

**GUILLERMO VILALTA ALONSO**

**MODIFICAÇÕES NA ESTRUTURA DE ESCOAMENTOS  
TURBULENTOS EM CANAL DEVIDO A ADIÇÃO DE POLÍMEROS.  
MECANISMO DA REDUÇÃO DE ATRITO**

Tese apresentada ao Departamento  
de Engenharia Mecânica da Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Doutor em Engenharia

São Paulo  
2000

*GUILLERMO VILALTA ALONSO*

*MODIFICAÇÕES NA ESTRUTURA DE ESCOAMENTOS  
TURBULENTOS EM CANAL DEVIDO A ADIÇÃO DE POLÍMEROS.  
MECANISMO DA REDUÇÃO DE ATRITO*

Tese apresentada ao Departamento  
de Engenharia Mecânica da Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do título de  
Doutor em Engenharia

Área de Concentração:  
Engenharia Mecânica

Orientador:  
Jayme Pinto Ortiz

São Paulo  
2000

*DEDICATÓRIA*

*Aos meus pais*

*Aos meus irmãos*

## ***DEDICATÓRIA ESPECIAL***

Ao saudoso amigo e professor

**Nestor M. Ramos Páez**

que soube me encaminhar desde o início da minha vida acadêmica, no fascinante mundo das pesquisas e da educação das novas gerações, dedico o resultado deste trabalho.

## *AGRADECIMENTOS*

Na busca incansável do conhecimento e na nobre tarefa de expandir os limites do saber, ninguém é absoluto. A comunidade de esforços é necessária. Cada pesquisa, com seus correspondentes aportes, integra a dedicação e o trabalho de muitas pessoas. A que se apresenta aqui não é uma exceção.

Agradeço em primeiro lugar, ao Prof. Dr. Jayme P. Ortiz, orientador, pela possibilidade que me ofereceu quando aceitou dirigir o nosso trabalho nestes “turbulentos e poliméricos” anos, pelo apoio constante e pela forma em que dirigiu esta pesquisa;

Ao Eng<sup>o</sup>. Carlos Alberto Nunes e às Indústrias Químicas Arujá Ltda, pelo fornecimento das amostras de polímeros que permitiram a realização deste trabalho, pela amizade, paciência e imensa vontade de ajudar;

Aos Professores Podalyro Amaral de Souza, Fábio Saltara e Antonio Luis de Campos Mariani, pela freqüente e sistemática disposição para atende-nos;

Ao Zé Guilherme, cuja experiência e capacidade fizeram mais simples e possível, as difíceis tarefas de projetar, montar e construir a bancada experimental;

À Professora Dra. Carmen C. Tadini, do Laboratório de Engenharia de Alimentos do Departamento de Engenharia Química da EPUSP, quem colocou à nossa disposição, de forma rápida e sem burocracia, o equipamento e assessoria necessários para a realização dos ensaios reológicos das soluções poliméricas;

Ao Dr. Noboru Minei, por ter colocado à nossa disposição um programa de cálculo, fruto do seu trabalho, para abordar uma parte importante desta pesquisa;

Parágrafo aparte para meu amigo Regino, imprescindível na minha vinda e importante pessoa durante estes anos no Brasil;

Aos estudantes cubanos da USP, conhecidos lá ou aqui, não importa. A união da comunidade cubana permitiu-me enfrentar os grandes desafios que este trabalho exigiu. Ora um, ora outro, muitos contribuíram e tem aqui o seu grão de areia;

Aos amigos brasileiros pela ajuda em todo momento;

Aos amigos de América toda, com os quais partilhamos as saudades das nossas terras, e sonhamos com um mundo unido e sem diferenças;

À CAPES/Brasil pelo apoio financeiro durante a realização dos meus estudos;

Ao Brasil, país magnífico, pelo carinho com que me recebeu e pelas imensas possibilidades que me ofereceu, para me tornar um profissional mais preparado;

Corro o risco de esquecer alguns nomes. Não me julguem. Hoje e no futuro sempre estarei lembrando de vocês;

Simplesmente

OBRIGADO A TODOS

## ERRATA

Tese de Doutorado

Autor: Guillermo Vilalta Alonso

Orientador: Jayme P. Ortiz

Título: Modificações na estrutura de escoamentos turbulentos em canal devido a adição de polímeros. Mecanismo da redução de atrito.

