

2 Experimentos

2.1 Seção de testes

Neste capítulo será descrita a seção de testes projetada e construída para permitir a realização dos experimentos envolvendo o escoamento de fluido em uma região anular com rotação do cilindro interno.

A seção de testes foi projetada com o objetivo de atender aos estudos relacionados ao escoamento de fluidos de perfuração em poços horizontais, incluindo a determinação de detalhes do escoamento através da utilização de técnicas óticas avançadas para medição de campos de velocidade. Esta seção foi também projetada de modo a, no futuro, permitir o estudo do escoamento em regiões anulares parcialmente obstruídas, bem como investigar as características dinâmicas do movimento de leitos de esferas depositadas na região anular, representando o cascalho removido durante operações de perfuração.

O projeto da seção de testes buscou conciliar várias exigências consideradas relevantes para os experimentos. Assim, desejava-se realizar medidas que permitissem a determinação da influência da rotação do cilindro interno sobre a queda de pressão e campos de velocidades ao longo de uma região anular. Para isso era necessário garantir a existência da condição de escoamento hidrodinamicamente desenvolvido na região anular.

As faixas de vazão de fluido e rotação do cilindro interno deveriam permitir a realização de testes em regimes de escoamento laminar e turbulento, varrendo faixas de rotação, que fossem relevantes para as aplicações de perfuração de poços de petróleo que motivaram o presente estudo. Outra característica desejável na seção de testes projetada seria a possibilidade de utilização de técnicas óticas para a medição de detalhes dos campos instantâneos de velocidade na região anular. Para isso, não somente acesso óptico ao interior da seção de testes deveria ser previsto, mas também a estabilidade no fornecimento de fluido deveria ser garantida, visto que o es-

coamento em regiões anulares com rotação do cilindro interno é conhecido pelos diversos padrões que assume em função das variáveis de operação. Flutuações externas são indesejáveis, pois podem distorcer os resultados obtidos. Além destas exigências, o projeto deveria ser adequado às limitações de espaço e potência de bombeamento existentes no laboratório onde os testes foram conduzidos. A seguir são apresentados os detalhes da seção de testes construída.

2.1.1

Visão geral da seção de testes

A seção de testes concebida é apresentada esquematicamente na figura (2.1). A região principal da seção é formada por um tubo cilíndrico de alumínio com 41,4 mm de diâmetro externo e 6 m de comprimento, montado de forma concêntrica no interior de um tubo de acrílico com 64 mm de diâmetro interno e também com cerca de 6 m de comprimento. Com estas dimensões básicas, esta seção apresentava uma razão de raios, $\eta = 0,64$ e razão de aspecto cerca de $\Gamma = 265$, o que garante o desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento para os regimes laminar ou turbulento como desejado. Como pode ser visto na figura (2.1), que o cilindro interno de alumínio é apoiado em dois mancais em suas extremidades e ligado a um motor elétrico de rotação variável por meio de um sistema de polias e correias sincronizadas, permitindo assim o ajuste da velocidade angular de rotação do cilindro.

Para evitar as pulsações típicas das bombas de cavidades progressivas, a alimentação do fluido para a seção anular foi realizada por gravidade. Um tanque foi montado em um mezanino no espaço do laboratório, situando-se cerca de 4 metros acima do nível da seção de testes. O fluido recolhido pelo fundo do tanque passava por um rotâmetro sendo levado em seguida a uma caixa de entrada que funcionava como uma câmara plena permitindo a entrada suave do fluido na região anular.

Na extremidade oposta da região anular, outra câmara plena semelhante à da entrada recebia o fluido saído do anular, conduzindo-o a um outro tanque posicionado no chão do laboratório. Uma válvula do tipo gaveta permitia o controle da vazão através do espaço anular. Uma bomba centrífuga com rotação controlada bombeava o fluido de teste do tanque inferior de volta ao tanque superior. Para manter o nível de fluido no tanque superior constante, e assim, garantir a estabilidade da vazão no espaço anular, uma mangueira de retorno posicionada na parte superior do tan-

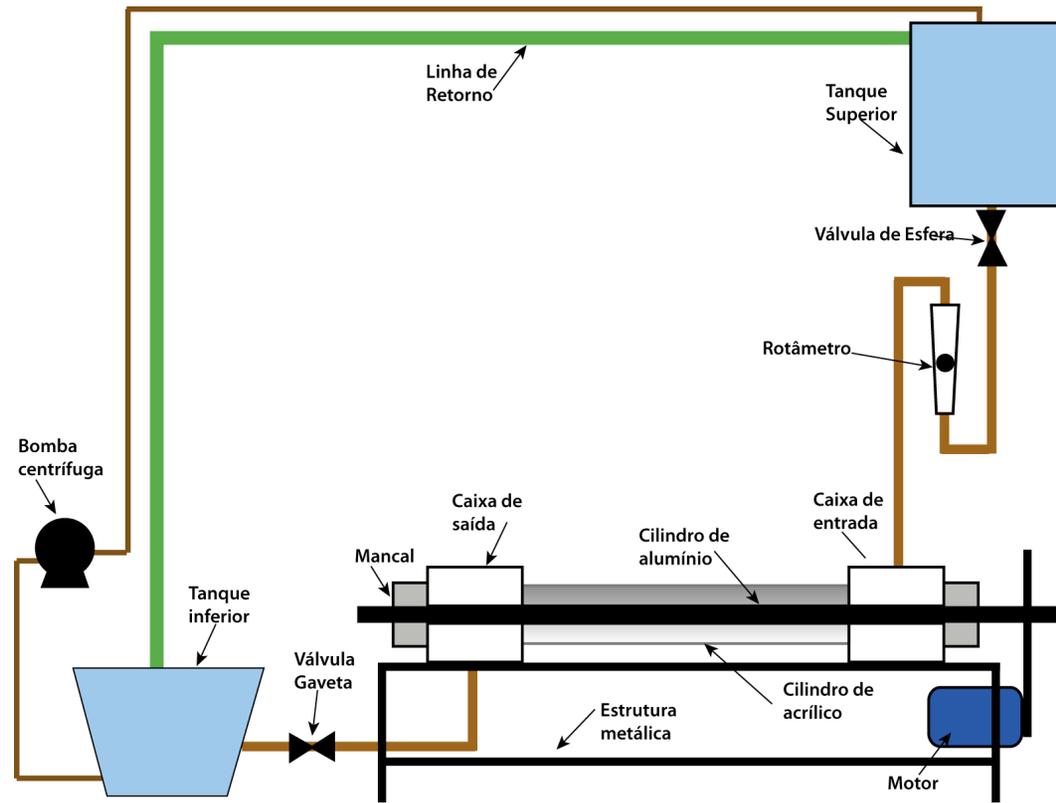


Figura 2.1: Figura esquemática da seção de testes montada.

que superior funcionava como ladrão do reservatório promovendo o retorno do excesso de fluido ao tanque inferior. Trinta e três tomadas de pressão estática foram instaladas ao longo da região anular para permitir a medição da queda axial de pressão. Uma caixa de visualização com paredes de vidro planas foi instalada no final da seção anular para facilitar a observação e medição do escoamento no interior da seção.

2.2

Montagem experimental

2.2.1

Tubo interno de alumínio

Devido ao longo comprimento total do tubo alumínio, 6 m, foram necessários, por razões construtivas, dividir seu comprimento em 4 trechos de 1,5 m de comprimento. Os tubos, adquiridos com 4,5 mm de espessura de parede, foram usinados externamente para minimizar sua ovalização. Após a operação de usinagem, o diâmetro externo dos tubos era de $41,4 \pm 0,1$ mm e a espessura da parede de cerca de 3 mm.

Para garantir rigidez na união dos quatro tubos de alumínio, foram projetadas e fabricadas 3 luvas internas de alumínio com 400 mm de comprimento. Estas luvas tinham uma dupla função: conectar dois tubos adjacentes mantendo seus alinhamentos e impedir que o fluido de trabalho penetrasse no interior do mesmo evitando um aumento do seu peso produzindo deformações indesejáveis ao longo do eixo de alumínio.

Cada luva foi usinada de modo que o diâmetro externo se ajustasse ao interior dos tubos de alumínio. Na região central da luva havia uma elevação com diâmetro igual ao diâmetro externo do eixo. Assim, quando uma luva era introduzida na extremidade de dois tubos para realizar a conexão, a superfície externa formada era contínua e sem ressalto. Em cada lado da elevação central da luva foi usinada uma rosca externa que se adaptava à uma rosca interna usinada na extremidade dos tubos de alumínio. Ao lado de cada rosca, duas canaletas foram usinadas para receber anéis de vedação de borracha. Estes anéis faziam contato com a parte interna dos tubos de alumínio evitando a penetração do fluido no interior dos tubos. Este mecanismo de união dos tubos provou-se eficiente, produzindo uma união firme e alinhada entre os tubos, além de efetivamente impedir a penetração do fluido de trabalho para o interior do tubo de alumínio. A figura (2.2), apresenta uma fotografia de uma das luvas de união construídas.



Figura 2.2: Foto da luva de união dos tubos de alumínio.

O eixo de alumínio montado conforme descrito nos parágrafos anteriores formava uma peça de 6 m de comprimento que deveria ser dotada de movimento de rotação suave. Para tal, o eixo foi suportado por dois rolamentos de esferas, localizados nas extremidades do eixo. Para receber os rolamentos, foram construídas duas pontas de eixo que se encaixavam nas extremidades dos tubos, sendo fixadas por meio de um ajuste com interferência. Uma foto destas extremidades é apresentada na figura (2.3).



Figura 2.3: Foto da tampa do eixo de alumínio.

Como pode ser observado na figura (2.3), a ponta de eixo possuía um diâmetro maior que se encaixava no interior do eixo de alumínio, deixando exposto um eixo com diâmetro menor que se encaixava no rolamento de esferas. Na parte da peça que penetrava no eixo de alumínio foi usinada uma canaleta para receber um anel de vedação, com o objetivo de impedir a penetração de fluido de trabalho no interior do eixo.

2.2.2

Tubo externo de acrílico

O tubo externo que formava o espaço anular foi montado a partir de três tubos de acrílico de 2 m de comprimento formando um conjunto com 6 m de comprimento total. Cada tubo de acrílico apresentava um diâmetro externo de $70 \pm 0,1$ mm e diâmetro interno de $64 \pm 0,1$ mm, indicando uma parede de espessura de 3 mm. Os três tubos de acrílico foram unidos por

meio de luvas de união especialmente projetadas e construídas para esta tarefa. As luvas, apresentadas nas figuras (2.4 e 2.5), foram usinadas em polipropileno e tinham a finalidade de alinhar os tubos de acrílico, vedar o fluido dentro do espaço anular e prover apoios intermediários para o eixo de alumínio.

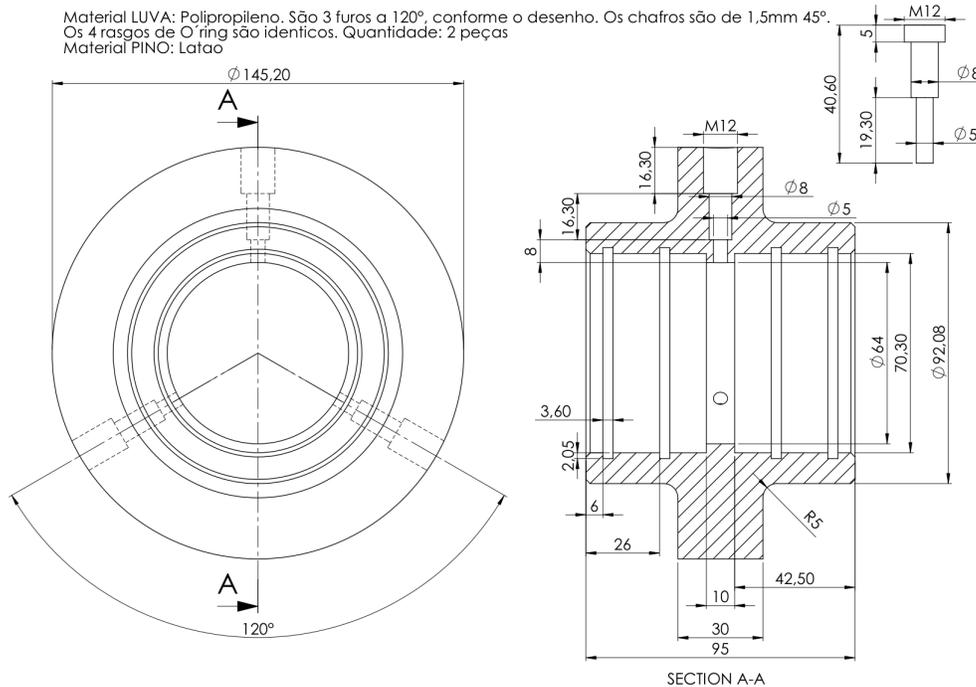


Figura 2.4: Desenho técnico da luva de polipropileno com o parafuso centralizador.

Como pode ser observado nas figuras (2.4 e 2.6), a luva possuía um ressalto interno com diâmetro igual ao diâmetro interno do tubo de acrílico. Este ressalto servia como batente para os tubos de acrílico que, uma vez montados, formavam uma superfície contínua como desejado para não perturbar o escoamento no espaço anular. Em cada lado da luva foram usinadas duas canaletas para receber anéis de vedação de borracha. Na montagem dos tubos de acrílico, estes anéis faziam contato com a superfície externa dos tubos. A figura (2.6) apresenta uma vista tridimensional do conjunto montado, onde também podem ser vistos o eixo de alumínio e dois tubos de acrílico montados.

Pode-se observar na figura (2.6), também que a luva era usada para apoiar o tubo de acrílico sobre a estrutura de aço que suportava toda a seção de testes. Para isso, um suporte em acrílico no formato de meia cana foi usinado e montado entre cada luva e uma cantoneira aparafusada na mesa de aço, como pode ser visto na figura (2.7). Foram usinados dois

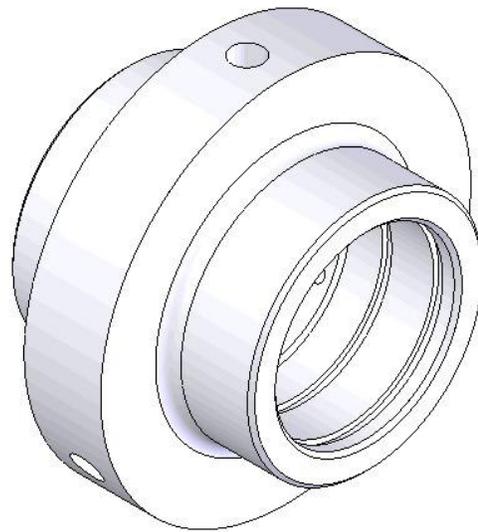


Figura 2.5: Figura esquemática da luva de polipropileno.

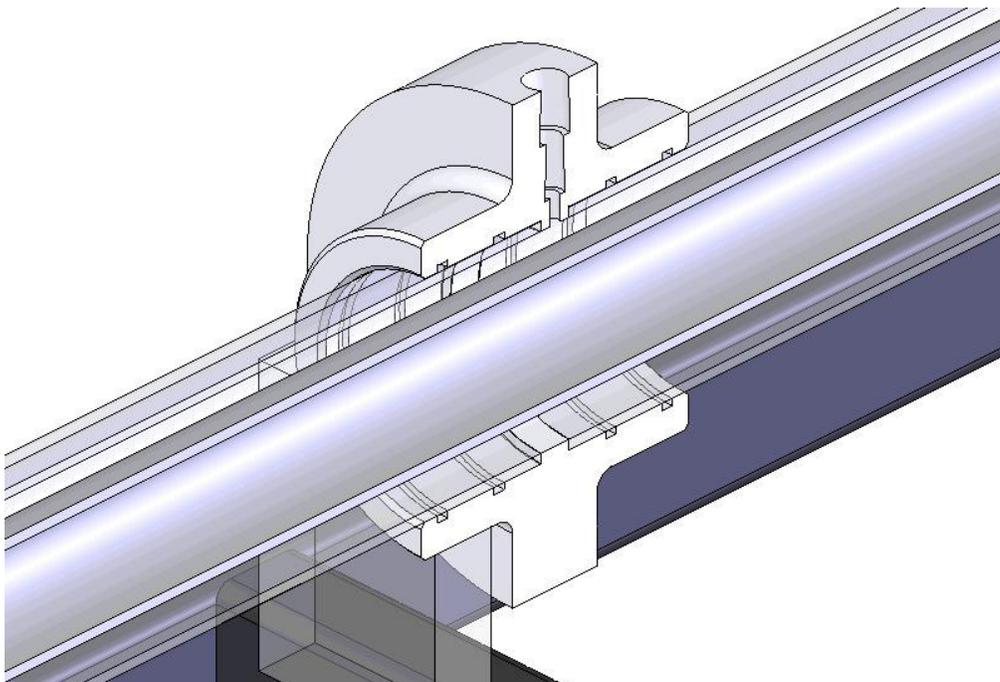


Figura 2.6: Figura esquemática da montagem da luva nos tubos de acrílico.

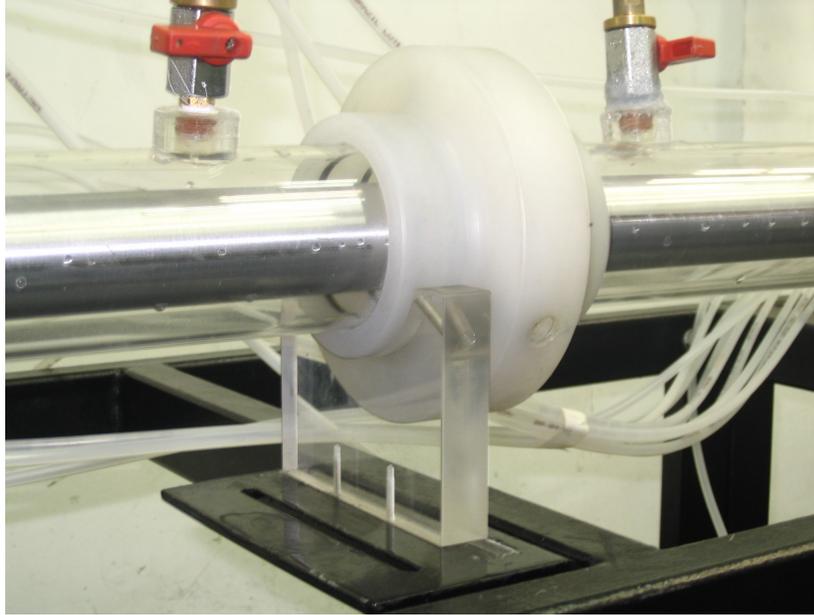


Figura 2.7: Foto da luva de polipropileno apoiada na cantoneira.

furos oblongos na parede desta cantoneira que fazia contato com a mesa de apoio permitindo seu movimento na direção vertical. A fixação deste suporte de acrílico na estrutura de aço foi feita de modo a permitir seu deslocamento lateral permitindo assim, que fosse possível alinhar o espaço anular ao longo de seu comprimento, como mostrado na figura (2.7). Esta operação de alinhamento foi realizada introduzindo 9 anéis, com as mesmas dimensões do espaço anular, entre os tubos de acrílico e o eixo de alumínio, sendo 3 anéis em cada tubo de acrílico. Os anéis eram posicionados nas extremidades de cada tubo assim como na sua parte central. Isto garantia rigidez suficiente nas junções dos tubos de acrílico, podendo, então, ajustar-se a altura das cantoneiras. Após o alinhamento, os suportes de acrílico eram fixados firmemente à cantoneira.

As luvas de polipropileno também foram projetadas para, caso necessário, suportar o eixo de alumínio evitando seu empenamento. Como já foi descrito anteriormente, o eixo de alumínio, depois de montado, formava uma peça de 6 m de comprimento apoiado apenas em suas extremidades. Assim, apesar de oco, seu peso próprio provocava uma flecha de deformação inaceitável para os experimentos, pois comprometeria a simetria da geometria do espaço anular e, quando em rotação, produziria níveis elevados de vibração.

O projeto do eixo de alumínio foi realizado de modo que quando o espaço anular estivesse preenchido com um fluido com massa específica de valor próximo ao da água, produzisse uma força de empuxo que neutralizasse

o peso do eixo, eliminando assim a deformação por flexão. No entanto como o fluido somente seria introduzido no espaço anular na etapa final de montagem, deixando assim o eixo deformado e sujeito a empeno, e também devido ao fato que diferentes tipos de fluidos com diferentes valores para a massa específica poderiam vir a ser utilizados em testes futuros, optou-se por prover apoios para o eixo de alumínio nas luvas de polipropileno.

Na figura (2.4), pode-se observar a presença nas luvas de três furos radiais dispostos circunferencialmente a 120° . Estes furos roscados alojavam parafusos centralizadores usinados em latão. A parte dos parafusos de menor diâmetro penetrava no espaço anular tocando no eixo de alumínio e, desta forma, centralizando-o. Um calibrador de acrílico foi usinado para garantir que os parafusos alinhariam o eixo de alumínio de forma concêntrica com a luva de polipropileno. A parte de maior diâmetro era roscada e adaptava-se aos furos da luva. Anéis de borracha garantiam a vedação do fluido no interior do espaço anular. Para minimizar o atrito entre o eixo girante e o pino, um inserto de PVC foi instalado na ponta de cada pino de latão. Na cabeça de cada parafuso foi usinada uma fenda para permitir que os parafusos pudessem ser girados com uma chave de fenda convencional e ajustados para somente tocar o eixo de alumínio sem pressioná-lo em demasia. A figura (2.4), apresenta o desenho técnico do pino. Caso não houvesse necessidade de utilizar os pinos para suporte do eixo, eles poderiam ser retraídos até que suas pontas facessem o interior da luva, deixando o espaço anular inteiramente livre para o escoamento.

2.2.3

Mesa de apoio

Uma vista geral do espaço anular montado sobre a mesa de apoio confeccionada em estrutura de aço são apresentadas nas figuras (2.8 e 2.9). A mesa de apoio era formada por 7 mesas aparafusadas umas às outras de modo a formar um conjunto rígido. Os pés de cada mesa eram ajustáveis facilitando a operação de nivelamento do conjunto. As dimensões de uma destas mesas são: 1 m de comprimento, 50 cm de largura e 45 cm de altura.

2.2.4

Caixas de entrada e saída

Caixas de entrada e saída de fluido foram projetadas para serem instaladas nas extremidades do espaço anular, como pode ser visto nas

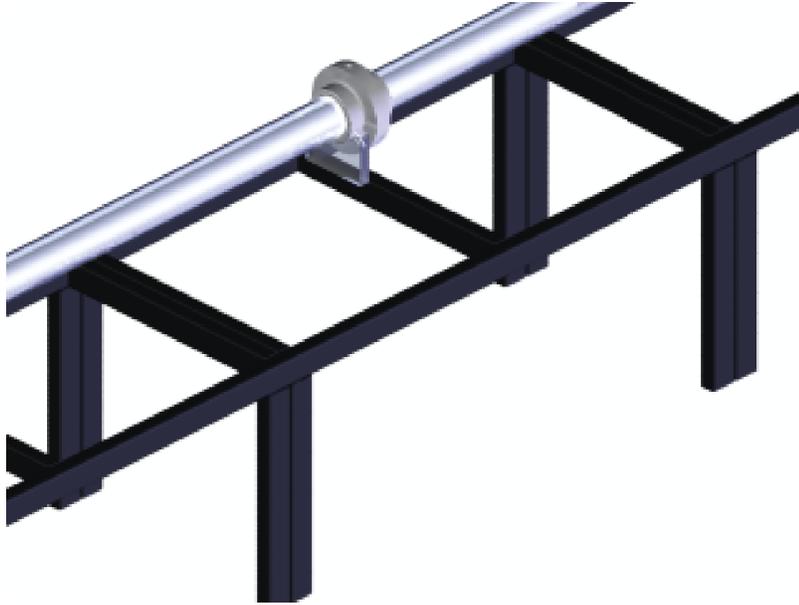


Figura 2.8: Desenho Ilustrativo da mesas de apoio construídas.

figuras (2.10 e 2.11).

A primeira função das caixas de entrada e saída de fluido era receber os rolamentos de esfera e selos mecânicos que serviam de mancais para suportar o eixo de alumínio. As caixas foram construídas de acrílico com 20 mm de espessura e eram cubos com dimensão externa de 200 mm. A caixa de entrada possuía três furos em suas paredes, dois em paredes verticais opostas e um na tampa superior. O furo da tampa superior era usado como entrada do fluido vindo do sistema de alimentação, como é descrito mais adiante. Os furos nas paredes verticais davam passagem à ponta do eixo de alumínio. Uma peça em alumínio foi usinada para servir de sede para o rolamento de esferas que suportava o eixo de alumínio, conforme mostra a figura (2.10). A sede do rolamento era aparafusada à parede vertical da caixa e recebia o rolamento que sustentava o eixo. Um selo mecânico de cerâmica montado na parte interna da sede do rolamento garantia a vedação de fluido.

Na parede vertical oposta àquela onde a sede do rolamento foi instalada, um flange de acrílico recebia o tubo de acrílico que formava a parte externa do espaço anular. A caixa de entrada também tinha a importante função de agir como uma câmara plena propiciando uma entrada uniforme do fluido no espaço anular.

Na outra extremidade do espaço anular estava posicionada a caixa de saída. Esta caixa era praticamente idêntica à caixa de entrada, diferindo apenas na posição do furo na tampa horizontal que era posicionado na parte inferior da caixa e servia para conduzir o fluido ao reservatório inferior da

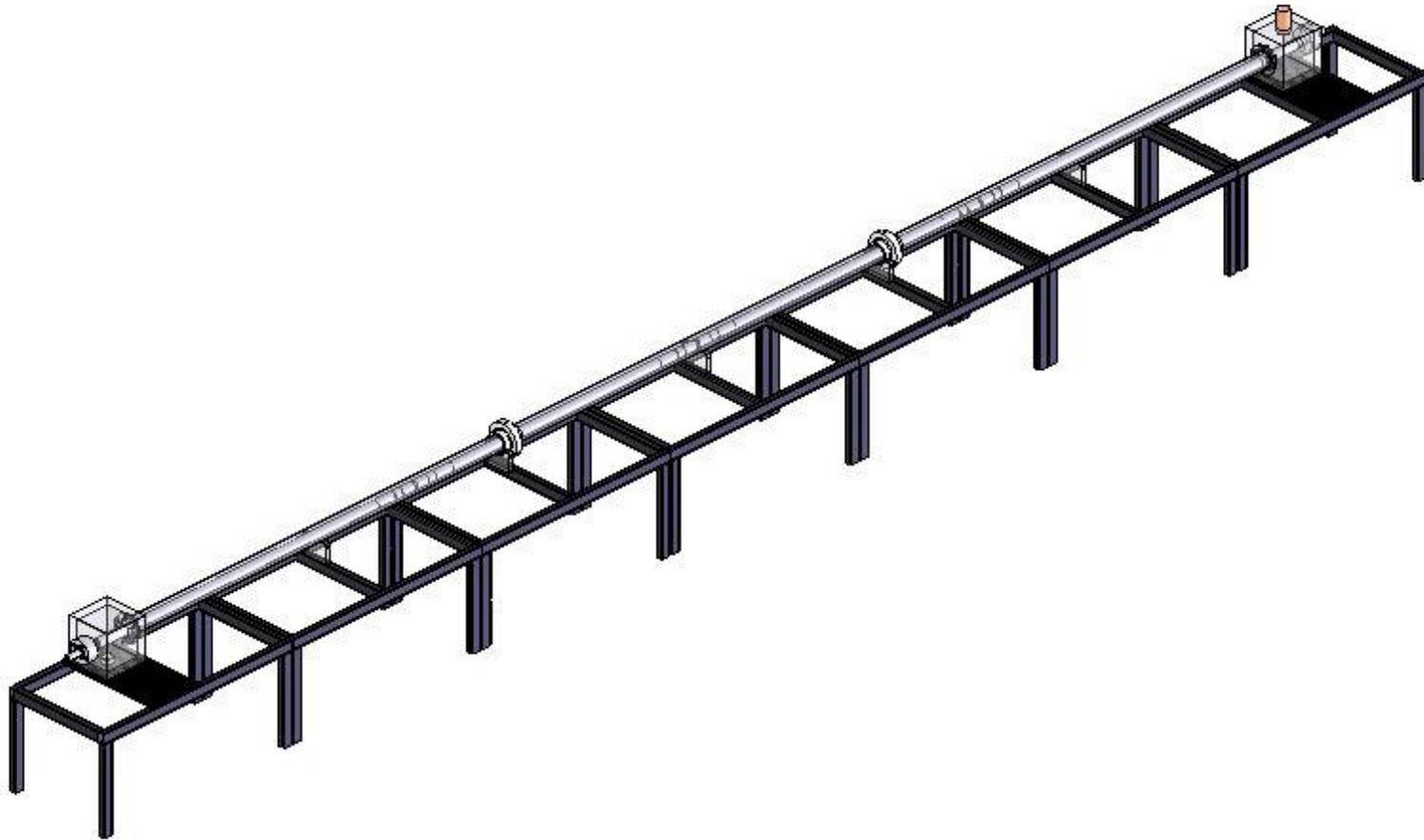


Figura 2.9: Figura ilustrando a seção de testes.

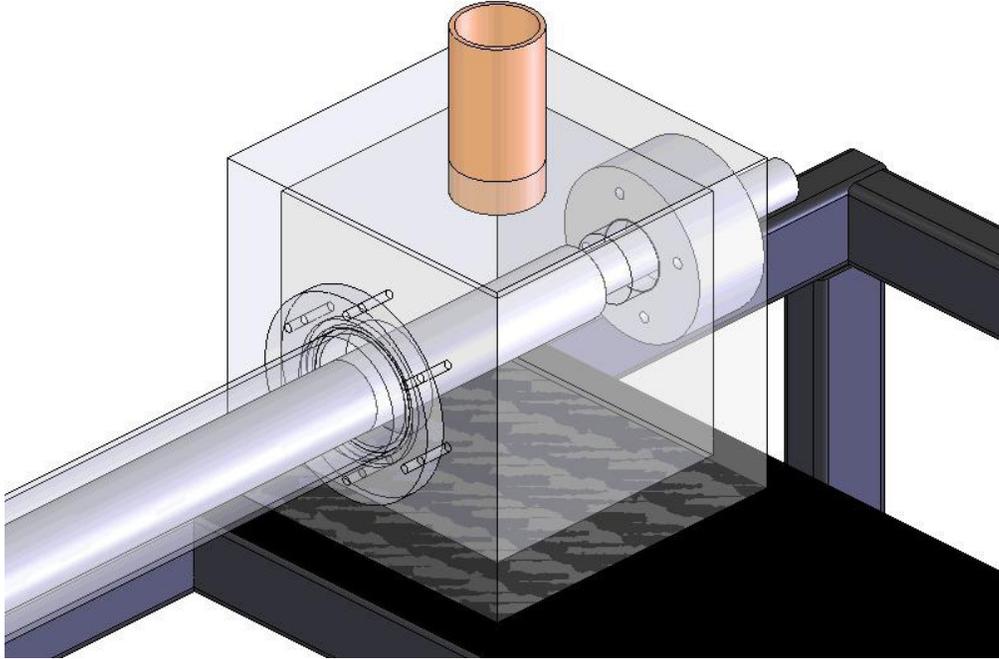


Figura 2.10: Ilustração da caixa de entrada.

seção de testes. Uma ilustração da caixa de saída é apresentada na figura (2.11).

2.2.5 Sistema de alimentação de fluido

O fluido de trabalho era fornecido à seção de testes por meio de um sistema de alimentação por gravidade. Um tanque cilíndrico de polipropileno com capacidade de 150 litros foi utilizado como reservatório superior para o fluido de trabalho (Figura 2.12). Este tanque foi posicionado sobre uma estrutura de aço em um mezanino do laboratório, ficando a superfície livre do fluido, quando o tanque estava cheio, a cerca de 4 m acima do nível do espaço anular. Para minimizar as perdas de carga e maximizar a máxima vazão pela seção de testes, foi utilizada uma tubulação de PVC de 75 mm de diâmetro para conectar o fundo do tanque à caixa de entrada. Uma válvula de esfera de segurança de PVC foi instalada na saída do tanque superior.

No trajeto da linha de 75 mm para a caixa de entrada foi instalado um par de rotâmetros para a medição de vazão. Uma ligação dos rotâmetros em paralelo permitia que um ou dois rotâmetros fossem utilizados nos testes ampliando a faixa de vazão medida. A figura (2.13) mostra os rotâmetros utilizados. Um rotâmetro da marca Omel, modelo 169/967, com fundo

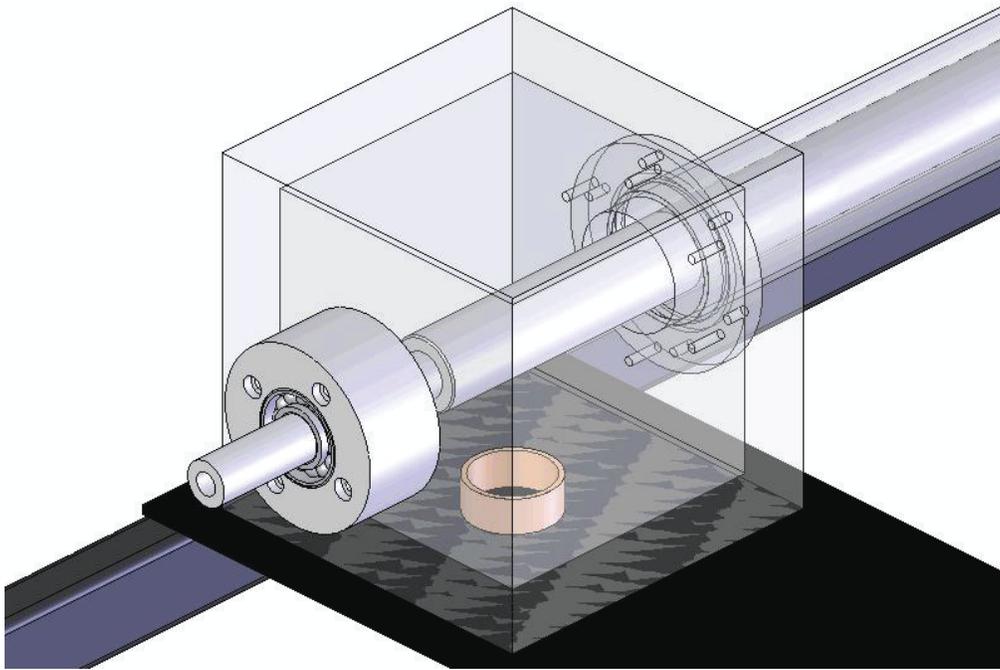


Figura 2.11: Ilustração da caixa de saída.



Figura 2.12: Tanque superior.

de escala de 5000 litros/hora foi utilizado para as vazões em regimes turbulentos, e um segundo rotâmetro da marca Omel, modelo 169/932, com fundo de escala de 1000 litros/hora foi utilizado para vazões em regimes laminares. Estes rotômetros foram calibrados para a faixa de vazão a serem utilizadas pelos experimentos. Esta calibração é apresentada no Apêndice A



Figura 2.13: Fotos dos rotômetros utilizados para a leitura da vazão.

A caixa de saída era conectada por meio de um tubo de PVC de 75 mm de diâmetro a um reservatório de polipropileno com capacidade de 180 litros e posicionado no chão do laboratório. Entre a caixa de saída e o reservatório inferior foi instalada uma válvula globo de 3 polegadas para controle da vazão através da seção de testes.

Uma bomba centrífuga da marca Dancor modelo CAM W6 TNEMA 56 acionada por um motor trifásico de 1,5 cv foi instalada junto ao

reservatório inferior. Esta bomba retornava o fluido para o tanque superior. A tubulação de retorno era de PVC de diâmetro de 32 mm, entrando no tanque cilíndrico superior por sua tampa e penetrando até a região do fundo do tanque, longe da saída central.

Para manter o nível do tanque superior constante foi instalada uma saída na parte superior da lateral do tanque. Esta saída foi conectada a uma mangueira plástica espiralada de 75 mm de diâmetro, que era conectada em sua outra extremidade à tampa do tanque inferior. A vazão da bomba era ajustada de tal modo a suprir uma vazão maior que a vazão do teste a ser conduzido. Assim, o excesso de fluido retornava ao tanque inferior através da mangueira plástica, mantendo desta forma o nível do tanque superior constante, como desejado. A vazão da bomba centrífuga era controlada através do ajuste da rotação do motor elétrico, conseguido por meio de um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW08. A figura (2.12) mostra o tanque superior com a mangueira de retorno do excesso de fluido. A figura (2.14) apresenta fotografia do tanque inferior que recebia o fluido da seção de teste, a bomba centrífuga que retornava o fluido para o tanque superior, a mangueira de retorno e a válvula para o controle de vazão da seção de testes.



Figura 2.14: Foto do tanque inferior, bomba centrífuga, inversor de frequência e válvula gaveta.

2.2.6

Transmissão de potência para a rotação do eixo de alumínio

O sistema de transmissão de potência foi concebido por um motor elétrico AC trifásico WEG 0,5 cv com rotação nominal de 850 rpm, um

inversor de frequência modelo WEG CFW08 que possibilita o controle de rotação através da frequência, um par de polias sincronizadoras e uma correia dentada opitbelt-ZR050/510L4 de 12,7 mm de largura e passo 3/8 de polegada. A figura (2.15) mostra a foto do conjunto de transmissão de potência.

A polia do motor continha 10 dentes, enquanto a segunda, montada na ponta da tampa do eixo de alumínio apresentava 85 dentes. A relação de transmissão estabelecida nessa montagem foi de 8,5:1.

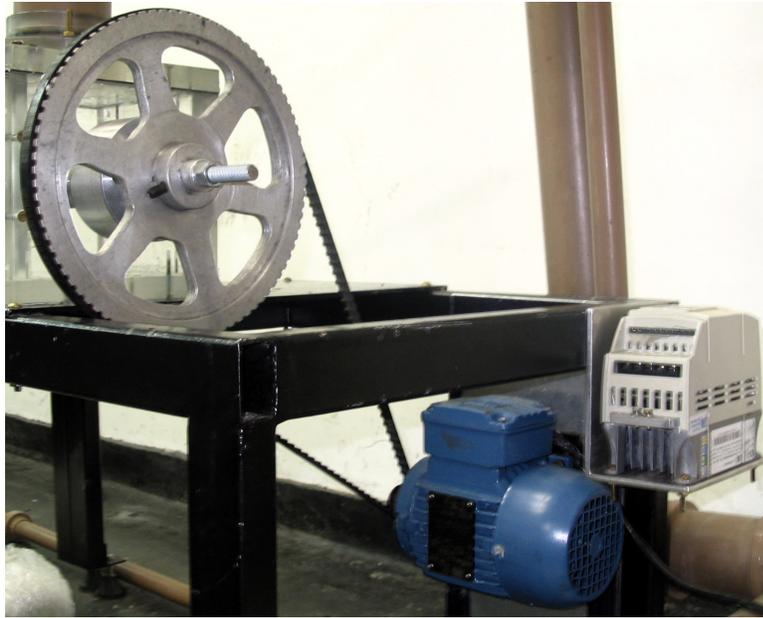


Figura 2.15: Sistema de transmissão de potência para a rotação do cilindro interno.

2.2.7 Medição de velocidade angular

Um dispositivo para medição de frequência angular foi projetado para registrar a história de rotação do cilindro interno. O dispositivo foi construído no laboratório visando uma exatidão maior no valor da rotação que os tacômetros comercialmente disponíveis, além da facilidade de adaptação na experiência e do baixo custo. O dispositivo era constituído de três partes: i) encoder; ii) circuito eletrônico; e iii) Osciloscópio Tektronics, modelo TDS 2012B.

O encoder foi construído a partir de um disco de latão de 2,0 mm de espessura, com 90 rasgos produzidos por uma fresa tipo serra de corte com 1,5 mm de largura. Os rasgos apresentavam um passo de 4 graus conseguidos

através do divisor da fresadora. Esse processo de fabricação possibilitou a confecção dos rasgos com boa exatidão. Uma foto do encoder construído é apresentada na figura (2.16).

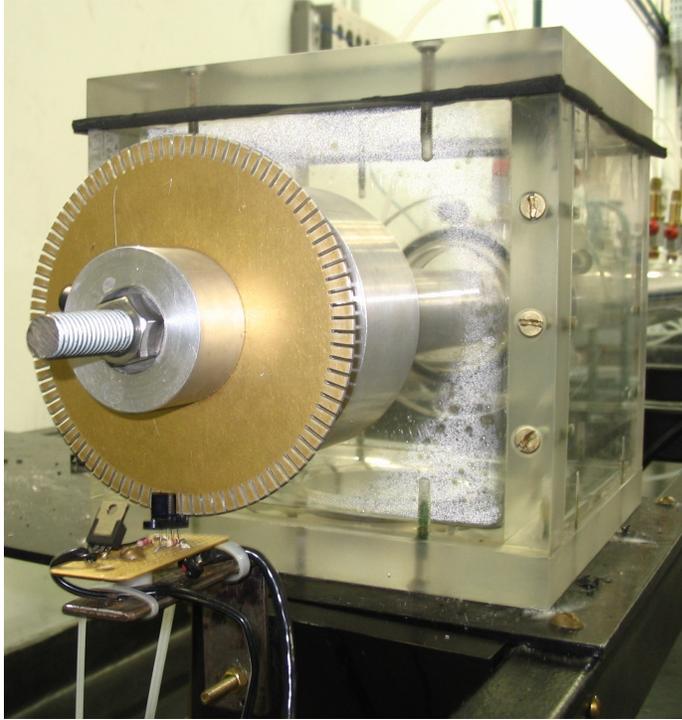


Figura 2.16: Encoder utilizado na medição da velocidade angular do cilindro interno.

O circuito eletrônico foi montado sobre uma placa de circuito e alimentado com uma fonte DC de 12 Volts. O principal componente foi uma chave óptica que serviu como emissor e receptor de sinal infravermelho.

O sinal de tensão produzido pelo circuito eletrônico foi limitado entre 0 e 10 Volts. Devido à configuração dos rasgos, a onda produzida pelo medidor de frequência angular apresentava a forma de onda quadrada. A aquisição do sinal de tensão foi realizada pelo osciloscópio, possibilitando a medição da frequência de rotação em tempo real.

2.3

Medição da queda de pressão

Conforme citado anteriormente, 33 tomadas de pressão estática foram instaladas na direção axial da região anular, medindo a distribuição de pressão ao longo do espaço anular. Para minimizar a incerteza da medição, foram feitos furos de 2 mm de diâmetro nos tubos de acrílico.

Segundo Blake (1983) o diâmetro ideal para um furo de tomada de pressão estática é de $\frac{1}{4}$ mm furado perpendicularmente à superfície na qual se deseja medir a pressão. Um furo de 1 mm de diâmetro introduz um erro menor que 1% comparado com o furo de $\frac{1}{4}$ mm. Blake (1983) citou R. Shaw (1960) no qual sugeriu que erros em furos de tamanhos práticos ocorrem devido ao escoamento presente dentro e ao redor do furo. Arredondamentos nos cantos e não perpendicularidade dos furos, até 45 graus, introduzem erros menores que 1%.

O espaçamento entre as tomadas de pressão eram de 200 mm nos dois primeiros tubos de acrílico e de 150 mm no último tubo, aumentando o número de pontos de medição na região desenvolvida do anular. Em cada tomada havia uma válvula de esfera permitindo selecionar as tomadas a serem medidas pelo manômetro, como pode ser visto na figura (2.17).



Figura 2.17: Foto das tomadas de pressão.

De cada válvula saíam mangueiras de plásticos tipo poliflux de $\frac{1}{8}$ de polegada de diâmetro, onde a primeira tomada era conectada ao manômetro servindo de referência. As outras 32 mangueiras conectavam-se em um cilindro de PVC, que servia de um vaso seletor de pressão, como pode ser visto na figura (2.18). Deste cilindro saía uma mangueira que era conectada na outra entrada do manômetro.

Maldonado (2005) mostrou que para vazões baixas e o fluido de trabalho sendo água, a queda de pressão entre duas tomada de pressão adjacentes poderia ser menor que 1 mm de coluna de água. Levando em conta a resolução do instrumento utilizado por Maldonado (2005) a incerteza da medição pode se tornar relevante, podendo levar a um valor de fator de atrito incorreto. Para tentar minimizar este problema, no presente trabalho foi construído um manômetro do tipo "U" invertido de dois fluidos.

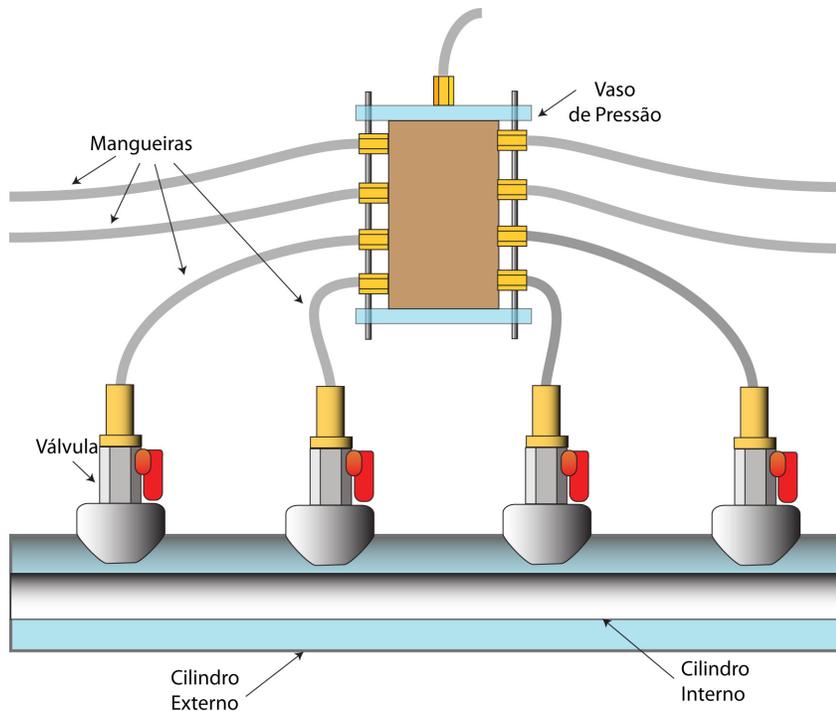


Figura 2.18: Ilustração do vaso seletor das tomadas de pressão.

Aplicando a equação de Bernoulli nesta geometria de manômetro, pode-se concluir que, se forem utilizados dois fluidos de massa específica de valores próximos, a leitura da pressão no manômetro é multiplicada por um fator, sendo este a diferença entre as massa específicas dos dois fluidos, como mostra a equação (2-1). A figura (2.19) mostra uma ilustração do manômetro tipo "U" invertido de dois fluidos.

$$p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho_2)hg \sin \alpha \quad (2-1)$$

onde,

h = leitura do manômetro (m)

p_1 e p_2 = pressão (Pa)

ρ_1 = massa específica do fluido de trabalho ($\frac{kg}{m^3}$)

ρ_2 = massa específica do fluido do manômetro ($\frac{kg}{m^3}$)

$\sin \alpha$ = ângulo de inclinação do manômetro

Este manômetro era composto por dois tubos de vidro de 1,5 m de comprimento conectados em uma peça de acrílico, especialmente projetada e construída. Esta peça tinha como função encher o manômetro com o segundo fluido, no caso um óleo, além de fazer toda a vedação, garantindo assim, o funcionamento do manômetro. Na outra extremidade dos tubos de vidro eram conectadas as mangueiras para a tomada de pressão. Uma

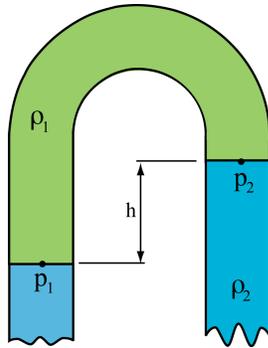


Figura 2.19: Ilustração do manômetro tipo "U" invertido.

das mangueiras vinha da tomada de referência e a segunda mangueira vinha do vaso seletor de tomadas. Também foi construída uma base de apoio para o manômetro, que recebia os dois tubos de vidro já montados com a peça de acrílico. A principal função desta base era proporcionar o grau de liberdade de inclinação do manômetro e com isso aumentando sua sensibilidade. Na ponta do eixo que promove a inclinação, foi colocado um transferidor. Um marcador tipo ponteiro soldado à base fazia a marcação do ângulo de inclinação. Para reduzir a incerteza no ângulo, o manômetro foi cuidadosamente posicionado na posição vertical, e assim o transferidor rotacionado para a posição de marcação de 90° . Com isso foi garantido que a inclinação do manômetro pudesse ser lida no transferidor com uma certeza maior. A figura (2.20) mostra uma foto do manômetro construído.

O fluido utilizado no manômetro foi o óleo Spindle, fornecido pelo CENPES, com massa específica $815 \frac{kg}{m^3}$. Este óleo foi caracterizado pelo Laboratório de Caracterização de Fluidos da PUC-RIO.

Para cada vazão e rotação do cilindro interno desejada mediu-se a diferença de pressão entre cada tomada e a tomada de referência, determinando a distribuição de pressão ao longo do anular. Um tempo de estabilização era considerado a partir do momento de abertura da válvula de cada uma das tomadas.

2.4

Medição dos Campos de Velocidade

A medição dos campos de velocidade foram realizadas pela técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula, que é descrita no Capítulo 3.

As figuras (2.21) e (2.22) mostram um esquema da montagem do sistema de PIV.



Figura 2.20: Manometro do tipo "U" invertido construído.

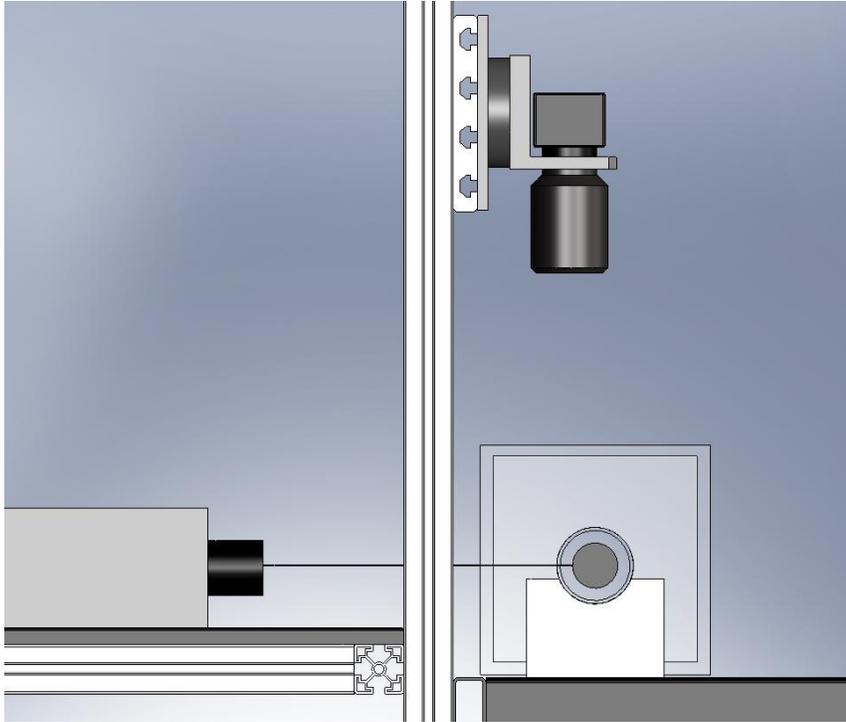


Figura 2.21: Representação esquemática da montagem do sistema de PIV na seção de testes. Vista lateral.

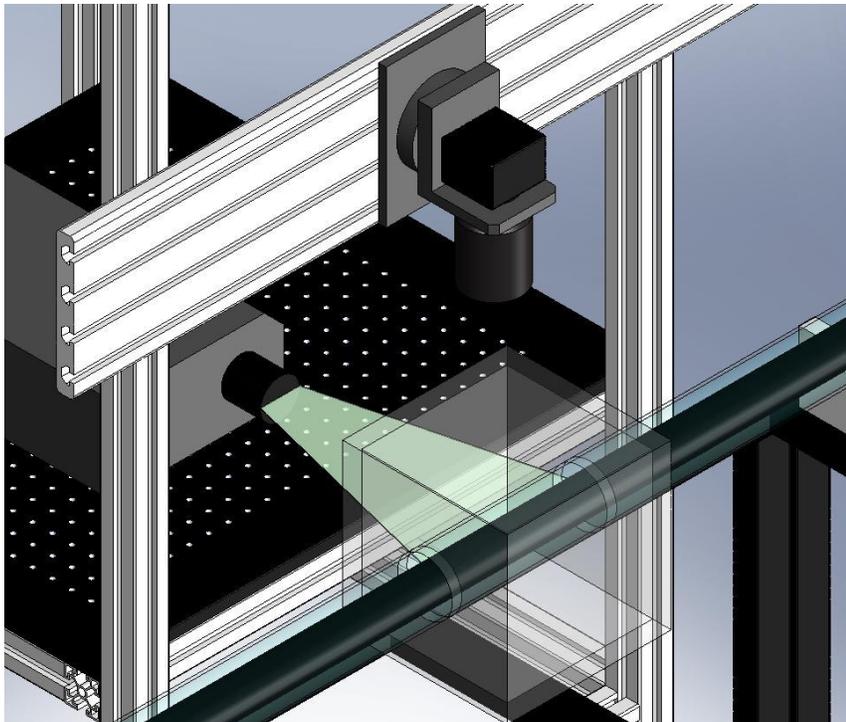


Figura 2.22: Representação esquemática da montagem do sistema de PIV na seção de testes. Vista lateral.

Como pode ser observado nas figuras (2.21) e (2.22), o plano de laser ilumina a seção meridional do espaço anular. Para a formação do plano de laser foram usadas duas lentes: uma cilíndrica (-15 mm) e uma esférica com distância focal de 500 mm.

A base do laser foi fixado a uma base elevatória a uma distância de 500 mm da região de medição. A câmera foi fixada em um perfil de alumínio (perfil Bosch) que foi aparafusado nesta base elevatória. Para minimizar o efeito de curvatura do tubo de acrílico na imagem capturada pela câmera de PIV, uma caixa de visualização foi construída e posicionada próxima à caixa de saída da seção de testes. Esta caixa foi preenchida com água. Partículas de esfera de vidro ocas com revestimento de prata (Potters Industries) foram adicionadas ao fluido para serem usadas como partículas traçadoras. O diâmetro médio destas partículas é de $13\mu m$, e sua densidade é de $1,60 g/cm^3$.

O equipamento utilizado na medição do campo de velocidade é apresentado abaixo:

- Laser Nd:YAG pulsado de 120mJ por pulso a uma frequência de 15Hz, modelo GeminiPIV da New-Wave;
- Câmera de 4 Megapixels de resolução (2048 por 2048 e tamanho do pixel de $7,4\mu m$) por pixel) modelo 4MP da TSI Inc.;
- Sincronizador modelo 610032 da TSI Inc.;
- Placa de captura modelo X64 da TSI Inc.;
- Software INSIGHT 3G da TSI Inc. para captura, processamento e pós-processamento;
- Software TECPLOT 10, da Amtec, para análise dos campos de velocidade.

2.5

Redução de dados

Os parâmetros adimensionais que governam o problema são o número de Reynolds, número de Reynolds rotacional e o fator de atrito. A seguir são apresentadas as equações e os procedimentos utilizados na obtenção destes parâmetros a partir dos dados experimentais medidos.

2.5.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds foi calculado a partir da vazão volumétrica medida nos rotâmetros. A calibração dos rotâmetros utilizados são apresentados no Apêndice (A).

Assim, o número de Reynolds, equação (2-2) foi obtido por,

$$\text{Re} = \frac{\rho Q D_H}{A \mu} \quad (2-2)$$

onde,

ρ : massa específica do fluido ($\frac{kg}{m^3}$);

μ : viscosidade dinâmica do fluido ($\frac{kg}{ms}$);

Q : vazão volumétrica de fluido ($\frac{m^3}{s}$);

D_H : diâmetro hidráulico da seção anular (m), $D_H = d_e - d_i$;

d_e : diâmetro interno do tubo de acrílico (m);

d_i : diâmetro externo do tubo de alumínio (m); e

A : área da seção reta do espaço anular (m^2), $A = \pi(r_e^2 - r_i^2)$.

2.5.2 Número de Reynolds rotacional

O número de Reynolds rotacional foi calculado a partir da velocidade tangencial do cilindro interno, Ωr_i . A velocidade angular do cilindro interno, Ω , foi calculada pela leitura da frequência dos pulsos emitidos pelo encoder lidas no osciloscópio TDS 2012B, como foi descrito anteriormente.

Assim o número de Reynolds rotacional foi avaliado pela equação (2-3).

$$\text{Re}_{rot} = \frac{\rho \Omega r_i d}{\mu} \quad (2-3)$$

onde,

ρ : massa específica do fluido ($\frac{kg}{m^3}$);

μ : viscosidade dinâmica do fluido ($\frac{kg}{ms}$);

Ω : velocidade angular do cilindro interno (rad/s);

r_i : raio do cilindro interno (m); e

d : espaço anular (m), $d = (r_e - r_i)$.

2.5.3

Fator de Atrito

A região desenvolvida do anular foi identificada através de gráficos pressão *versus* posição. Para determinar o gradiente de pressão, $\frac{dp}{dx}$, a equação de uma reta foi ajustada na região desenvolvida do anular através de um procedimento baseado no método dos mínimos quadrados. O coeficiente angular da reta representa o gradiente de pressão, $\Delta P/L$, utilizado no cálculo do fator de atrito, f . Assim, o fator de atrito usado foi o baseado no diâmetro hidráulico, sendo dado pela fórmula (2-4).

$$f = \frac{2(\Delta P/L)D_H}{\rho(Q/A)^2} \quad (2-4)$$

2.5.4

Exemplo de Redução de Dados

Esta seção apresenta um exemplo da redução dos dados para a obtenção dos parâmetros adimensionais que governam o problema.

O caso que será apresentado nesta seção é para $Re_{axial} = 8458$ sem rotação do cilindro interno.

Após a medição do diferencial de pressão no manômetro, faz-se uma tabela com os dados da posição das tomadas e com os dados obtidos no manômetro. A tabela (2.1) apresenta estes dados.

Na tabela (2.1), a terceira coluna são os dados de pressão em milímetros de coluna de água lidos no manômetro. A quarta coluna da tabela foi obtida através da equação (2-1)

A equação (2-1) faz a correção da diferença das massas específicas da água e do óleo, que fazem a amplificação da leitura de pressão no manômetro, em Pascal. A inclinação do manômetro para este caso, $Re_{axial} = 8458$ foi de 90° , ou seja, o manômetro estava na posição vertical.

Com os dados de posição, em metros, e de pressão, em Pascal, faz-se um gráfico Pressão *versus* Posição. A figura (2.23) apresenta este gráfico para o caso analisado.

Através do ajuste de uma reta nos dados de pressão *versus* posição do tubo 3 pelo método de mínimos quadrados, como pode ser visto na figura (2.23), obtém-se o coeficiente angular da reta, que é o gradiente de pressão axial. No caso analisado o gradiente de pressão axial é $\frac{\Delta P}{L} = -103,2$. A estimativa da incerteza na pressão é apresentada no Apêndice (B). Para o caso apresentado a incerteza na pressão varia entre 8,90% a 8,89%.

Tabela 2.1: Dados obtidos na leitura do manômetro e a pressão corrigida pela equação (2-1.). $Re_{axial} = 8458$ sem rotação do cilindro interno

Tomada	Posição (m)	Pressão (mmca)	Pressão (Pa)
1	0,1	0	0
2	0,3	15	-21,70
3	0,5	28	-40,51
4	0,7	43	-62,21
5	0,9	53	-76,68
6	1,1	67	-96,94
7	1,3	81	-117,20
8	1,5	94	-136,06
9	1,7	109	-157,72
10	1,9	125	-180,87
11	2,1	145	-209,81
12	2,3	162	-234,41
13	2,5	176	-254,66
14	2,7	189	-273,47
15	2,9	204	-295,18
16	3,1	218	-315,44
17	3,3	232	-335,69
18	3,5	248	-358,69
19	3,7	263	-380,55
20	3,9	277	-400,81
21	4,1	300	-434,09
22	4,25	310	-448,56
23	4,4	320	-463,03
24	4,55	330	-477,50
25	4,7	340	-491,97
26	4,85	350	-506,44
27	5	364	-526,69
28	5,15	372	-538,27
29	5,3	385	-557,08
30	5,45	393	-568,66
31	5,6	404	-584,57
32	5,75	416	-601,94
33	5,9	430	-622,19

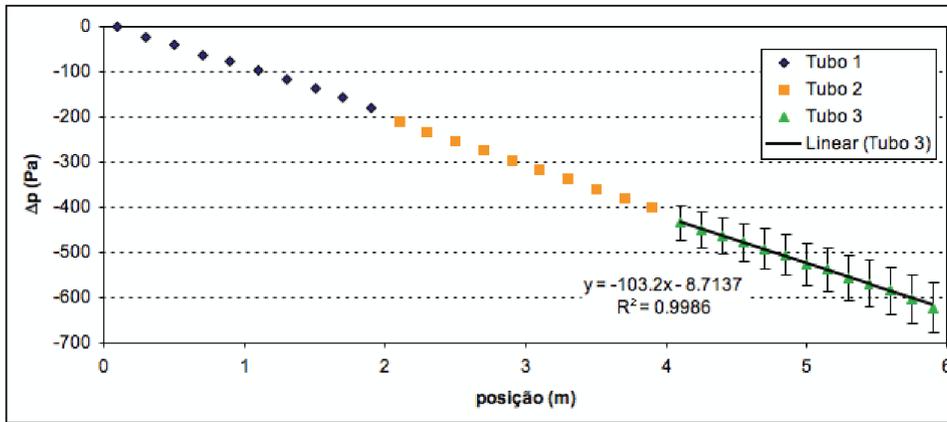


Figura 2.23: Gráfico Pressão *versus* Posição para $Re_{axial} = 8458$ sem rotação do cilindro interno

Com o gradiente de pressão axial pode-se obter o fator de atrito dado pela equação (2-4).

O fator de atrito obtido através da equação (2-4) foi $f = 0,033$.