

## **4**

### **Descrição dos experimentos**

Como mencionado anteriormente, os experimentos realizados estudaram o escoamento desenvolvido laminar e turbulento através de duto de seção circular utilizando água e água contendo agente redutor de atrito como fluidos de trabalho.

Para a realização dos experimentos foi especialmente projetada e construída uma seção de testes que permitisse a realização de medidas de queda de pressão, além da medição de velocidades utilizando a técnica óptica PIV. Além da cuidadosa seleção dos instrumentos para medição de vazão e queda de pressão, o projeto da seção de testes seguiu algumas premissas para garantir a confiabilidade dos resultados. A seleção de um polímero adequado foi outro ponto crucial para o sucesso dos experimentos.

#### **4.1**

##### **Seção de testes**

Para a realização dos experimentos, foi construída uma seção de testes, operando em circuito fechado, como mostrado esquematicamente na Figura 4.1.

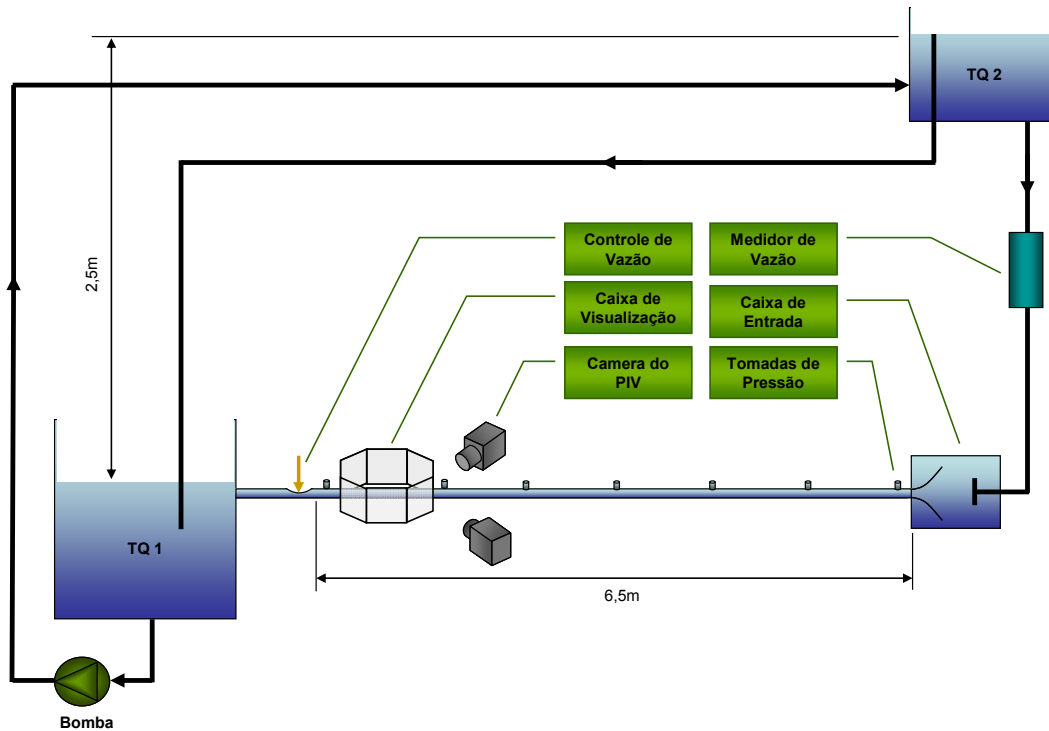


Figura 4.1 – Esquema da seção de testes construída para a realização dos experimentos.

O escoamento do fluido pela seção de testes dava-se por gravidade. A bomba e o circuito de retorno (ladrão) tinham somente a função de manter o nível no tanque 2 (TQ 2) constante. Desta forma, conseguia-se evitar que as pulsações geradas pelo sistema de bombeio perturbassem o escoamento.

A jusante do tanque superior foi instalado um medidor de vazão do tipo eletromagnético. Após passar pelo medidor o fluido chegava à caixa de entrada que era responsável pela normalização do escoamento na entrada do tubo da seção de testes. Para controlar a vazão, ao final do tubo da seção, foi construído um sistema especial de controle de vazão que minimizasse as tensões cisalhantes no fluido, conforme será detalhado adiante. Este é um dos pontos críticos do sistema, pois poderia gerar uma degradação prematura no polímero usado como redutor de atrito.

