

### 3 Descrição dos Experimentos

Os dois enfoques principais do experimento, como já foi mencionado, são a determinação do campo de velocidades na região entre o jato e a placa (especialmente na região de estagnação) e a medição dos coeficientes locais de troca de calor na placa.

Para isso, foi projetada e construída uma seção de testes que, com algumas alterações, se adaptava a um ou outro propósito. As dimensões, peças e equipamentos utilizados foram cuidadosamente escolhidos tendo em vista os resultados procurados. A configuração do experimento, que será descrita em detalhes a seguir, está representada esquematicamente na Figura 3.1.

Como será explicado posteriormente, as técnicas de medição de velocidade que foram utilizadas requerem a inserção de partículas no escoamento. Por isso, projetou-se a câmara de testes de forma que o escoamento se desse em um ambiente fechado. Após incidir na placa, o ar com as partículas teria que ser levado para fora do laboratório. Tendo isto em vista, a melhor configuração encontrada foi aquela em que o jato era produzido por sucção do ar ambiente.

Como pode ser visto na Figura 3.1, um aspirador com vazão controlada por um inversor de frequência succionava ar a temperatura ambiente do laboratório para o interior da câmara de testes. O ar passava por uma seção geradora de escoamento espiralado, por uma seção reguladora da intensidade de “*swirl*” e pelo tubo que dava origem ao jato. A saída deste jato encontrava-se no interior da câmara, incidindo ortogonalmente sobre uma placa, formando assim a configuração a ser estudada. Após incidir sobre a placa, o ar com as partículas era conduzido para o exterior do laboratório, por meio de uma tubulação que continha um medidor de vazão (rotâmetro). No caso do experimento de transferência de calor, a placa era substituída por uma placa aquecida e instrumentada com sensores de temperatura. Fotos da seção de testes preparada para a medição do escoamento e para a medição dos coeficientes de troca de calor são mostradas nas Figuras 3.2 e 3.3 respectivamente.

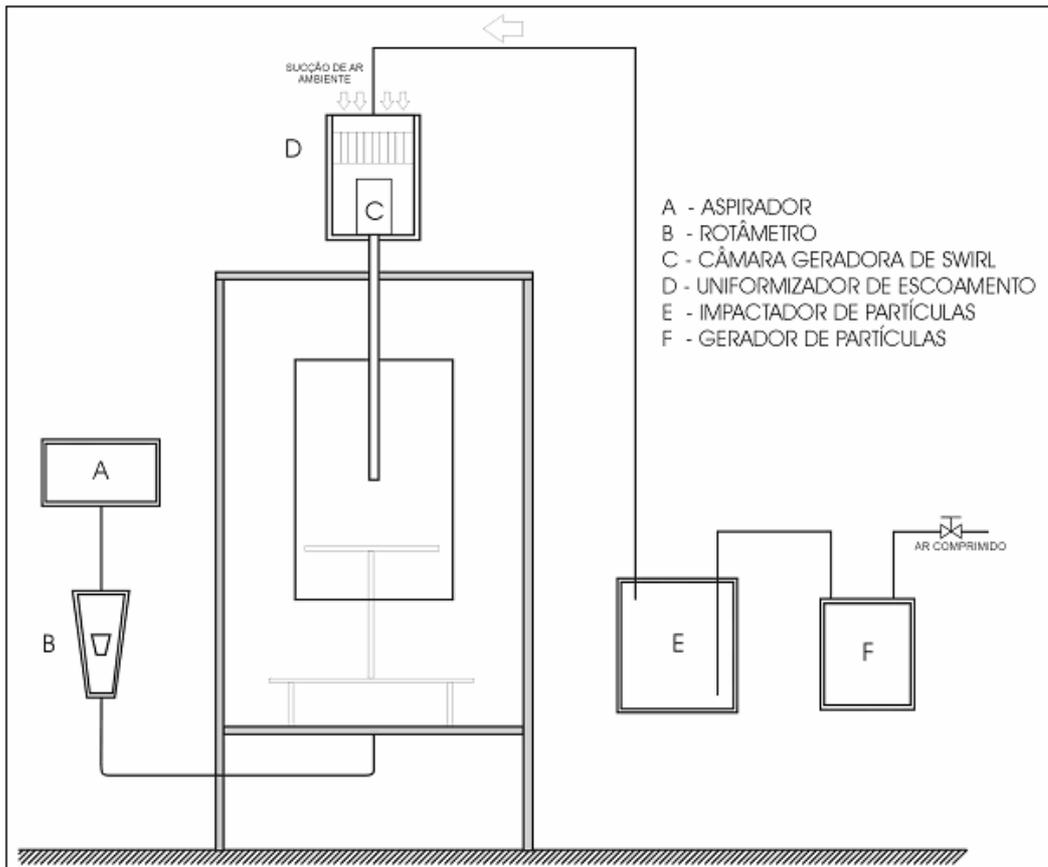


Figura 3.1 – Visão geral da seção de testes

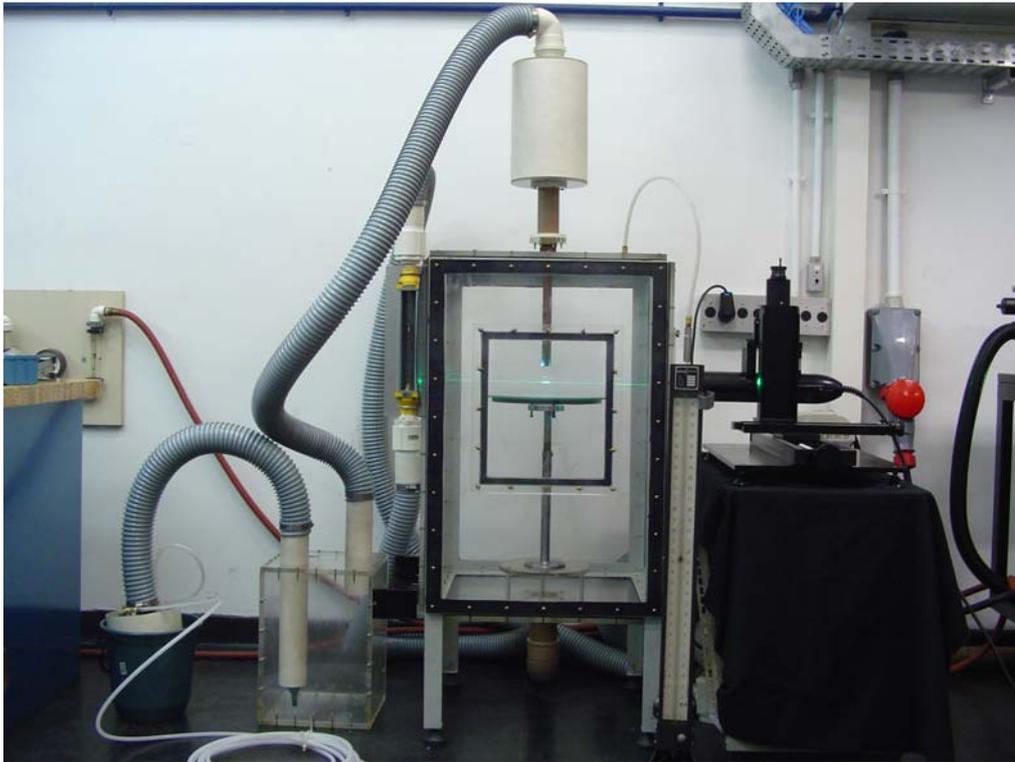


Figura 3.2 - Seção de testes em experimento de medição de velocidade com LDV



Figura 3.3 - Seção de testes preparada para experimento de transferência de calor

