

### **3**

## **Montagem experimental**

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a descrição da montagem e dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho experimental proposto. Primeiramente será discutida uma visão geral e, em seguida, as características detalhadas dos elementos constituintes dos principais sistemas que compõem toda a montagem.

### **3.1.**

#### **Descrição geral da montagem experimental**

A seção de testes foi formada basicamente por quatro conjuntos: o sistema de escoamento de ar, o sistema de escoamento de água, o sistema de separação e a estação de medição.

O sistema de escoamento de ar era aberto, onde o ar era obtido de um ambiente externo ao laboratório, comprimido por um compressor, encaminhado a entrada da seção de testes e posteriormente separado e descartado através do sistema de separação. Já o sistema de escoamento de água era fechado: uma bomba centrífuga realizava a sucção da água de um reservatório, encaminhando a água para a entrada da seção de testes, onde ao final, a água era separada do ar e reutilizada.

O sistema de separação era composto por dois reservatórios conectados entre si, onde o processo de decantação era o mecanismo responsável pela separação das fases.

A estação de medição era composta pelos instrumentos necessários para a detecção da passagem dos pistões de líquido e das bolhas alongadas e pela captura das imagens. A aquisição de imagens era realizada com o auxílio de interruptores de feixe, conectados a uma placa de conversão analógico/digital. As informações fornecidas pela placa de aquisição eram utilizadas para a análise estatística e para a sincronização dos equipamentos. O sincronizador, a câmera, o painel de *LED's*

e a caixa de visualização, formavam todo o sistema destinado à captura das imagens.

A fim de fornecer uma visão geral com maior clareza da montagem experimental, são apresentados nas *figuras 2.1* e *2.2* dois desenhos esquemáticos. O primeiro fornece uma ilustração detalhada da visão superior de toda a montagem, enquanto o segundo, fornece uma visão tridimensional da mesma.

Foi utilizada uma tubulação com diâmetro interno de  $50,8\text{ mm}$ , espessura de parede de  $1,6\text{ mm}$  e comprimento total de aproximadamente  $23\text{ m}$  ( $L/D \approx 450$ ). Toda a tubulação foi fabricada em *FEP (Fluorinated Ethylene Propylene)*, material que possui índice de refração próximo ao da água, minimizando as distorções ópticas e permitindo uma visualização nas proximidades da parede da tubulação (*Hewitt et al., 1990*). Para apoiar toda a tubulação e fixar os equipamentos, foi utilizada uma estrutura construída com perfis de alumínio *Bosch*<sup>®</sup>, com dimensões de  $45 \times 60\text{ mm}$ , o que garantiu uma montagem rígida com possibilidade de um controle cuidadoso do nível de todas as partes acopladas. É importante destacar que grande parte da montagem já se encontrava pronta quando este trabalho foi iniciado, devendo-se o devido crédito a *Farias (2010)*, que descreve em detalhes todo o processo de montagem.

Uma entrada com o formato de um "Y" foi projetada, possuindo em seu interior uma placa separando o escoamento do ar e da água. A placa tinha como finalidade formar um escoamento estratificado, permitindo que as próprias perturbações inerentes ao escoamento formassem naturalmente o pistão de líquido a jusante da entrada. Projetos semelhantes de entradas são encontrados nos trabalhos de *Nydal et al. (1992)*, *Ujang et al. (2006)* e *Zoetewij (2007)*. Esta última referência compara diversas geometrias de entrada. A temperatura da mistura de ar e água foi medida logo após a entrada através de um termômetro digital da marca *Full Gauge*<sup>®</sup>, modelo *TI-02*, com resolução de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para a ampla maioria dos casos, a temperatura permaneceu em um patamar praticamente constante em torno de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

