Este capítulo irá primeiramente apresentar os resultados dos ensaios com água pura comparando-os com os resultados conhecidos da literatura para a validação da seção de testes e dos procedimentos adotados. Em seguida serão apresentados os resultados, de perfis de velocidade média, instantânea e perfis turbulentos, obtidos com uso de solução de água e polímero. Os resultados obtidos para a queda de pressão são apresentados na forma de fatores de atrito em função do número de Reynolds.

Foram realizados experimentos para quatro vazões distintas, com e sem a adição de polímero. Para cada ensaio foram computados 600 campos de velocidade instantâneos.

6.1 Validação da seção de testes

A seção de testes, projetada e construída conforme descrito em detalhes no Capítulo 4, foi qualificada através da realização de experimentos para a determinação do fator de atrito e medição dos perfis de velocidade para o caso de escoamento hidrodinamicamente desenvolvido através de um tubo de seção circular. Os testes realizados abrangeram somente o regime de escoamento turbulento onde observa-se a redução de atrito pela adição de polímeros. Foram feitos alguns ensaios preliminares no regime laminar e de transição laminarturbulento para verificação qualitativa dos campos de velocidade obtidos através da técnica PIV estereoscópica.

6.1.1 Fator de atrito

O Processo de validação da seção de testes teve início com a análise da queda de pressão ao longo da tubulação e do fator de atrito para o escoamento hidrodinamicamente desenvolvido. A análise da distribuição axial das pressões indica o grau de desenvolvimento do escoamento e o fator de atrito, calculado

com base na distribuição das pressões, nos permite avaliar de forma quantitativa a qualidade da seção de testes e dos procedimentos experimentais empregados.

Os resultados obtidos foram comparados com o fator de atrito semiempírico de Blasius para escoamento desenvolvido de fluido newtoniano em tubo de parede lisa através da eq.(3), apresentada na seção 2.2.

O procedimento experimental adotado para determinar o fator de atrito hidrodinâmico era baseado na determinação do gradiente de pressão na região de escoamento desenvolvido. A Figura 6.1 apresenta um conjunto de medições típicas para a variação da pressão ao longo da seção de testes. O caso apresentado na figura corresponde a um número de Reynolds de 4,38 x 10⁴. A diferença de pressão em relação à quarta tomada de pressão (localizada a 3 metros da entrada do tubo), dada em kPa, é apresentada em função da coordenada axial ao longo da seção de testes, dada em metros. Isto explica os valores negativos para queda de pressão abaixo e positivos acima de 3 metros.



Figura 6.1 – Distribuição de pressões ao longo da seção de testes para Re = $4,38 \times 10^4$.

Observa-se na Figura 6.1 que a distribuição de pressões através da seção apresenta um comportamento linear desde a entrada do duto. Isso ocorre porque para este número de Reynolds o desenvolvimento do escoamento se dá muito rapidamente. A equação de uma reta foi ajustada aos dados de pressão, em função da coordenada axial, através de um procedimento baseado no método dos mínimos quadrados. Neste procedimento os dois primeiros pontos de medição de pressão, que se encontravam mais próximos à entrada, foram ignorados com o objetivo de se obter uma aproximação do gradiente na região desenvolvida do escoamento. O coeficiente angular da reta obtida representa o gradiente de pressão $\Delta P/L$ utilizado no cálculo do fator de atrito, f. O fator de atrito foi calculado conforme a eq.(11) abaixo.

$$f = \frac{2(\Delta P/L)D}{\rho(Q/A)^2}$$
(11)

Onde:

f	= Fator de atrito
ΔP	= Queda de pressão entre os pontos de medição
L	= Distância entre os pontos de medição
D	= Diâmetro da tubulação
ρ	= Massa específica do fluido
Q	= Vazão volumétrica
A	= Área da seção da tubulação

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. Como há recirculação do fluido pela seção de testes, a temperatura do fluido sobe em torno de 3°C durante o ensaio. Esta variação poderia influenciar os resultados e teve que ser considerada.

