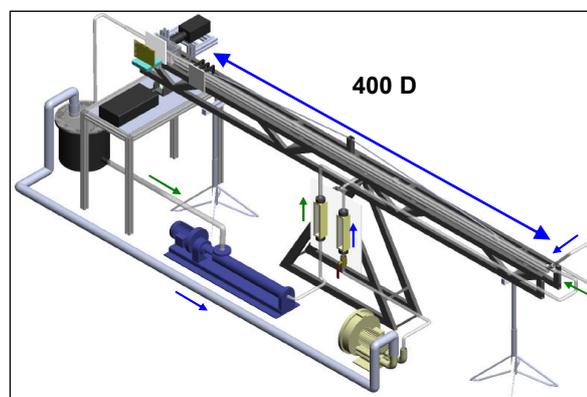


Figura 4.1 – Visão geral do aparato experimental

A seção de testes apresentava-se apoiada por dois suportes visando garantir a estabilidade do sistema durante o escoamento. Estes suportes também apresentavam regulagem de altura, o que tornava possível a realização de experimentos para uma inclinação de 5 graus. A Figura 4.2 apresenta o sistema experimental na sua configuração inclinada.

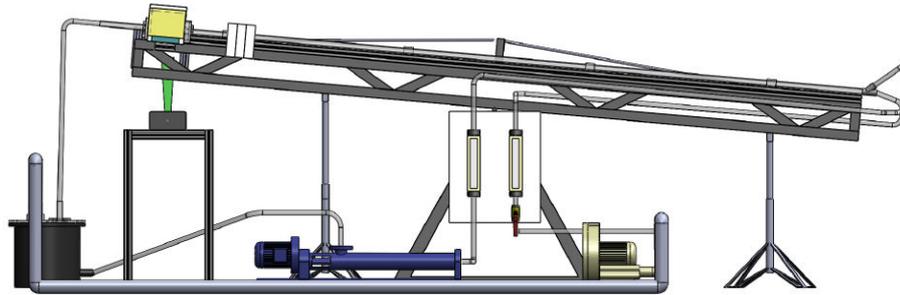


Figura 4.2 – Visão do aparato experimental inclinado.

A seguir, será feita uma descrição detalhada dos equipamentos constituintes da montagem experimental.

4.1. Sistema de escoamento da água

O sistema utilizado para escoamento da água antes da chegada ao misturador consiste de uma bomba para impulsionar o fluido, um rotâmetro para a medição da vazão e um inversor de frequência para garantir a variação da rotação da bomba, alterando, assim, a vazão do fluido escoado.

A bomba de líquido utilizada neste experimento foi uma bomba helicoidal *Weatherford*, marca Geremia, modelo 24/l, a qual oferece uma pressão máxima de $6,0 \text{ Kgf/cm}^2$. O desempenho deste modelo de bomba é descrito pelo fabricante pela curva apresentada na Figura 4.3.