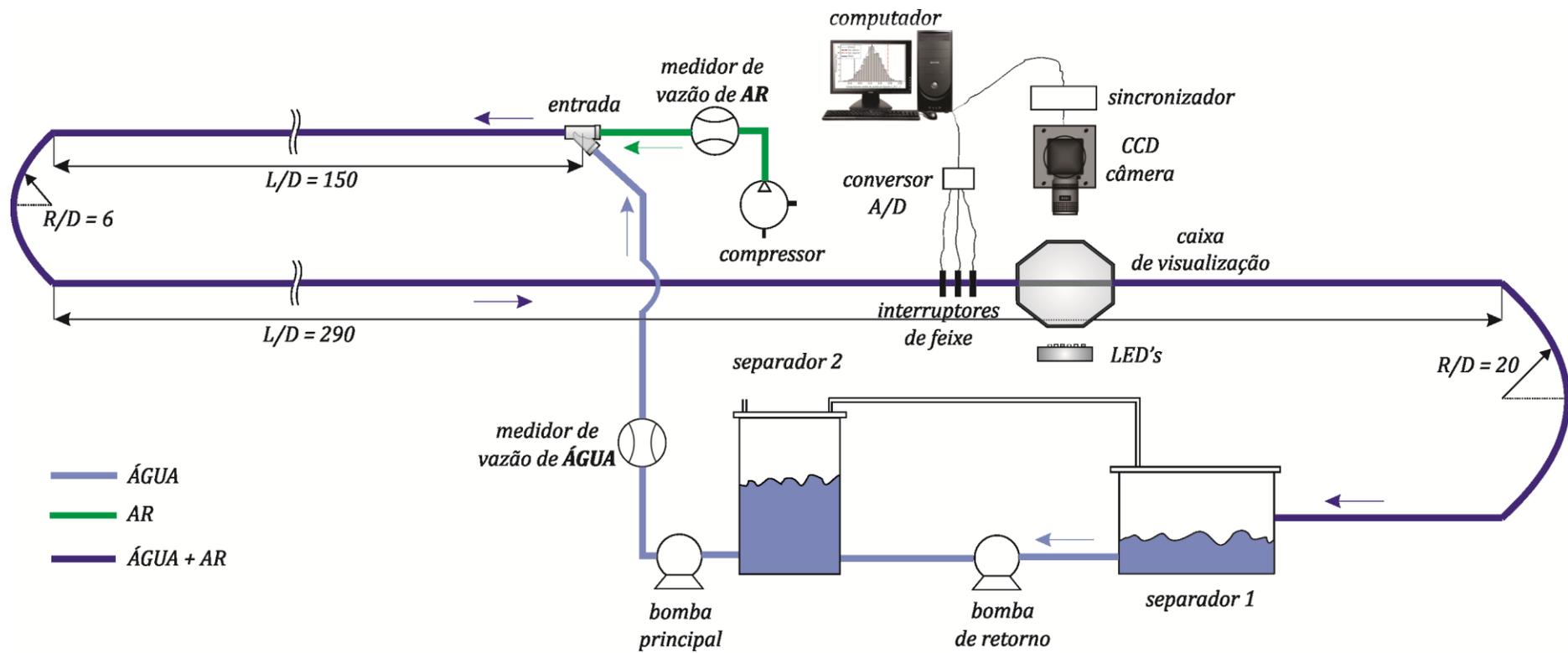


Figura 2.1 - Desenho esquemático da montagem da seção de testes.