Em todos os testes, para diferentes números de Reynolds, obteve-se uma distribuição linear da queda de pressão indicando que o escoamento estava desenvolvido.

A Figura 6.2 apresenta os fatores de atrito obtidos em diversos experimentos para diferentes números de Reynolds. O mesmo gráfico apresenta também o fator de atrito de Blasius para tubo liso calculado pela eq.(3), apresentada na seção 2.2 utilizado para a validação da seção de testes.



Figura 6.2 – Comparação dos fatores de atrito previstos pela equação de Blasius com as medições realizadas para a faixa de Reynolds investigada. O fluido de trabalho é a água sem polímero.

A análise dos resultados apresentados mostra que a seção de testes construída produz resultados confiáveis com pouco desvio em relação aos resultados aceitos na literatura. As maiores discrepâncias ocorreram para valores de número de Reynolds baixos onde as incertezas associadas à vazão são grandes (por limitações do medidor de vazão) e onde a queda de pressão é muito reduzida, o que produz elevados níveis de incerteza devido ao manômetro utilizado. Para a faixa de Reynolds de interesse, Re > 7 x 10^3 (onde o efeito da redução de atrito é mais apreciável) as medidas obtidas são consideradas satisfatórias.

6.1.2 Perfis de velocidade média

Em cada experimento realizado, foram obtidos 600 campos de velocidade instantânea para o cálculo do campo médio de velocidade.

Figura 6.3 apresenta um exemplo de campo instantâneo, tri-dimensional de velocidade em uma seção reta do tubo. Na figura, a magnitude do vetor velocidade, dada em metros por segundo, é apresentada na escala de cores associada à legenda. O número de campos de velocidade utilizado na determinação do campo da velocidade média, reduzido se comparado a algumas referências mencionadas neste trabalho, foi limitado pela capacidade computacional disponível no laboratório, tendo em vista que a técnica PIV estereoscópica demanda um processamento significativamente mais pesado, se comparado ao PIV convencional. Apesar do número limitado de campos de velocidade, os perfis se apresentaram bem uniformes com uma forma compatível com aquela esperada para perfis turbulentos em escoamento hidrodinamicamente desenvolvido.



Figura 6.3 – Campo tri-dimensional, instantâneo de velocidade para Re = $4,2 \times 10^4$. A região azul em torno se localiza fora da seção de escoamento do tubo, devendo, portanto ser desconsiderada.

Na apresentação dos resultados que se segue serão utilizados os eixos coordenados tal como definido na Figura 6.3. As componentes da velocidade instantânea em um ponto do escoamento serão denominadas U(t), V(t) e W(t)respectivamente nas direções dos eixos X,Y e Z. É conveniente de definir essas componentes de velocidade em como:

$$U(t) = \overline{U} + u'(t); V(t) = \overline{V} + v'(t); W(t) = \overline{W} + w'(t)$$
(12)

onde, u', v' e w' são as flutuações instantâneas de velocidade nas respectivas direções. \overline{U} , \overline{V} e \overline{W} são as velocidades médias pontuais calculadas a partir dos N campos instantâneos de velocidade conforme as equações (13).

$$\overline{U} = \sum_{i=1}^{N} \frac{U_i}{N}; \quad \overline{V} = \sum_{i=1}^{N} \frac{V_i}{N}; \quad \overline{W} = \sum_{i=1}^{N} \frac{W_i}{N}$$
(13)

Figura 6.4 mostra uma imagem do campo médio de velocidade tridimensional gerado a partir dos 600 campos de velocidade medidos. Nota-se que o campo obtido é bastante homogêneo e simétrico. É possível observar que há uma distorção do campo próximo às paredes laterais. Essa distorção foi causada pela baixa intensidade de iluminação do laser nessas regiões. Como o plano de laser utilizado era emitido na vertical, formavam-se áreas de sombra próximas às paredes laterais. Para melhorar a luminosidade nessas regiões seria necessário reduzir a espessura da parede do tubo de acrílico, ou utilizar, na seção de visualização um tubo em material com índice de refração igual ao da água.