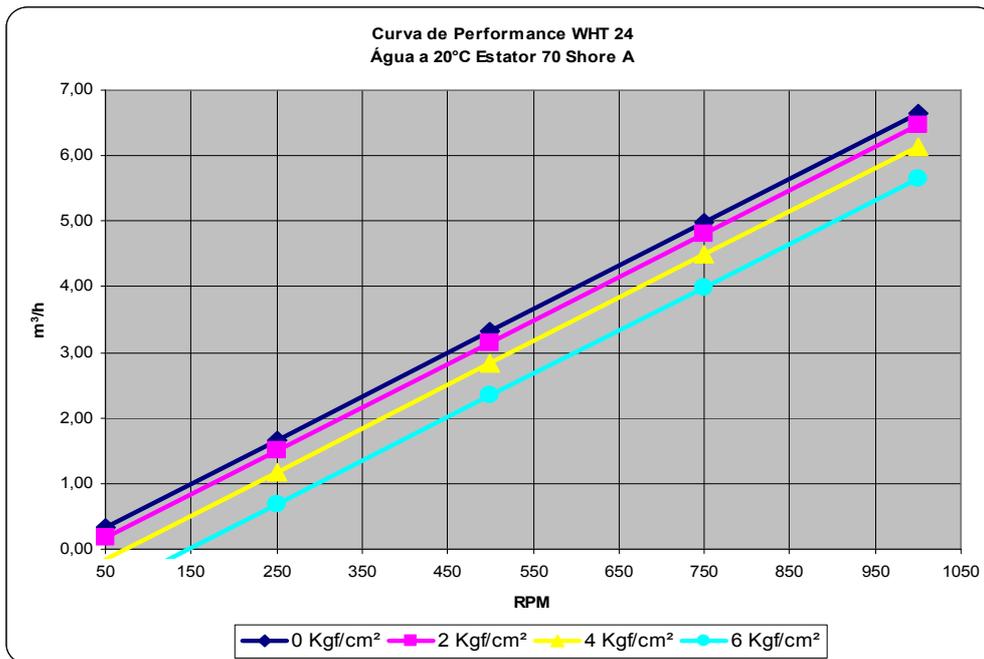


Figura 4.3 – Curva de operação da bomba utilizada nos experimentos. Fonte: (www.weatherford.com)

Para garantir a realização da grade de teste proposta, a bomba era acionada por um inversor de frequência da marca WEG. A vazão da água era medida com uso de um rotâmetro da marca OMEL, com fundo de escala de 1000 l/h, cuja faixa de incerteza mostrada na Tabela 4.1. O cálculo da estimativa de incerteza e o método de calibração adotado encontram-se no Apêndice A.1.

Tabela 4.1 -- Incerteza do rotâmetro de líquido OMEL modelo 182932 utilizado nos experimentos.

Q(l/h)	$\frac{\partial Q}{Q}$
297	0.4%
401	0.6%
478	0.7%
676	0.9%
881	1.2%

4.2. Sistema de escoamento de ar

Para a geração do fluxo de ar no sistema foi utilizado um compressor fabricado em liga de alumínio especial, da marca ASPO, modelo CR-2. O compressor utiliza motor trifásico de 2HP, fornecendo vazão máxima de 300 m³/h com vácuo de 2.200 mm de coluna de água.

Para garantir a realização de testes respeitando a grade proposta, o compressor era acionado por meio de um inversor de frequência marca WEG. A entrada do fluxo de ar era regulada por uma válvula esfera instalada a montante do rotâmetro, utilizada com objetivo de controlar o fluxo de ar e evitar uma oscilação brusca da vazão de ar durante os testes.

A medição da vazão de ar foi realizada com a utilização de um rotâmetro da marca Omega Engineering Inc. série 50676, calibrado para uma faixa de vazão de 0,297 à 9,18m³/h. A incerteza do rotâmetro informada pelo fabricante era de 2%.

4.3. Seção de testes

O primeiro elemento a ser destacado na seção de testes é o misturador, situado na entrada da tubulação. A mistura das duas fases na entrada da tubulação era feita por meio de uma junção em “Y”, feita em PVC, onde uma ponta se encaixava do tubo de acrílico e as outras duas pontas sendo utilizadas para a entrada do ar e da água, conforme pode ser visto na Figura 4.4.

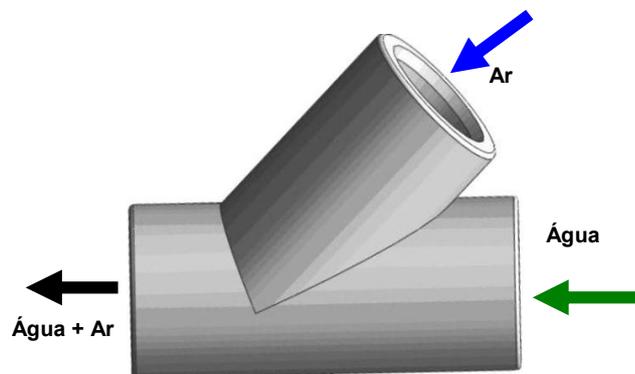


Figura 4.4 – Fluxo de entrada e saída no misturador.