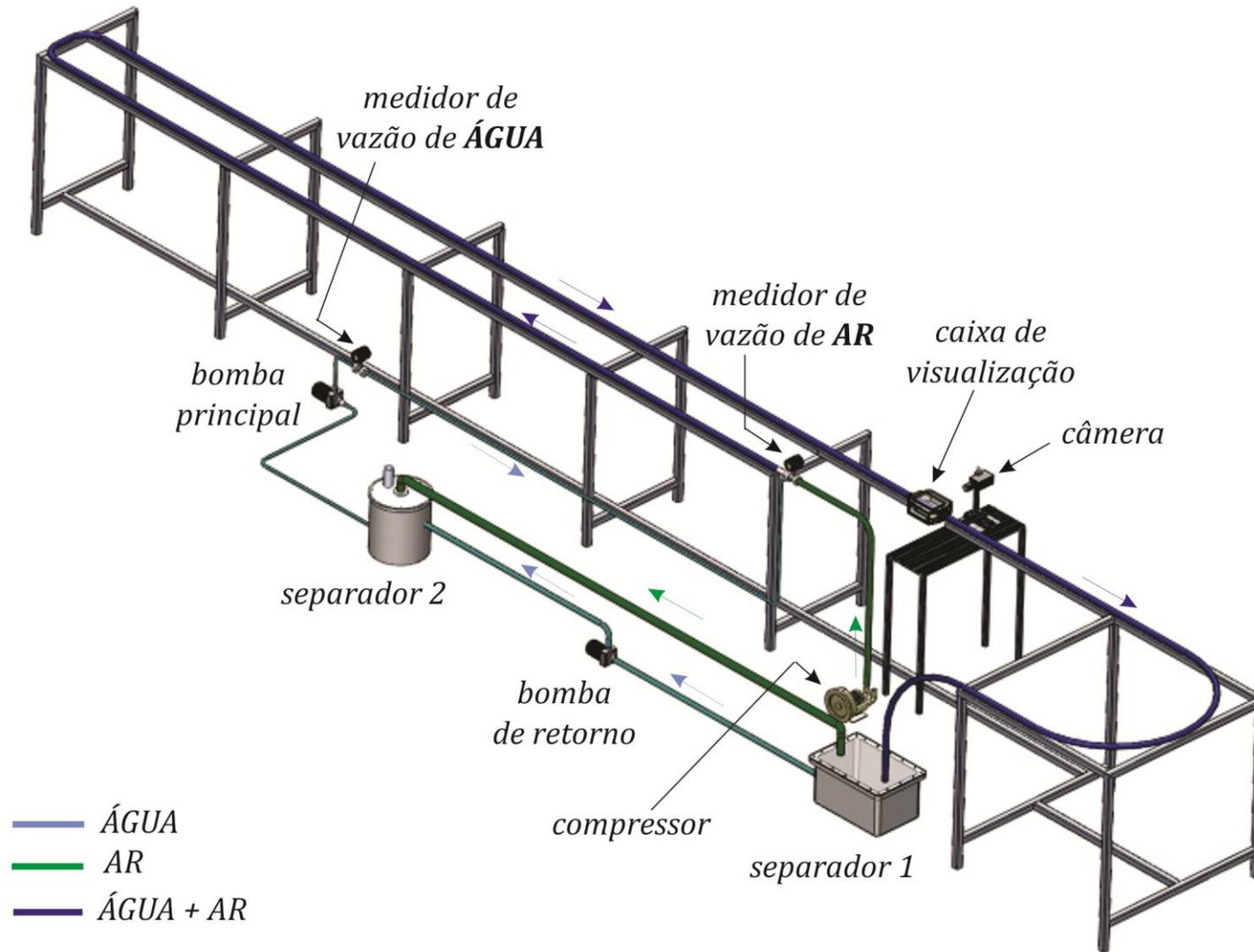


Figura 2.2 - Desenho esquemático tridimensional da montagem da seção de testes.

### 3.2. Sistema de escoamento de água

O sistema de escoamento de água era composto pela bomba principal e pelo medidor de vazão, onde a bomba era do tipo centrífuga, da marca *DANCOR*<sup>®</sup>, com potência de  $3/4$  CV, controlada por um inversor de frequência da marca *WEG*<sup>®</sup>.

A vazão de água era obtida por um medidor do tipo turbina da marca *Contech*<sup>®</sup>, modelo *LI9*, com faixa de operação de  $0,67$  à  $6,8$   $m^3/h$ , cuja incerteza estimada na medição era da ordem de  $0,5$  %. Neste modelo de turbina, a vazão podia ser lida diretamente no *display* acoplado ao medidor.