Os principais componentes da seção de teste foram construídos em acrílico para permitir as medições de velocidade com as técnicas ópticas de medição não intrusivas baseadas em luz laser e imagens de partículas traçadoras distribuídas no escoamento.

Para garantia do desenvolvimento do escoamento, optou-se por uma seção de testes com uma tubulação longa. As equações abaixo definem o

comprimento necessário para o desenvolvimento do escoamento em um tubo de seção circular para o caso laminar e turbulento.

$$L = 0,06 \times Re \times D \quad (\text{regime laminar}) \quad (8)$$

$$L = 4,4 \times (Re)^{1/6} \times D \quad (\text{regime turbulento}) \quad (9)$$

Como o tubo selecionado para a seção de testes possuía 34 milímetros de diâmetro interno, para o regime laminar o comprimento para desenvolvimento teórico é de aproximadamente 5 metros. Portanto, foi selecionada uma tubulação com comprimento de 6 metros até a seção de visualização, resultando em uma relação L/D (comprimento dividido pelo diâmetro) de 176. Desta forma garantiu que escoamento estaria completamente desenvolvido na região da seção de medição, mesmo para um caso de escoamento laminar. Como não há tubos de acrílico deste comprimento disponíveis no mercado, foi necessário juntar cuidadosamente trechos de tubulação com 2 metros de comprimento. As uniões entre estes trechos de tubo eram consideradas pontos crítico da montagem, pois qualquer desalinhamento entre as seções dos tubos poderia comprometer completamente o perfil de velocidade em desenvolvimento na tubulação.

Para a condição de escoamento turbulento, foco deste trabalho, o comprimento de desenvolvimento teórico é muito menor. Se considerarmos um Reynolds máximo de 50.000, o comprimento de desenvolvimento é de 0,9 metros. Como há tomadas de pressão ao longo de toda a seção, é importante conhecer este comprimento para garantirmos que as medidas de queda de pressão consideradas para o cálculo do fator de atrito estejam fora da região de desenvolvimento.

Após passar pelo tubo de acrílico o fluido era recolhido no tanque inferior (TQ1) que também recebia o excesso de fluido retornando pelo ladrão. O volume deste tanque foi dimensionado de modo a permitir a drenagem de todo o líquido da seção, caso necessário. Além disso, neste tanque era preparada a solução de água com polímero para os ensaios.

#### **4.1.1 Seção de visualização**

No trecho final da tubulação estava localizada a seção de visualização onde foram realizadas as medidas dos perfis de velocidade utilizando a técnica

PIV (Figura 4.2.). Para possibilitar a obtenção de imagens de melhor qualidade com pequenas distorções, foi projetada uma caixa octogonal em acrílico. A forma octogonal da caixa permite que tanto a técnica PIV bi-dimensional quanto a técnica estereoscópica sejam empregadas. Este formato da caixa de visualização permite que as câmeras sejam posicionadas sempre perpendicularmente à parede da caixa, reduzindo distorções. A Figura 4.8 apresenta o posicionamento das câmeras na montagem para utilização da técnica SPIV. A caixa era preenchida com água que apresenta índice de refração próximo ao do acrílico. Esta proximidade dos valores dos índices de refração reduz significativamente as distorções que ocorrem na visualização de superfícies curvas como a do tubo.

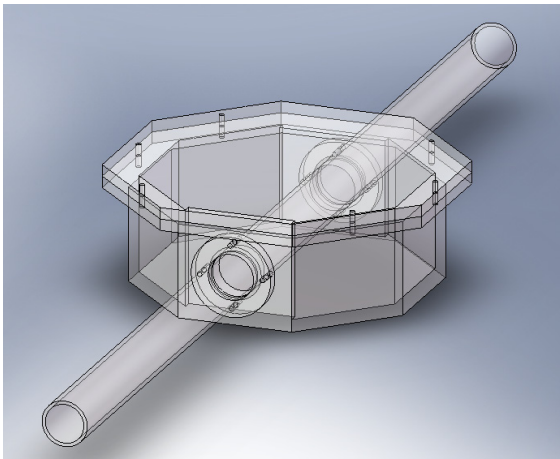


Figura 4.2 – Seção de visualização octogonal em acrílico.