### 3.1. Câmara de Testes

A câmara de testes tinha dimensões de 900 x 600 x 600 mm (altura x largura x profundidade). Sua estrutura foi construída com cantoneiras de aço galvanizado (1 ¼" x 3 mm), sobre as quais foram aparafusadas placas de acrílico de 12 mm de espessura. A vedação foi garantida utilizando-se juntas de borracha entre o acrílico e as cantoneiras.

Em duas das paredes laterais de acrílico (uma adjacente à outra) foram usinados cortes de 300 x 350 mm e colocadas janelas de vidro borosilicato de qualidade ótica, com o objetivo de possibilitar a utilização do laser e a aquisição de imagens com uma câmera. Também foi usada uma vedação com juntas de borracha nestas janelas, que podiam ser removidas para permitir o acesso ao interior da câmara.

Na parte superior da câmara de testes foi feito um pequeno furo para tomada de pressão, e exatamente no centro, um furo para a colocação dos tubos de onde sairia o jato para incidir na placa. Na parede inferior da câmara, foi usinado um furo para a conexão da tubulação de aspiração (mangueira sanfonada).

O medidor de vazão utilizado, um rotâmetro, foi posicionado verticalmente numa estrutura de alumínio solidária à câmara de testes. Assim, a tubulação que saía por baixo da câmara de testes, como foi explicado acima, logo se conectava a um adaptador na entrada do rotâmetro. E na saída do instrumento, isto é, em seu topo, se encontrava outro adaptador e novamente era conectado outro trecho de mangueira, que por sua vez era direcionado para o aspirador.

### 3.2. Seções Geradora e Reguladora de Escoamento Espiralado

Entre as várias maneiras de se obter o escoamento espiralado, optou-se por fazê-lo através de uma câmara cilíndrica com furos tangenciais à circunferência interna da mesma. A escolha deste tipo de seção deveu-se ao fato de que ela possibilitaria uma maior variação dos parâmetros estudados, e era a que melhor se adequava à seção de testes.

A seção, que é mostrada em detalhes na Figura 3.4, constava de um tubo de bronze TM 23, com 135 mm de comprimento, 49,6 mm de diâmetro interno e 70 mm de diâmetro externo. Como uma das extremidades era fechada, quando o ar era succionado pela outra extremidade, era obrigado a entrar na câmara através

dos furos tangenciais, impondo assim uma componente circunferencial de velocidade ao escoamento. Este escoamento se desenvolvia ao longo da câmara, sendo sua intensidade controlada pelo diâmetro e vazão em cada furo. Foram usinados 100 furos de 2 mm de diâmetro dispostos em 8 fileiras de 39 furos cada.

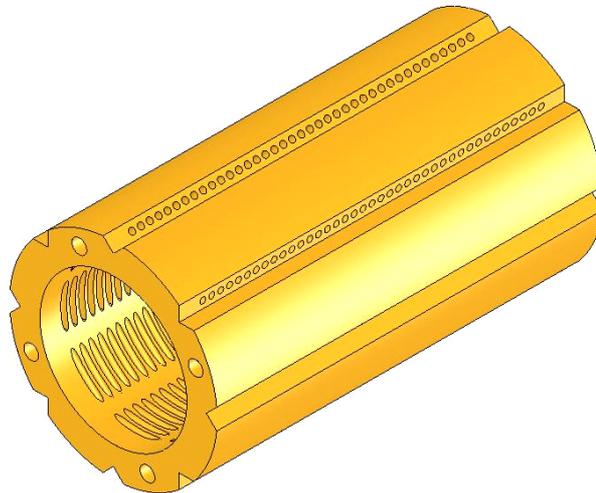


Figura 3.4 - Detalhe da seção geradora de escoamento espiralado

Como foi explicado acima, uma das extremidades do tubo de bronze era fechada com uma tampa de acrílico, de forma que o ar fosse forçado a entrar somente pelos pequenos furos tangenciais. Na extremidade que não era tamponada, acoplou-se um disco de acrílico com um furo central de mesmo diâmetro interno da câmara geradora, como pode ser visualizado na Figura 3.5.

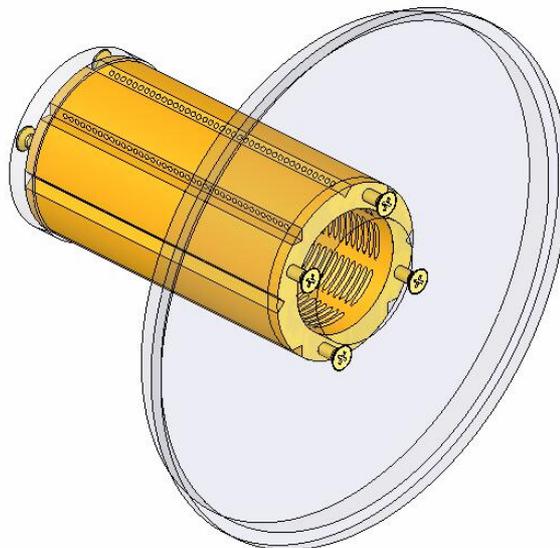


Figura 3.5 – Montagem da seção geradora de escoamento espiralado

Para que o ar succionado do ambiente pudesse se misturar com as partículas vindas do dispositivo gerador de partículas (descrito na seção 3.4.6) antes de entrar nos furos tangenciais, foi colocado também um cilindro externo de 280mm de diâmetro ao redor da câmara geradora. Este cilindro encaixava no disco do acrílico que era acoplado à câmara geradora. Em sua parte superior, ele era tampado com outro disco de acrílico, que possuía um furo de 60mm no centro e 8 furos de 25mm de diâmetro dispostos circunferencialmente. A montagem pode ser visualizada na Figura 3.6. No furo central era conectada uma tubulação proveniente do dispositivo gerador de partículas e os outros furos serviam para proporcionar a abertura ao ambiente do laboratório, de onde o ar estava sendo succionado.