Figura 6.4 – Campo tridimensional médio de velocidade para Re = $4,2 \times 10^4$.

Devido à distorção observada nas laterais da seção de visualização, os perfis do escoamento foram traçados no plano YZ, região onde a distorção não foi verificada. Portanto, nos perfis, a componente U da velocidade representa a velocidade tangencial, a componente V representa a velocidade radial e a componente W a velocidade axial.

A Figura 6.5 mostra os perfis médios de velocidade axial \overline{W} , obtidos para quatro diferentes números de Reynolds. Como neste plano não há distorções significativas, foi possível medir valores de velocidade em posições próximas à parede. Para a apresentação dos perfis, para o eixo das abscissas será utilizado r/D onde r representa a distância do ponto até o centro da tubulação.



Figura 6.5 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $\overline{W}/\overline{W}$ máx, em função de r/D para diversos valores do número de Reynolds. A coordenada radial, associada ao eixo Y, representa a distância do ponto até o centro do tubo.

Para uma análise do gradiente de velocidade próximo à parede, é conveniente representar o perfil médio adimensional de velocidades em unidades de parede y^+ e com velocidades normalizadas pela velocidade de atrito, u_r .

$$u_{\tau} = \frac{D}{4\rho} \left| \frac{\Delta P}{\Delta L} \right|; \tag{14}$$

onde,

D = Diâmetro da tubulação

 ρ = Massa específica do fluido

 ΔP = Queda de pressão

 ΔL = Comprimento

е

$$y^{+} = \frac{y \cdot u_{\tau}}{v}; \tag{15}$$

onde,

^y = Posição media a partir da parede da tubulação

v = Viscosidade cinemática

Deve-se notar que, como a velocidade de atrito u_{τ} é proporcional à queda de pressão, quanto maior a vazão maior o valor de y^+ . Ou seja, para vazões maiores, o menor valor de y^+ que se consegue medir aumenta.

Com o objetivo de validar a seção de testes e as técnicas de medição utilizadas, foram determinados campos médios de velocidade a partir de medidas de 600 campos instantâneos de velocidade para números de Reynolds iguais a 5,4 x 10^3 e 1,1 x 10^4 . No primeiro caso foi possível chegar bem próximo à parede, atingindo-se y^+ = 1,3. A Figura 6.6 mostra os resultados obtidos para o perfil médio de velocidade adimensional dado em coordenadas de parede, W^+ versus y^+ . Nesta mesma figura é apresentada a lei da parede, para fluido Newtoniano. Para a subcamada viscosa:

$$W^+ = y^+$$
 se $0 < y^+ < 5$, (16)

e para a camada logarítmica:

 $W^+ = 2.5 \ln y^+ + 5.5$ se $y^+ > 30$



Figura 6.6 – Perfil médio adimensional de velocidades medido com PIV para Reynolds igual a 5,5 x 10^3 e 1,1 x 10^4 .

Observa-se que os dados obtidos não seguem a lei para a camada logarítmica estando deslocados em relação ao perfil aceito na literatura. Para o caso de Reynolds 5,5 x 10^3 (onde o perfil obtido está deslocado para baixo em relação ao teórico) este desvio é atribuído à incerteza na medição da queda de pressão para baixas vazões (ver Figura 6.2), o que afeta diretamente a velocidade de atrito u_{τ} utilizada como referência para normalizar as velocidades.

Para Reynolds igual 1,1 x 10⁴, onde as incertezas associadas à queda de pressão e à vazão são muito menores, observa-se que os dados estão levemente deslocados para cima em relação à lei logarítmica. Este deslocamento não representa um erro e está associado ao baixo valor do número de Reynolds. Este deslocamento foi confirmado experimentalmente e através de simulações DNS por den Toonder [7].

(17)

Para Reynolds igual a 5,5 x 10^3 , o centro do tubo está localizado na coordenada y^+ = 207, já para Reynolds igual a 1,1 x 10^4 o ponto central da tubulação está localizado em y^+ = 335, ambas posições fora da escala da Figura 6.6.