	<i>Pág.</i>	<i>Parágrafo/ linha ref.</i>	<i>Onde se lê ....</i>	<i>Leia-se ....</i>
Cap. 2	18	2/2	maior  Ligth	menor  Ligth
Cap. 3	57	4/1	Amplification by Stimulated Emission	Amplification by Stimulated Emission Radiation
Cap. 3	60	5/1	tabela (3.1)	tabela (3.2)
Cap. 3	63	3/1	por de Araujo	por Araujo
Cap. 4	73	eq. (4.3)	$H = \frac{2}{3}h + \frac{Q^2}{2gb^2h^2}$	$H = h + \frac{Q^2}{2gb^2h^2}$
Cap. 5	99	3/3	$Re < 9 \times 10^4$	$Re < 9 \times 10^3$
Cap. 5	99	4/1	$Re \approx 9 \times 10^4$	$Re \approx 9 \times 10^3$
Cap. 5	104	1/3	No	Não
Cap. 5	117	1/1	menos que zero	menor que um
Cap. 5	124	1/2	na a região	na região
Cap. 5	130	5/6	realação	relação
Cap. 5	145	3/2	da atrito	de atrito

Cap. 5	155	8/2	excercem	exercem
Cap. 6	160	2/1	Gennes de	Gennes (1990)
Cap. 6	162	3/1	foi	tenha sido
Cap. 7	177	2/3	que verificado	que foi verificado
Cap. 7	180	2/2	trazeram	trouxeram
Anexo 1	184	eq. (A.9)	$H = \frac{2}{3}h + \frac{Q^2}{2gb^2h^2}$	$H = h + \frac{Q^2}{2gb^2h^2}$
Ref. Bibl.	192	2/4	1972	1995
Ref. Bibl.	192	9/1	MOIN, R	MOIN, P
Ref. Bibl.	192	17/1	Grag	Drag



## SUMÁRIO

Lista de figuras	
Lista de tabelas	
Lista de símbolos	
Resumo	
Abstract	
1 Introdução .....	1
2 Redução de atrito em escoamentos turbulentos por adição de polímeros .....	6
2.1 Abordagem molecular .....	7
2.2 Abordagem da dinâmica dos fluidos .....	10
2.2.1 Hipótese da Subcamada Viscosa (S.C.V.) .....	10
2.2.2 Hipótese da Subcamada Intermediária (S.C.I.) .....	20
2.3 Tendências atuais no estudo da redução da atrito por adição de polímeros.	35
2.4 Conclusões .....	40
3 Instalação e procedimento experimental .....	42
3.1 Descrição da instalação experimental .....	42
3.1.1 Sistema de medição da vazão .....	45
3.1.2 Sistema de injeção das soluções poliméricas. Preparo e características da solução mãe .....	48
3.1.2.1 Estimativa analítica da dispersão do polímero em soluções homogêneas..	50
3.1.2.2 Degradação mecânica das soluções poliméricas .....	53
3.1.2.3 Estudo de soluções não-homogêneas .....	54
3.1.3 Sistema de medição, aquisição e processamento de dados .....	56
3.1.3.1 Influência do tamanho da amostra na aquisição de dados .....	59
3.1.3.2 Partículas traçadoras em sistemas L.D.A. ....	62
3.1.3.3 Seleção da seção de testes .....	63
3.2 Polímeros .....	66
3.3 Procedimento experimental .....	67
4 Estrutura da turbulência em canais .....	71
4.1 Velocidade de atrito e coeficiente da eficiência da redução de atrito .....	71