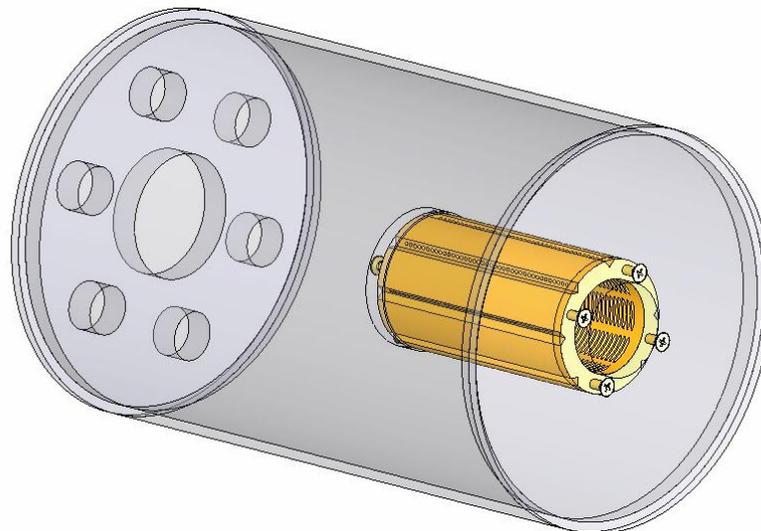


Figura 3.6 – Montagem da seção geradora com cilindro externo

Dentro do cilindro externo, havia também um “uniformizador” do escoamento, especialmente importante nos casos medidos sem a presença da componente circunferencial de velocidade. Quando se queria estudar o escoamento sem esta componente, o recipiente cilíndrico era mantido, e a seção geradora de “swirl” retirada de seu interior.

Para possibilitar a variação da intensidade do escoamento espiralado, colocava-se, depois da seção geradora, trechos de tubo de PVC de 53mm de diâmetro interno e de comprimentos variados, que podiam ser acoplados uns aos outros através de flanges, para aumentar ou diminuir o comprimento total. Quanto maior esse comprimento, maior o decaimento da intensidade de “swirl”.

Finalmente, na parte inferior desses tubos, era conectado, através de um flange, o tubo de cobre de diâmetro  $d$  do qual saía o jato para dentro da câmara de testes. Todo o conjunto se encontra esquematizado na Figura 3.7. Como havia dois tubos de cobre de diâmetros diferentes que seriam utilizados, cada um deles foi soldado em uma peça que permitia acoplá-los ao resto do conjunto de tubos de PVC ou, quando não eram usadas estas extensões, à parte inferior do recipiente cilíndrico em que se encontrava a seção geradora de “swirl” (Figura 3.8). Uma luva centralizadora era usada para abraçar o tubo e sustentar o conjunto quando este estivesse montado na câmara de testes (Figura 3.9).

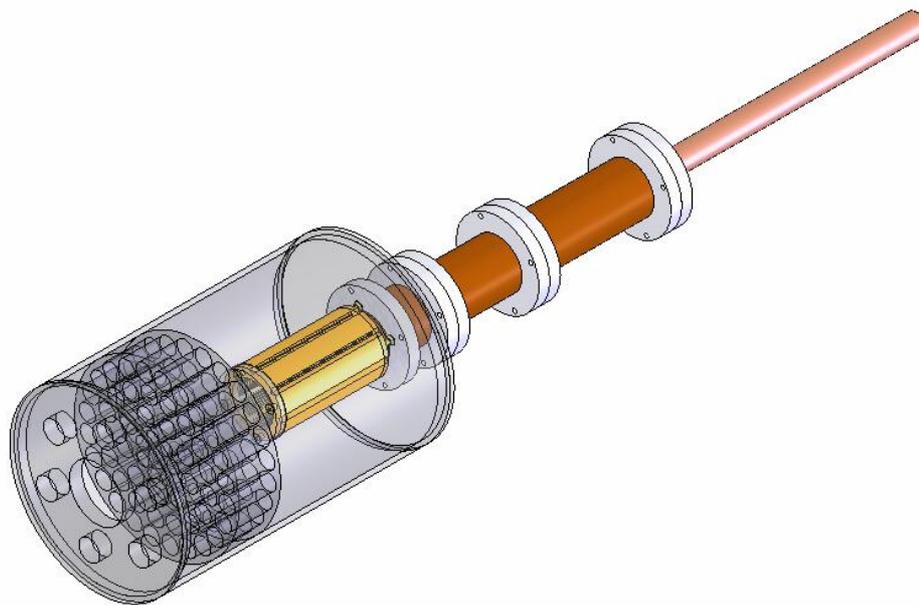


Figura 3.7 - Montagem completa utilizada para a geração do jato espiralado

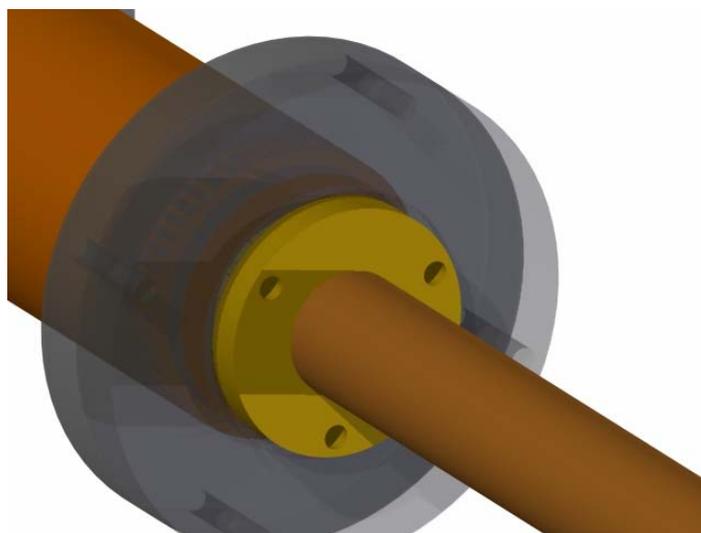


Figura 3.8 – Acoplamento dos tubos de cobre

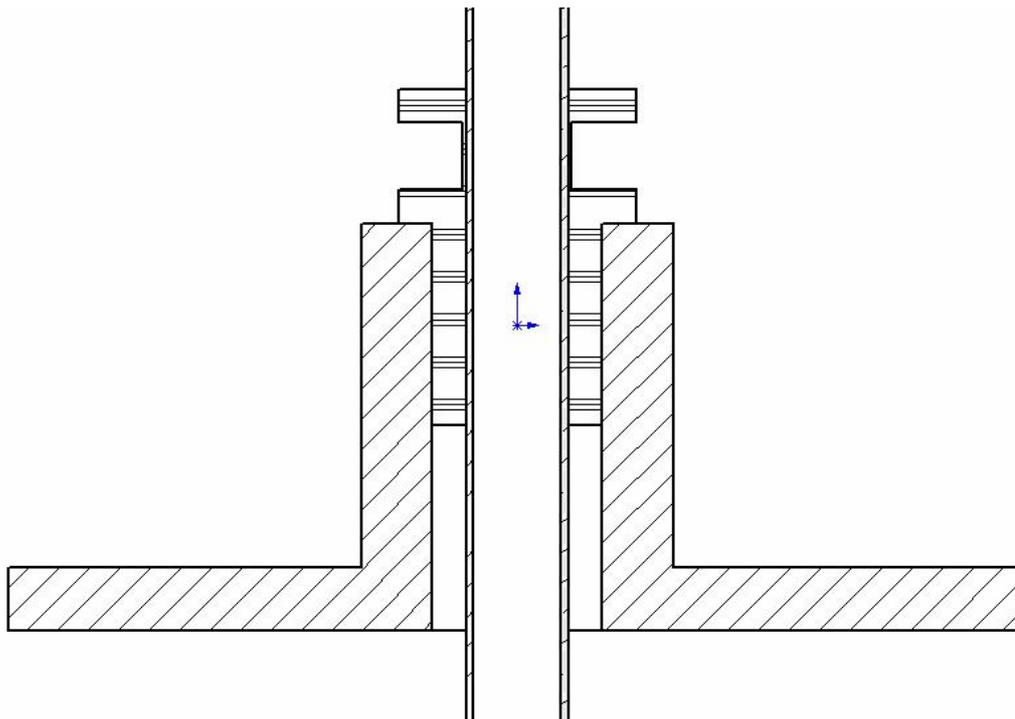


Figura 3.9 – Luva centralizadora para os tubos de cobre

### 3.3. Placa e Suporte

Primeiramente, é importante notar que a placa utilizada nos experimentos de transferência de calor era diferente daquela utilizada nos experimentos de visualização e medição do escoamento.

Para os experimentos de visualização do escoamento e de medição do campo de velocidade, foi utilizada uma placa circular, com 350 mm de diâmetro. Com este tamanho, e levando-se em conta os diâmetros dos tubos de saída do jato, esperava-se que a placa poderia ser considerada grande o suficiente para que não houvesse efeitos de borda sobre o escoamento. A placa era de vidro, com 6 mm de espessura. A Figura 3.10 mostra o detalhe da placa durante uma medição com LDV.

A placa de vidro foi apoiada sobre uma mesa posicionada sobre o fundo da seção de testes. A mesa tinha 250 mm de diâmetro e três pés que a mantinham a 80 mm do fundo. Desta forma, a mesa não bloqueava a saída do ar para o aspirador. Centralizado sobre a mesa foi fixado o suporte telescópico da placa. Este suporte telescópico consistia em um eixo que podia deslizar dentro de um tubo. Ambos tinham 300mm de comprimento, e desta forma era possível ajustar a altura da placa com bastante liberdade, prendendo o eixo com uma abraçadeira

por fora do tubo. Apoiada neste suporte ficava uma placa de acrílico, com três pequenos furos na parte inferior, dispostos a  $120^\circ$  entre si. Assim, podia-se girar três parafusos de cabeça cônica de forma a ajustar o nível da placa. Finalmente, a placa de vidro foi colada na parte superior da placa de acrílico, com seus centros coincidentes. A Figura 3.11 mostra o esquema para suporte da placa utilizada nos experimentos de medição do escoamento.

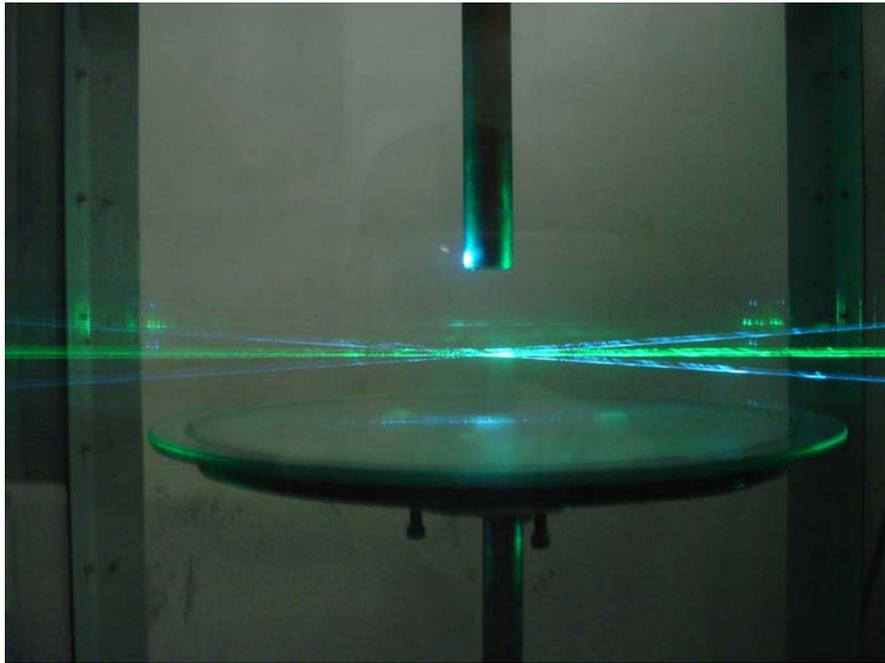


Figura 3.10 - Detalhe da placa de vidro durante medição com a técnica "Laser Doppler Velocimetry" (LDV)

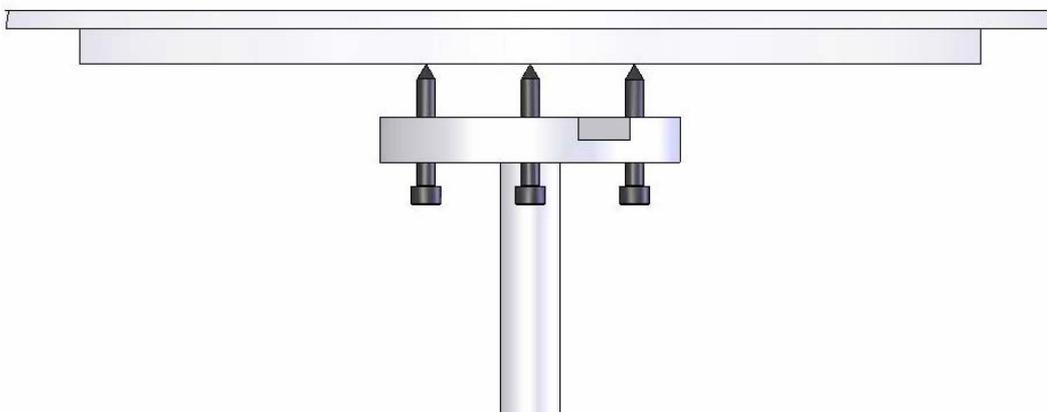


Figura 3.11 – Suporte da placa de vidro utilizada nos experimentos de medição do escoamento

Os experimentos de transferência de calor foram realizados utilizando uma placa aquecida eletricamente e instrumentada com termopares. As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 apresentam vistas esquemáticas da placa utilizada.

A condição de contorno térmica selecionada para os experimentos foi a de fluxo de calor constante. Para impor esta condição de contorno foi utilizada uma folha de aço inoxidável (Ni80/Cr20) com resistividade elevada de  $108 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ . As dimensões da folha de aço inox eram  $450 \times 200 \times 0,025$  mm (comprimento  $\times$  largura  $\times$  espessura). Devido à pequena espessura, largura elevada e alta resistividade elétrica, não foi possível encontrar a folha de aço inox descrita acima no mercado nacional. Depois de uma demorada busca conseguiu-se um fornecedor para o material na Inglaterra: Goodfellow.