Os resultados obtidos estão de acordo com as referências utilizadas neste trabalho o que confirma que a seção de testes e técnicas utilizadas estão adequadas.

6.1.3 Perfis de grandezas turbulentas

A exatidão e confiabilidade dos dados de turbulência do escoamento estão relacionadas ao número de imagens, ou campos instantâneos analisados. A turbulência está associada a flutuações aleatórias da velocidade no tempo $(u'(t), v'(t) \in w'(t))$ em um dado ponto do escoamento. Portanto, quanto maior o número de campos instantâneos capturados, melhor a qualidade estatística dos resultados. Todas as estatísticas de turbulência apresentadas foram calculadas a partir de 600 campos independentes de velocidade instantânea, valor este considerado abaixo do ideal para a determinação das grandezas turbulentas de interesse Como dito anteriormente, o número de campos adquiridos foi limitado pela capacidade computacional disponível. Por esta razão a validação das dos resultados obtidos para as grandezas turbulentas foi fundamental para a garantia de resultados confiáveis. É importante, portanto, definirmos: velocidade turbulenta e tensão de Reynolds. A velocidade turbulenta é a média *rms (root mean square)* das flutuações de velocidade instantâneas $(u'(t), v'(t) \in w'(t))$, calculada pela eq.(18) apresentada abaixo.

$$u'_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (u'_{i})^{2}}$$

$$v'_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (v'_{i})^{2}}$$

$$w'_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (w'_{i})^{2}}$$
(18)

61

Entender o conceito de velocidade turbulenta é fundamental para analisar os efeitos que a adição de polímeros redutores de atrito causa no escoamento. O valor *rms* das flutuações são uma indicação da intensidade da turbulência em cada direção.

Outra importante grandeza calculada a partir das 600 amostras ou campos de velocidade é a tensão de Reynolds ou tensão cisalhante turbulenta $\overline{v'w'}$ definida pela eq.(19) abaixo.

$$\overline{v'w'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} v'_i \times w'_i \tag{19}$$

A Figura 6.7 apresenta um exemplo de um campo instantâneo bidimensional turbulento de velocidade medido na seção circular da tubulação, para um número de Reynolds de 4,2 x 10⁴. O campo de velocidade apresentado é composto de aproximadamente 5 x 10³ vetores de velocidade instantânea. É interessante notar que como a figura apresenta uma visão frontal do escoamento, vemos na realidade a projeção do vetor velocidade no plano XY. Isto representa, aproximadamente, as flutuações instantâneas de velocidade u'(t), v'(t), já que a velocidade média $\overline{U} \in \overline{V}$ são próximas a zero em toda a seção.



Figura 6.7 – Campo instantâneo de velocidade medido em regime turbulento em uma seção da tubulação para Re = $4,2 \times 10^4$.

Conforme foi apresentado no item anterior, para um escoamento turbulento em tubo de seção circular é comum normalizar as estatísticas de turbulência com a velocidade de atrito u_{τ} . Um valor de u_{τ} com boa exatidão é fundamental já que erros na estimativa da velocidade de atrito levam a erros sistemáticos nos dados estatísticos de turbulência.

Podem ser utilizadas três formas para estimar-se a velocidade de atrito u_r . A primeira considera a eq.(14) apresentada na seção 6.1.2 considerando o $\Delta P/\Delta L$ medido experimentalmente. A segunda forma considera a mesma equação, porém utiliza o gradiente de pressão obtido de uma equação empírica consagrada na literatura. Como nos experimentos realizados os resultados experimentais para o gradiente de pressão foram coerentes com os resultados da literatura, essas duas primeiras formas de se calcular a velocidade de atrito não apresentam diferenças significativas.

Uma terceira forma para estimar-se u_{τ} considera os perfis de tensão de Reynolds e tensão viscosa. Neste caso, a velocidade de atrito se baseia na extrapolação da tensão total medida para a parede, e a utilização direta da definição da velocidade de atrito:

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_{w}}{\rho}}$$
(20)

A Figura 6.8 apresenta o perfil de tensões medido em um dos experimentos. Considerando-se a eq.(20)(18) apresentada acima, e a tensão na parede τ_w calculada através da aproximação pela regressão linear da tensão total na parede, chegamos a uma velocidade de atrito u_{τ} de 13,8 mm/s. Enquanto que a velocidade de atrito obtida através do gradiente de pressão medido experimentalmente foi de 16,9 mm/s.

63



Figura 6.8 – Perfil de tensões para Reynolds de 1,10 x 10⁴. A reta cheia representa a regressão linear da tensão total enquanto que as retas tracejadas apresentam os limites da inclinação da tensão total.

É importante notar que a aproximação da tensão total por uma reta está associada um grande nível de incerteza, como pode ser verificado pelas bandas limites traçadas com linhas tracejadas na Figura 6.8. Van Doorne [15] também observou em seu trabalho que a velocidade de atrito calculada com base nas tensões medidas gerava resultados ligeiramente inferiores aos resultados baseados em equações empíricas para o fator de atrito. Segundo van Doorne [15], esta diferença poderia ser causada principalmente pela resolução espacial obtida com o PIV estereoscópico, que pode agir como um filtro passa baixa nos dados. Mais informações sobre a causa desta discrepância podem ser obtidas no trabalho mencionado.

Um exemplo de perfis de velocidades turbulentas u'_{RMS} , v'_{RMS} e w'_{RMS} normalizados pela velocidade axial média na seção $W_{méd}$ - é apresentado na Figura 6.9. Nota-se que a componente mais significativa da velocidade turbulenta encontra-se na direção do escoamento.



Figura 6.9 – Perfis de velocidade turbulenta para Reynolds de 1,10 x 10^4 . O Fluido de trabalho é água sem polímero.

A comparação entre as velocidades turbulentas de um escoamento com e sem o polímero nos trará informações valiosas para a compreensão do efeito de redução de atrito. Portanto, o gráfico da Figura 6.9 será novamente utilizado a seguir durante a apresentação dos resultados dos experimentos com o uso de polímeros.

6.2 Efeito da adição do polímero na queda de pressão

Apresentamos agora as medidas de gradiente de pressão e os perfis de velocidade obtidos para o escoamento com a adição de polímeros redutores de atrito. Foram realizados experimentos com a adição de polímeros para quatro vazões distintas. Para cada experimento foram medidos o gradiente de pressão e 600 campos instantâneos de velocidade utilizando a técnica PIV estereoscópica. Essas medidas nos permitiram associar a redução da queda de pressão a variações no perfil do escoamento. Em todos os casos estudados, a concentração do polímero poliacrilamida utilizado foi mantida constante e igual a 20 ppm.

A Tabela 6.1 apresenta os resultados da redução de atrito à vazão constante (DR_{ϱ}) definido na eq.(1). Nesta tabela são apresentados o gradiente de pressão experimental e teórico para a água. O gradiente de pressão teórico foi utilizado, pois, para baixas vazões a incerteza do gradiente experimental era elevada. Na tabela dois valores para DR_Q são apresentadas, baseados na queda de pressão experimental e teórica.

Vazão (I/min)	Gradiente de Pressão						
	Água			A110		DR _{Q exp}	DR _{Q teórico}
	Re	ΔΡ/L _{exp} [kPa/m]	ΔΡ/L _{teórico} [kPa/m]	Re	ΔP/L [kPa/m]	[%]	[%]
60	42349	0,386	0,384	33859	0,266	31,1	30,8
30	22945	0,117	0,114	17061	0,107	8,5	6,0
15	11088	0,033	0,034	8495	0,034	-3,4	-1,3
7,5	5465	0,013	0,010	4296	0,011	17,9	-3,8

Tabela 6.1 – DR_Q experimental e teórico para as quatro vazões ensaiadas.

