

4 Descrição dos experimentos

Neste capítulo será descrita a seção de testes utilizada para a realização dos experimentos envolvendo o escoamento desenvolvido turbulento através de um duto, usando como fluido de trabalho água e uma solução diluída de água e polímero.

A bancada foi construída em um trabalho anterior [16] e modificada no presente trabalho, de tal forma que permitisse a realização de medidas de queda de pressão, além da medição de velocidades e das flutuações da intensidade de turbulência utilizando a técnica óptica PIV.

Primeiramente, será apresentada uma visão geral da seção de testes e, em seguida, serão descritos seus elementos constituintes.

4.1. Seção de testes

A seção de testes é apresentada esquematicamente na Figura 4.1.

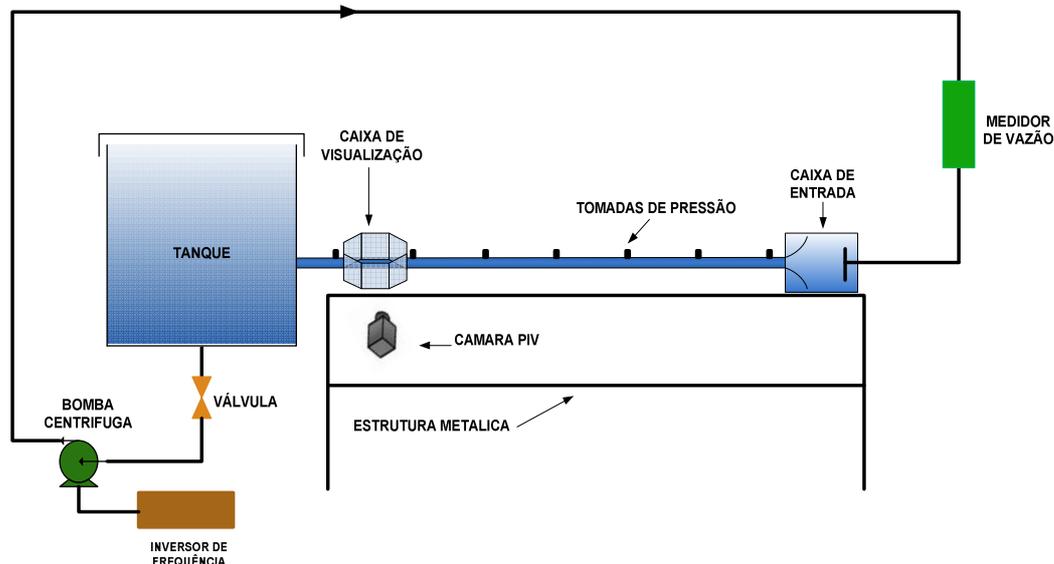


Figura 4.1 – Figura esquemática da seção de testes.

Como uma descrição detalhada da construção da seção de teste é apresentada no trabalho de Pereira [16], optou-se por uma descrição resumida

do seu princípio de funcionamento e das mudanças introduzidas no presente trabalho.

A seção consiste de um duto de acrílico de 34 milímetros de diâmetro interno e 6 metros de comprimento, resultando em uma relação L/D (comprimento dividido pelo diâmetro) de 176. Se considerarmos um número de Reynolds máximo de 80.000, o comprimento necessário para o desenvolvimento hidrodinâmico do é de 1 metro. Desta forma, verifica-se que a seção utilizada garante a condição de escoamento desenvolvido na região da seção de medição.

O fluido é bombeado de um reservatório aberto para a atmosfera por uma bomba centrífuga. A vazão na seção de teste era controlada pela variação da rotação do motor da bomba, utilizando-se para isso um inversor de frequência. A montante da bomba 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. A parte do tubo de acrílico na região de medição foi substituída por um tubo de paredes finas para permitir as medições do campo de velocidade junto à parede com menores efeitos de refração óptica utilizando a técnica óptica *PIV*. Após passar pela seção de medição o fluido retornava ao tanque, caracterizando uma operação em circuito fechado. Este mesmo tanque era também usado para a preparação das soluções de água com polímero utilizada nos experimentos.

