

## 2

### Aparato Experimental

Este capítulo apresenta uma descrição da banca experimental, seus componentes e o procedimento de montagem. Esta bancada tem o objetivo de obter as imagens do escoamento do fluido através das seções de expansões–contrações abruptas assimétricas e permitir a análise das variáveis que influenciam seu comportamento.

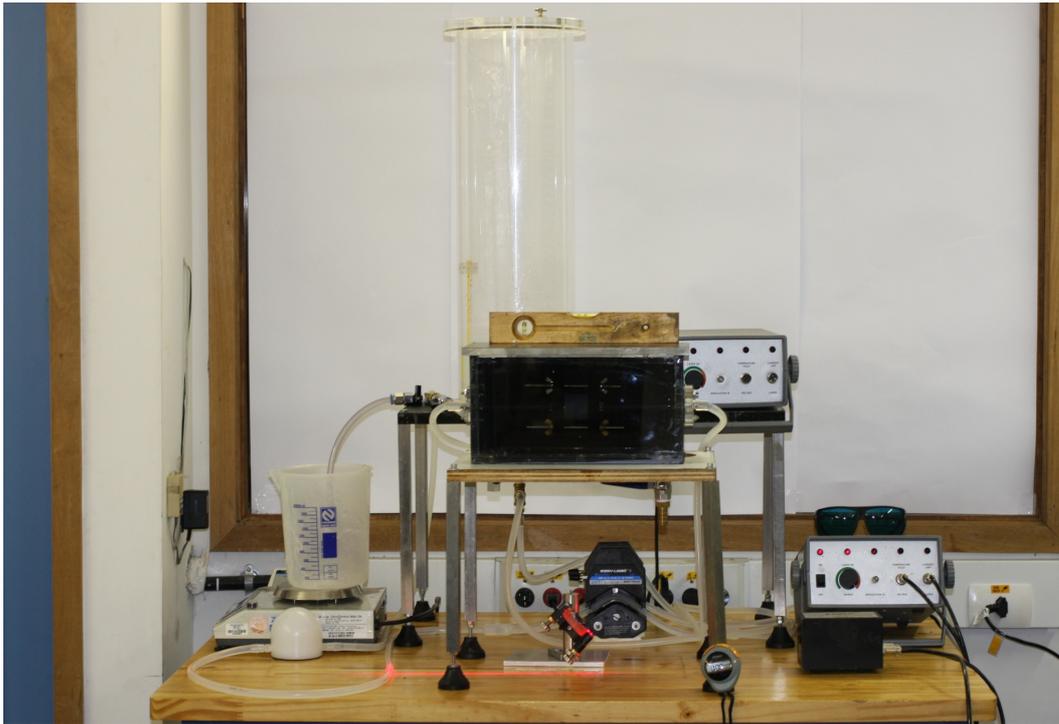
A bancada experimental mostrada na Figura 2-1 foi montada durante o desenvolvimento da pesquisa e encontra-se no Laboratório de Termociências da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, com o intuito de permitir a visualização de uma expansão–contração, ambas abruptas e axissimétricas. A bancada experimental consta de três partes fundamentais.

1. Suportes
2. Sistema Hidráulico
3. Mecanismo de visualização

#### 2.1.

##### Suportes

Os suportes são principalmente uma base de madeira, onde fica todo o experimento, uma mesa para o reservatório e uma mesa para colocar o reservatório contendo a seção de teste. O ultimo reservatório tem feito um rasgo para permitir que o laser atravessasse até a seção de visualização. Cada mesa tem bases de borrachas para fixar bem e evitar o deslizamento e impactos. O nivelamento das mesas foi controlado para evitar inclinações no mecanismo de visualização.



**Figura 2-1:** Bancada experimental.

### **2.1.1.**

#### **Sistema Hidráulico**

O Sistema hidráulico tem um reservatório para armazenagem do fluido de trabalho, que foi montado a partir de um tubo de acrílico de 195 mm de diâmetro interno. Um disco de acrílico foi colado na parte inferior do tubo e uma válvula esférica instalada no centro para que houvesse um controle na saída do fluido do reservatório. Para assegurar que não houvesse contaminação do fluido de trabalho contido no reservatório, um disco de acrílico, com um anel de borracha, foi colocado no topo do reservatório. Passando pela válvula de saída do reservatório, o fluido é transportado por tubos de silicone.