Na montagem utilizada, o feixe laser cortava a seção de testes através da parte superior da caixa de visualização enquanto as câmeras captavam as imagens através das paredes laterais inclinadas a  $45^\circ$ .

#### 4.1.2 Caixa de entrada

A caixa de entrada (Figura 4.3) tinha a função de homogeneizar o escoamento na entrada do tubo da seção de testes. Para isso, foi projetada uma caixa com uma área de passagem grande de forma a desacelerar o fluido, proporcionando uma entrada na tubulação de testes com baixo nível de turbulência. A caixa possuía um bocal instalado no início do tubo que também tinha a função de minimizar a formação de vórtices junto à entrada. Conseguia-se com este dispositivo uma redução no comprimento para o desenvolvimento

do escoamento que se refletiu em uma melhor qualidade das medidas de queda de pressão mesmo próximo à entrada do tubo de acrílico.

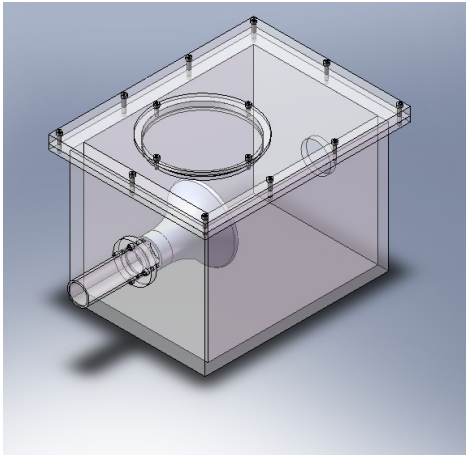


Figura 4.3 – Caixa de entrada

### 4.1.3 Estrutura de fixação

Com o uso de um tubo longo em acrílico, era necessário garantir o perfeito alinhamento em toda a seção. Além disso, a turbulência do escoamento poderia causar vibrações na estrutura, o que poderia vir a comprometer os resultados. Portanto, optou-se pelo uso de perfis estruturais Bosch de 40 x 40 mm de seção reta. Esse tipo de perfil além de leve e resistente, proporciona grande flexibilidade de montagem.

A utilização dos perfis Bosch permitiu integrar a fixação de todos os componentes, tornando a estrutura da seção de teste um único corpo rígido. Isto simplificou o processo de alinhamento dos componentes (laser, câmeras, alvo, espelho e caixa de visualização) etapa fundamental para a realização das medições com a técnica PIV.

As seções de tubo de acrílico de 2 metros foram fixadas sobre uma barra de perfil Bosch de 6 metros para garantir seu perfeito alinhamento. Para acomodar as luvas de acoplamento foi necessário fresar os perfis de forma que a luva não ficasse apoiada sobre a estrutura.

No fim da seção foi utilizada uma mesa feita de perfil Bosch com dimensões de 1000 x 250 mm que trouxe grande flexibilidade para a fixação dos equipamentos envolvidos nas medições. A Figura 4.4 ilustra a estrutura já com os principais componentes que compõem a seção.