4.1.1. Sistema de alimentação de fluido

O fluido de trabalho era fornecido à seção de testes por meio de uma bomba centrífuga. Um tanque cilíndrico com capacidade de 150 litros foi utilizado como reservatório para o fluido de trabalho. Este tanque foi posicionado sobre uma estrutura de aço. Foi utilizada uma mangueira de 75 mm de diâmetro para conectar o fundo do tanque à sucção da bomba. Uma válvula de esfera de segurança de PVC foi instalada na saída do tanque. Na descarga da bomba foi utilizada uma tubulação de PVC de 50 mm de diâmetro que ia até a caixa de entrada no início da tubulação da seção de testes.

No trajeto da linha de 50 mm para a caixa de entrada foi instalado um medidor de vazão.

4.1.2. Bomba

A bomba utilizada foi uma bomba centrífuga fabricada em bronze que evitava a contaminação da água com depósitos oriundos de corrosão.

O motor elétrico que acionava a bomba de potência máxima de 3 HP e era alimentado por um inversor de frequência marca Danfoss, com alimentação trifásica em 200-240 VCA e 50/60 Hz que proporcionava uma saída de 0 a 240 VCA e frequência de 0 a 60 Hz, permitindo o controle da rotação e, conseqüentemente, da vazão de fluido bombeado. A vazão da bomba poderia ser controlada de 0 a 116 l/min.

4.1.3. Medida de pressão

Para obter o gradiente de pressão axial no escoamento foram instaladas ao longo do tubo de acrílico 7 tomadas de pressão estática na direção axial, numeradas de 0 a 6. Para minimizar a incerteza da medição, foram feitos pequenos furos de 1mm de diâmetro no tubo de forma que as tomadas de pressão não afetassem o escoamento [5].

O espaçamento entre as tomadas de pressão era de 1 m. Em cada tomada foi instalada uma válvula de esfera permitindo selecionar as tomadas a serem medidas pelo manômetro, como pode ser visto na Figura 4.2.

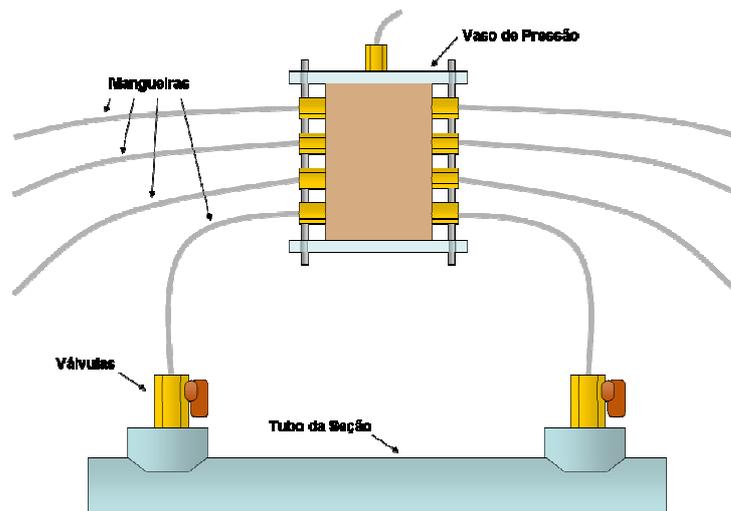


Figura 4.2 – Tomadas de pressão e vaso seletor[5]

A tomada de pressão número dois era conectada ao manômetro utilizado nas medições, servindo de referência para as medidas. As outras 6 mangueiras conectavam-se a um cilindro de PVC, que servia como vaso seletor de pressão,

como pode ser visto na Figura 4.2. Deste cilindro saia uma mangueira que era conectada na outra entrada do manômetro.

No presente trabalho foram utilizados dois manômetros, um do tipo “U” invertido de dois fluidos e um manômetro inclinado de mercúrio.