A folha de aço inox foi colada sobre uma placa de celeron quadrada com 400 mm de lado e 5 mm de espessura. Adesivo Araldite próprio para suportar até  $200^\circ\text{C}$  foi utilizado na colagem. O adesivo utilizado foi o F-CY2005, da marca Maxepoxi. Antes da colagem, 70 termopares haviam sido previamente instalados na placa de celeron ao longo de duas linhas de simetria cruzando-se no meio da placa, como ilustra a Figura 3.15. Os furos foram feitos com broca de 0,7 mm e os termopares utilizados eram de Chromel-Constantan com  $125 \mu\text{m}$  de diâmetro. Os termopares foram colados dentro dos furos com cola condutora de calor da marca Omegatherm. Durante a colagem, extremo cuidado foi tomado para que a junção de cada termopar ficasse perfeitamente faceada com a superfície da placa de celeron. Desta forma garantia-se que os termopares teriam contato com a folha de aço inox, medindo a temperatura da face interna da folha, como desejado.

A placa de celeron com a folha de aço inox colada foi fixada sobre uma base de acrílico de mesmas dimensões. O objetivo desta base de acrílico era dar rigidez mecânica ao conjunto. Entre a placa de celeron e a base de acrílico foi introduzido um bloco de estireno com 25,4 mm de espessura cuja função era isolar termicamente a folha de aço inox. Os fios dos termopares foram acomodados em canaletas presentes no isolamento e no suporte de acrílico.

Como a folha de aço inox possuía comprimento maior do que a placa de celeron, uma aba de cerca de 20 mm de comprimento restou em cada lado da folha. Cada uma das abas foi introduzida entre duas barras de cobre, de largura igual à da folha, e apertada com parafusos de modo a comprimir a folha de aço inox. Cada barra de cobre era ligada por meio de um fio de cobre a um dos

terminais de uma fonte de corrente contínua Hewlett Packard modelo 6110 que alimentava o circuito. A folha de aço inox funcionava como uma resistência elétrica, gerando um fluxo de calor por unidade de área constante como desejado.

A corrente e a queda de tensão através da folha de aço inox são dados necessários para o cálculo do fluxo de calor gerado na folha. A corrente pelo circuito pode ser avaliada pelo mostrador da fonte. A queda de tensão, no entanto, deve ser avaliada na folha de aço inox devido à queda de tensão nos fios e terminais desde a fonte até a folha. Para isso dois fios de cobre de 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro foram soldados na folha de aço inox a uma distância conhecida um do outro. Estes fios foram ligados a um voltímetro digital para medição da queda de tensão.

O conjunto da placa aquecida foi posicionado sobre o mesmo suporte utilizado para a placa de vidro, permitindo assim o ajuste de altura e nível do conjunto, além de sua centralização. O nível da placa era controlado através de três parafusos de cabeça redonda, e um outro parafuso passava por um rasgo existente no suporte e fixava o conjunto, através de um furo com rosca usinado no acrílico. Esta configuração está esquematizada na Figura 3.16.

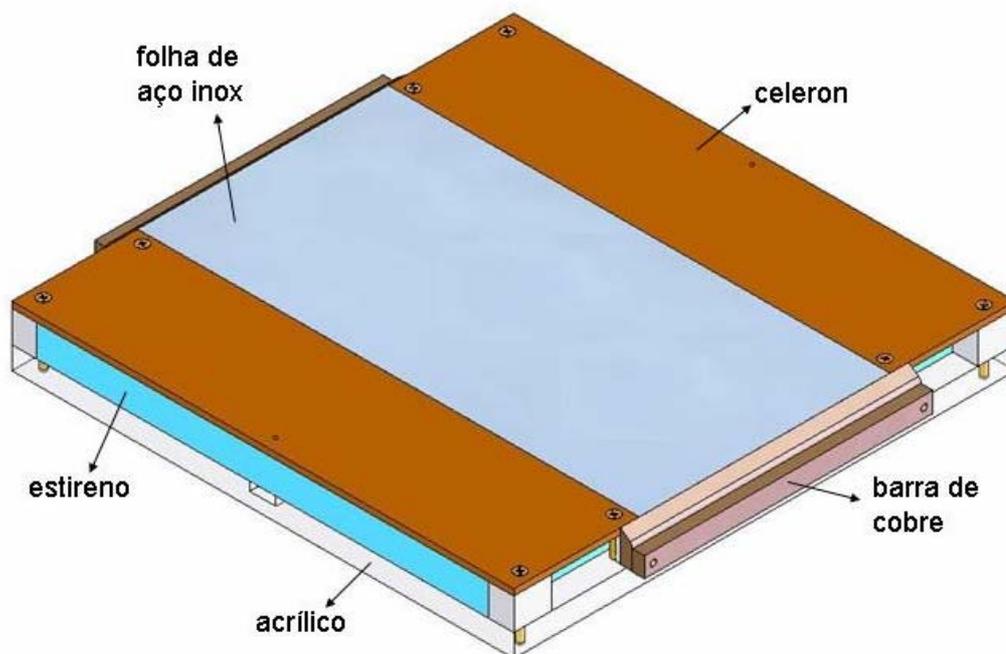


Figura 3.12 – Vista esquemática da placa aquecedora utilizada nos experimentos de transferência de calor

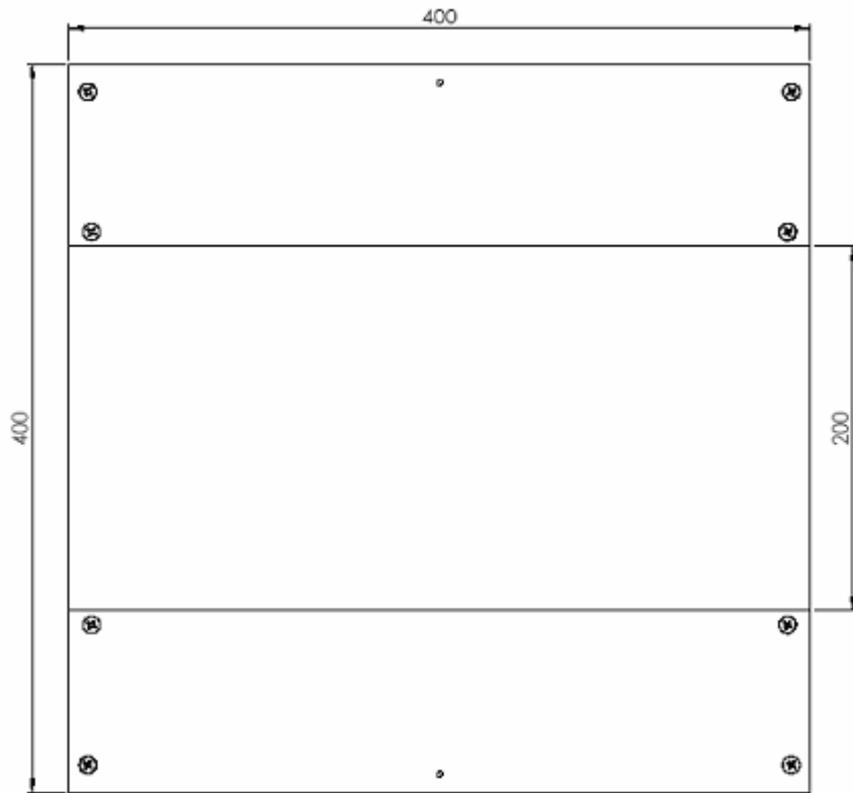


Figura 3.13 - Vista superior da placa aquecedora (cotas em milímetros)

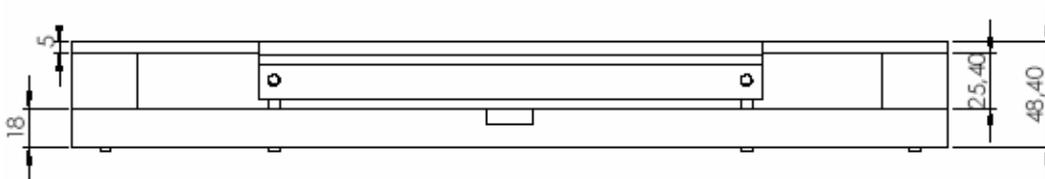


Figura 3.14 - Vista lateral da placa aquecedora (cotas em milímetros)

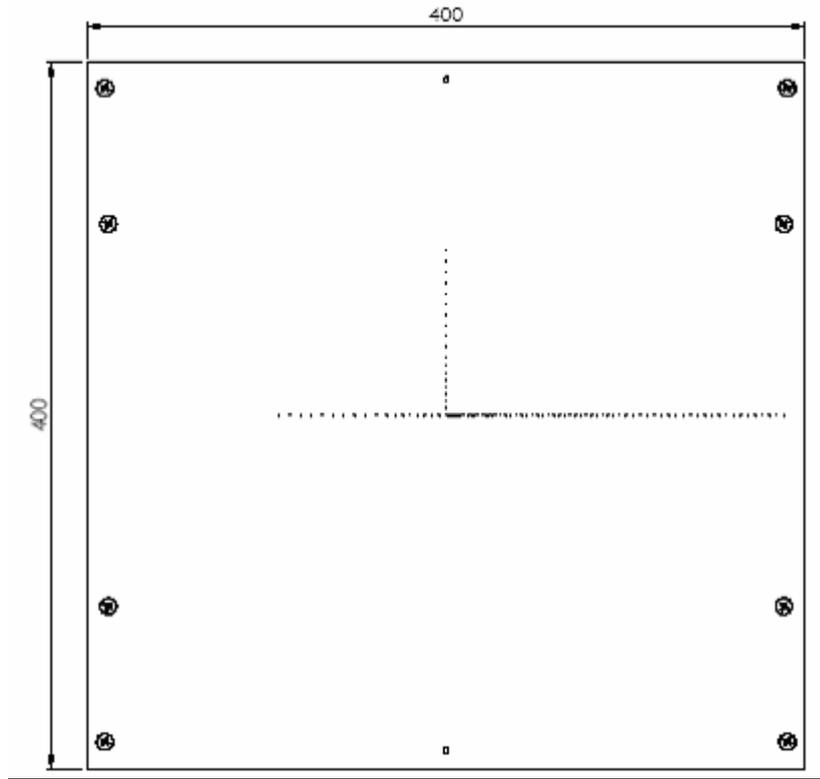


Figura 3.15 - Furação na placa de celeron para posicionamento dos termopares

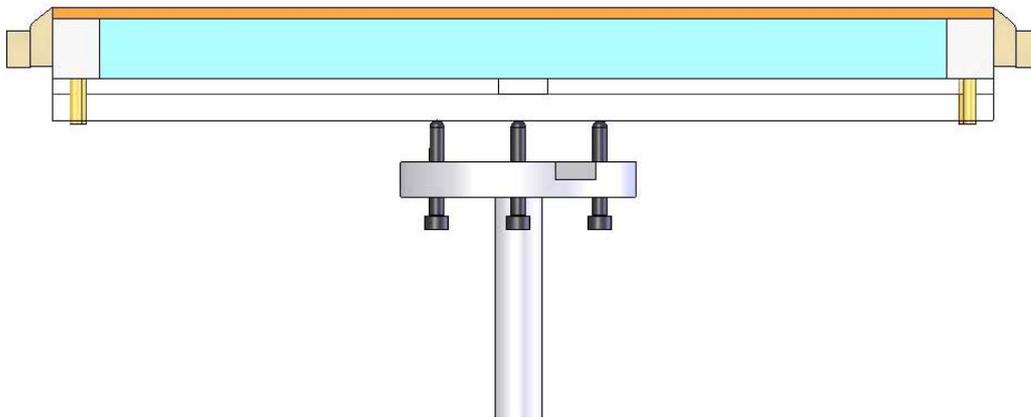


Figura 3.16 – Suporte da placa utilizada nos experimentos de transferência de calor

### 3.4. Outros Componentes

#### 3.4.1. Centralizador do Feixe de LDV e do Plano de PIV

Como será explicado mais adiante, o sistema de LDV utilizado na medição do escoamento tem seu volume de medição formado pelo cruzamento de dois feixes de laser. Como o escoamento estudado é axissimétrico, as medições foram

realizadas em pontos contidos em um único plano  $x - r$  (onde  $x$  se refere à direção axial e  $r$  à direção radial) e, para isto, era importante que o volume de medição estivesse inicialmente muito bem centralizado (nas medições em  $r=0$ ), isto é, que ele estivesse exatamente sobre o eixo de simetria do tubo. Uma vez que o ponto central estivesse bem definido, uma mesa de coordenadas permitia que o volume de medição fosse movimentado para os pontos a serem medidos na seqüência, com uma baixa incerteza.

Foi fabricada então uma peça para auxiliar o posicionamento do feixe no eixo de simetria do tubo. A peça era um cilindro de acrílico cujo diâmetro externo se ajustava com pequena interferência ao diâmetro interno do tubo do jato. No eixo de simetria desta peça foi usinado um furo de 0,25 mm de diâmetro. Através deste furo foi passado um fio metálico com 0,2 mm de diâmetro. O fio foi conectado a um peso em uma de suas extremidades, atuando como um fio de prumo. Quando o volume de medição do LDV encontrava o fio a alteração no sinal era a indicação que havia sido alcançada a localização do eixo de simetria.

### 3.4.2. Centralizador do Tubo do Jato sobre a Placa Aquecida

Nos experimentos de transferência de calor a placa aquecida dispunha de 70 termopares dispostos ao longo de dois eixos ortogonais, conforme já descrito. Na região central da placa o espaçamento entre estes termopares era de apenas 1 mm. Assim, era importante para a correta interpretação dos dados na região de estagnação que a linha de centro do jato estivesse situada sobre o termopar central da placa.

Para garantir a centralização foi construída uma peça formada por uma base de alumínio em cujo centro encaixava-se um eixo vertical de polipropileno. O eixo vertical encaixava-se no diâmetro interno do tubo do jato, enquanto a base de alumínio possuía dois pinos que encaixavam em dois furos-guia na placa de celeron. Estes furos foram usinados na mesma operação em que foram usinados os furos que receberam os termopares, estando alinhados com a posição do termopar central. Os furos para a colocação dos pinos na base de alumínio também foram feitos nesta operação, de forma que tivessem a mesma distância em relação ao furo que recebia o termopar central que os furos-guia no celeron. Assim, quando a base de alumínio era posicionada sobre a placa aquecedora com os pinos

encaixados nos furos-guia, o eixo vertical de polipropileno tinha sua linha de centro sobre o termopar central. Quando o tubo era levado a encaixar-se no eixo de polipropileno, garantia-se o alinhamento do eixo do tubo com o termopar central da placa. Antes de cada experimento este procedimento de centralização era conduzido. Esta peça é mostrada na figura 3.17, que simula seu encaixe no processo de centralização.

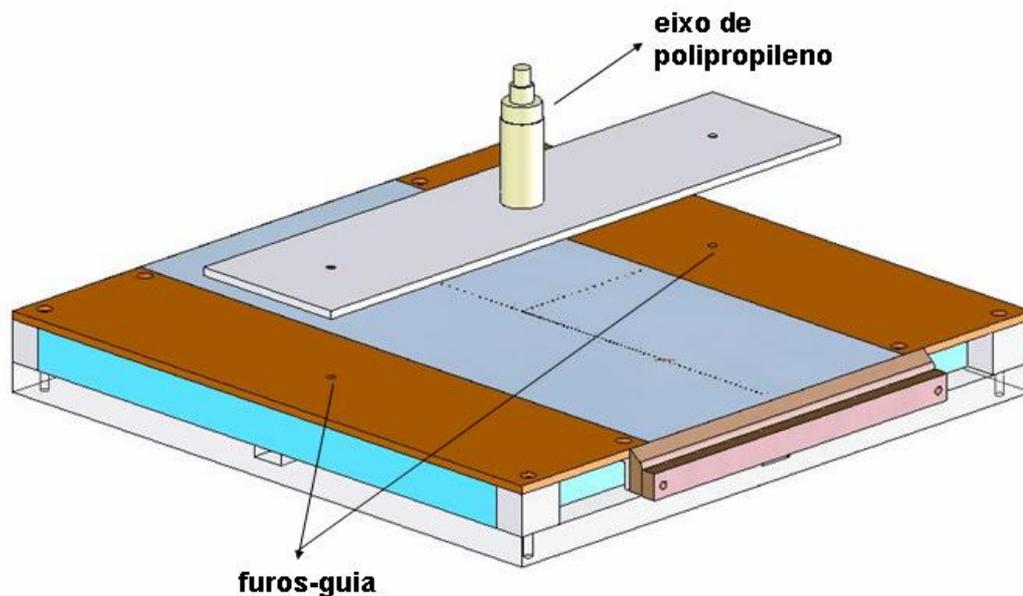


Figura 3.17 – Processo de centralização para os experimentos de transferência de calor

### 3.4.3. Exaustor

O exaustor utilizado para succionar o ar e assim gerar o escoamento é da marca ASPÓ, modelo CR-4, acionado por um motor elétrico trifásico de 3 HP. De acordo com o fabricante o exaustor produz uma vazão de  $3 \text{ m}^3/\text{min}$  com um diferencial de pressão máximo de  $2500 \text{ mmH}_2\text{O}$ .

### 3.4.4. Inversor de Frequência

Para o controle da vazão foi utilizado um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW-08. Este inversor foi conectado ao motor do aspirador, controlando sua rotação e permitindo assim o ajuste fino da vazão de ar.

### 3.4.5. Rotâmetro

Para a medição de vazão no experimento foi instalado na tubulação um rotâmetro da marca Omel, série 4T7/4T8, para ar. A escala era de 0 – 55 m<sup>3</sup>/h e o diâmetro, tanto na entrada como na saída, de 1”.

A exatidão especificada pelo fabricante era de  $\pm 1\%$  do fundo de escala, e a repetibilidade de 0,5% de vazão lida.

Como se observou que o instrumento não estava perfeitamente calibrado, foi feita então uma calibração utilizando a técnica LDV para medir os perfis de velocidade média na saída para as diversas configurações. Através de uma integração numérica deste perfil, obtinha-se a vazão correspondente e relacionava-se esta vazão com aquela lida no rotâmetro. Após diversas medições, tinha-se uma calibração satisfatória e, para cada configuração a ser estudada, sabia-se a vazão que deveria ser lida no rotâmetro para caracterizar o número de Reynolds desejado. Uma segunda calibração foi conduzida posteriormente com a utilização de outro rotâmetro do laboratório, e foi confirmado que a primeira calibração estava correta.

### 3.4.6. Gerador de Partículas

Em escoamentos de gases, o fornecimento de partículas traçadoras é bastante crítico para o bom resultado de medições com LDV e PIV. Para a maior parte das medições com PIV em escoamentos de ar se utiliza geradores do tipo “*Laskin Nozzle*” [17]. O dispositivo utilizado para gerar as partículas traçadoras foi construído no próprio laboratório, e seu funcionamento foi bastante satisfatório. Ele consiste num recipiente cilíndrico fechado com entradas de ar e uma saída para as partículas na forma de aerossol. Os tubos de suprimento de ar, montados no topo, mergulham no óleo que se encontra no recipiente. A Figura 3.18 mostra o esquema do gerador. Na extremidade de cada tubo de ar comprimido foi instalado um gerador do tipo bocal Laskin. A Figura 3.19 apresenta um desenho detalhado do bocal construído. Para os experimentos realizados, quatro bocais foram utilizados.

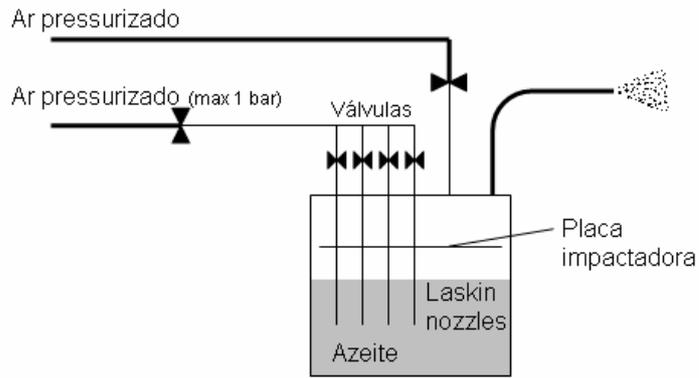


Figura 3.18 – Gerador de Partículas Traçadoras [17]

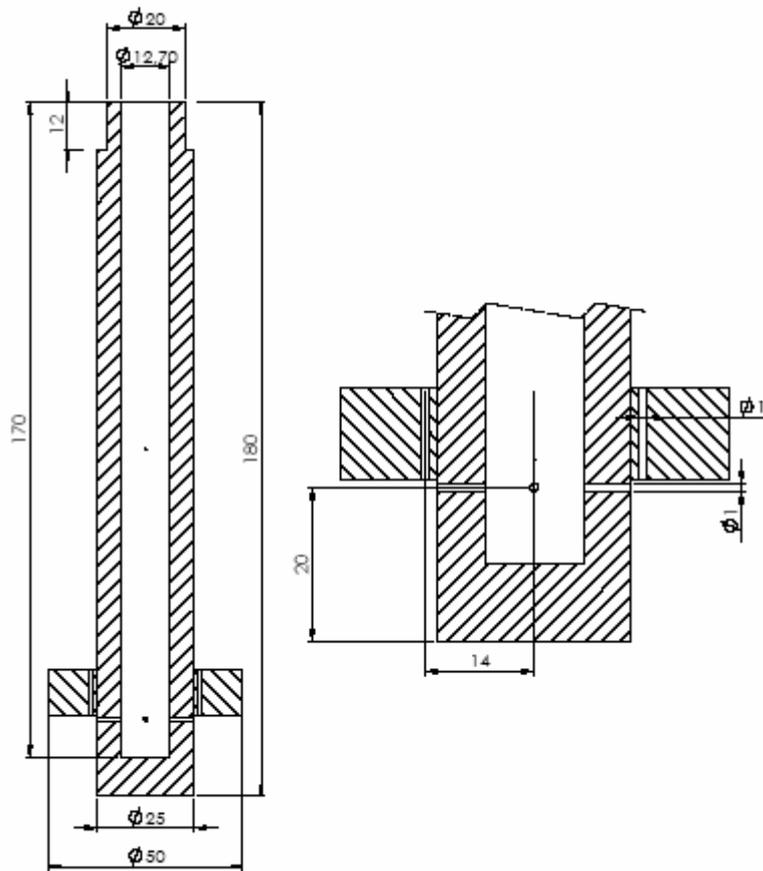


Figura 3.19 – Detalhe do bocal “Laskin” (cotas em milímetros)

Ar pressurizado vindo de uma linha de ar comprimido entrava no gerador, criando bolhas de ar no líquido. Devido à tensão cisalhante induzida pelos pequenos jatos sônicos, pequenas gotas eram geradas e carregadas dentro das bolhas na direção da superfície do óleo.

Uma placa impactadora interna impedia partículas grandes de passarem para a saída do dispositivo, deixando somente as pequenas escaparem através de um pequeno espaçamento, garantindo assim uma distribuição razoavelmente uniforme do tamanho das partículas. Com o gerador construído para este experimento, o tamanho das partículas ficou em torno de  $1\mu\text{m}$ . A Figura 3.20 mostra a distribuição do tamanho das partículas. Para a obtenção dos dados sobre esta distribuição, foi utilizado um equipamento da TSI Inc denominado “Aerodynamic Particle Sizer”, modelo 3320. Este equipamento não é capaz de medir diâmetros abaixo de  $0,5\mu\text{m}$ , de forma que todos os valores correspondentes às partículas menores que  $0,5\mu\text{m}$  ficam acumulados no canto esquerdo do histograma. É importante notar que esta caracterização foi feita para uma amostra de partículas vindas diretamente do gerador. Durante o experimento havia também um impactador de partículas acoplado ao circuito após o gerador, que fazia com que as partículas maiores ficassem presas ao fundo e somente as menores, com um diâmetro mais controlado, seguissem para a seção de testes.

Geralmente, um maior volume de partículas na saída pode ser obtido sem afetar seriamente a faixa de tamanho das gotas, aumentando a pressão de entrada. Uma válvula e um medidor proporcionam uma maneira fácil de controlar esta pressão de entrada. Uma das linhas de ar comprimido do laboratório já era equipada dessa forma e foi utilizada. Azeite de oliva foi utilizado no equipamento para a geração das gotículas.

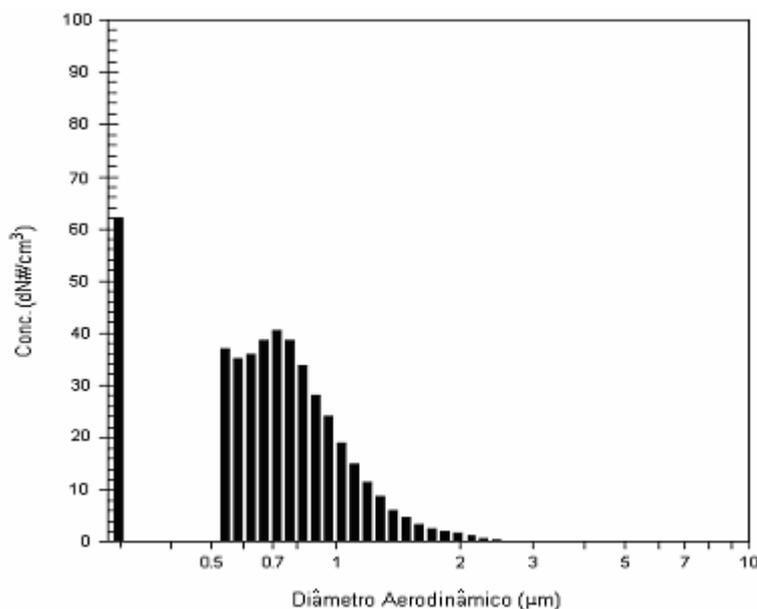


Figura 3.20 - Distribuição do tamanho das partículas geradas

### 3.4.7. Impactador de Partículas

Uma vez que a seção de testes estava construída e o circuito todo montado, iniciou-se o escoamento para verificar se tudo estava funcionando bem. Foi constatado que, após um certo tempo, gotas de azeite começavam a se formar e eventualmente caíam sobre a placa, o que era bastante inconveniente.

Concluiu-se então que as partículas de maior tamanho é que geravam essas gotas ao coalescerem durante o percurso até o jato, e que havia a necessidade de se acoplar um impactador ao circuito, logo depois do gerador de partículas. Visava-se com isso impedir que as partículas maiores seguissem adiante e entrassem na seção de testes.

Este impactador consistia simplesmente em uma caixa, que foi construída de acrílico. O ar com partículas vindo do gerador entrava por um tubo que possuía a extremidade afunilada bem perto do fundo da caixa, sendo portanto acelerado. Com isso as partículas de maiores diâmetros permaneciam no fundo da caixa. As partículas menores continuavam sua trajetória e eram levadas, através de outro tubo, para fora da caixa entrando na câmara de testes.

### 3.4.8. Fonte de Potência

A fonte de potência utilizada nos experimentos de transferência de calor, para aquecer a placa de aço inox, era modelo HP 6031A, com potência máxima de 1000W, estando disponíveis 20 V e 120 A.