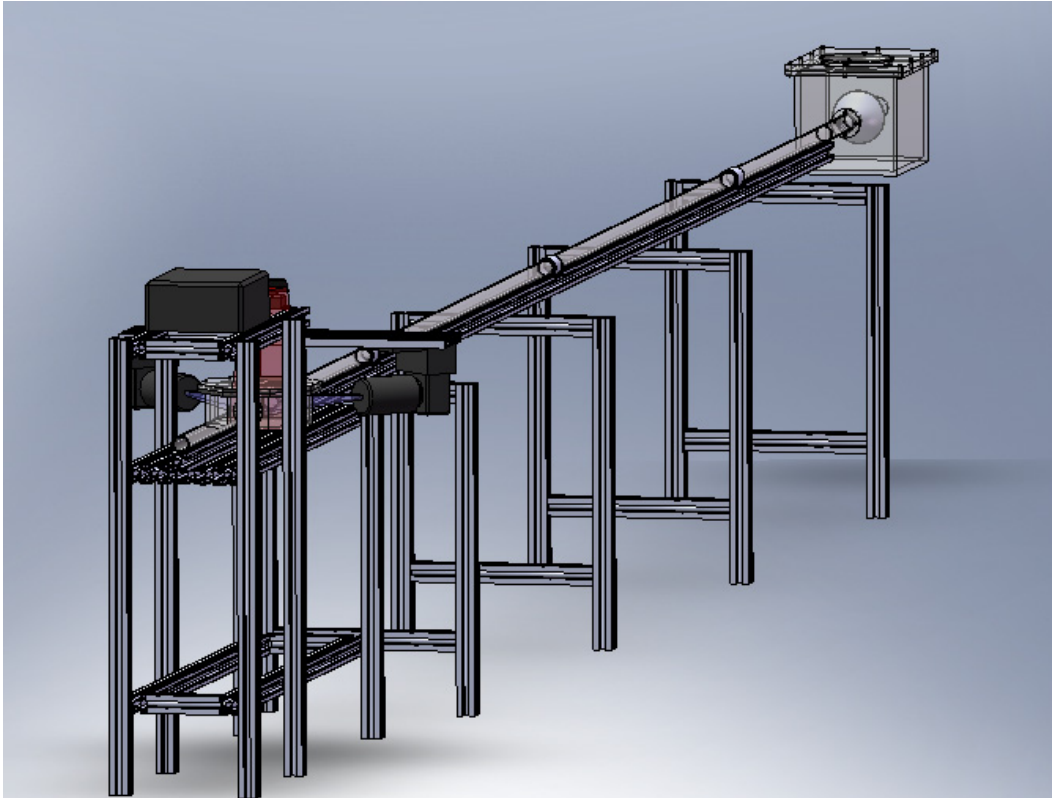


Figura 4.4 – Esquema da estrutura da seção de testes

#### 4.1.4 Medida de pressão

Ao longo do tubo de acrílico da seção de testes foram instaladas sete tomadas de pressão, numeradas de 0 a 6. Estas tomadas foram utilizadas no cálculo do gradiente de pressão axial no escoamento. O espaçamento axial entre as tomadas era de 1m. Foram feitos pequenos furos de 1mm de diâmetro na parede do tubo de forma que as tomadas de pressão não afetassem o escoamento.

Barros [2] cita que 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) o qual sugeriu que erros 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%.

Em cada uma das tomadas foram instaladas válvulas esfera que permitiam a seleção da tomada de pressão a ser medida pelo manômetro.