A aplicação da equação da hidrostática ao manômetro do tipo “U” invertido de dois fluidos mostra que a leitura da pressão no manômetro é multiplicada por um fator correspondente à diferença entre as massas específicas dos dois fluidos, como mostra equação (4-1)

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_1 - \rho_2)gh \quad (4-1)$$

onde,

h = leitura do manômetro [m]

p_1 e p_2 = pressão [Pa]

ρ_1 = massa específica do fluido de trabalho [kg/m³]

ρ_2 = massa específica do fluido do manômetro [kg/m³]

O fluido utilizado no manômetro foi o óleo Morlina, com massa específica 889 kg/m³. A massa específica deste óleo foi determinada no Laboratório de Caracterização de Fluidos da PUC–RIO, laboratório certificado na Rede Brasileira de Calibração para a medição desta grandeza.

Nos ensaios com valores da vazão elevados, a queda de pressão na seção de testes ultrapassava o valor máximo que podia ser lido com o manômetro de dois fluidos. Nestes casos utilizou-se um manômetro inclinado com mercúrio.

O manômetro de dois fluidos e a caixa de seleção de pressão utilizados foram construídos por Barros [5] e uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em seu trabalho.

4.1.4. Medida de vazão

A medição da vazão do fluido de trabalho foi realizada por um medidor eletromagnético marca Ciasey com faixa de medição de 5 a 170 l/min. A incerteza deste medidor constante em seu certificado de calibração era da ordem de $\pm 0,25\%$ F.E.

Este medidor foi calibrado através do Método de Pesagem Estática baseado na norma ISO 4185.

4.1.5. Tubulação e Estrutura de fixação

O tubo utilizado nos testes era de acrílico, possuindo diâmetro interno de 34 mm e comprimento total de 6 metros. O tubo era fabricado em trechos de 2 metros de comprimento e unido por flanges especialmente construídos que, além de garantir a vedação, garantiam também um perfeito alinhamento dos diâmetros internos dos trechos de tubo, eliminando descontinuidades na parede que poderiam afetar o escoamento.

Para obter resultados confiáveis era necessário garantir o perfeito alinhamento em toda a seção, além de evitar as vibrações induzidas pelo escoamento. Para isso, foi construída uma estrutura de perfis Bosch de 40 x 40 mm de seção reta, tornando a estrutura da seção de teste um único corpo rígido, onde toda a tubulação foi apoiada. A Figura 4.3 ilustra uma visão geral desta seção de testes já com os principais componentes que a compõem.



Figura 4.3 – Esquema da estrutura da seção de testes.

4.1.6. Caixa de entrada

A caixa de entrada era uma caixa de acrílico com dimensões de 300 x 300 x 350 mm, cuja função era homogeneizar o escoamento na entrada do tubo da seção de teste. Um bocal instalado no início do tubo de acrílico, ainda dentro da caixa, tinha também a função condicionar o escoamento na entrada do tubo da

seção de testes. A Figura 4.4 apresenta uma vista da caixa de entrada construída.

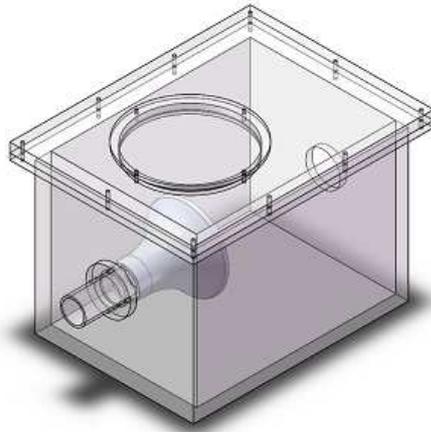


Figura 4.4 – Caixa de entrada para condicionamento do escoamento na entrada da seção de testes.

4.1.7. Sistema PIV

Para a medição do campo de velocidade foi utilizada a técnica PIV-bidimensional, descrita no Capítulo 3.