Uma análise dos resultados apresentados na Tabela 6.1 mostra que para vazões maiores o efeito da redução de atrito pela adição do polímero é mais significativo. Os resultados para a queda de pressão para as duas menores vazões devem ser desconsiderados devido ao elevado nível de incerteza associado a estes experimentos. Deve-se mencionar que os valores negativos obtidos para DR_Q indicam, na verdade, um aumento do atrito com a adição do polímero. Esta constatação pode ser explicada pelo fato que a baixas vazões os níveis de turbulência que prevalecem no escoamento são relativamente menores e, portanto, verifica-se pequeno efeito dos polímeros sobre as estruturas turbulentas. O pequeno aumento verificado na viscosidade da solução resultante da adição do polímero, justifica o aumento total do atrito.

É importante notar que para uma mesma vazão o número de Reynolds para o solvente puro (água) e para a solução com polímero não é o mesmo. Isto se deve ao aumento já mencionado da viscosidade da água gerado pela adição de polímeros. Esta variação nos remete à necessidade de definir uma forma adicional de se quantificar a redução de atrito além daquelas apresentadas na seção 2.2. Além de DR_{ϱ} à vazão constante, e de DR_{p} à pressão constante, é interessante definir-se DR_{Re} , isto é, redução de atrito à Reynolds constante. A eq.(21) apresenta a definição de DR_{Re} .

66

$$DR_{\rm Re} = \left(1 - \frac{f_p}{f_s}\right) \times 100\%$$
, a Reynolds constante; (21)

Como os experimentos foram realizados somente à vazão constante, para o cálculo de DR_{Re} foi necessário utilizar fator de atrito para solvente puro (f_s) dado pela equação de Blasius. A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos para DR_{Re} .

Tabela 6.2 – Coeficiente de Redução de Atrito à Reynolds Constante, DR_{Re} , em função de Reynolds

	Fator d	00		
Re	Água	A110	DR Re	
	f_s	f_p	[70]	
33859	0,023	0,015	35,0	
17061	0,027	0,024	12,3	
8495	0,032	0,030	7,2	
4296	0,040	0,037	6,9	

Nota-se que na comparação entre os fatores de atrito teórico e experimental para um mesmo número de Reynolds apresentados na Tabela 6.2, que o efeito da redução de atrito se torna ainda mais pronunciado.

A Figura 6.10 apresenta os resultados obtidos para o fator de atrito hidrodinâmico em função do número de Reynolds para os experimentos realizados com e sem a adição de polímeros.



Figura 6.10 – Gráfico de f contra Re com resultados experimentais para água, solução (superfloc A110 a 20ppm) e teóricos para água pura (Blasius).

Pode-se observar na figura a nítida tendência de aumento da redução de atrito com o aumento do número de Reynolds. O número reduzido de experimentos realizados com polímero e apresentados na Figura 6.10 deve-se ao tipo do manômetro de coluna utilizado nos experimentos. O manômetro utilizado apresentava um elevado tempo de resposta o que obrigava à inúmeras recirculações da solução pela bomba, ocasionando a degradação do polímero.

6.3 Perfis de velocidade do escoamento com a adição de polímeros

Nesta seção vamos apresentar a comparação entre os perfis de velocidade do escoamento medidos com e sem a adição de polímero. Para os gráficos apresentados a seguir, os símbolos vazios [□] indicam os resultados experimentais para água enquanto que os símbolos cheios [∎] indicam os resultados para a solução do polímero A110 na concentração de 20ppm.

Os perfis médios de velocidade axial do escoamento para uma vazão de 60 l/min com e sem o uso de polímeros são apresentados na Figura 6.11. Esta vazão foi escolhida, pois é aquela que apresenta a maior redução de atrito representada pelo coeficiente de redução de atrito DR_Q.A título de referência, pode-se mencionar que o número de Reynolds para os ensaios com água era de 4,23 X 10⁴ e para a solução com polímero 3,38 X 10⁴. Como já mencionado, esta diferença deve-se à variação da viscosidade provocada pela a adição do polímero.



Figura 6.11 – Perfis médios adimensionais de velocidade axial, $\overline{W}/\overline{W}$ máx, em função de r/D para água pura e solução com polímero a uma vazão de 60 l/min. Para água Re = 4,23 X 10⁴ e para a solução Re = 3,38 X 10⁴ com DRQ de 31,1%.