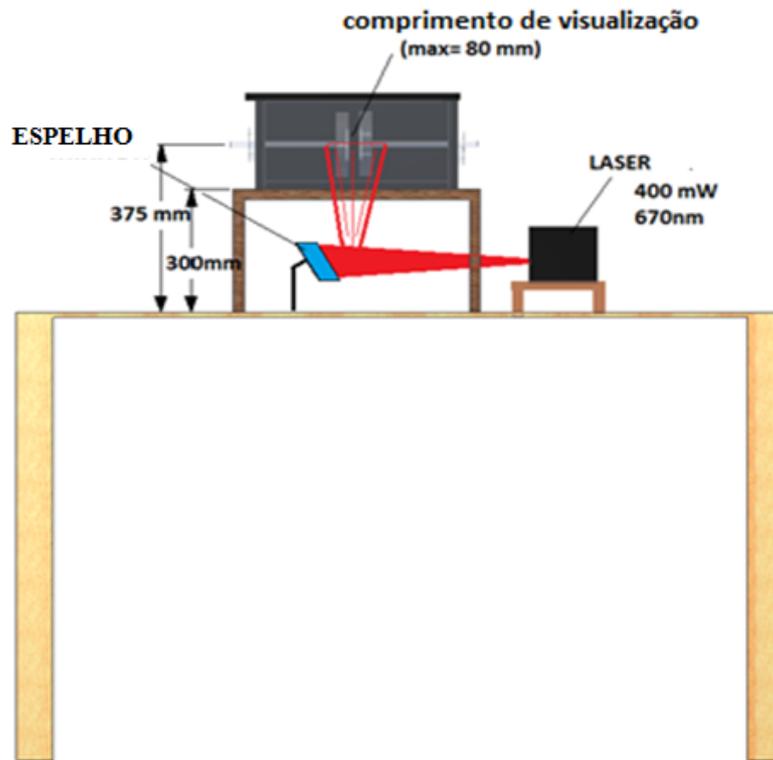
A força motriz do escoamento do fluido é uma bomba de deslocamento positivo. Esta bomba controla a velocidade do fluido. A modificação na vazão de entrada na expansão pode ser efetuada através de um controlador da bomba com dez diferentes marcações, numeradas de zero a dez, tornando possível o controle de dez diferentes vazões. A bomba desloca o fluido a partir do reservatório até a seção de visualização para depois sair e voltar para o reservatório de modo que obtém-se um *loop* fechado.

Após a bomba, foi instalado um *pulse damper* que é um pequeno reservatório na forma de um semicírculo posicionado para eliminar as pulsações próprias do funcionamento da bomba e garantir uma vazão constante. Seguidamente colocaram-se duas conexões T. Uma das conexões tem duas válvulas esféricas, uma em cada extremo, e tem como função desviar o fluido para medir a vazão do escoamento antes de entrar na seção de expansão-contração. Este desvio conecta-se a um Becker posicionado sobre uma balança e através de um cronômetro mede-se a vazão. A segunda conexão T tem uma válvula reguladora de vazão que permite desviar uma quantidade de fluido para diminuir de maneira controlada a vazão que entra na seção de expansão-contração.

### **2.1.2.**

#### **Mecanismo de Visualização**

Para o mecanismo de visualização da passagem do fluido de trabalho pela expansão-contração, um reservatório de acrílico e vidro foi construído, para que os efeitos da difração da luz pudessem ser minimizados, utilizando-se um fluido de índice de refração próximo ao do vidro. Para que fosse possível a visualização do escoamento, foi misturado ao fluido partículas de micro-esferas, as quais detalha-se ao seguir, e que a partir da incidência de um plano laser permitem a visualização através de uma câmera fotográfica. O plano de laser foi colocado perpendicular ao fluxo do fluido de trabalho, passando pelo eixo de simetria da seção de teste, com isso a câmera fotográfica pôde obter imagens do plano central da expansão-contração, como mostra a Figura 2-2. O feixe de laser foi refletido 90 graus através de um espelho, para poder colocar a fonte do laser em posição horizontal e facilitar o manuseio do experimento.