O tubo utilizado para escoamento na seção de teste era feito de acrílico, com diâmetro interno de 24 mm e 3 mm de espessura. O comprimento total era de 10 metros, sendo dividido em 5 seções com 2 metros de comprimento cada. Para a união dos tubos, luvas de acrílico foram especialmente fabricadas para garantir uma união perfeita e evitar a existência de ressaltos ou descontinuidades entre os tubos.

A tubulação de acrílico era apoiada em um perfil Bosch 45 X 45 (Figura 4.5). O perfil de alumínio Bosch foi selecionado para apoiar a tubulação de acrílico devido à sua excelente linearidade. Este perfil estava montado sobre a estrutura feita em metalon, projetada especialmente para este experimento. Essa estrutura apresentava 10 metros de comprimento e era composta por 3 (três) segmentos reforçados, sendo dois com 3 metros e um com 4 metros de comprimento, podendo ser visto na Figura 4.6. O perfil de Metalon selecionado apresentava dimensões de 50 x 30 mm e espessura de parede de 3 mm. Cabos de aço tensionados foram instalados para diminuir a deformação da estrutura.

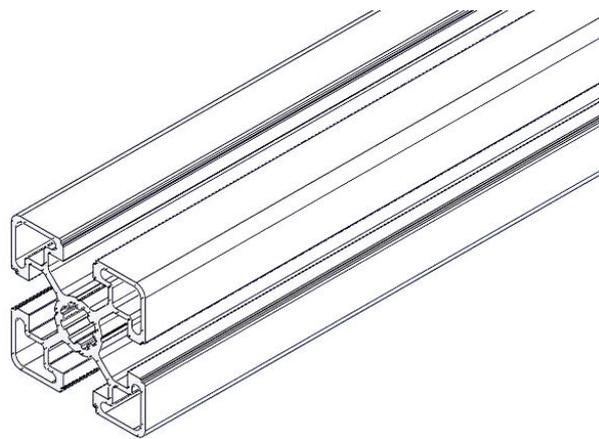


Figura 4.5 – Perfil Bosch 45 X 45 utilizado para apoio do tubo.

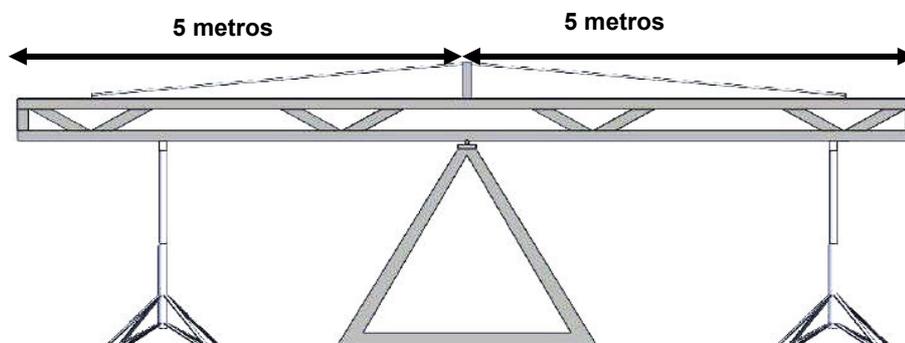


Figura 4.6 – Estrutura de metalon para apoio do perfil Bosch onde a tubulação foi montada.

Para permitir a variação do ângulo da tubulação em relação à horizontal, a estrutura de metalon era apoiada em um eixo suportado por dois mancais fixados a uma base em forma de triângulo equilátero. Nas extremidades, a estrutura em metalon era apoiada em dois suportes com regulagem de altura para garantir a linearidade da seção e evitar possíveis vibrações induzidas pela passagem do escoamento intermitente. A Figura 4.7 apresenta uma vista da estrutura de suporte utilizada.