A Figura 4.5 mostra o esquema da montagem dos principais componentes que forma o sistema PIV, que serão descritos a seguir.

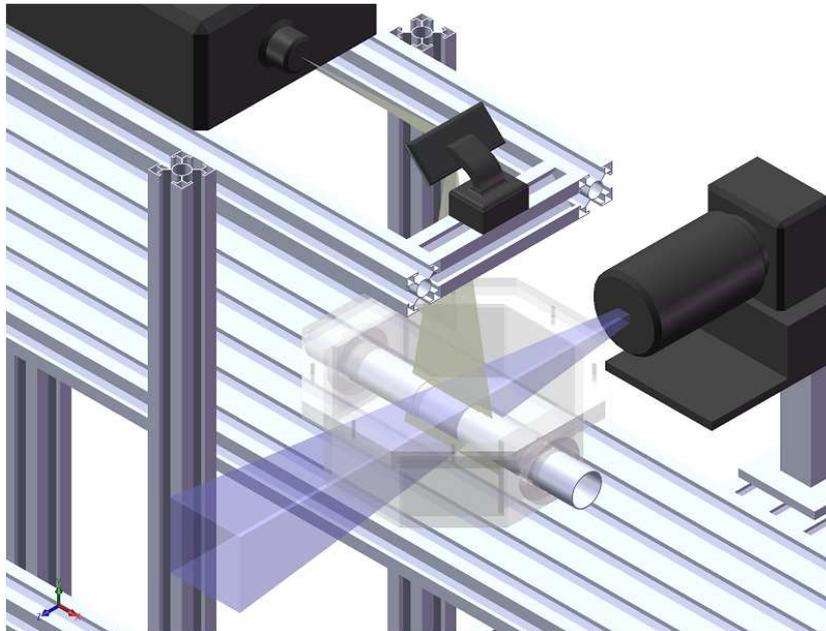


Figura 4.5 – Posicionamento das câmeras, laser e seção de visualização na bancada de testes

4.1.7.1.

Laser e plano de iluminação

Foi utilizado um laser pulsado de dupla cavidade Nd:YAG de 120mJ por pulso a uma frequência de 15Hz, modelo Big Sky. O laser emite luz no comprimento de onda de 532 nm, com pulsos de duração de 5 ns.

O plano de laser ilumina a seção transversal do tubo, após ser desviado por um espelho fixado em um suporte com ângulo de 45°, acima da seção. Para a formação do plano de laser foram usadas duas lentes: uma cilíndrica que determina a abertura do plano de luz e uma esférica que determina a espessura do plano de luz.

Para o sistema PIV 2D é essencial escolher as lentes ideais para obter um arranjo óptico ótimo para que feixe tenha a menor espessura na região de interesse, e para que a intensidade da luz seja uniforme em toda a área de interesse. A escolha das lentes depende da dimensão do plano a ser iluminado.

Nos nossos experimentos foi usada uma combinação de uma lente cilíndrica com uma distância focal de -25 mm e uma lente esférica com uma distância focal de 500 mm. Este arranjo gerava um plano de aproximadamente 0,5 mm de espessura.

4.1.7.2.

Partículas traçadoras

Como partículas traçadoras foram usadas esferas de vidro ocas com revestimento de prata (Potters Industries). O diâmetro médio destas partículas é de 13µm, e sua massa específica é de 1,60 g/cm³.

4.1.7.3.

Caixa de visualização

O uso da técnica PIV para a medição do escoamento através de um tubo de seção circular, como no presente caso, é dificultado pela refração ótica na superfície curva do tubo. A refração dos raios ópticos é especialmente problemática quando deseja-se realizar medições junto à parede do tubo. A curvatura da parede, aliada à diferença entre os índices de refração do ar, acrílico e água, produz distorções que impedem a visualização da região da parede. Para minimizar este problema, uma pequena parte da tubulação onde seriam realizadas as medições foi substituída por uma seção de teste especialmente projetada. A seção de teste consistia de uma caixa de

visualização octogonal de acrílico, montada ao redor do tubo, como indicado na Figura 4.6. O espaço entre o tubo e as paredes da caixa era preenchido com água. Desta forma, a visualização do escoamento no interior do tubo era feita através de uma parede plana, sendo que o caminho óptico de um raio proveniente do interior do tubo encontrava água no interior e exterior do tubo. Mesmo com a utilização da caixa de visualização ainda foram identificadas distorções na imagem das partículas traçadoras junto à parede do tubo. Este problema foi contornado de forma satisfatória pela diminuição da espessura da parede do tubo de acrílico na região de medição. Para isso, a parede do tubo de acrílico foi usinada nesta região até uma espessura de 0,5 mm, espessura mínima considerada segura do ponto de vista estrutural. Os resultados obtidos com a combinação da caixa de visualização com o tubo de parede fina foram considerados muito bons, como será apresentado mais adiante.

Deve-se mencionar que a concepção da caixa de visualização com formato octogonal tinha o objetivo de permitir a realização de medições utilizando a técnica PIV estereoscópica. Neste caso duas câmeras observariam o escoamento através das paredes inclinadas da caixa de visualização. No presente trabalho utilizou-se a técnica PIV bi-dimensional onde a câmera visualizava o escoamento por uma das paredes paralelas ao plano de iluminação longitudinal, como indicado na Figura 4.5. Pode-se observar na figura que o plano de iluminação cortava a seção de testes através da parte superior da caixa de visualização enquanto a câmera era colocada a 90°.

A caixa de visualização estava localizada a 4 m da entrada do tubo, onde o escoamento encontrava-se completamente desenvolvido.

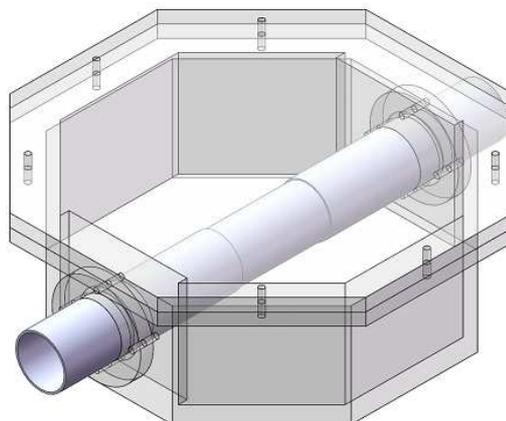


Figura 4.6 – Seção de visualização octogonal em acrílico mostrando o tubo de acrílico com parede usinada até uma espessura de 0,5 mm. .

4.1.7.4. Sincronizador

Para sincronizar os pulsos dos lasers com a captura de imagens pela câmera digital, foi usado um sincronizador de fabricação da TSI, modelo 610034. O sincronizador era controlado pelo software Insight 3G versão 9.0.4.0, também desenvolvido pela TSI.

4.1.7.5. Câmera digital

Na técnica PIV-bidimensional a câmera era colocada de forma ortogonal ao plano laser. As imagens foram capturadas com uma resolução de 2048 x 2048 pixels utilizando uma câmera CCD de fabricação da TSI, modelo 4MP. O sensor da câmera apresentava tamanho do pixel de 7,4 μ m x 7,4 μ m, com uma taxa máxima de captura de 16 quadros/seg. A lente selecionada para os ensaios foi uma Nikon AF Nikkor de 60 mm, com abertura máxima de 1:1.40. .

A fonte de laser foi fixada à estrutura de alumínio formada pelos perfis Bosch, enquanto a câmera foi fixada a uma mesa de coordenadas tri-axial, o que possibilitava o seu movimento durante o posicionamento e ajuste de foco.

4.2. Polímero redutor de atrito

Os experimentos foram realizados com água (solvente puro) e logo repetidos com a solução polimérica (solvente + polímero) com o fim de analisar o efeito da adição do polímero ao escoamento.

O polímero utilizado em nossos experimentos era o Superfloc A110 (Cytec Industries), uma poliacrilamida parcialmente hidrolisada (PAMH), cuja estrutura é indicada de modo esquemático na Figura 4.7. O polímero Superfloc A110 tem um peso molecular de 6-8x10⁶ g/mol, e tem aproximadamente 10⁵ monômeros, de acordo com o fabricante. A vantagem deste polímero é a sua resistência à degradação mecânica, superior à de outros polímeros disponíveis, segundo os trabalhos tomados como referência. [8]

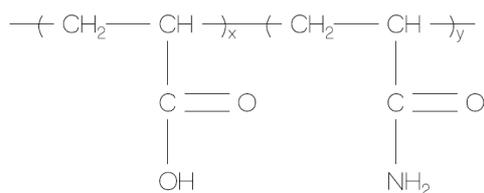


Figura 4.7 – Esquema da estrutura do polímero Superfloc A110 utilizado nos experimentos.

4.2.1. Degradação do polímero

Um dos problemas envolvidos na utilização de polímeros redutores de atrito é sua degradação sob a ação de escoamentos turbulentos. A degradação é resultado da quebra das cadeias moleculares longas seja por efeito mecânico do escoamento, seja devido a reações químicas, ação de bactérias ou efeitos térmicos.

Os efeitos mecânicos reduzem o peso molecular dos polímeros pois promovem a quebra das cadeias longas, diminuindo sua capacidade como redutor de atrito. Este é um ponto importante, uma vez que nossa configuração experimental é um circuito fechado, de modo que os polímeros estão constantemente sujeitos a deformações, especialmente na passagem pela bomba centrífuga.

Apesar do cuidado na seleção de acessórios na seção de testes que minimizassem o cisalhamento ao qual o fluido era submetido, a degradação era inevitável. Toonder [8], apresenta uma curva representativa da degradação deste mesmo polímero usado em seus experimentos, também realizados em circuito fechado, porém utilizando uma bomba de discos, teoricamente mais adequada para manter a integridade do polímero. Apesar da diferença das bombas utilizadas, no presente trabalho encontrou-se um comportamento semelhante à curva de degradação apresentada por Toonder, como pode ser observado na Figura 4.8. Nesta figura pode-se verificar como a queda na eficiência do polímero, dada em termos da redução percentual do coeficiente de atrito, pode ser significativa a longo prazo.

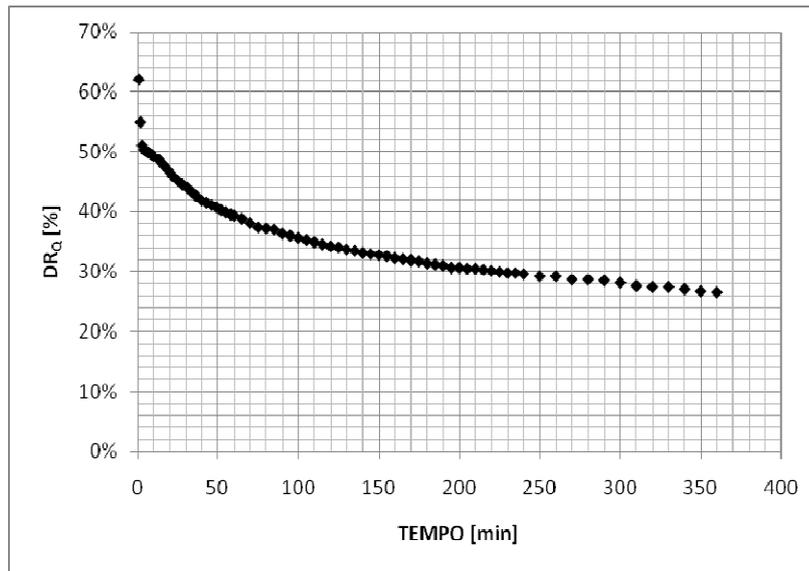


Figura 4.8- Queda na eficiência da redução do atrito do polímero poliácridamida Superfloc A110 para um número de Reynolds de $3,14 \times 10^4$ e uma concentração de 20 ppm.