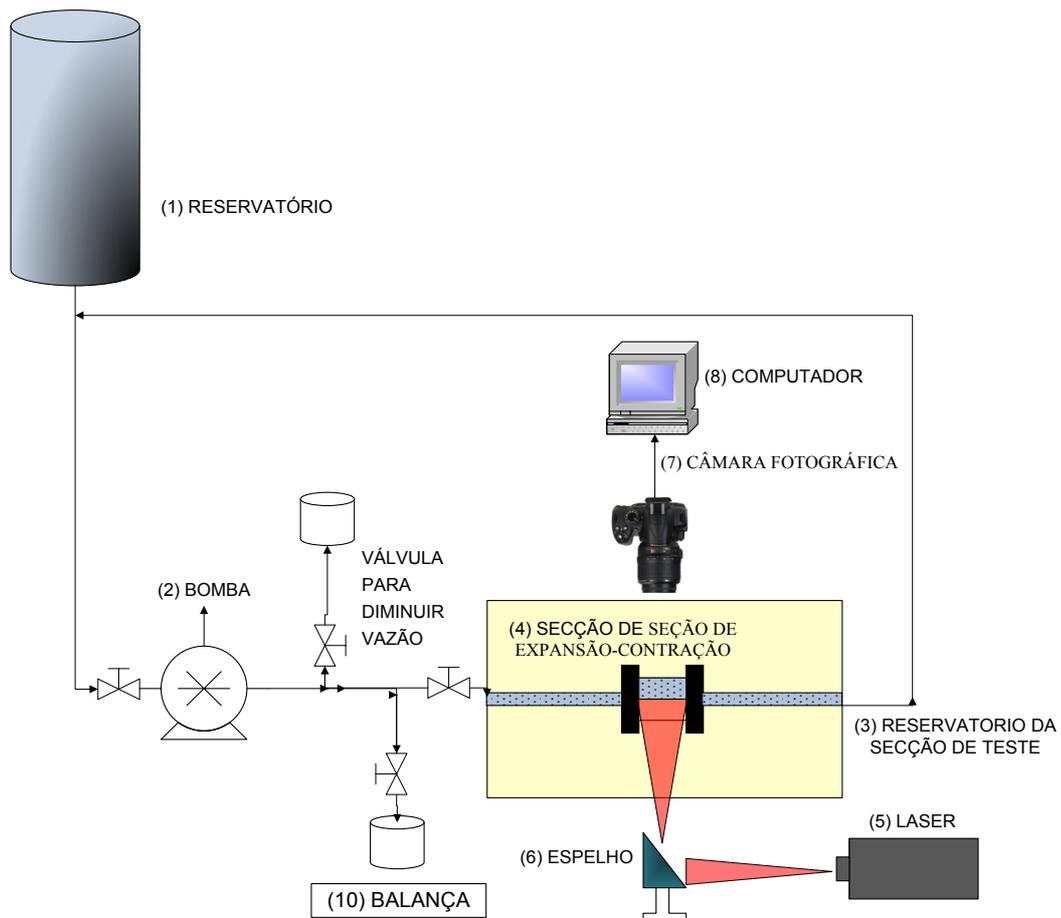


**Figura 2-2:** Plano do laser para visualização.

As imagens foram capturadas pela câmera e foram posteriormente tratadas e analisadas.

Os componentes do aparato experimental de acordo com o esquema da Figura 2-3 são:

- (1) Reservatório de armazenagem do fluido de trabalho
- (2) Bomba de deslocamento positivo
- (3) Aquário
- (4) Seção de expansão-contração
- (5) Laser
- (6) Espelho do laser
- (7) Câmera fotográfica
- (8) Computador
- (9) Partículas de micro-esferas
- (10) Balança.



**Figura 2-3:** Esquema do experimento.

## 2.2.

### Componentes do Aparato Experimental

#### 2.2.1.

#### Reservatório de armazenagem do fluido de trabalho

A função do reservatório é armazenar de jeito seguro e visível o fluido de trabalho durante todo o tempo da realização do experimento. Pelo fato do fluido percorrer um ciclo, este reservatório não precisa ser capaz de armazenar uma grande quantidade de fluido. Entretanto, o reservatório de armazenamento é de razoável transparência devido à necessidade de observar a presença ou não de bolhas no reservatório e para ter uma noção de homogeneidade do particulado dentro da solução. O acrílico mostrou-se a melhor escolha em detrimento ao

vidro, por se tratar de um material de fácil usinagem e maior segurança no transporte e manuseio.

A base do reservatório tem um furo de diâmetro NPT  $\frac{1}{4}$ " , central para que uma válvula esférica pudesse ser conectada, sendo possível assim, o controle da saída ou não do fluido contido no tanque, como mostra a Figura 2-3.

O reservatório no interior tem um termômetro que permite verificar se o fluido encontra-se à temperatura dos testes reológicos. A temperatura do fluido foi a mesma temperatura da sala, não foi utilizado um controle térmico mais preciso. As variações térmicas na sala foram de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

No topo do reservatório uma tampa foi projetada para que não houvesse contaminação do fluido de trabalho.



**Figura 2-4:** Reservatório com tampa e termômetro.

Características geométricas do reservatório da Figura 2-4:

- Diâmetro interno: 195 mm
- Diâmetro externo: 200 mm
- Diâmetro da base: 240 mm
- Espessura da base: 10 mm
- Diâmetro do furo da base:  $\frac{1}{4}$ " NPT
- Diâmetro da tampa: 240 mm
- Espessura da tampa: 20 mm

- Altura do reservatório: 600 mm
- Volume interno máximo: 0.018 m<sup>3</sup>.

### 2.2.2.

#### Bomba

A bomba utilizada é uma bomba de deslocamento positivo (Cole Parmer EW-07553-70, com mangueira Masterflex *double- y* de silicone de diâmetro 8 mm, modelo L/S 18 ). Tem uma potência de 0,1 HP, possui uma faixa de 6 até 600 rpm, e proporciona uma faixa de vazões que depende da viscosidade do fluido. Como o fluido de trabalho é laponita RD a viscosidade varia com tempo, devido a suas propriedades reológicas, não permitindo uma calibração da bomba para cada posição. Sendo assim, a vazão foi medida para cada teste de visualização. A incerteza na medida da vazão depende do valor da mesma, sendo a mínima incerteza de 0.00037 g/s e a máxima de 0.0029 g/s, cujo cálculo encontra-se no Anexo B com o gráfico da incerteza dependendo da vazão. A bomba trabalha com voltagem de 110-220 V e com uma amperagem de 1,5 A. Essa bomba é indicada para deslocamentos de água, embora foi utilizado neste experimento devido ao fato de ter um bom controle de vazão constante. A bomba pode ser visualizada na Figura 2-5.