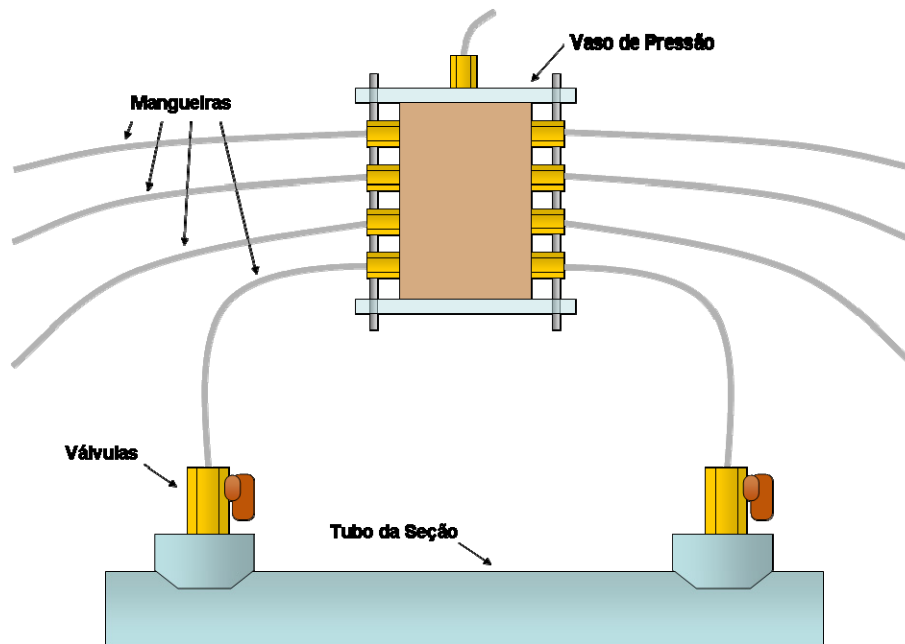


Figura 4.5 – Tomadas de pressão e vaso seletor

De cada válvula saiam mangueiras de plástico tipo poliflux de 1/8 de polegada de diâmetro. A tomada de pressão localizada no centro do comprimento da tubulação era conectada ao manômetro utilizado nas medições, servindo de referência para as medidas. A tomada central foi escolhida como referência, pois assim evitava-se que as perturbações geradas na entrada da tubulação afetassem as medidas realizadas. Além disso, conseguia-se uma maior resolução no manômetro já que a diferença de pressão máxima que podia ser medida no manômetro utilizado era limitada à perda de carga em 3 metros de tubulação. Caso a primeira tomada fosse utilizada como referência, a diferença de pressão máxima corresponderia a 6 m de tubulação, o que para as vazões mais altas, extrapolaria o limite de pressão máxima do manômetro. As outras 6 mangueiras conectavam-se a um cilindro de PVC, que servia como vaso seletor de pressão, como pode ser visto na Figura 4.5. Deste cilindro saía uma mangueira que era conectada na outra entrada do manômetro.

Barros [2] cita Maldonado (2005) que mostrou que, para vazões baixas de água escoando em seção de testes com configuração semelhante à utilizada no presente experimento, a queda de pressão entre duas tomadas de pressão adjacentes poderia ser menor que 1 mm de coluna de água. Levando-se em conta a resolução do instrumento utilizado por Maldonado (2005), a incerteza da medição poderia tornar-se relevante, podendo levar a um valor de fator de atrito incorreto. Para tentar minimizar este problema, no presente trabalho foi utilizado um manômetro do tipo "U" invertido de dois fluidos e inclinado.

Aplicando a equação da hidrostática à configuração deste manômetro, pode-se concluir que, caso sejam utilizados dois fluidos com valores de massa específica próximos, a leitura da pressão no manômetro é bastante amplificada, sendo multiplicada por um fator correspondente à diferença entre as massas específicas dos dois fluidos, como mostra a equação abaixo. A Figura 4.6 mostra uma ilustração do manômetro tipo "U" invertido de dois fluidos.

$$p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho_2)hg \sin \alpha \quad (10)$$

onde,

$h$  = leitura do manômetro [m]

$p_1$  e  $p_2$  = pressão [PA]

$\rho_1$  = massa específica do fluido de trabalho [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_2$  = massa específica do fluido do manômetro [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\alpha$  = ângulo de inclinação do manômetro

O fluido utilizado no manômetro foi o óleo Spindle, fornecido pelo CENPES, com massa específica  $815 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Este óleo foi caracterizado pelo Laboratório de Caracterização de Fluidos da PUC-RIO. Este fluido combinado com a água utilizada como fluido de trabalho nos experimentos proporcionava um fator de amplificação nas leituras do manômetro da ordem de 6 para o manômetro na posição vertical.

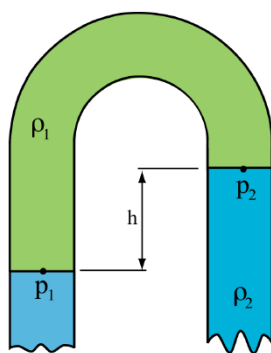


Figura 4.6 – Ilustração do manômetro tipo "U" invertido

O manômetro e a caixa de seleção de pressão utilizados foram construídos por Barros [2] e uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em seu trabalho.



#### 4.1.5 Bomba

A bomba utilizada foi uma bomba de cavidades progressivas, que opera em volume constante, formando cavidades pelas quais o fluido é levado de uma região de menor pressão para uma região de maior pressão. Este tipo de bomba minimiza o cisalhamento do fluido diminuindo a degradação do polímero redutor de atrito.

O motor elétrico era alimentado por um inversor de frequência que permitia o controle da rotação e conseqüentemente da vazão da bomba. Teoricamente a vazão da bomba poderia ser controlada de 0 a 116 l/min, porém, para rotações baixas foi observado um sobreaquecimento do motor causado pela redução do fluxo de ar através das aletas.

#### 4.1.6 Controle de vazão

Para o controle da vazão foi utilizado uma mangueira estrangulada. Um conjunto de porca e parafuso pressionava uma chapa metálica contra a mangueira que conduzia o fluido de trabalho para o tanque inferior, reduzindo a área de passagem. Quando comprimida, a mangueira assumia a forma de uma passagem suave aproximadamente igual à de um venturi, o que reduzia o cisalhamento imposto ao fluido.

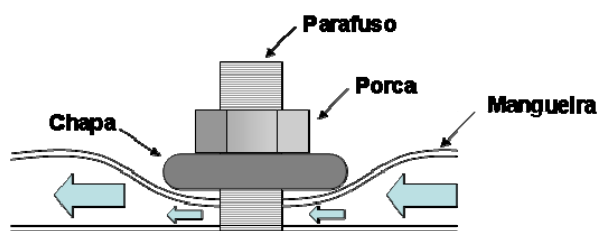


Figura 4.7 – Ilustração do sistema de controle de vazão

Estes cuidados foram tomados, como será visto à frente, em função da possibilidade de degradação do polímero. Uma válvula de controle convencional, seja de globo, gaveta ou esférica, certamente imporá tensões cisalhantes significativas ao fluido o que provocaria a degradação acelerada do polímero redutor de atrito.

Outra vantagem deste sistema era que possibilitava um ajuste fino da vazão a ser utilizada em cada teste.

#### 4.1.7 Medida de vazão

Para a medição da vazão foi utilizado um medidor de vazão eletromagnético fornecido pela Incontrol com faixa de medição de 5 a 180l/min. Este medidor foi calibrado através do Método de Pesagem Estática baseado na norma ISO 4185, sendo sua incerteza da ordem de  $\pm 0,35\%$ . Uma boa precisão na medição de vazão foi fundamental para a obtenção de resultados com baixas incertezas.

#### 4.1.8 Medida de campo de velocidade

Como descrito no capítulo 3, para a medição do campo de velocidades, foi utilizada a técnica de PIV estereoscópica. A Figura 4.8 mostra o esquema da montagem do sistema de PIV.

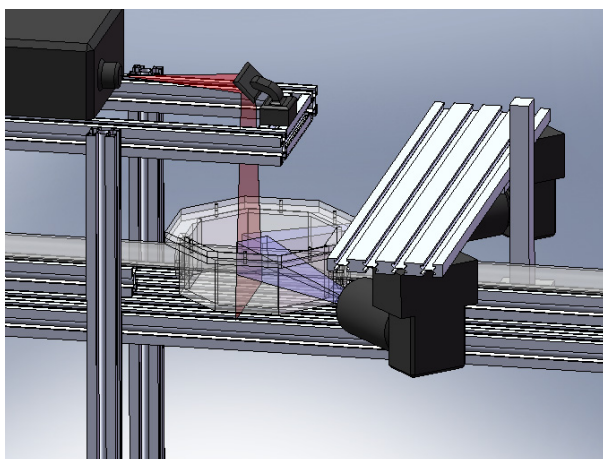


Figura 4.8 – Posicionamento das câmeras, laser e seção de visualização na bancada de testes

O plano de laser, após ser desviado por um espelho, entrava na seção de visualização verticalmente. As câmeras eram posicionadas de forma a visualizarem a seção circular do escoamento iluminada pelo laser através de uma das janelas de 45° da caixa de visualização. O posicionamento das câmeras ortogonal as paredes da caixa de visualização minimizava distorções ópticas.

A fonte de laser foi fixa à estrutura e as câmeras presas a uma mesa de coordenadas, o que possibilitava o movimento das mesmas durante o procedimento de calibração.

Os equipamentos utilizados na medição do campo de velocidade são apresentados abaixo:

- Laser Nd:YAG pulsado de 120mJ por pulso a uma frequência de 15Hz, modelo Big Sky;
- Câmera de 4 Megapixels de resolução (2048 x 2048 pixel, e tamanho do pixel de 7,4 µm) 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 das imagens;
- Software TECPLOT 10, da Amtec, para visualização dos campos de velocidade.

## 4.2 Polímero redutor de atrito

Para analisar o efeito da adição do polímero ao escoamento, os experimentos foram realizados com água (solvente puro) e posteriormente repetidos com o uso do polímero dissolvido em água (solvente + polímero). Foi utilizado o polímero Superfloc A110 da Cytec na concentração de 20 ppm. Este polímero, do tipo poliacrilamida (Figura 4.9) de peso molecular entre 6 e 8x10<sup>6</sup> g/mol, tem bom histórico de uso em redução de atrito e foi utilizado em outros trabalhos tomados como referência [5]. Além disso, este polímero tem boa resistência à degradação, ou seja, o efeito da redução de atrito obtido é duradouro.

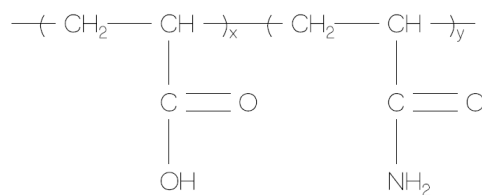


Figura 4.9 – Esquema da cadeia do polímero Superfloc A110.

### 4.2.1 Degradação do polímero

Uma das grandes dificuldades para a construção de seção de testes objetivando o estudo do efeito da redução de atrito através da adição de polímeros é o fato de que os polímeros se degradam muito facilmente. A

passagem dos polímeros por bombas, restrições ou válvulas, pode quebrar suas cadeias reduzindo sua eficácia como agente redutor de atrito. Portanto, conforme descrito anteriormente, foram selecionados acessórios que minimizaram o cisalhamento do fluido ao longo da seção de testes.

Mesmo com todos os cuidados, estudos mostram que a degradação dos polímeros é inevitável. Em Toonder [6], chegou-se a uma curva representativa da degradação deste mesmo polímero. Esta curva, Figura 4.10, mostra como a queda na eficiência do polímero, dada em termos da redução percentual do atrito, pode ser significativa a longo prazo.

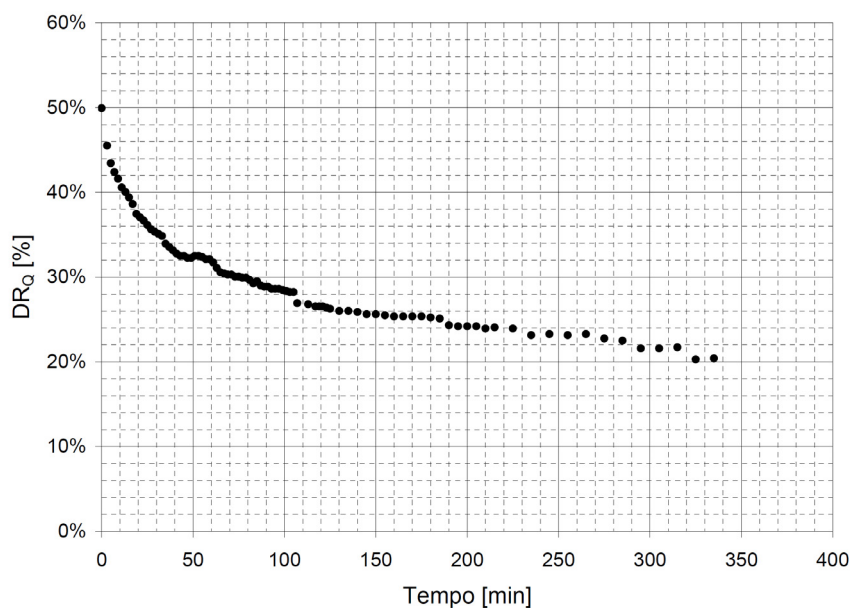


Figura 4.10– Queda na eficiência da redução do atrito do polímero poliacrilamida para uma vazão constante de 60 l/min. Tempo de residência de 2 minutos.

Conforme observado, as propriedades do polímero, em relação à redução de atrito, podem variar dramaticamente. Portanto, os experimentos devem ser realizados em um curto espaço de tempo para que as variações na condição do polímero não influenciem os resultados.

Enquanto que na primeira hora do experimento a degradação (redução do efeito inicial) chega a 36%, na hora subsequente a degradação é de somente 10%. Portanto, além de reduzir o tempo do experimento, é necessário aguardar algum tempo para que a intensa degradação inicial não influencie os resultados. Considerando uma degradação permissível de 2% e um tempo de experimento de 20 minutos, concluímos ser necessário aguardar 1 hora e 10 minutos para o início das medições.