Observa-se que a capacidade de redução de atrito do polímero pode variar significativamente. Portanto, os experimentos devem ser realizados em um curto espaço de tempo para que a degradação do polímero não influencie os resultados.

Verifica-se na Figura 4.8 que na primeira hora de operação do experimento a degradação chega a 22 pontos percentuais, enquanto que na hora subsequente a degradação é de somente 5 pontos percentuais. Considerando-se uma degradação permissível de 2 pontos percentuais ao longo da duração típica de um experimento de cerca de 20 minutos, concluímos que era necessário aguardar-se cerca 1 hora e 30 minutos antes de iniciar-se as medições, de modo que a degradação não influenciasse significativamente nos resultados obtidos.

4.3. Redução dos dados globais do escoamento

A seguir são apresentadas as equações e os procedimentos utilizados na obtenção do número de Reynolds e o fator de atrito a partir dos dados experimentais medidos.

4.3.1. Número de Reynolds

O número de Reynolds foi determinado a partir da vazão volumétrica medida no medidor eletromagnético utilizando a seguinte expressão,

$$\text{Re} = \frac{\rho U_b D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\pi D \mu} \quad (4-2)$$

onde,

ρ : massa específica do fluido (kg/m^3);

μ : viscosidade dinâmica do fluido ($\text{kg/m}^*\text{s}$);

Q : vazão volumétrica de fluido (m^3/s);

D : diâmetro do tubo (m);

A massa específica e viscosidade da água para o cálculo do fator de atrito e do número de Reynolds foram avaliadas na temperatura medida durante os experimentos por meio de equações que levam em conta dependência destas propriedades com a temperatura[27]:

$$\rho = \frac{\sum_0^5 a_i T_f^i}{1 + b T_f} \quad (4-3)$$

onde,

$$a_0 = 0.9998396 \times 10^3$$

$$a_1 = 18.224944$$

$$a_2 = -7.922210 \times 10^{-3}$$

$$a_3 = -55.44849 \times 10^{-6}$$

$$a_4 = 149.7562 \times 10^{-9}$$

$$a_5 = -393.2952 \times 10^{-12}$$

$$b = 18.159725 \times 10^{-3}$$

$$\mu_{H_2O} = (2.414 \times 10^{-5}) \times 10^{\frac{247.8}{T_f - 140}} \quad (4-4)$$

onde,

$$[\mu] = Pa.s$$

$$[T_f] = K$$

Devido à recirculação do fluido pela seção de testes, verificou-se que a temperatura do fluido subia em torno de 2°C durante os ensaios. Esta variação poderia influenciar os resultados e teve que ser considerada.

4.3.2. Fator de Atrito

O fator de atrito foi determinado utilizando-se a equação (4-5) indicada a seguir. A determinação do gradiente de pressão, $\Delta P/L$, necessário para o cálculo do fator de atrito foi realizada através do ajuste de uma reta aos dados de pressão ao longo do tubo da seção de testes, utilizando-se o método dos mínimos quadrados. O coeficiente angular da reta ajustada representa a gradiente de pressão desejado.

$$f = \frac{2(\Delta P / L)D}{\rho(Q / A)^2} \quad (4-5)$$

onde, $\Delta P/L$ é o gradiente de pressão, D o diâmetro do duto, ρ é a massa específica do fluido, Q é a vazão e A é a área do duto.

4.3.3.Exemplo de redução de dados para cálculo do fator de atrito

A seguir é apresentado um exemplo numérico do procedimento de redução de dados para cálculo do fator de atrito descrito na seção anterior. Para este exemplo foi utilizado um ensaio realizado com água a um número de Reynolds de 4.13×10^4 .