Depois da bomba colocou-se um *pulse dampener*, um pequeno reservatório na forma de um semicírculo posicionado após a saída da bomba para armazenar o fluido de trabalho e minimizar os efeitos de pulsação do escoamento.



**Figura 2-5:** Bomba de deslocamento positivo (Cole Parmer EW-07553-70).



**Figura 2-6:**Controlador da vazão da bomba.



**Figura 2-7:** Pulse dampener.

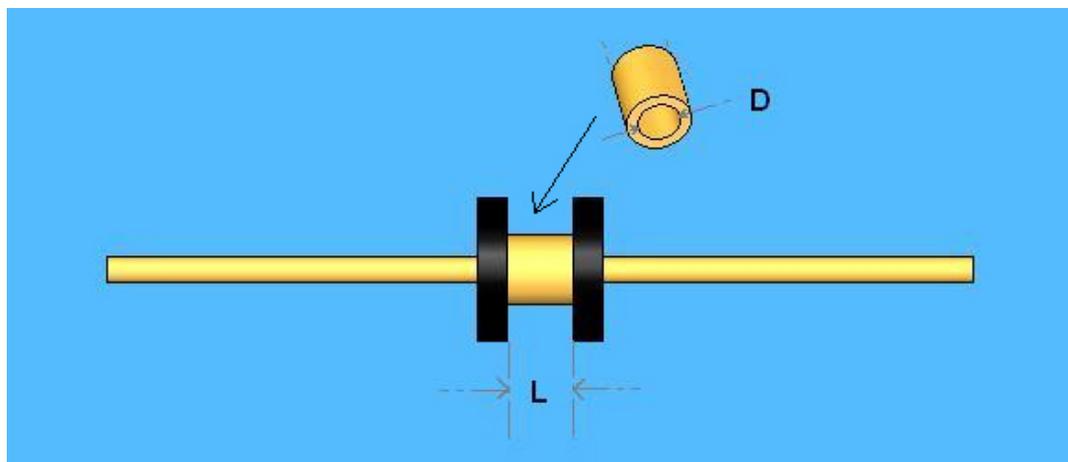
### 2.2.3.

#### **Seção de expansão-contração**

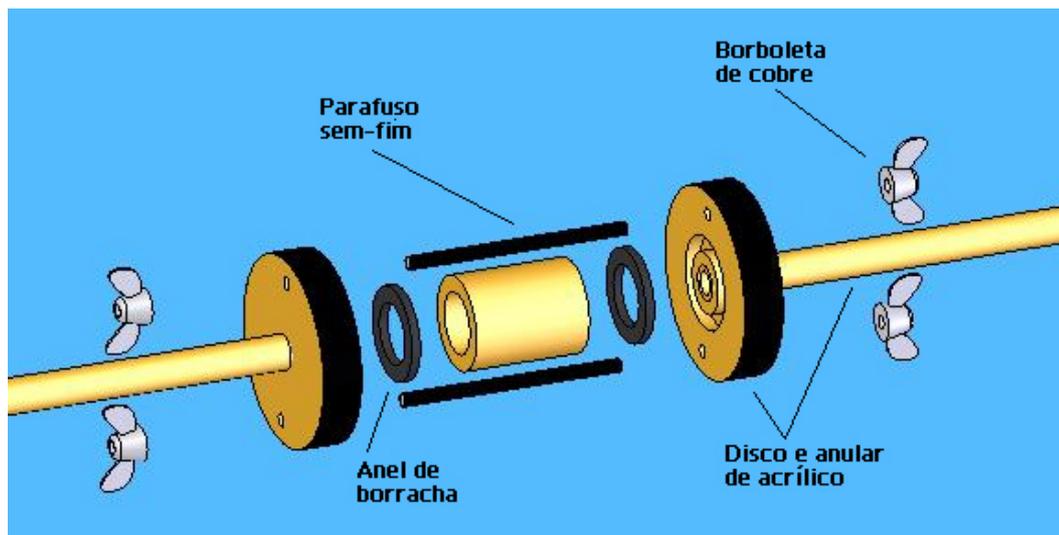
Para cumprir os objetivo deste trabalho, um tubo de acrílico com 8mm de diâmetro interno foi usado como padrão antes e depois da expansão. Para as expansões dois tubos de diferentes diâmetros internos foram utilizados, 24mm, 40mm. Cada tubo foi cortado com diferentes razões de  $L/D$ , onde,  $L$  é o comprimento e  $D$  o diâmetro interno da expansão, como mostra a Figura 2-8. Três diferentes razões de  $L/D$  foram utilizadas: 0,5,1 e 1,5. As dimensões com respeito às relações são apresentados na Tabela 2-1.

**Tabela 2-1:** Dimensões dos tubos de acrílico da seção de expansão-contração.

<b>TUBOS DE ACRÍLICO DA SEÇÃO DE EXPANSÃO-CONTRAÇÃO</b>		
<i>L/D</i>	<i>DIAMETRO</i>	<i>COMPRIMENTO</i>
[ ]	[mm]	[mm]
0,5	40	20
1	40	40
1,5	40	60
0,5	24	12
1	24	24
1,5	24	36

**Figura 2-8:** Expansão e contração.

Para que fosse possível a montagem da seção de expansão-contração alguns elementos foram utilizados, tais como, anéis de borracha, parafusos sem fim de aço inox, porcas e arruelas de cobre, como é possível ver na Figura 2-9. Cada conjunto de expansão-contração contém: dois tubos, dois discos, dois anéis de borracha e três comprimentos característicos da expansão- contração ( $L$ ). Assim, dois conjuntos ( $d$ - $D$ - $d$ ) foram necessários para a realização do experimento, 1-3-1 (24 mm), 1-5-1 (40 mm). Algumas peças são utilizadas por todos os conjuntos, tais como: os parafusos sem-fim, as borboletas e arruelas.



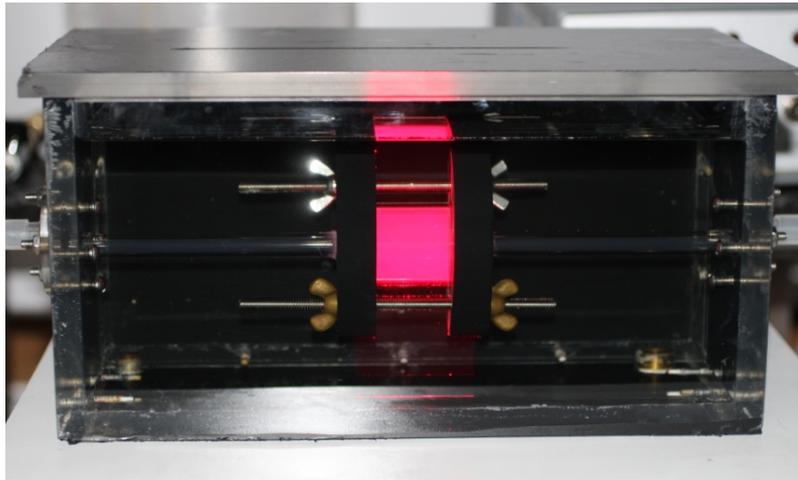
**Figura 2-9:** Vista da montagem da expansão-contracção.

#### **2.2.4.**

#### **Reservatório da seção de teste**

O objetivo do reservatório da seção de teste é de conter um fluido que minimize o efeito da difração da luz durante a obtenção de imagens na seção de expansão-contracção, para o qual uma caixa de acrílico com uma das faces em vidro foi construída. Com o intuito de evitar a exposição direta do conjunto de expansão-contracção com a câmera, glicerina foi escolhida para preencher o interior desta caixa. A glicerina é um fluido que possui um índice de refração muito próximo ao do vidro por o qual evita a distorção das imagens por diferença de índices de difração.

Com exceção da face de vidro, onde há visualização, todas as paredes de acrílico foram revestidas com filme plástico preto, impedindo que fontes de luz, exceto do plano laser, pudessem interferir de forma significativa na realização do experimento, como mostra a Figura 2-10.



**Figura 2-10:** Expansão-contração e aquário montados.

Na base de acrílico foi feito um rasgo no filme de plástico preto de 150 mm de comprimento por 2 mm de largura para permitir a completa passagem do plano laser. Na mesma base da caixa, duas válvulas esféricas foram instaladas para permitir que a glicerina escoasse, permitindo assim, a troca das geometrias e limpeza dos elementos que compõem o conjunto.

### **2.2.5.**

#### **Laser**

O laser utilizado é o EAGLE LASER LIGHT SHEET com potência de 400 mW. A luz do laser infravermelho sai do equipamento em forma de leque com um comprimento de onda de 670 nm. Utilizaram-se óculos de proteção para visualizar o Laser. O equipamento do laser trabalha com uma fonte de 220 V.