Pode-se observar na figura uma diminuição da derivada do perfil médio de velocidade resultante da adição do polímero. Para melhor observar as diferenças entre os perfis de velocidade na região da parede, é conveniente apresentar-se o perfil de velocidades em termos das coordenadas de parede, $W^+ e y^+$. Os perfis de W^+ em função de y^+ para água e solução de polímero são apresentados na Figura 6.12 para a vazão de 60 l/min.



Figura 6.12 – Perfil médios de velocidade normalizados pela velocidade de atrito em função de y+ para vazão de 60 l/min e DRQ de 31,1%.

Nota-se, conforme esperado, que tanto para a água pura, quanto para a solução com 20ppm do polímero o perfil de velocidades na sub-camada laminar $(y^+ < 5)$ não sofre alterações e respeita a lei $W^+ = y^+$. Observa-se que a adição de polímeros provoca um alargamento da camada de transição. Enquanto que para água, a camada de transição vai até $y^+ = 30$, a adição de polímeros aumenta este limite para $y^+ = 70$. Este alargamento da camada de transição também foi observado por den Toonder [8], Procaccia [11] e Kawaguchi [10]. Com isto, o perfil de velocidades na região logarítmica fica deslocado para cima em relação ao perfil newtoniano. A redução de atrito pode ser verificada pelo aumento da velocidade observada nos perfis. Conforme observado, para a camada logarítmica, as velocidades W^+ com polímero superam as velocidades para água o que está coerente com a redução de atrito observada.

Para avaliar de forma qualitativa o efeito da redução de atrito no perfil de velocidade, a Figura 6.13 apresenta abaixo dois gráficos de W^+ em função de y^+ para as vazões de 30 l/min e 15 l/min com DR_Q de 8,5% e -3,4% respectivamente. Fica claro na observação comparativa dos gráficos que, quanto menor a vazão, menor a redução de atrito que pode ser avaliada pela menor variação do perfil de velocidade relativamente ao da água. De fato, para a vazão

de 15 l/min, onde não se notou redução de atrito com a adição de polímeros, também não houve variação no perfil de velocidades.



Figura 6.13 - Perfis médios de velocidade normalizados pela velocidade de atrito em função de y^+ para: (a) Vazão de 30 l/min e DRQ de 8,5% e (b) Vazão de 15 l/min e DRQ de -3,4%.

6.4 Perfis de turbulência com a adição de polímeros

Estudos anteriores mostram que a adição de polímeros para a redução do atrito gera grandes impactos nos perfis de turbulência do escoamento. Den Toonder [8], considera as distorções dos perfis turbulentos um forte indicativo de que a anisotropia das tensões gerada pelas longas cadeias de polímero são essenciais para explicar o efeito da redução de atrito.

A Figura 6.14 apresenta um campo de velocidade turbulenta na direção axial w'_{RMS} gerados a partir das medições com o sistema PIV estereoscópico para a vazão de 60 l/min.



Figura 6.14 - Perfis de velocidade turbulenta na direção axial w'_{RMS} em tubo de seção circular para: (a) Água a vazão de 60 l/min e Re = 4,23 X 10⁴ e (b) Solução de polímero a vazão de 60 l/min, Re = 3,38 X 10⁴ e DRQ de 31,1%.

Fica claro que há uma redução na intensidade de turbulência na região central da seção do tubo, porém, para uma análise mais detalhada é conveniente apresentarmos o perfil das velocidades turbulentas u'_{RMS} , v'_{RMS} e w'_{RMS} normalizados pela velocidade axial média $W_{médio}$ em função de r/D. Como a velocidade de atrito varia com a adição de polímeros, optamos pela normalização pela velocidade média já que os experimentos foram realizados à vazão constante.

Observando a Figura 6.15 vemos que a adição de polímero reduz a intensidade de turbulência em todas as direções e praticamente ao longo de toda a seção. A exceção ocorre somente próximo à parede. Resultados semelhantes foram observados por Hoyt [9] e den Toonder [5].



Figura 6.15 – Perfis de intensidade turbulenta com e sem o uso de polímeros para a vazão de 60 l/min e DRQ de 31,1%.

A título de informação serão apresentados na Figura 6.16 os perfis de velocidade turbulenta para as vazões de 30 l/min, 15 l/min e 7,5 l/min com e sem o uso de polímeros.

Resultados



Figura 6.16 – Perfis de velocidade turbulenta para o escoamento com água e com polímero para: (a) vazão de 30 l/min e DRQ de 6,0 %; (b) vazão de 15 l/min e DRQ de - 1,3 %; (c) vazão de 7,5 l/min e DRQ de -3,8 %.

Além de reduzir as flutuações de velocidade, os polímeros parecem reduzir a correlação entre v' e w'. Trabalhos como o de Hoyt [9] mostram que curiosamente a tensão de Reynolds pode ser reduzida a valores insignificantes enquanto que redução no atrito se mantém limitada em, no máximo, de 60 a 80%. Segundo Hoyt, aparentemente o polímero reduz a interação entre as flutuações v' e w'. Em outras palavras as flutuações axiais e transversais se tornam independentes. Vale ressaltar que essas observações foram feitas em experimentos com elevada concentração de polímero.

A Figura 6.17 apresenta a tensão de Reynolds para o escoamento com e sem a adição de polímeros para a vazão de 60 l/min. A principal observação é a significativa redução do perfil de tensões em relação ao experimento para água pura. A redução da dos valores da tensão de Reynolds com o uso de polímeros é coerente com a redução de atrito observada.



Figura 6.17 – Tensão de Reynolds para água pura e solução com polímero a uma vazão de 60 l/min e DRQ de 31,1%.

A Figura 6.18 apresenta o perfil de tensões de Reynolds para outras vazões onde a redução de atrito não foi significativa. Observa-se pelos perfis que, conforme esperado, as tensões de Reynolds para o escoamento com polímero, variam pouco em relação ao escoamento com água pura.



Figura 6.18 – Tensão de Reynolds para água pura e solução com polímero para: (a) vazão de 30 l/min e DRQ de 6,0 %; (b) vazão de 15 l/min e DRQ de -1,3 %; (c) vazão de 7,5 l/min e DRQ de -3,8 %.

Para um escoamento turbulento completamente desenvolvido em uma tubulação, a soma das tensões deve obedecer a seguinte relação linear:

$$2\frac{r}{D} \times \tau_w = \tau_{\rm Re} + \tau_V \tag{22}$$

onde,

 τ_w = Tensão total na parede estimada pela regressão linear da tensão total

$$\tau_{\rm Re} = \rho \cdot v' w' \tag{23}$$

$$\tau_{V} = \mu \frac{\partial \overline{W}}{\partial Y}$$
(24)

Nas medições realizados com polímero foi observado um déficit de tensão. Este efeito é ilustrado pela Figura 6.19 onde são mostradas as contribuições para a tensão total no escoamento com polímeros. A tensão de Reynolds τ_{Re} foi medida diretamente através da eq.(23) durante o processamento do PIV estereoscópico e a tensão viscosa τ_{V} foi calculada através da eq.(24) a partir do perfil médio de velocidades medido. Observou-se que a soma das tensões de Reynolds e viscosa apresenta um déficit em relação ao perfil de tensão total esperado. Este déficit se deve à adição de polímeros e está associada ao que é chamado de tensão de polímero τ_{P} . Esta tensão foi determinada a partir da equação de balanço de tensões modificada apresentada abaixo:

$$2\frac{r}{D} \times \tau_w = \tau_{\text{Re}} + \tau_V + \tau_P \tag{25}$$

Fica evidenciado que o polímero contribui significativamente no perfil de tensões fora da região central da tubulação e em particular na camada de transição (5 < y^+ < 30). Den Toonder [8] relata que a grande maioria dos trabalhos experimentais sobre o assunto também apresentam um déficit de tensão.



Figura 6.19 – Perfis de Tensão para solução com polímero a uma vazão de 60 l/min e DRQ de 31,1%.