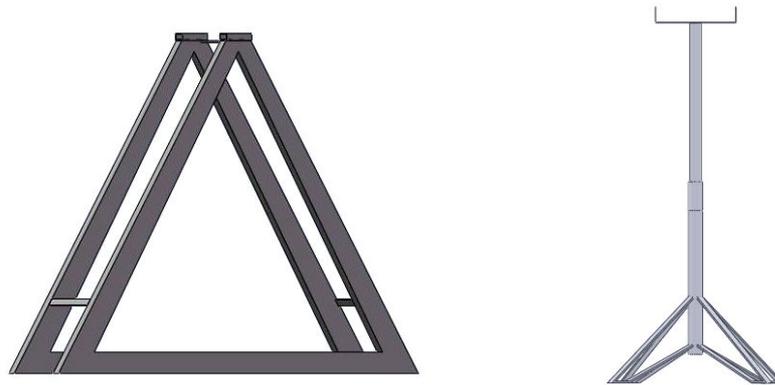


Figura 4.7 – Desenho esquemático da base central e um dos suportes situados nas extremidades.

4.3.1. Tanque de separação

O escoamento multifásico, após percorrer a tubulação em acrílico, desembocava em um tanque de polipropileno (Figura 4.8), onde era promovida a separação das fases para retornarem ao início da tubulação. O tanque apresentava 330 mm de altura e 300 mm de diâmetro interno. Após a separação, o líquido ia em direção à bomba através da saída localizada na porção inferior do tanque, enquanto o gás era sugado pelo compressor por uma saída localizada na porção superior. A entrada no tanque da mistura multifásica ocorria pela parte superior com a tubulação, sendo os fluidos levados à uma altura de $2/3$ da altura total do sistema. Desta forma, evitava-se que bolhas entrassem pela bomba de líquido na saída localizada na parte inferior e também era evitada a presença de líquido na entrada do compressor.

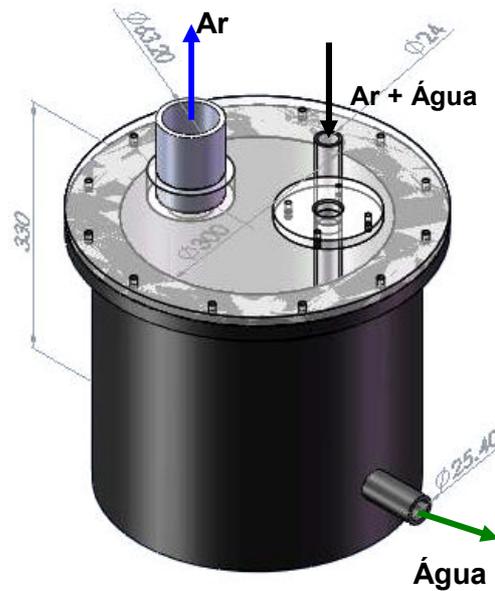


Figura 4.8 – Tanque de separação

4.3.2. Medição de temperatura

Durante os testes, a temperatura do sistema foi monitorada em dois pontos através da utilização de termopares. Um par foi colocado na entrada do rotâmetro utilizado para a medição da vazão de ar e o outro foi colocado dentro do tanque utilizado para separação dos fluidos.

4.3.3. Sistema PIV

Os equipamentos utilizados para a medição pela técnica de *PIV* estão destacados na Figura 4.9 abaixo. Nesta figura, a parte final da seção de testes é apresentada. A seguir é feita uma descrição dos elementos constituintes desta técnica.