**Figura 2-11:** Laser utilizado.



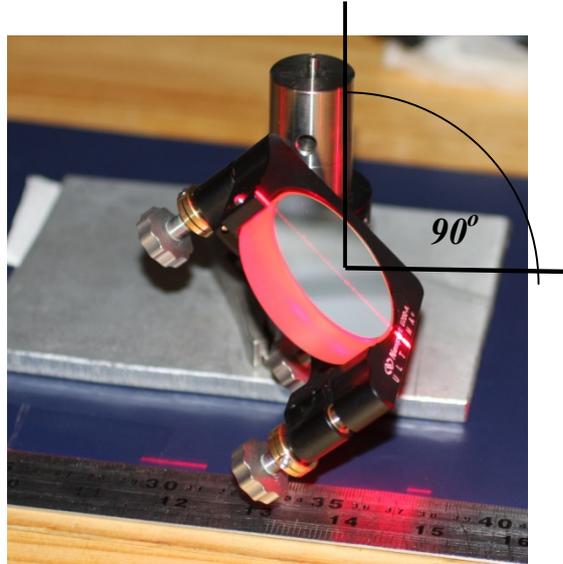
**Figura 2-12:** Fontes do laser.

### 2.2.6.

#### Espelho e suporte

O espelho tem como função refletir 90 graus a luz do laser infravermelho para a seção de teste. Neste trabalho utilizou-se um espelho de Zerodur de diâmetro 50.8 mm para comprimentos de onda de 450- 700 nm. Com o objetivo de posicionar o espelho precisa-se de um sistema de suportes próprio do espelho que permita sua calibração e fixação. Os elementos utilizados no suporte são:

- Apoio de precisão do espelho
- Pedestal
- Pinça deslizante
- Fixação



**Figura 2-13:** O espelho e os acessórios de seu suporte.

### 2.2.7.

#### **Câmera fotográfica**

Para capturar imagens do escoamento do fluido escoando na seção de expansão-contração utilizou-se uma câmera digital marca Canon, modelo EOS 40D com uma lente EF 50 mm. Para posicionar a câmera utilizou-se um suporte próprio da câmera, colocando ela o mais próximo possível da seção de teste.

As fotografias foram obtidas no modo monocromático. Os parâmetros da câmera: sensibilidade ISO (sensibilidade do sensor de imagem à luz), velocidades do obturador e abertura, variam para cada vazão, pois as velocidades das partículas dependem da vazão.

### 2.2.8.

#### **Partículas para visualização**

As partículas utilizadas para visualizar o escoamento do fluido na seção de teste são microesferas ocas de vidro de tamanho de 8-12  $\mu\text{m}$ , produzidas por Potters Industrial Inc. Estas partículas têm uma aparência de pó de vidro de cor branco, com uma densidade específica de aproximadamente  $0.87 \text{ g/cm}^3$ , é solúvel em água e é estável sob quaisquer condições, usos e armazenagem. Trabalhou-se com uma concentração um pouco maior a 10 ppm, o qual é recomendado por Raffel, Willert, Wereley, Kompenhans [42].

### 2.2.9.

#### Balança

Para medir a vazão do fluido que entra na seção de teste utilizou-se uma balança marca Gehaka. A balança pode medir uma massa mínima de 0.25 gramas e uma máxima de 4200 gramas e tem uma incerteza de  $\pm 0.01$  gramas. A balança precisa um pré-aquecimento de 30 minutos antes de qualquer medição.



**Figura 2-14:** Balança Gehaka utilizada para medir a vazão.

### 2.3.

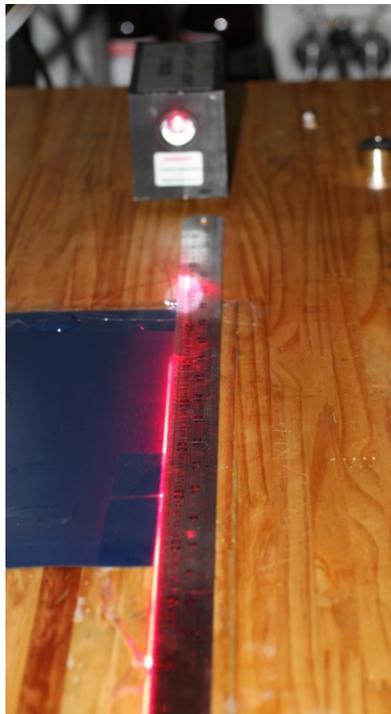
#### Montagem da Bancada

Para montar a bancada no laboratório seguiu-se o seguinte procedimento:

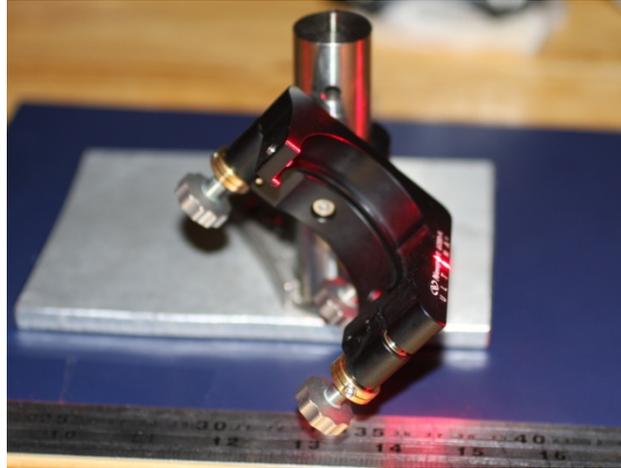
- Montou-se o reservatório sobre sua mesa e encaixou-se de modo que o furo da mesa fique concêntrico ao furo do reservatório. Após colocou-se a válvula esféricas no furo NPT  $\frac{1}{4}$ '' da base do reservatório, e em seguida conectou-se à união para mangueira à sair do reservatório.
- Colocou-se na posição sobre a mesa: a bomba, o *pulse dampener* e as válvulas para regular e medir vazão.
- Posicionou-se a mesa do reservatório da seção de teste, depois nivelou-se e foram feitas marcas nos apoios para evitar movimentações. Uma vez posicionada a mesa, encaixou-se o traço do reservatório da seção de teste com o traço da mesa e finalmente projetou-se o plano central da secção de

teste na mesa principal, fazendo um traço com lápis. Para isso, utilizou-se um nível, um paquímetro e uma régua.

- Uniram-se com mangueira os elementos do circuito hidráulico concordando com a Figura 2-3.
- Posicionou-se a fonte e ligou-se o laser. O laser foi posicionado de tal modo que a luz laser passe pelo traço projetado do plano central da secção de teste, como mostra a Figura 2-15. Em seguida, colocou-se o sistema de suporte do espelho controlando o nível e fixação. O suporte do espelho, para estar alinhado, deve ficar com o traço do laser na parte central dele, como mostra a Figura 2-16.



**Figura 2-15:** Posicionamento e alinhamento do laser.



**Figura 2-16:** Alinhamento do sistema de suporte do espelho.

- Finalmente os acessórios da seção de expansão-contração ficaram disponíveis para trocar as geometrias em cada experimento.

## 2.4.

### Procedimento Experimental

Uma série de procedimentos foram desenvolvidos para a realização do experimento. Estes procedimentos desenvolveram-se a partir de alguns problemas que foram surgindo no decorrer da fase experimental deste trabalho. Os primeiros surgiram na maneira com que o fluido de trabalho, a Laponita, era transferido do recipiente de armazenagem para o reservatório, pois muitas bolhas surgiam. Outro problema envolvido na preparação da bancada era a existência de bolhas na seção de expansão-contração. Com respeito ao laser surgiu o problema que a luz laser não passava direito pelo plano central do tubo e a expansão-contração. Finalmente, a viscosidade da laponita não permitiu uma calibração da bomba, devido a variação da viscosidade como o tempo.

Para que o fluido estivesse sempre submetido à mesma taxa de deformação característica ( $\dot{\gamma}_c$ ) fechou-se o circuito antes da entrada de fluido do reservatório como se mostra na Figura 2-3.

A sequencia de passos para realizar o experimento é:

- Primeiramente, colocar as partículas de visualização no fluido de trabalho. Para isso dissolver uma fração um pouco maior a 100 ppm em água, e com o objetivo de fazer uma boa dissolução colocar uma pequena gota de

sabão que rompe a tensão superficial da água. Depois as partículas dissolvidas misturar com o fluido de trabalho a uma velocidade de 100 rpm durante 20 minutos para produzir uma dispersão homogênea das partículas e também para quebrar a microestrutura do fluido.

- Inclinando o reservatório, colocar o fluido de trabalho, procurando que o fluido entra no recipiente escoando pela parede do reservatório até a base do mesmo para que o fluido deposite-se na base sem formar nenhuma bolha. Finalmente colocar a tampa do reservatório
- Uma vez já colocado o fluido no reservatório, ligar a bomba para preencher as mangueiras com o fluido. A mangueira que fecha o circuito unindo a seção de teste com a entrada de fluido do reservatório, deve ser preenchida primeiro e após colocada em sua posição.
- Quando todo o sistema hidráulico já está preenchido com o fluido de trabalho, incluindo as mangueiras e o *pulse dampener*, deve-se verificar que não existam bolhas nas mangueiras, caso haja bolhas deve-se eliminá-las pela mangueira utilizada para medir a vazão.
- Fechar o circuito hidráulico, conectando a mangueira na entrada da seção de teste e preencher a mesma do jeito explicado ao seguir.
- Após verificar a eliminação de bolhas do sistema, fechar o reservatório da seção de teste na parte de contato com o tubo, com os anéis de borrachas para evitar vazamento da glicerina. Ajustar os parafusos que aprisionam o sistema que contém os anéis de borracha. Os ajustes devem ser feito com muito cuidado para evitar quebrar os elementos de acrílico.
- Com tudo verificado, não havendo aparecimento de bolhas e vazamentos nas juntas da expansão-contração, colocar glicerina no reservatório da seção de teste até próximo a sua borda. Quando a glicerina é adicionada ela torna-se turva imediatamente ao choque com o interior do aquário, sendo necessários 60 minutos para que reverta-se essa condição da glicerina. Durante este tempo a tampa do aquário é colocada. Com o transcorrer de 60 minutos o experimento está pronto para ser iniciado. No entanto, após preencher a seção de teste, deve-se deixar repousar um determinado número de horas para que fluido gelifique.

- Verificar a posição e o alinhamento do laser, como se detalha ao seguir e após ligá-lo.
- Após deixar repousar o fluido de trabalho, posicionar a câmera fotográfica com ajuda do suporte da mesma. Para isso é preciso controlar o nível da câmera em todas as direções. Colocar a câmera o mais próximo possível da seção de expansão-contração e focar a lente para conseguir ver as partículas no fluido o mais claro possível. O tempo de repouso do fluido é de 8 horas, já que o tempo necessário para que o fluido volte as características de repouso [41].
- Com a bancada experimental pronta, os parâmetros variáveis para ser estudados são:
  - Numero de Reynolds do escoamento.
  - Tempo que o fluido está escoando a vazão constante imposta pela bomba.
  - Geometria D/d (Figura 1-3).
  - Geometria D/L (Figura 1-3).
- Finalmente alterando os parâmetros variáveis da bancada experimental, captar as imagens com uma câmera fotográfica durante o escoamento.
- Repetir o procedimento acima detalhado para todas as combinações de parâmetros geométricos, para cada razão de diâmetros ( $D/d = 3; 5$  e  $6$ ) as seguintes relações comprimento-diâmetro ( $L/D = 0,5; 1,0; 1,5$ ).

Deve-se ressaltar que o laboratório é dividido com outras bancadas experimentais, e que a realização da experiência requer pouca luminosidade e vibração nas imediações da bancada de testes. Por isso deve-se planejar o momento exato da realização da experiência, para que as imagens fiquem com boa qualidade, evitando reflexos.

#### **2.4.1.**

##### **Preenchido do fluido de trabalho na bancada**

Uma vez já preenchido todas as mangueiras com fluido sem bolhas. À vazão mínima da bomba deve-se começar a escoar fluido para preencher a seção de teste, quando o fluido já esta na expansão, girar o tubo durante o processo, procurando que o ar sai, sendo assim o fluido ocupará quase a totalidade da

expansão-contração, restando apenas uma grande bolha no canto superior. Com uma movimentação adequada do reservatório esta grande bolha remanescente sairá por empuxo para eliminá-la por a linha de fluxo utilizada para medir a vazão.

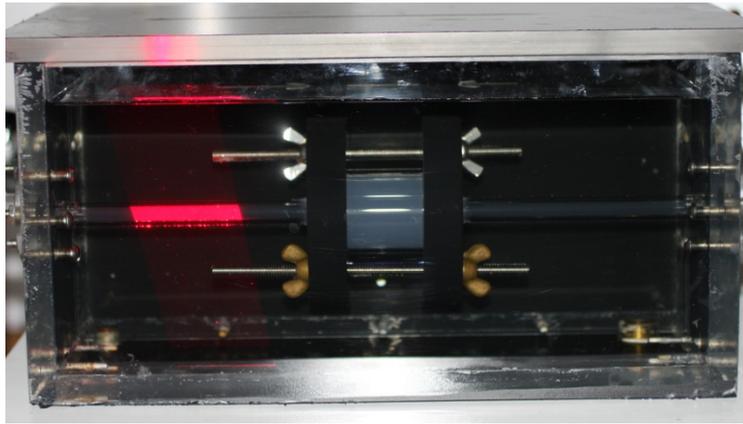
Em algumas ocasiões não é possível eliminar a bolha grande no canto superior da expansão só com a movimentação antes mencionada, e para eliminar esta bolha deve-se afrouxar as borboletas para que o ar saia pelas uniões da seção de expansão-contração. Em seguida deve-se limpar muito bem o reservatório para que a Laponita não contamine a glicerina.

Quando já não há bolhas no sistema, o fluido passa a circular por mais alguns segundos na menor vazão, para que constate-se a não formação de novas bolhas. Em caso de haver mais bolhas, eliminá-las pela linha de fluxo utilizada para medir a vazão.

#### **2.4.2.**

#### **Calibração do sistema laser**

Esta calibração é essencial, pois a mesa principal não está totalmente nivelada. Em algumas ocasiões o plano de laser refletido pelo espelho não passa pelo plano central da seção de teste. Para refletir o laser na posição desejada o suporte do espelho permite um posicionamento com excelente precisão. Deve-se fazer a calibração verificando que o plano laser passe pelo plano central dos dois tubos que encontra-se antes e após da seção de teste. Isto é possível alterando a posição do laser procurando que o plano visível do tubo seja o maior como mostram a Figura 2-17. Uma vez que já constatou-se que o laser passa pelo meio dos dois tubos, deve-se posicioná-lo como esta na Figura 2-10.



**Figura 2-17:** Calibração da posição do laser.