Após a medição do diferencial de pressão no manômetro inclinado, preparou-se uma tabela associando as posições das tomadas com as leituras do manômetro. A Tabela 4.1 apresenta estes dados.

Na tabela, a primeira coluna indica a posição da tomada de pressão, a segunda coluna os dados de pressão lidos no manômetro. A terceira coluna indica os dados de pressão em milímetros de coluna de água, são obtidos depois de multiplicar por o fator de correção o qual converte as dados lidos no manômetro em dados em unidades de milímetros de água. A quarta coluna da tabela foi obtida através da utilização da equação do manômetro, equação (4-1). Os dados de pressão e posições são então plotados em um gráfico como o apresentado na Figura 4.9 Neste gráfico é apresentada a curva resultante do ajuste de uma reta aos dados pelo método dos mínimos quadrados. A equação da reta é indicada no gráfico, onde pode-se observar o valor do coeficiente angular igual a 0,4018 Pa/m que corresponde ao gradiente de pressão desejado. A estimativa da incerteza na pressão é apresentada no Apêndice (A). Para o caso apresentado a incerteza no gradiente de pressão varia entre 1 e 2%.

Tabela 4.1 Dados obtidos na leitura do manômetro e a pressão. $Re = 4.13 \times 10^4$.

POSIÇÃO	PRESSÃO	PRESSÃO	PRESSÃO	PRESSÃO
m	mm lidos	mmca	Pa	kPa
2	0	0,00	0	0
3	3.5	57.63	562.571182	0.562571
4	6	98.79	964.407741	0.964408
5	8.5	139.95	1366.2443	1.366244
6	10	164.65	1607.34623	1.607346

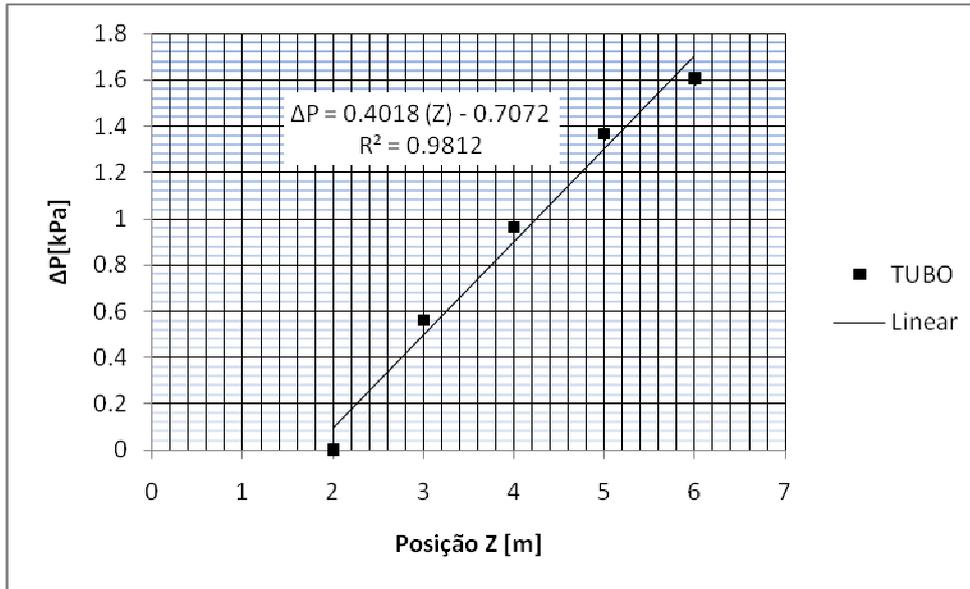


Figura 4.9 – Gráfico Pressão versus Posição para $Re = 4.13 \times 10^4$.

O fator de atrito obtido através da Eq. (4-1) utilizando a gradiente de pressão calculado axial foi igual a 0,0226. A incerteza experimental associada a este valor foi de $\pm 4\%$, de acordo com os procedimentos descritos no Anexo A.