4.2	Perfis adimensionais de velocidade média, de intensidade turbulenta e das tensões de Reynolds .....	74
4.2.1	Lei de parede .....	74
4.2.2	Perfis de intensidade turbulenta .....	74
4.2.3	Perfis das tensões de Reynolds .....	75
4.3	Tensão de cisalhamento de parede .....	75
4.4	Parâmetros de ordem superior .....	75
4.5	Produção e dissipação de energia cinética turbulenta .....	76
4.6	Análise espectral, escalas e cascata de energia .....	78
4.7	Princípio de máxima entropia .....	83
4.8	Breve caracterização reológicas das soluções poliméricas .....	84
4.8.1	Procedimento experimental dos ensaios reológicos .....	86
4.8.2	Preparo das soluções poliméricas para ensaios reológicos .....	87
4.9	Considerações finais .....	87
5	Análise e discussão dos resultados .....	88
5.1	Considerações gerais .....	88
5.2	Campo do escoamento turbulento .....	89
5.2.1	Lei de parede .....	89
5.2.2	Relação $f$ versus $Re$ .....	99
5.2.3	Intensidade turbulenta .....	103
5.2.4	Momentos de ordem superior .....	106
5.2.4.1	Coeficiente de assimetria axial .....	106
5.2.4.2	Coeficiente de curtose axial .....	107
5.2.5	Perfil das tensões de Reynolds: .....	109
5.2.6	Produção de energia cinética turbulenta .....	112
5.2.7	Análise espectral e escalas da turbulência .....	118
5.2.7.1	Análise espectral de turbulência .....	118
5.2.7.1.1	Análise espectral da turbulência para soluções poliméricas .....	121
5.2.7.2	Escalas de turbulência .....	126
5.2.7.2.1	Modificações das escalas de turbulência na região de parede .....	126
5.2.7.2.2	Modificações das escalas de turbulência na região central do escoamento .....	128

5.2.8 Princípio de máxima entropia.....	135
5.3 Início da redução de atrito.....	142
5.3.1 Efeito da concentração das soluções poliméricas sobre o início da R.A ...	143
5.3.2 Efeito do diâmetro hidráulico sobre o início da redução de atrito.....	146
5.4 Redução de atrito em soluções heterogêneas.....	147
5.4.1 Redução de atrito local.....	149
5.5 Resultados da análise reológica das soluções poliméricas.....	153
5.6 Considerações finais.....	156
6 Discussão do mecanismo da redução de atrito a partir dos resultados obtidos neste trabalho.....	157
6.1 Análise reológica.....	157
6.1.1 Influência dos efeitos viscosos.....	158
6.1.2 Influência dos efeitos elásticos.....	159
6.2 Análise das modificações na estrutura da turbulência por adição de polímeros.....	161
6.3 Mecanismo de redução de atrito em soluções heterogêneas.....	164
6.4 Mecanismo da redução de atrito em soluções homogêneas.....	167
6.4.1 Aspectos gerais da redução de atrito.....	167
6.4.2 Aspectos fenomenológicos da redução de atrito.....	170
7 Conclusões.....	175
Anexo I Análise de incerteza.....	181
Referências bibliográficas.....	191

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura (2.1a) Mecanismo de formação das estrias.

Figura (2.1b) Mecanismo de colapso das estrias.

Figura (2.2) Efeito de  $\varphi$  sobre  $\lambda^+$ .

Figura (2.3) Influência de  $Y^+$  na relação de  $\lambda^+$  versus  $\varphi$ .

Figura (2.4) Perfil de intensidade turbulenta axial mostrando um deslocamento da zona de produção para pontos mais afastados da parede. Gráfico superior: injeção no eixo, inferior: na parede.

Figura (2.5) Perfil das tensões de Reynolds para solvente e soluções poliméricas.

Figura (2.6) Espectros de energia de  $u'$ ,  $v'$  e  $u'v'$ . + água,  $\square C_{sm}=1000$  ppm,  $\circ C_{sm}=500$  ppm.

Figura (2.7) Função de densidade de probabilidade conjunta para água (à esquerda) e para soluções poliméricas (à direita).

Figura (3.1) Instalação experimental.

Figura (3.2) Tanque homogeneizador.

Figura (3.3) Esquema do sistema de medição de vazão.

Figura (3.4) Esquema das tomadas de pressão utilizando o método do "Triple T".

Figura (3.5) Sistema de injeção das soluções poliméricas.

Figura (3.6) Sistema de injeção para soluções não-homogeneas.

Figura (3.7) Relação entre o Erro Absoluto Médio ( $E$ ) e o tamanho da amostra.

Figura (3.8) Perfis de velocidade para  $Re \approx 4,83 \cdot 10^4$ , para diferentes valores de  $x$ .

Figura (3.9) Perfis de velocidade para  $Re \approx 8,2 \cdot 10^4$ , para diferentes valores de  $x$ .

Figura (4.1) Vista oblíqua do canal em estudo, com suas principais denominações.

Figura (4.2) Esquema que representa a posição das regiões e as escalas integrais do escoamento a partir de considerações geométricas.

Figura (4.3) Representação esquemática dos turbilhões com suas escalas integrais de comprimento.

Figura (5.1) Perfil de velocidades adimensionalizado para água a diferentes valores de  $Re$ .

Figura (5.2) Perfis adimensionalizado de velocidade para  $Re_0$ : (a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*.

Figura (5.3) Perfis adimensionalizados de velocidade para  $Re_3$ : (a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*; (c) Polyvilacetato.

Figura (5.4) Representação do modelo de três camadas de Virk (1971).

Figura (5.5) Diagrama da relação  $f$  versus  $Re$ : (a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*.

Figura (5.6) Coeficiente da Redução de Atrito,  $\varphi$ : (a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*.

Figura (5.7) Perfis de intensidade turbulenta axial para  $Re_1$ : (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.

Figura (5.8) Perfis de intensidade turbulenta axial para  $Re_2$ : (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.

Figura (5.9) Fator de assimetria na direção axial.

Figura (5.10) Coeficiente de Curtose na direção axial.

Figura (5.11) Perfis das tensões de Reynolds: *Iqapol* e  $Re_1$  (a), *Iqapac* e  $Re_0$  (b).

Figura (5.12) Perfil de produção de energia cinética turbulenta, para o *Iqapac*,  $Re_0$ .

Figura (5.13) Perfis de produção de energia cinética turbulenta para  $Re_1$ : (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.

Figura (5.14) Perfis de produção de energia cinética turbulenta para  $Re_2$ : (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.

Figura (5.15) Variação da produção de energia cinética turbulenta: (a) *Iqapol*,  $Re_1$ , (b) *Iqapac*,  $Re_0$ .

- Figura (5.16) Espectros de potência do solvente para os diferentes valores de Reynolds analisados e regiões dentro do campo de escoamento: (a) Região de parede; (b) Região central e (c) Região da superfície livre.
- Figura (5.17) Espectros de potência do solvente, para  $Re_0$  nas diferentes regiões do escoamento.
- Figura (5.18) Espectros de potência na região de parede e  $Re_0$ , para (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.
- Figura (5.19) Espectros de potência na região central do escoamento e  $Re_0$ : (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.
- Figura (5.20) Comparação dos perfis de velocidade experimentais com os obtidos pelo PME, para diferentes valores do número de Reynolds.
- Figura (5.21) Comparação dos perfis de velocidades axial: (a)  $Re_0$  e  $Cw= 5$  ppm, (b)  $Re_1$  e  $Cw= 20$  ppm, (c)  $Re_3$  e  $Cw= 10$  ppm.
- Figura (5.22) Comportamento de  $\Psi$  como função da concentração para diferentes valores de  $Re$ .
- Figura (5.23) Influência da concentração das soluções poliméricas sobre o início da redução de atrito para os sistemas estudados: (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.
- Figura (5.24) Efeito da concentração das soluções poliméricas sobre a declividade,  $\delta$ .
- Fig. (5.25) Relação entre o início da redução de atrito e o diâmetro hidráulico: (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.
- Figura (5.26) Variação da redução de atrito com o incremento da distância à jusante do injetor.
- Figura (5.27) Perfil de intensidade turbulenta axial para soluções heterogêneas.

Figura (5.28) Relação entre a viscosidade,  $\mu$  e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) para soluções de *Iqapol* às concentrações de estudo.

Figura (5.29) Relação entre a viscosidade,  $\mu$  e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) para soluções de *Iqapac* para  $C_w = 15$  e  $20$  ppm.

Figura (6.1) Regiões típicas de um escoamento de soluções poliméricas

Figura (6.2) Relação  $f$  versus  $Re$  para uma situação hipotética do escoamento

## ***LISTA DE TABELAS***

---

Tabela 2.1 Relação entre  $\lambda^+$ ,  $C_w$  e  $\varphi$ .

Tabela 3.1 Condições experimentais para ensaios de soluções heterogêneas

Tabela 3.2 Resultados da análise para determinação do tamanho da amostra.

Tabela 3.3 Perfis de velocidade em torno a seção em estudo,  $Re \approx 4,83 \cdot 10^4$

Tabela 3.4 Perfis de velocidade em torno a seção em estudo,  $Re \approx 8,2 \cdot 10^4$ .

Tabela 3.5 Polímeros utilizados no trabalho e suas características.

Tabela 3.6 Condições e parâmetros experimentais para soluções homogêneas.

Tabela 5.1 Valor do coeficiente  $A$  para água e soluções poliméricas.

Tabela 5.2 Valor do coeficiente  $B+\Delta B$  para água e soluções poliméricas.

Tabela 5.3 Máximos valores de  $k_w$  (final da região inercial) para escoamento de água nas diferentes regiões e para diferentes números de  $Re$ .

Tabela 5.4 Valores da taxa de dissipação,  $\varepsilon$  para água, na região de parede.

Tabela 5.5 Escalas integrais e de Kolmogorov na região de parede, para  $Re_0$  e  $Iqapol$ .

Tabela 5.6 Escalas integrais e de Kolmogorov na região de parede, para  $Re_0$  e  $Iqapac$ .

Tabela 5.7 Relação entre escalas integrais e de Kolmogorov na região de parede, para  $Re_0$  e as duas soluções poliméricas analisadas.

Tabela 5.8 Valores da taxa de dissipação,  $\varepsilon$  para escoamento de solvente, na região central do escoamento.

Tabela 5.9 Escalas integrais e de Kolmogorov na região central do escoamento, para  $Re_0$  e  $Iqapol$ .

Tabela 5.10 Escalas integrais e de Kolmogorov na região central do escoamento, para  $Re_0$  e  $Iqapac$ .



Tabela 5.11 Relação entre escalas integrais e de Kolmogorov na região central do escoamento, para  $Re_0$  e as duas soluções poliméricas analisadas

Tabela 5.12 Valor do parâmetro adimensional de entropia,  $M$  para água e soluções poliméricas.

Tabela A.1 Resultado da análise de incertezas.

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

$A$	Constante que representa a declividade do perfil de velocidade adimensionalizado para soluções poliméricas, equivalente ao inverso da constante de Von-Kármán
$A_{st}$	Área da seção de testes
$B$	Constante de integração na lei logarítmica, Limite de desvio (eq. A.1)
$b$	Largura do canal
$C_{av}$	Concentração homogênea, na Fig. (2.4)
$C_p$	Concentração da solução mãe, na Fig. (2.4)
$C_{sm}$	Concentração da solução mãe
$C_w$	Concentração das soluções poliméricas homogêneas
$d$	Diâmetro interior do injetor
$D_H$	Diâmetro Hidráulico
$E$	Erro absoluto médio
$e_k$	Escala de energia, por unidade de massa, dos menores turbilhões
$\mathcal{E}$	Escala integral de energia, por unidades de massa
$F$	Taxa de erupções, Coeficiente de Curtose
$f$	Coeficiente de perda de carga universal, frequência do sinal
$f_D$	Frequência Doppler
$f_{máx}$	Frequência máxima
$H$	Carga total
$h$	Altura da lâmina d'água

$\bar{h}$	Valor médio da altura da lâmina d'água entre duas seções
$h_e$	Altura do cilindro do reômetro
$h_m$	Distância entre o leito do canal e o ponto onde foram analisados os espectros e as escalas correspondente à região central do escoamento
$h_{mv}$	Distância da superfície livre ao ponto de máxima velocidade
$h_{rp}$	Distância entre o leito do canal e o ponto onde foram analisados os espectros e as escalas correspondente à região de parede
$h_{sl}$	Distância entre o leito do canal e o ponto onde foram analisados os espectros e as escalas correspondente à região da superfície livre
$h_{st}$	Altura da lâmina d'água na seção de testes
$G$	Termo que representa o déficit de quantidade de movimento em soluções poliméricas
$g$	Aceleração da gravidade
$K$	Coefficiente de Curtose
$k$	Constante de Von-Kármán
$k_w$	Número de onda
$\mathcal{L}$	Escala integral de comprimento
$L$	Comprimento do canal
$l$	Escala de comprimento da turbulência
$l_k$	Escala de comprimento dos menores turbilhões
$M$	Parâmetro de entropia
$M_c$	Relação entre a vazão de fluido corante e a vazão na S.C.V

$M_f$	Massa final na aferição da Placa de Orifício
$M_i$	Massa inicial na aferição da Placa de Orifício
$M_t$	Torque aplicado ao rotor do reômetro
$n$	Número de ensaios e/ou medições
$P$	Produção de energia cinética turbulenta, Limite de precisão (eq. A.1)
$P(u_i')$	Função de densidade de probabilidade da componente flutuante $u_i'$
$Q$	Vazão volumétrica
$Q_r$	Vazão de injeção da solução mãe (leitura do rotâmetro)
$R$	Raio da tubulação
$R_g$	Raio de giração das moléculas de polímeros
$RA$	Redução da atrito ou equivalentemente redução de arrasto
$r$	Raio em um ponto genérico da tubulação
$rp$	Raio médio das partículas traçadoras
$Re$	Número adimensional de Reynolds
$R_H$	Raio hidráulico do canal
$R_x$	Coefficiente de correlação axial
$r_i$	Raio do cilindro interno do reômetro
$r_e$	Raio do cilindro externo do reômetro
$S$	Coefficiente de Assimetria, Taxa de deformação do escoamento médio
$S(f)$	Espectro de potência no domínio da frequência
$S(k_w)$	Espectro de potência no domínio do número de onda
$T$	Temperatura do fluido

$t$	Tempo, escala de tempo
$T_B$	Tempo entre erupções
$t_k$	Escala de tempo dos menores turbilhões
$\mathcal{T}$	Escala integral de tempo
$U$	Velocidade média do escoamento
$U$	Incerteza relativa da magnitude, em %
$u$	Velocidade média local
$U_{máx}$	Velocidade máxima do escoamento na seção
$u'$	Componente flutuante na direção $x$
$u_*$	Velocidade de atrito
$U^+$	Velocidade adimensionalizada com variáveis internas
$\mathcal{U}$	Escala integral de velocidade
$U_Z$	Incertezas na determinação de um parâmetro genérico qualquer
$u_k$	Escala de velocidade dos menores turbilhões
$u_p$	Velocidade de injeção da solução mãe
$\overline{u'v'}$	Tensões de Reynolds
$v'$	Componente flutuante na direção $y$
$x$	Coordenada axial, direção do escoamento
$x^+$	Distância axial adimensionalizada
$y$	Distância perpendicular ao leito do canal
$Y^+$	Número de Reynolds de Atrito
$\mathcal{W}$	Escala integral de vorticidade
$w_k$	Escala de vorticidade dos menores turbilhões

### ***Letras Gregas***

$\alpha$	Constante numérica ( $\approx 1,5$ ) na equação (4.9)
$\Delta M$	Diferença de massa
$\Delta H$	Leitura do manômetro de Mercúrio
$\delta$	Declividade da curva das soluções poliméricas, na análise da início da redução de atrito
$\varepsilon$	Dissipação de energia cinética turbulenta
$\eta$	Viscosidade intrínseca das soluções poliméricas
$\varphi$	Coefficiente de Eficiência da Redução de Atrito
$\lambda$	Espaçamento das estrias, comprimento de onda
$\lambda^+$	Espaçamento adimensional das estrias
$\mu$	Coefficiente de viscosidade dinâmica do fluido
$\nu$	Coefficiente de viscosidade cinemática do fluido
$\Pi_p$	Razão de variação da produção de energia cinética turbulenta
$\rho$	Massa específica do fluido
$\sigma_i$	Raiz média quadrática da componente $u_i'$
$\tau_o$	Tensão de cisalhamento na parede
$\xi$	Relação entre $r$ e $R$
$\Theta$	Tempo característico do polímero
$\theta$	Ângulo de interseção do feixe
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação
$\Delta B$	Deslocamento do perfil de velocidade adimensionalizado para soluções poliméricas

$\Omega$	velocidade angular do motor do reômetro
$\omega$	Frequência angular
$\omega^+$	Frequência angular adimensionalizada
$\psi$	Coefficiente de variação da turbulência

***Subscritos***

s	Referido ao solvente
p	Referido ao polímero
1	Referido à seção 1 (na entrada) do canal (Figura (4.1))
2	Referido à seção 2 do canal (Figura (4.1))

---

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental da influência da adição de polímeros na estrutura dos escoamentos turbulentos em canais. As diferentes teorias existentes para explicar a redução de atrito foram avaliadas e, pelos resultados obtidos, propõe-se um mecanismo para explicá-lo. Foram utilizados três polímeros, de indústrias brasileiras, um de alto peso molecular (*Iqapol*) e os outros dois de baixo peso molecular (*Iqapac* e *Polivinilacetato*). O estudo foi realizado para valores de número de Reynolds na faixa de  $8 \times 10^3$  e  $10^5$  e quatro valores de concentração da solução polimérica (5, 10, 15 e 20 ppm). Para a realização das medições foi utilizado um anemômetro laser unidimensional, através do qual foram levantados os perfis de velocidade axial numa região do escoamento desenvolvido. Os resultados mostraram que a estrutura da turbulência das soluções poliméricas muda significativamente na região de parede,  $Y^+ < 100$ , o que foi comprovado tanto na análise de soluções homogêneas quanto heterogêneas. Do ponto de vista reológico, os polímeros induzem modificações locais da viscosidade, embora mantendo características Newtonianas, sendo considerada esta propriedade mais importante do que as características elásticas das moléculas. A análise da dinâmica dos fluidos mostrou que os processos de produção e dissipação são sensivelmente alterados. Isto se reflete nas escalas de turbulência dos turbilhões menos energéticos, e conseqüentemente na cascata de energia, que não pode se desenvolver totalmente. O coeficiente de perda de carga universal,  $f$  apresenta diminuições significativas (até  $\approx 60\%$  e  $C_w = 20$  ppm, para o *Iqapol*) que dependem da concentração e do tipo de polímero.



Utilizou-se o Princípio de Máxima Entropia, (P.M.E) para caracterizar a turbulência através do parâmetro de entropia  $M$ , que diminui quando comparado com o solvente. Os resultados demonstraram que os polímeros de baixo peso molecular são capazes de reduzir atrito, embora o efeito quantitativo seja menor do que aquele de alto peso molecular. Conclui-se que os polímeros atuam no sentido de suprimir parcialmente a turbulência.

---

## ABSTRACT

In this work, an experimental study about the influence of the polymer addition in the turbulent channel flow structure is presented. The different theories available to explain the drag reduction were analyzed and, by the results obtained, it is proposed a mechanism to explain them. