CAPÍTULO 8 ESTRUTURA DE TURBULÊNCIA DE PAREDE NOS ESCOAMENTOS COM SOLUÇÕES POLIMÉRICAS

8.1. O Fenômeno da Redução de Atrito Em Soluções Poliméricas: Uma Visão Geral

As primeiras noções sobre este fenômeno surgiram na década de 40, quando foram publicados os resultados do trabalho de *Toms*, 1948 (apud GYR E BEWERSDORFF, 1995) demonstrando que o escoamento de soluções poliméricas (na época soluções diluídas de polimetilmetacrilato em monoclorobenzeno como solvente) em condutos forçados necessita de menor energia por unidade de vazão volumétrica que o solvente puro. Outros estudos posteriores confirmaram esse fenômeno, que ficou conhecido como "*efeito Toms*".

A partir da década de 60, com o desenvolvimento da teoria de Kolmogorov, passou-se a investigar o assunto procurando-se compreender as características estruturais do escoamento turbulento, principalmente na região de parede, e as mudanças no escoamento turbulento quando da adição de polímeros solúveis em água.

Diversos resultados experimentais surgiram a partir da década de 60, sendo o trabalho de Kline et al (1967), uma das mais importantes referências, demonstrando a importância da região de parede na estrutura da turbulência e na relação entre as regiões interna e externa dos escoamentos. Instabilidades na região de parede são responsáveis por 80% da turbulência nos escoamentos. A *figura 8.1* mostra o mecanismo da formação de estrias de alta e baixa velocidade na região de parede, e, consequentemente, o processo de esticamento e compressão da vorticidade devido ao gradiente $\frac{\partial u}{\partial y}$ junto à parede, segundo Kline. A *figura 8.2* mostra o mecanismo de deformação e colapso das estrias, com os elementos de vorticidade esticados, afastandose da região de parede e entrando na camada de instabilidade hidrodinâmica, atingindo o núcleo turbulento ocorrendo então o colapso das estrias.

A redução de atrito por adição de polímeros nos escoamentos em condutos forçados pode ser definida pelo conjunto de modificações que ocorrem na estrutura de parede dos escoamentos turbulentos, decorrentes da adição desses polímeros Essas modificações dizem respeito aos processos de produção, dissipação e transferência de

energia, além de isotropia ou anisotropia das componentes de flutuações de velocidade e das propriedades reológicas desses escoamentos.



Figura 8.1 Mecanismo de formação das estrias (KLINE ET AL, 1967).



Figura 8.2 Mecanismo de colapso das estrias (KLINE ET AL, 1967).

O assunto poderia ser analisado, por um lado, partindo-se da abordagem molecular, já que no escoamento de solução polimérica provoca-se o alongamento das moléculas do polímero. Por outro lado, sob o ponto de vista da turbulência, é como se houvesse o amortecimento das flutuações na direção vertical e amplificação das flutuações na direção horizontal. Este assunto será discutido ao longo desse capítulo.

LUMLEY (1969) definiu a redução de arrasto (RA) ou redução de atrito em um escoamento polimérico como:

$$RA = \frac{\tau_{as}}{\tau_{aN}} \tag{8.1}$$

onde: τ_{as} \rightarrow tensão de atrito na parede no caso da solução polimérica;

 $\tau_{aN\rightarrow} \text{tensão de atrito na parede no caso de fluido newtoniano (solvente).}$ Considerando a definição de coeficiente de atrito:

$$C_{f} = \frac{\tau_{a}}{\frac{1}{2}\rho U^{2}}$$

$$RA = \frac{C_{f_{s}} \frac{1}{2}\rho_{s} U_{s}^{2}}{C_{f_{N}} \frac{1}{2}\rho_{N} U_{N}^{2}}$$
(8.2)
$$RA = \frac{U_{N}}{C_{f_{N}} \frac{1}{2}\rho_{N} U_{N}^{2}}$$

$$RA = \frac{C_{f_{s}}}{C_{f_{N}}} \text{ ou } RA(\%) = 1 - \frac{C_{f_{s}}}{C_{f_{N}}}$$
(8.4)

Sendo o processo de redução de atrito em escoamentos poliméricos essencialmente um fenômeno de parede, é muito importante o estudo da estrutura do escoamento na região muito próxima da parede ($0 < y^+ < 100$). Devido à pequena espessura desta região, as pesquisas experimentais sobre as modificações nas escalas de turbulência que ocorrem nos escoamentos turbulentos, provocadas pela adição de polímeros, necessitam de medição de velocidade instantânea, com resolução que permita medições precisas na camada limite do escoamento, o que só é possível com a utilização de sistema de anemometria laser (*LDA*).

Pode-se representar o comportamento do escoamento de uma solução polimérica através da *figura 8.3*.



Figura 8.3 Representação esquemática dos cinco regimes de escoamento propostos por Virk.

De acordo com classificação proposta por Virk (*VIRK et al,1967 e VIRK,1975*), cinco regimes de escoamento podem ser identificados na figura, a saber:

- Regime laminar (Re<2300): neste caso, tanto as soluções poliméricas, quanto o solvente, seguem a mesma lei (lei de Poiseuille) para tubulações e não ocorre redução de atrito devido a injeção de polímero. O valor de *f* é calculado, de acordo com a literatura por: f = ⁶⁴/_{Re}.
- Regime de transição de escoamento laminar para turbulento: neste regime o solvente e as soluções poliméricas devem seguir o mesmo comportamento, tanto para tubulações lisas, como rugosas, embora não se conheça uma lei matemática que caracterize esse escoamento.
- Regime turbulento sem redução de atrito por adição de polímero: Até a faixa de Re ≅ 10⁴ (ponto A da *figura 8.3*), as soluções poliméricas e o solvente devem obedecer a mesma relação para o coeficiente de perda de carga *f*, *com f = f(Re)*, sendo válida a equação para regime turbulento hidraulicamente liso:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log \operatorname{Re}\sqrt{f} - 0.8 \tag{8.5}$$

A partir do ponto A, tem-se início a redução de atrito, e as curvas das soluções poliméricas começam a se afastar da curva de *Kármám-Prandtl*, entrando o escoamento em uma região caracterizada pelos seguintes regimes:

 Regime turbulento com redução de atrito: O comportamento das soluções poliméricas depende de parâmetros, tais como: concentração, peso molecular e solvatização. Virk(1975) propõe uma equação representativa para este regime:

$$\left(\frac{f}{4}\right)^{\frac{-1}{2}} = (4,0+\delta)\log \operatorname{Re}\left(\frac{f}{4}\right)^{\frac{1}{2}} - 0,4 - \delta\log\sqrt{2}DW$$
(8.6)

Neste equação δ representa a declividade do perfil de velocidade adimensionalisado das soluções poliméricas com relação a do solvente e que sofre um incremento. W representa o número de onda associado ao início da RA. Segundo Virk (1975), nessa região o coeficiente de perda de carga pode diminuir em até 70%, sendo que os valores médios estão na faixa de 30-40%.

 Regime polimérico com redução de atrito, independentemente dos parâmetros poliméricos: quando o escoamento alcança o ponto B da *figura 8.3*, incrementos nos valores de concentração, não conseguem mais melhorar o desempenho das soluções poliméricas, valendo a seguinte equação:

$$\left(\frac{f}{4}\right)^{\frac{-1}{2}} = 19,0\log \operatorname{Re}\left(\frac{f}{4}\right)^{\frac{-1}{2}} - 32,4$$
(8.7)

Este limite é conhecido na literatura como Assíntota de Máxima Redução de Atrito (AMRA).

Os trabalhos experimentais que foram desenvolvidos na tentativa de dar subsídios ao estudo do tema de redução de atrito por adição de polímeros e que serão apresentados a seguir deram origem aos trabalhos de mestrado e doutoramento de Guillermo Vilalta, sob a minha orientação.

8.2. Procedimento Experimental do Trabalho de Mestrado de Vilalta (1995)

A instalação experimental usada neste estudo está apresentada nas *figuras 8.4 e* 8.5. Esta instalação, montada originalmente no Centro Tecnológico de Hidráulica – CTH por Nakae (1994), e adaptada para a realização desse trabalho, constava de um motor elétrico (ME), de um variador eletromagnético de rotação (VE), de uma bomba centrífuga (BC), de tomadas de pressão (TP), de um transdutor diferencial de pressão (TD), de um tubo de Pitot (TT), de um medidor eletromagnético de vazão (MV), de um termômetro (TM) e de um sensor de termômetro (ST). Um microcomputador, acoplado a um sistema de aquisição de dados e *software* dedicado, permitia o cálculo automático da vazão Q, da queda de pressão Δp na seção 1 e da velocidade média local na seção 2. Os ensaios foram feitos para vazões na faixa de 8 a 40 l/s, o que corresponde a uma faixa de Re $\cong 10^5$ a 5 x 10^5 . O perfil de velocidades foi medido com o auxílio de um tubo de Pitot. Maiores detalhes sobre o procedimento experimental podem ser encontrados em Vilalta et al (1995) e Vilalta (1995).

O polímero utilizado foi a poliacrilamida Iqapol PA e a solução polimérica foi preparada a partir da solução mãe. A adição de polímero a água foi lenta e gradual, de modo a evitar a quebra das cadeias poliméricas. A água utilizada era proveniente da rede pública.



Figura 8.4 Representação esquemática da instalação experimental montada no CTH.



Figura 8.5. Fotografia mostrando a seção de ensaio para medição com tubo de Pitot (extraída de Nakae, 1994).

8.2.1. Resultados

Em primeiro lugar é importante enfatizar que admitiu-se como lisa, a tubulação da bancada experimental, portanto, com os resultados restritos ao regime hidraulicamente liso. Por outro lado, considerando-se a faixa de número de Reynolds mencionada acima, não foi possível a análise do processo de início de redução de arrasto. Finalmente, admitiu-se nos cálculos que as propriedades físicas da solução polimérica foram consideradas com os mesmos valores da água para as condições de ensaio.

A análise da degradação mecânica por cisalhamento da solução polimérica foi feita a partir da determinação do perfil de velocidade normalizado U⁺ vs Y⁺, comparando-se os perfis do solvente com o das soluções poliméricas para diferentes concentrações e tempo de circulação dessas soluções na instalação, depois de começados os ensaios, conforme mostrado nas *figuras 8.6 e 8.7*.

A figura 8.6 apresenta os resultados obtidos para vazão Q = 20 l/s e concentração $C_w = 70$ ppm. Nessa figura observa-se a tendência dos perfis em se aproximar ao da água com o passar do tempo.



Figura 8.6 Representação gráfica da degradação mecânica da solução polimérica (Q = 20 L/s e 70 ppm).

No caso da *figura* 8.7 a tendência à coincidência é mais rápida já que o incremento da vazão favorece as condições turbulentas e o processo de degradação, o que implica em uma perda mais rápida da capacidade redutora de atrito do Iqapol PA. Como os ensaios foram feitos no período de 30 a 40 min. após o início de operação da bomba centrífuga, nota-se que os resultados caem na faixa entre as curvas dos perfis de velocidade para t = 0 e t = 2h. Sendo assim, concluiu-se nessa pesquisa que, para o tempo de ensaio utilizado, a degradação mecânica não foi relevante e os resultados experimentais foram pouco afetados pelo seu efeito.



Figura 8.7 Representação gráfica da degradação mecânica da solução polimérica ($Q = 30 L/s \ e \ 50 \ ppm$).

A *figura 8.8* mostra o gráfico do coeficiente de perda de carga *f* versus o número de Reynolds *Re* (em escala logarítmica), onde aparecem os resultados para as soluções de Iqapol PA à diferentes concentrações. Pode-se perceber pela análise dessa figura que, para as soluções poliméricas, existe um afastamento da curva de *Prandtl* para o regime hidraulicamente liso, tendendo-se ao regime polimérico com a aumento da concentração da solução. Portanto, com o aumento da concentração, para um mesmo valor de Re, os valores de *f* são menores tendendo à chamada AMRA.

A *figura* 8.9 mostra a eficiência da redução de atrito para as diversas concentrações ensaiadas e para Re na faixa de 2×10^5 e 4×10^5 . Observa-se nessa figura que para Re menores e C_w < 70 ppm, a eficiência na redução de atrito não supera 10%. Para Re maiores e concentrações C_w > 70 ppm a eficiência na redução de atrito aumenta significativamente.

Define-se como eficiência de redução de atrito:

$$\varphi = \frac{\left| fs - fp \right|}{fs} 100$$

(8.8)

onde: $fs \rightarrow$ coeficiente de atrito do solvente;

 $fp \rightarrow$ coeficiente de atrito da solução polimérica.



Figura 8.8 Variação do coeficiente de perda de carga f, como função do número de Reynolds e da concentração das soluções poliméricas de IQAPOL PA.



Figura 8.9 Relação entre a eficiência da redução de arrasto ψ e a concentração para diferentes valores de número de Reynolds.

A obtenção experimental do início da redução de arrasto não foi possível tendo em vista a faixa de número de Reynolds estudada. Uma tentativa nesse sentido foi feita através da extrapolação das curvas experimentais, como mostra a *figura 8.10*, podendose observar nesta figura que o início da redução de arrasto ocorre, em tubulações lisas, para valores de Re $\approx 10^4$, de acordo com a teoria de Virk et al (1967).



Figura 8.10 Diagrama que mostra o início da RA por extrapolação gráfica.

Com o intuito de se tentar uma generalização dos resultados dessa pesquisa, esses foram comparados com aplicação de equações da literatura que são a equação de *Vortinskaya (apud RABINOVICH, 1987)* e a equação *de* Tam et al (1992). A equação de *Vortinskaya* é dada abaixo:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left[\left(\frac{2,8u_*}{U\sqrt{f}}\right)^{\frac{\beta}{5,75}} \left(\frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} + \frac{e}{3,7D}\right)\right]$$
(8.9)

onde β é um termo que depende da concentração volumétrica e pode ser determinado por:

$$\beta = 10^3 C_V$$

A equação é válida para $0,0005 < C_V < 0,012$ e verifica-se que para escoamento de água ($C_V = 0, \beta = 0$), recaindo-se na equação de Colebrook. Resultados comparativos da variação de f = f(Re), considerando os valores experimentais desta pesquisa, a utilização de uma equação logarítimica ajustada a partir dos dados experimentais e a utilização da equação de Vortinskaya podem ser vistos em Vilalta (1995), Vilalta e Ortiz (1995) e Ortiz e Vilalta (1998). Percebe-se, pela análise desses resultados, que as diferenças são muito pequenas para os Reynolds mais baixos ensaiados e não superam 17% para os Reynolds mais altos mesmo para as maiores concentrações ensaiadas.

A comparação com a relação de Tam et al (1992) (ver ORTIZ & VILALTA, 1998) mostra diferenças muito significativas entre os resultados e essas diferenças devem ser atribuídas ao fato da correlação de Tam et al (1992) ter sido obtida para condições de ensaio bastante diversas de nossa pesquisa.

8.2.2. Comentários Adicionais

Os resultados obtidos mostraram a dificuldade de se generalizar os resultados da pesquisa em termos de uma metodologia analítica que pudesse ser aplicada para diversas soluções poliméricas, diversas concentrações e para uma ampla faixa de número de Reynolds. Além disso, para a evolução da pesquisa era fundamental passar-se a uma nova fase em que fosse possível estudar as modificações na estrutura do escoamento, principalmente na região de parede, após a injeção de um polímero solúvel em água. Tendo isso em conta, estruturou-se o trabalho de doutoramento do aluno *Vilalta Alonso*, que será descrito a seguir.

8.3. Procedimento Experimental do Trabalho de Doutorado de *Vilalta* (2000)

Este trabalho experimental teve como objetivo principal investigar e diagnosticar as modificações estruturais que ocorrem nos escoamentos turbulentos devido à adição de polímeros.

8.3.1. Instalação e Procedimento Experimental

A instalação experimental, especialmente projetada e construída no Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, está apresentada na *figura 8.11*.

A bancada experimental constitui-se de um canal retangular de acrílico de dimensões 3,48 m de comprimento, 0,03 m de largura e 0,30 m de altura operada com o fluido escoando em circuito fechado. Diferentemente da bancada utilizada no CTH, de caráter industrial, esta nova bancada foi concebida com um caráter de pesquisa, com menores dimensões, possibilitando a simulação de uma faixa mais baixa de número de Reynolds, de modo a tentar obter o início da redução de arrasto, e possibilitando, principalmente, a utilização de um sistema de anemometria laser – *LDA*, disponível no Laboratório de Mecânica dos Fluidos.



Figura 8.11 Representação esquemática da bancada experimental do Laboratório de Mecânica dos Fluidos – EPUSP

A nomenclatura dos termos que aparecem na descrição da bancada experimental é a seguinte:

- RPA reservatório principal de água;
- BC bomba centrífuga;
- PO placa de orifício;
- TP tomada de pressão;
- MN manômetro de mercúrio;
- SC placa perfurada;
- TH tanque homogeneizador;
- PIM tanque de injeção da solução-mãe; •
- SIH sistema de injeção de soluções homogêneas; •
- incia 2016 SIN-H sistema de injeção de soluções não-homogêneas; •
- TM termômetro;
- ST seção de testes;
- SCC sistema para manutenção de carga constante;
- FD fotodetector do LDA;
- CL canhão do LDA;
- sistema de aquisição e processamento de dados; SPD
- CP computador.

A bancada operava da seguinte forma. Do RPA a água era recalcada por uma bomba centrífuga até o TH. Na tubulação de recalque (de PVC rígido de 2 pol. de diâmetro interno) existia uma placa de orifício PO para medir a vazão através do manômetro MN. O TH de acrílico, com dimensões externas de 0,5 m de comprimento, 0,3 m de largura e 0,4 m de altura, foi projetado no sentido de estabelecer uma região na qual o escoamento fosse turbulento, mas sem grandes turbilhões. Para isso, foram colocadas duas placas perfuradas na entrada, a primeira com furos de 6 mm de diâmetro a 150 mm da entrada do tanque, e a segunda com furos de 2 mm de diâmetro a 100 mm a jusante da primeira. O escoamento ao sair do TH entrava em um canal, com um controle a jusante através de uma placa de seção constante e este escoamento retornava ao RPA, completando o ciclo. A figura 8.12 representa uma vista em perspectiva do canal da bancada experimental e da medição com o sistema LDA.



Figura 8.12 Vista em perspectiva do canal experimental e da medição com o LDA.

Conforme detalhadamente descrito em Vilalta (2000) apresenta-se a seguir algumas considerações específicas sobre o sistema de injeção das soluções poliméricas e sobre o sistema de medição, aquisição e processamento de dados.

8.3.2. Sistema de Injeção das Soluções Poliméricas

O trabalho começava com a preparação da solução-mãe. O polímero era despejado em um recipiente de acrílico contendo 30 l de solvente (água) e a dissolução do polímero era feita com a ajuda de um agitador mecânico, injetando-se o polímero lenta e gradualmente no vórtice formado pela circulação mecânica e impondo-se uma freqüência de rotação f < 450 rpm, de modo a evitar a quebra das cadeias poliméricas e a perda de eficiência do produto.

Para a realização dos ensaios a solução-mãe era levada ao PIM, com capacidade de aproximadamente 20 L, de onde a solução polimérica era despejada com vazão constante na seção de teste. As precauções tomadas durante o ensaio garantiram que a solução-mãe, para a faixa de concentração ensaiada, se dissolvesse completamente no

solvente e o tempo de ensaio foi fixado de modo a garantir que a degradação mecânica da solução polimérica fosse desprezível.

8.3.3. Sistema de Medição, Aquisição e Processamento de Dados

As medições de velocidade (média e *RMS* da componente axial) foram feitas utilizando um *LDA* fabricação *DANTEC*, modelo 55X, unidimensional, que permitiu realizar medições em pontos muito próximos do contorno da parede, com uma resolução espacial e temporal adequada para esta região. As dimensões do volume de medição, formado pelo cruzamento dos feixes, foram as seguintes: 3,2 mm de comprimento e 0,31 mm de diâmetro. Os ensaios iniciais foram feitos para tubulação de acrílico de seção circular, passando a seguir para seções, com um trecho vertical plano. Em ambos os casos não foi possível validar as medições. Seria necessário envolver a seção de teste com um fluido de mesmo índice de refração da parede do conduto de acrílico, (*ver DURST et al, 1985 e CHERNIAUSKAS & ORTIZ, 2009).* Optou-se, finalmente, por um canal retangular, conforme esquematizado na *figura 8.12*..

O fotodetector, que é parte do sistema de medição do *LDA*, e é responsável por transformar a energia luminosa em energia elétrica, opera nesse equipamento, na posição direta. Os sinais recebidos pelo fotodetector eram enviados para o processador de dados e através de *software* próprio do sistema, determinava-se: os valores de velocidade média local, o *RMS* da componente axial, assim como, outros parâmetros obtidos pela análise estatística e espectral do sinal.

O princípio de funcionamento do *LDA* estabelece que a medição de velocidade é feita através da diferença de freqüência entre o sinal emitido e o espalhado por causa da passagem de uma partícula pelo sensor do anemômetro. Isto significa que deve existir no fluido algum elemento, também conhecido como "*seeding*", que provoque este efeito. No presente trabalho utilizou-se água de abastecimento da SABESP, como solvente, não tendo sido necessário a utilização de qualquer tipo de partícula.

8.3.4. Análise Reológica das Soluções Poliméricas

Utilizou-se nesse estudo soluções poliméricas de Iqapol PA e Iqapac (menor peso molecular) e para as concentrações de ensaio foram feitos testes reológicos utilizando-se um viscosímetro de cilindros concêntricos (DV III Rheometer V 3.1. External Control, da Brookfield Engineering Laboratory). Os resultados dessa análise estão mostrados na figura 8.13. A análise dessa figura mostra que para a mesma concentração da solução polimérica (até 20 ppm), não há variação significativa da viscosidade dinâmica. Todavia, percebe-se que com o aumento da concentração, particularmente no caso do polímero Iqapol de maior peso molecular, há um significativo aumento da viscosidade, embora ela permaneça praticamente constante, com a fixação da concentração. Portanto, os efeitos viscosos se acentuam nas soluções poliméricas de maior peso molecular e maior concentração, nos escoamentos turbulentos.



Figura 8.13 Relação entre a viscosidade e a taxa de deformação para as concentrações de soluções poliméricas ensaiadas: (a) Iqapol; (b) Iqapac.

8.3.4. Resultados

A faixa de número de Reynolds estudada corresponde à valores entre 8×10^3 e 10^5 e a idéia foi procurar representar o início da redução de arrasto, o que não foi

possível obter nas experiências realizadas na instalação do CTH. Deste modo, os cálculos, a partir dos valores experimentais, foram feitos para as seguintes condições:

 $Re_{0} \cong 8 \leftrightarrow 8,5x10^{3}$ $Re_{1} \cong 1,33 \leftrightarrow 1,5x10^{4}$ $Re_{2} \cong 4,6 \leftrightarrow 5,1x10^{4}$ $Re_{3} \cong 8x10^{4} \leftrightarrow 10^{5}$

Para os cálculos, admitiu-se que as propriedades físicas das soluções poliméricas são consideradas iguais àquelas da água, para as condições de temperatura e de concentração dos ensaios.

8.3.4.1. Lei de Parede

O conceito de turbulência de parede, particularmente para parede lisa, de acordo com a literatura, segue a equação logarítmica universal de *Kármán-Prandtl*, onde k = 0,41 e B = 5,5. No trabalho aqui apresentado, os valores de k variaram entre 0,382 e 0,414, o que representa diferenças de 1% a 7% da constante teórica de Kármán. Os valores de B variaram entre 5,54 e 6,53 o que representa diferenças de 0,7 a 19%. A *figura 8.14* mostra os resultados experimentais para o solvente (água).



Figura 8.14 Perfil de velocidade normalizado para a água com diferentes valores de Re (comparação com a curva teórica de Kármán – Prandtl).

No caso das soluções poliméricas o comportamento dos perfis normalizados de velocidade, assim como das constantes que definem a lei logarítmica, variam consideravelmente. A literatura recomenda, nesse caso, uma equação logarítmica, com a introdução de um termo adicional:

$$U^+ = A \ln Y^+ + B + \Delta B \tag{8.10}$$

O termo ΔB representa o deslocamento do perfil de velocidade devido a presença do polímero. Para Re₀, com concentrações até 15 ppm, não há diferenças significativas, tanto para o polímero Iqapol, como para o polímero Iqapac, quando comparados com os resultados para a água, conforme mostra a *figura 8.15*. Nessa *figura* apresenta-se ainda a comparação com os valores teóricos de Virk da AMRA, assim como o trecho da subcamada viscosa teórica (SCV).



*Figura 8.15 Perfis normalizados de velocidade para Re*₀ :(*a*)*Iqapol; (b*)*Iqapac.*

Com o aumento do número de Reynolds a redução de atrito começa a se manifestar, mesmo para valores mais baixos de concentração, como, pode-se verificar na *figura 8.16*.

Verifica-se, no caso do Iqapol, que o coeficiente A da equação logarítmica, aumenta significativamente, com o aumento das concentrações, para maiores valores de Reynolds. No caso do Iqapac e do Polyvinilacetato (polímeros de menor peso molecular), os valores de A variam bem menos, aumentando-se o valor de $B+\Delta B$, e mantendo-se um paralelismo aproximado das curvas.

Seguindo o modelo de Virk (1971), a interpretação prática do que ocorre na região de parede é dada na *figura* 8.17. Nessa figura pode-se verificar, comparativamente as curvas logarítimicas do Iqapol e do Iqapac, assim como os respectivos trechos da subcamada elástica (SCE), segundo Vilalta (2000).

Admite-se nesse modelo que a subcamada viscosa permanece praticamente a mesma até o limite de Y⁺ \cong 5. Para o solvente existe uma subcamada intermediária (*buffer-layer*) até Y⁺ \approx 10 e uma terceira camada logarítmica. As duas últimas camadas segundo este modelo, são modificadas no caso das soluções poliméricas e essa modificação vai depender do tipo do polímero, de sua concentração e do número de Reynolds. *A figura 8.17* mostra essas modificações comparativamente, considerando o solvente (água), o Iqapol e o Iqapac, para concentração de 20 ppm e Re₂. Seguindo o modelo de Virk, poderíamos interpretar que a adição de polímero aumenta a camada intermediária, onde subsistem as tensões viscosas e as tensões Reynolds.

Como conclusão desse item, podemos afirmar que a lei de parede não oferece informações sobre a estrutura física na subcamada viscosa e na camada intermediária, nem como essa pode ser alterada pela presença de polímeros, embora seja possível concluir que a *buffer-layer* deve aumentar, nesses casos.



Figura 8.16 Perfis normalizados de velocidade para Re_3 : (a) Iqapol; (b) Iqapac; (c) Polyvinilacetato.



Figura 8.17 Representação do perfil de velocidade segundo o modelo de Virk e comparação com os resultados com o Iqapol e o Iqapac.



A *figura 8.18* representa a relação de *f versus Re* para o Iqapol e o Iqapac. Analisando globalmente os gráficos, observa-se que a curva correspondente ao solvente acompanha a curva de *Kármán-Prandtl*- para canais lisos, com diferenças menores que 5%, na faixa de número de Reynolds em estudo. Com a utilização das soluções poliméricas, ocorre um gradual afastamento destas curvas, com relação à do solvente. Verifica-se que o peso molecular do polímero, assim como sua concentração exerce uma forte influência na redução de atrito e para isto basta comparar a curva (a) – Iqapol (maior peso molecular) coma curva (b) – Iqapac (menor peso molecular). Verifica-se ainda que para Reynolds abaixo de $9x10^3$ não ocorre praticamente redução de atrito, independentemente do polímero utilizado e de sua concentração. Em outras palavras para baixa turbulência o processo de redução de atrito não é eficiente. Comparando os resultados em termos do coeficiente de eficiência de redução de atrito ψ , definido na equação 8.8, a *figura 8.19* mostra que a redução de atrito começa para Re $\cong 9 \times 10^3$ e C_w = 20 ppm, com valores de $\psi = 8\%$, no caso do Iqapac. Aumentando-se a concentração



Figura 8.18 Diagramas da relação de f versus Re: (a)Iqapol; (b)Iqapac.



Figura 8.19 Coeficientes de eficiência de redução de atritoψ: (a)Iqapol;(b)Iqapac.

8.3.4.3. Perfis de Intensidade Turbulenta

Os perfis normalizados do desvio médio quadrático (*RMSu*[']) das flutuações axiais de velocidade estão mostrados nas *figuras* 8.20 e 8.21, para Re₁ e Re₂, respectivamente. Para Re₁ e para o Iqapol (*figura* 8.20 a), observa-se um incremento do RMS da flutuação normalizada da ordem de 49%, para a concentração de C_w = 20 ppm. No caso do Iqapac o incremento está na faixa de 25%, para a mesma concentração (*figura* 8.20b). Observa-se ainda nesses gráficos que os valores máximos se afastam da parede para as soluções poliméricas e são maiores do que os valores máximos apresentados para o solvente, mostrando que a adição de polímeros altera significativamente a estrutura de escoamento de parede. Não foi possível com o equipamento disponível a obtenção dos perfis normalizados do desvio médio quadrático (*RMSv*[^]) das flutuações transversais. Resultados da literatura (*ver DURST et al, 1985*) mostram que estes valores são amortecidos com a adição de polímeros, embora os valores máximos continuam se afastando da parede.



Figura 8.20 Perfis de intensidade turbulenta axial para Re₁: (a) Iqapol; (b) Iqapac.



Figura 8.21 Perfis de intensidade turbulenta axial para Re₂: (a) Iqapol; (b)Iqapac.

8.3.4.4. Tensões de Reynolds

Teoricamente tem-se que as tensões na camada limite de um escoamento de parede são dadas pela soma das tensões viscosas com as tensões turbulentas:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \tag{8.11}$$

Admitindo-se que muito próximo da parede de uma camada limite desenvolvida, a tensão de atrito cresce linearmente com a distância da parede, tem-se que:

$$\tau = \tau_0 \left(1 - \frac{y}{h}\right) \tag{8.12}$$

Combinando as equações (8.11) e (8.12), resulta:

$$\mu \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} = \tau_0 (1 - \frac{y}{h})$$
(8.13)

Normalizando a equação 9.13 com relação a velocidade de atrito e ao Reynolds de atrito, resulta:

$$\frac{\overline{u'v'}}{u_*^2} = \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{\partial U^+}{\partial Y^+}$$
(8.14)

Esta equação foi utilizada para a determinação indireta das tensões de Reynolds nessa pesquisa. Os resultados estão apresentados na *figura 8.22: (a) Iqapol e Re*₁ *e (b) Iqapac e Re*₀. Os resultados indicam que, apesar dos picos de tensões de Reynolds se afastarem da parede, com o aumento das concentrações poliméricas, ocorre o amortecimento dessas tensões com o aumento das concentrações, o que permite a conclusão de que os valores de *RMSv*´ devem diminuir, já que os valores de *RMSu*´ aumentam.



Figura 8.22 Perfis das tensões de Reynolds: (a)Iqapol e Re₁;(b)Iqapac e Re₀

8.3.4.5. Produção de Energia Cinética Turbulenta

O termo de produção de energia cinética turbulenta é dado por :

$$P = -\left\langle \overline{u'v'} \right\rangle \frac{\partial u}{\partial y} \tag{8.15}$$

Os resultados experimentais aplicados a esta equação estão dados na *figura 8.23*, onde se verifica claramente, que a produção é amortecida devido a adição de polímeros (Iqapol ou Iqapac), e esse amortecimento se intensifica com o aumento da concentração

do polímero e de seu peso molecular. Observa-se que as modificações ocorrem na região onde $Y^+ < 100$, sem variações importantes na camada externa do escoamento. Observa-se ainda que as regiões de máxima produção de energia cinética turbulenta estão mais afastadas da parede e seu valor diminui com o incremento da concentração.



Figura 8.23 Perfis de produção de energia cinética turbulenta para Re₂: (a) Iqapol, (b) Iqapac.

8.3.4.6. Análise Espectral

Conforme já apresentado anteriormente, a equação que define o espectro de potência S em função do número de onda kw, para escoamento newtoniano, conhecida como espectro de Kolmogorov, é dada por:

$$S(kw) = C\varepsilon^{\frac{2}{3}} kw^{\frac{-5}{3}}$$
(4.2)

onde C é uma constante sugerida como 1,5 em Tennekes & Lumley (1972).

O espectro do número de ondas se relaciona com o espectro de freqüência através das seguintes equações:

$$S(kw) = \left(\frac{u}{2\pi}\right)S(f)$$

$$kw = \frac{2\pi f}{u}$$
(8.16)
(8.17)

A partir do software do sistema *LDA* obtém-se S(f) e com as equações acima obtém-se S(kw), sendo *u*, a velocidade média local axial medida no ponto.

Os espectros S(kw) foram determinados para três regiões do canal: em uma região de parede, a uma distância aproximada de 1-1,5 mm do fundo do canal, em uma região central, que corresponde à metade da profundidade do canal e próximo da superfície livre. A *figura 8.24* mostra o espectro S(kw) do solvente para as três regiões estudadas e para os quatro números de Reynolds ensaiados. Observa-se nessa figura a tendência da formação de uma camada inercial com declividade aproximada de -5/3, de acordo com o previsto no espectro universal de turbulência de Kolmogorov, representado pela equação 4.2. *A tabela 8.3* apresenta os máximos valores de *kw* dentro da região inercial e pode-se ver que estes valores aumentam com o Reynolds e com a proximidade da parede, aumentando-se assim a taxa de dissipação ε e diminuindo-se as escalas dissipativas.

Tabela8.3 Máximos valores de kw (no final da região inercial) paraescoamento de água nas diferentes regiões e para diferentes Reynolds

Região esc. →	<i>kw</i> (m ⁻¹) na	<i>kw</i> (m ⁻¹) na	kw (m ⁻¹) na
	Reg. Parede	Reg. Central	Reg. Sup. Livre
Re ₀	3802	2400	2365
Re ₁	4093	3228	2986
Re ₂	5209	3981	3920
Re3	6426	4910	4909



Figura 8.24 Espectros de potência do solvente para os diferentes valores de Reynolds: (a) Região de parede; (b) Região central; (c) Região da superfície livre.

A *figura* 8.25 mostra o espectro S(kw) para as soluções poliméricas de Iqapol e Iqapac, na região de parede ($Y^+ < 20$), para Re₀ e para diversas concentrações dos polímeros. Neste caso observa-se que a zona inercial do escoamento newtoniano do solvente é suprimida, havendo uma maior proximidade entre a zona produtiva e a zona dissipativa de turbulência.

A *figura* 8.26 corresponde a estes resultados para a região central do escoamento. Nessa figura há uma nova tendência à formação da zona inercial e de aproximação ao perfil –5/3, o que demonstra que a modificação da estrutura de turbulência devido a adição do polímero concentra-se principalmente muito próximo da parede. Pode-se argumentar que próximo da parede há uma diminuição da dissipação de energia quando comparada com o solvente, o que provoca que as escalas de comprimento de Kolmogorov sejam maiores neste caso.



Figura 8.25 Espectros de potência na região de parede para Re₀: (a)Iqapol; (b)Iqapac.



Figura 8.26 Espectros de potência na região central do escoamento para Re₀: (a)Iqapol; (b)Iqapac.

8.3.4.7. Taxas de Dissipação e Escalas de Turbulência

A adição de polímeros provoca modificações nas escalas de turbulência, embora nesse trabalho não tenha sido possível quantificar melhor essas modificações.

Em termos do solvente, a taxa de dissipação ε foi calculada a partir da equação 4.2 e da equação seguinte de Kolmogorov, admitindo-se A = 1:

$$\varepsilon = \frac{u^3}{L} \tag{4.5}$$

Os valores de ε estão apresentados na tabela 8.4, para o solvente na região de parede, e são muito próximos validando a utilização dos dois métodos. Os cálculos feitos para a região central, conforme mostrados na tabela 8.5, mostram a diminuição da taxa de dissipação com o afastamento da parede.

Tabela 8.4 Valores de taxa de dissipação calculados para água na região de parede

Método \rightarrow	ε (s ² /m ³) pelo	ε (s ² /m ³) pela
Re↓	Espectro de Potência	Equação (4.10)
Re ₀	0.01687	0.01697
Re ₁	0.036	0.03246
Re_2	0.0597	0.0644
Re ₃	0.114	0.1272

Tabela 8.5 Valores de taxa de dissipação para a água na região central do escoamento

Método \rightarrow	ε (s ² /m ³) pelo	ε (s ² /m ³) pela
Re↓	Espectro de Potência	Equação (4.10)
Re_0	6.1E-04	6.4E-04
Re_1	6.5E-04	7E-04
Re_2	1.73E-03	1.8E-03
Re ₃	5E-03	5.8E-03

8.3.4.8. Conclusões do Trabalho Experimental

Como principais conclusões deste trabalho experimental, podemos apontar:

- O processo energético de escoamentos turbulentos de soluções poliméricas (produção, dissipação, tensões de Reynolds) é amortecido com relação ao escoamento do solvente;
- Existe um processo de amortecimento das flutuações transversais e amplificação das flutuações longitudinais, o que está associado à própria configuração molecular dos polímeros;
- A taxa de dissipação diminui, no escoamento polimérico, provocando uma redistribuição da energia das altas para as baixas freqüências e aumentando-se as escalas dissipativas;
- Nos espectros de energia dos escoamentos poliméricos há uma aproximação das zonas de produção e de dissipação, suprimindo-se a zona inercial e conseqüentemente o processo de cascata de energia de Kolmogorov.

322