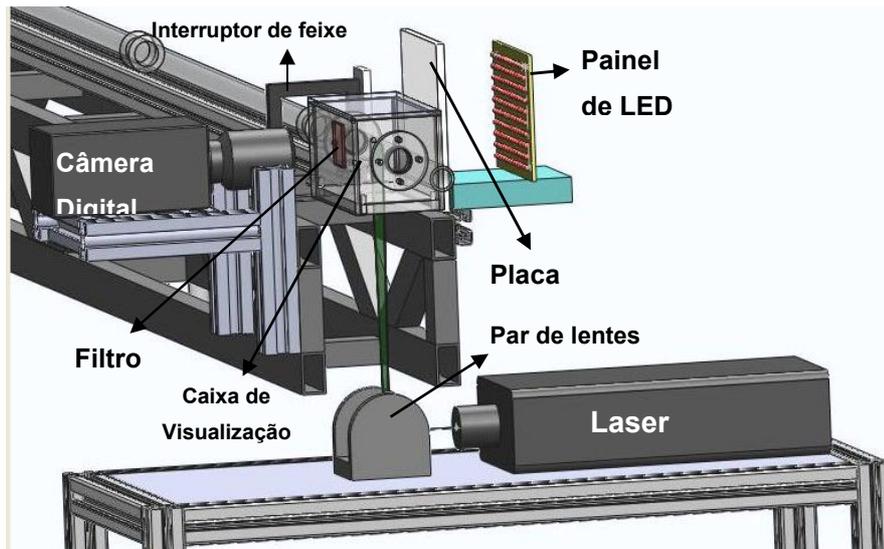


Figura 4.9 – Elementos constituintes da metodologia de medição do PIV.

4.3.3.1. Laser

Neste trabalho, foi utilizado um laser de Nd:YAG, marca *New Wave TM* de dupla cavidade, com uma frequência máxima de emissão de 15 Hz. A dupla cavidade permite um intervalo entre pulsos tão curto quanto se deseje o que o capacita para utilização em escoamentos de alta velocidade. O laser emite em um comprimento de onda igual a $\lambda = 532 \text{ nm}$, com uma energia de 120 mJ por pulso, e duração de 5 ns por pulso.

4.3.3.2. Câmera digital

Para a aquisição das imagens para o processamento pela técnica de PIV foi utilizada uma câmera PIVCAM 10-30, modelo 630046 de fabricação da TSI Inc. A lente utilizada era Nikon com distância focal de 50 mm e abertura máxima de 2.8. As imagens foram digitalizadas por uma placa digitalizadora da TSITM (modelo X64). Conforme pode ser visto na Figura 4.9, a câmera foi montada solidária à estrutura em metalon, de forma que acompanhasse o movimento da estrutura durante a inclinação da seção.

4.3.3.3. Sincronizador

A sincronização entre o laser e a câmera foi realizada de modo a registrar apenas um pulso de iluminação por imagem, evitando a sobreposição de

imagens. Esta sincronização foi feita por meio do software *Insight PIV System* versão 5.1 e por um sincronizador digital da TSI™, modelo 610032.

4.3.3.4. Conjunto de lentes

Conforme já destacado anteriormente, o plano de laser gerado deve apresentar um plano de luz com pequena espessura e alta intensidade. Desta forma, uma boa combinação de lentes se faz necessária. Para o presente trabalho, foram utilizadas duas lentes, sendo uma lente cilíndrica ($f = -25$ mm) e a outra lente esférica ($f = 500$ mm).

4.3.3.5. Caixa de visualização

Devido ao efeito de curvatura da tubulação, se fez necessário a utilização de uma caixa de acrílico preenchida com água, para eliminar distorções que pudessem ser geradas e minimizar a interferência do índice de refração dos diferentes materiais presentes. Esta caixa de visualização está destacada na Figura 4.10 abaixo. Dois furos na parte superior eram utilizados para o enchimento da caixa e saída do ar.

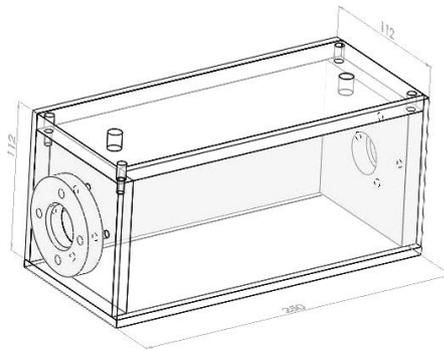


Figura 4.10 – Caixa de visualização. Dimensões em milímetros.

A caixa foi montada com placas de acrílico de espessura igual a 12 mm, sendo apenas de vidro (6 mm) a face frontal e o fundo. A caixa apresentava 112 mm de altura, 250 mm comprimento axial e 112 mm de largura. As tampas e as laterais foram aparafusadas e vedadas com silicone.

4.3.3.6. Partículas

Na descrição da técnica experimental apresentada no capítulo 3, foi exposta a necessidade de se utilizarem partículas traçadoras que devem acompanhar o escoamento da fase líquida e são fundamentais para a medição da técnica de PIV. Por se tratar de escoamento multifásico, as partículas utilizadas devem apresentar a particularidade de serem fluorescentes.

Desta forma, para o presente trabalho foram utilizadas partículas fluorescentes com comprimento de onda de excitação de 542nm e de emissão em 612nm. As partículas possuíam diâmetro de 15 μ m, da marca *Duke Scientific*, solúveis em água, com massa específica de 1,05 g/cm³.

4.3.3.7. Painel de LED's e placa difusora

Para que a técnica de Iluminação pulsada de fundo (do inglês, *Pulsed Shadow Technique – PST*) fosse implementada com êxito, montou-se um painel composto por 120 LED's do fabricante MARL (distribuidor Farnell), de alta potência, com um pequeno ângulo de emissão (30°), emitindo luz com comprimento de onda máximo de 660 nm. A Figura 4.11 mostra o LED utilizado e o painel montado.

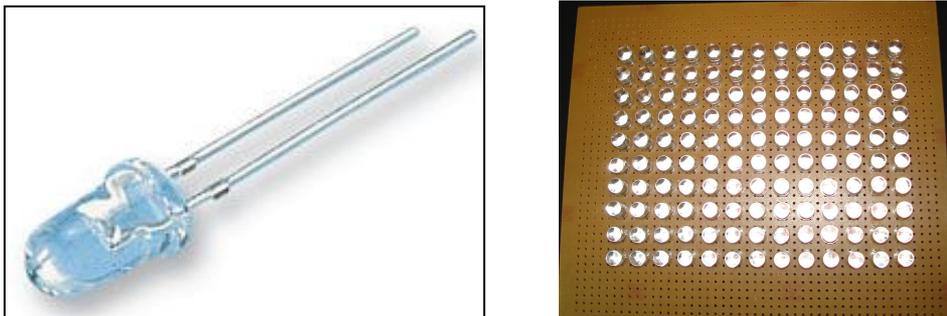


Figura 4.11 – LED vermelho de 5 mm (Fonte: Site Farnell) e painel com LED's .

Com o objetivo de homogeneizar a luz emitida pelos LED's e evitar problemas de reflexão, uma placa difusora feita com acrílico jateado foi posicionada entre o painel de LED's e a seção de testes, podendo ser vista na Figura 4.12 abaixo.



Figura 4.12 – Placa difusora do painel de LED's

4.3.3.8. Filtro

A luz emitida pelas partículas fluorescentes com comprimento de onda $\lambda=612$ nm e a luz gerada pelo painel de LED's com comprimento de onda $\lambda=640$ nm deveriam sensibilizar o sensor da câmera digital para permitir o registro da imagem das partículas traçadoras e da forma das bolhas de ar. Ao mesmo tempo, a luz espalhada pelas interfaces ar-água com comprimento de onda igual a 540 nm deveria ser impedida de atingir o sensor da câmera. Esta separação seletiva de comprimentos de onda foi obtida com a utilização de um filtro óptico posicionado em frente à lente da câmera digital. O filtro selecionado foi um filtro vermelho passa alta de 570 nm (fabricante: Melles Griot e modelo SQ - 50.8; OG-570), cujas dimensões e curva de transmissividade são mostradas nas Figuras 4.13a e 4.13b.

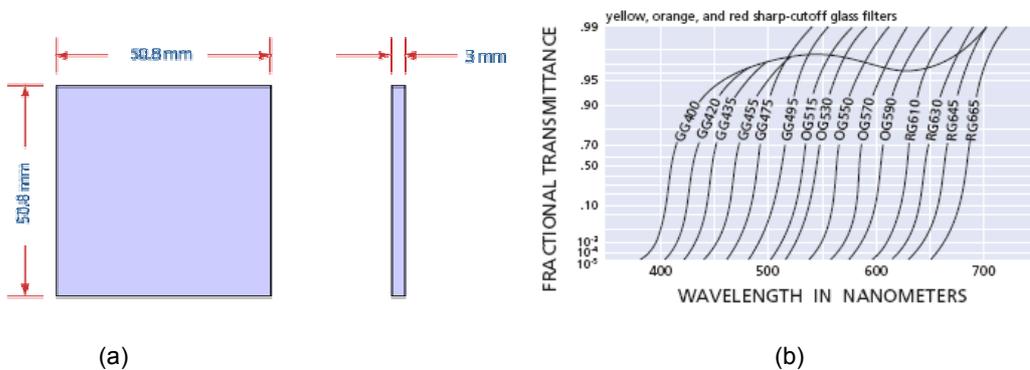


Figura 4.13 – (a) Filtro OG 570 (Fonte: site www.mellesgriot.com); (b) - Curva de Transmissividade do filtro Óptico (Fonte: site www.mellesgriot.com)

4.3.3.9. Sistema de interruptores de feixe

Situados a uma distância de 370 diâmetros em relação à entrada e 45 diâmetros antes do final da seção de testes, foi montado um sistema de interruptores de feixe, conforme pode ser visto em destaque na Figura 4.15 abaixo.

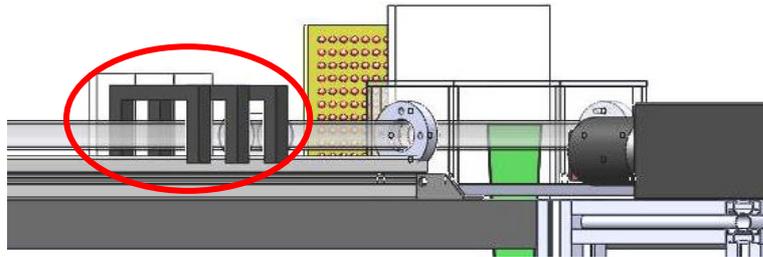


Figura 4.14 – Destaque ao sistema de interruptores de feixe.

O equipamento (modelo ME-9204B, fabricado PASCO® e fornecido pela empresa Scientia) consiste de um emissor e um detector de raio infravermelho que emite um sinal quando o feixe infravermelho é bloqueado. Detalhes do equipamento podem ser visto na Figura 4.16, obtida no site do fabricante.

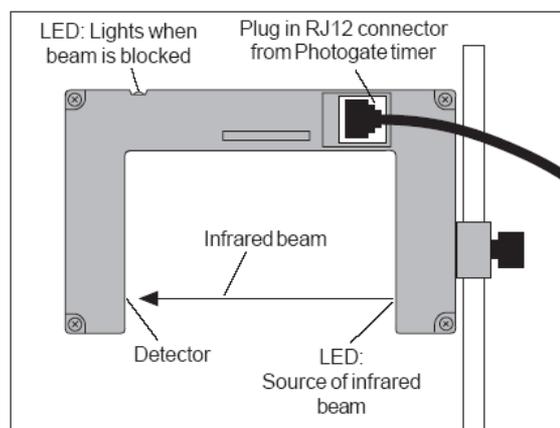


Figura 4.15 – Equipamento interruptor de feixe e seu cabo de alimentação (Fonte: www.pasco.com)

Foram instalados 3 equipamentos, dos quais 2 foram utilizados para as medições e levantamento estatísticos das variáveis globais do escoamento intermitente (separados por uma distância de 50 mm). O outro sensor foi utilizado como um detector da presença da bolha de gás e acionador do laser utilizado pela técnica de medição de PIV. Maiores detalhes a respeito das aplicações deste sistema serão apresentados no capítulo seguinte.