### 3.3. Sistema de escoamento de ar

O escoamento de ar na seção de testes era produzido por um compressor centrífugo de duplo estágio da marca *IBRAM*<sup>®</sup>, modelo *CRB-14*, também controlado por um inversor de frequência da marca *WEG*<sup>®</sup>. O motor de  $23,2$  CV fornecia uma vazão máxima de  $10$   $m^3/min$  e uma pressão máxima de  $4600$  mm de coluna de água.

A vazão de ar foi obtida por um medidor do tipo turbina da marca *Contech*<sup>®</sup>, modelo *G19*, com faixa de operação de  $3,4$  à  $34$   $m^3/h$ , cuja incerteza era da ordem de  $1$  %. Como este modelo de turbina não possuía um *display* para a leitura direta da vazão, foi utilizada uma unidade de aquisição de dados da marca *Agilent*<sup>®</sup> para a leitura da frequência do sinal de saída da turbina. A partir da curva de calibração da turbina, que relacionava a medida da vazão com o sinal de frequência de forma linear, a vazão era lida de forma indireta com o auxílio do sistema *Agilent*<sup>®</sup>. A figura a seguir ilustra a curva de calibração da turbina fornecida pela *Contech*<sup>®</sup> para a medida da vazão de ar na temperatura de operação de  $-20$  a  $120$  °C.

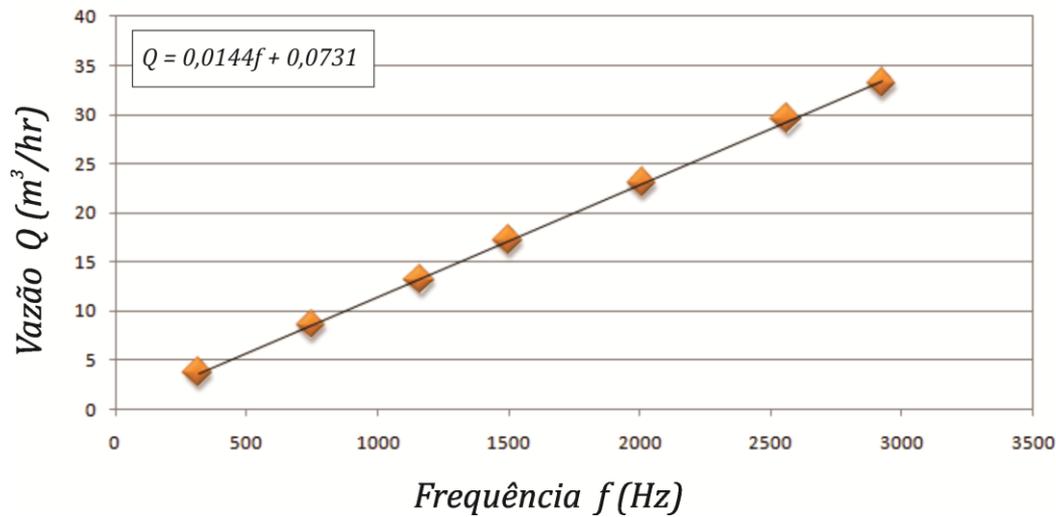


Figura 2.3 - Curva de calibração do medidor de vazão de ar.

### 3.4. Sistema de separação

Foram utilizados dois tanques interconectados para a realização do 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 flexível. Este tanque tinha a função de receber o escoamento bifásico e realizar uma separação inicial da mistura através do processo de decantação. Com o auxílio de uma saída superior, a pressão interna do separador 1 era aliviada e o ar ainda com gotículas era conduzido para o separador 2. Pela abertura inferior do tanque, o líquido ainda com pequena quantidade de bolhas de ar dispersas era bombeado para o separador 2 por uma bomba de retorno, do tipo centrífuga e com potência de 1/4 CV. A mistura água-ar extraída do separador 1 era separada por completo, também pelo mecanismo de decantação, no separador 2. O ar expelido nesse último separador era descartado num ambiente externo ao laboratório com o auxílio de uma saída superior conectada a mangueiras flexíveis. Através desse processo, a água livre de bolhas dispersas ficava então disponível para ser bombeada para a entrada da seção de testes. A figura a seguir ilustra a montagem esquemática do sistema de separação.

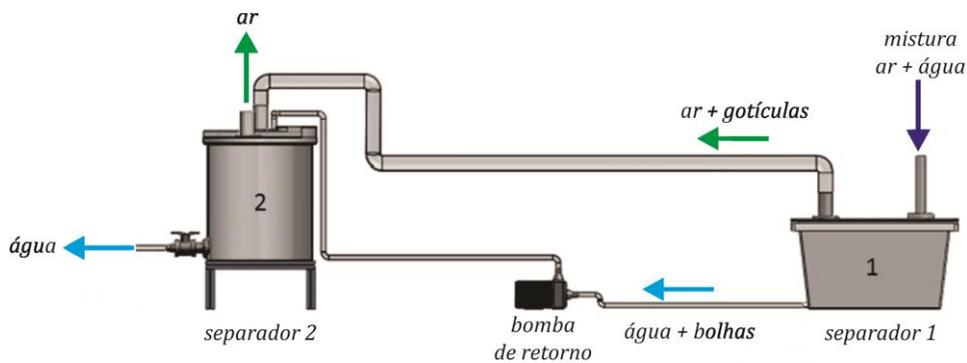


Figura 2.4 - Desenho esquemático do sistema de separação (adaptado de *Farias, 2010*)

### 3.5. Estação de medição

O pistão de líquido formado a partir de perturbações naturais no escoamento estratificado na entrada tubulação, evoluía ao longo de cerca de 400 diâmetros até encontrar a estação de medição. Um sistema de interruptores de feixe detectava a passagem do pistão, gerando um sinal que era pré-condicionado por um circuito lógico e posteriormente capturado por uma placa de aquisição de dados. O sinal lógico de saída era interpretado por um computador através de uma interface construída em ambiente *LabView*<sup>®</sup>. A interface permitia o armazenamento e processamento de todos os dados relativos a passagem da frente ou da traseira do pistão, além de gerenciar um sinal de disparo (*trigger*) em tempo real para um gerador de pulsos conectado a uma câmera. Com isso, as imagens eram adquiridas de maneira sincronizada à passagem dos pistões de líquido ou das bolhas alongadas de ar. O ajuste do número de fotografias registradas, tempo de exposição, *etc*, era realizado através do *software* fornecido pelo fabricante. A câmera foi montada ortogonalmente à seção de testes, de frente para a caixa de visualização. Foi montado também um painel de *LED's* localizado do lado oposto à câmera, que criava um iluminação de fundo nas imagens. A figura a seguir ilustra a configuração da montagem da estação de medição.

### 3.5.1. Sistema de interruptores de feixe

A uma distância de aproximadamente 390 diâmetros a partir da entrada, foram montados três interruptores de feixe da marca *Pasco*<sup>®</sup>, modelo *ME-9204B*. Cada sensor consistia basicamente num emissor/detector fotossensível de um feixe de onda no espectro infravermelho, que emitia um sinal de voltagem quando o feixe era interrompido. Quando o pistão de líquido ocupava toda a seção transversal da tubulação, o feixe de infravermelho emitido pelo sensor não encontrava o dispositivo fotossensível receptor, gerando assim uma mudança no nível lógico de saída do sensor. Esse sinal era capturado por um circuito eletrônico e interpretado pelas rotinas desenvolvidas no *software LabView*<sup>®</sup>

Um sistema de interruptores de feixe, semelhante ao utilizado neste trabalho, também foi utilizado nos trabalhos de *Carpintero (2008)* e *Fonseca (2009)*. As figuras a seguir ilustram respectivamente a montagem ortogonal dos interruptores de feixe à seção de testes, com o detalhe do sinal luminoso no momento da detecção da passagem de um pistão de líquido, e as dimensões do sensor. Uma observação na *figura 2.5* é o detalhe de que a água aparece com cor rosada devido a adição de uma substância fluorescente em concentração suficiente para não alterar as propriedades da água, como viscosidade e massa específica. Essa substância foi utilizada em experimentos paralelos, não tendo quaisquer influências sobre os experimentos realizados no presente trabalho.

Maiores detalhes sobre o funcionamento dos interruptores de feixe e sobre os procedimentos para a obtenção dos parâmetros estatísticos encontram-se no próximo capítulo.

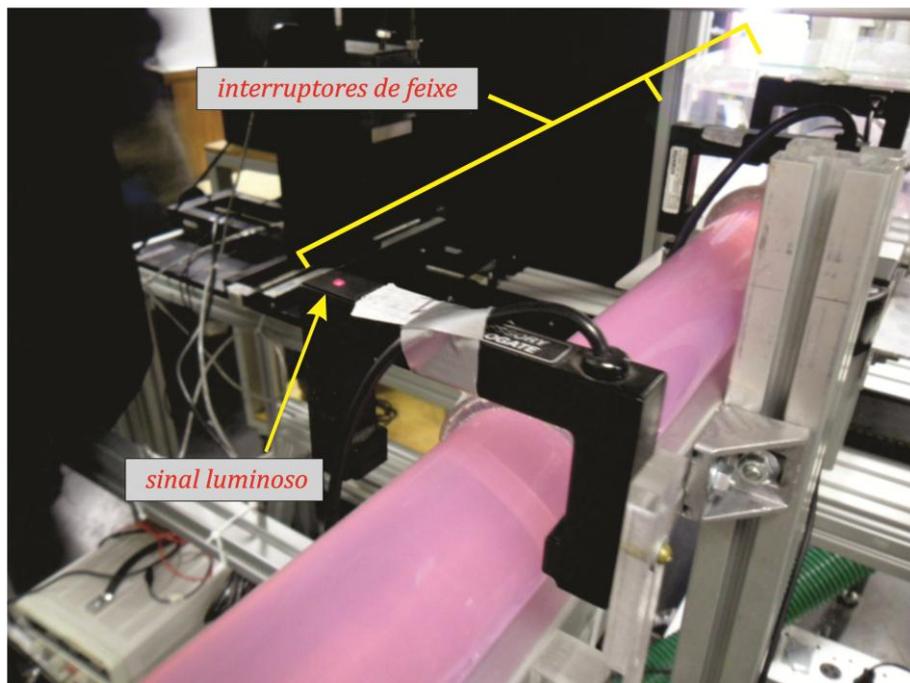


Figura 2.5 - Detalhe da montagem dos sensores que compõem o sistema de interruptores de feixe.

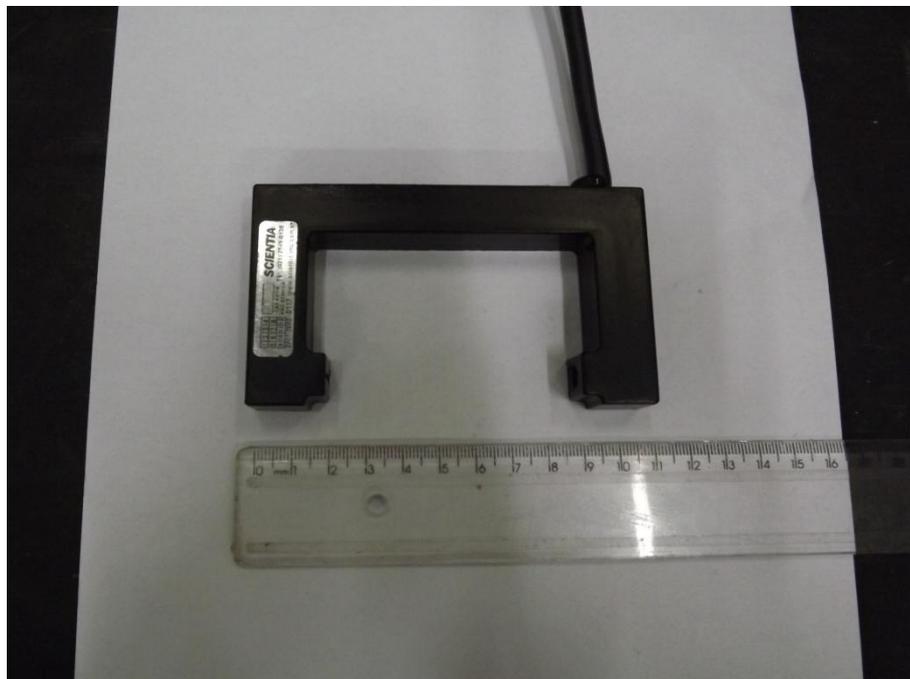


Figura 2.6 - Detalhe da dimensão do sensor.

### 3.5.2. Caixa de visualização

Uma caixa octogonal preenchida com água foi utilizada para permitir uma visualização longitudinal do escoamento e futuramente um visualização estereoscópica com diferentes ângulos. Construída em acrílico e possuindo em sua parte superior uma abertura para o preenchimento de líquido, a caixa de visualização tinha como objetivo a minimização de distorções ópticas provenientes da refração da luz e da curvatura da tubulação (*Farias, 2009*). Toda a vedação necessária era realizada com a utilização de *O-rings* (ver *figura 2.7*).

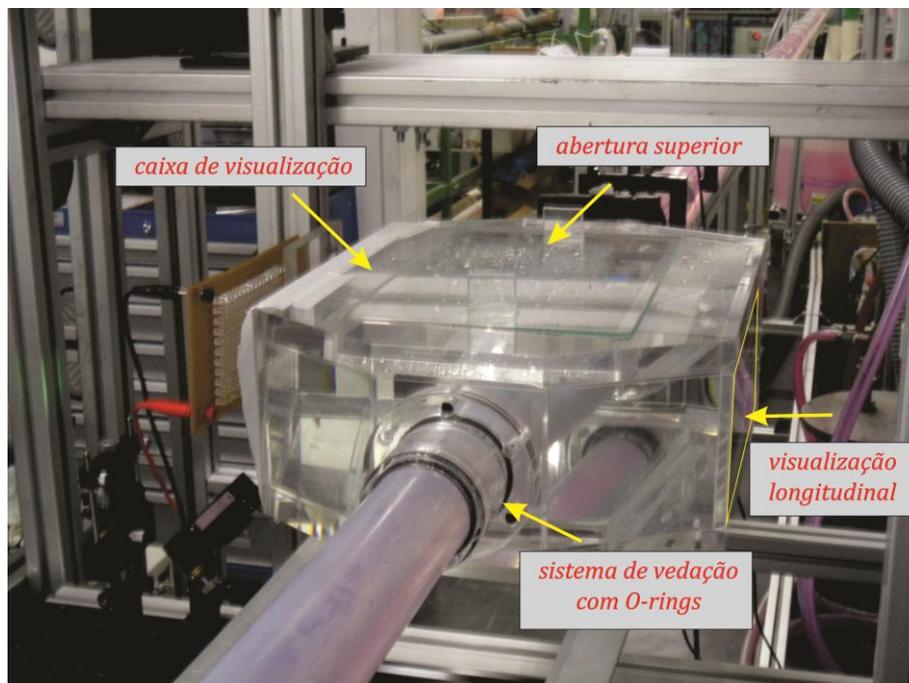


Figura 2.7 - Detalhe da montagem da caixa de visualização.

### 3.5.3. Painel de LED's

Para a criação de uma iluminação de fundo, foi construído um painel com *LED's* de luz branca. Os *LED's* foram arranjados em uma matriz retangular com linhas compostas por 16 *LED's* e colunas com 11 *LED's*, totalizando 176 *LED's* com circuito em configuração paralela. A intensidade de iluminação do painel de *LED's* era controlada por uma fonte regulável. Para espalhar a luz proveniente do painel de *LED's* de forma homogênea pelo escoamento, foram utilizadas folhas de

papel vegetal entre o painel e a caixa de visualização. A *figura 2.9* a seguir, ilustra o painel de *LED's* utilizado.

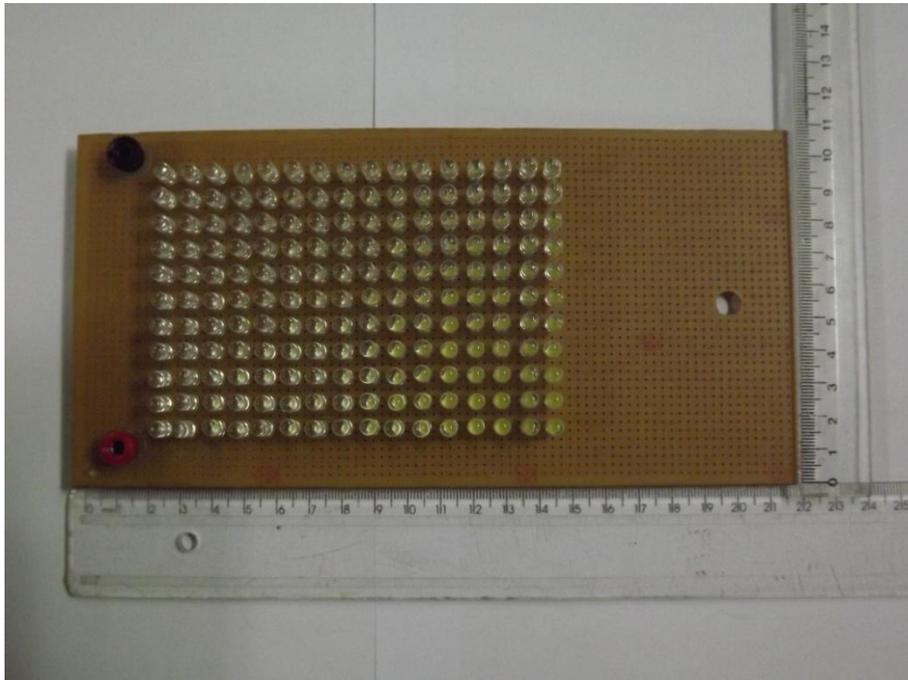


Figura 2.8 - Detalhe do painel de *LED's*.

#### 3.5.4. Câmera

Para a captura das imagens, uma câmera de alta velocidade foi montada ortogonalmente à caixa de visualização, estando de frente para a iluminação de fundo proveniente do painel de *LED's*. A câmera utilizada era do modelo *MotionPro X3™*, fabricada pela *IDT®* com tecnologia de sensores de imagem *CMOS* (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), oferecendo resolução espacial máxima de  $1280 \times 1024$  pixels (ver *figura 2.9*). O *software* do fabricante *IDT Motion Studio®* era utilizado para o ajuste dos parâmetros como o tempo de exposição, quantidade de fotografias, *etc.* As imagens capturadas eram armazenadas na memória interna da câmera e posteriormente transferidas para um computador, sendo que a capacidade máxima de armazenamento da câmera era de *8 Gigabytes*. Um gerador de pulso conectado à câmera fornecia o necessário sinal de disparo para a captura das imagens da frente ou da traseira do pistão, com

intervalos de tempo predeterminados, variando geralmente entre 10 e 20 milésimos de segundo. O gerador de pulsos era da fabricado *pela Berkeley Nucleonics Corporation*<sup>®</sup>, modelo *BNC 575*.



Figura 2.9 - Detalhe da câmera utilizada.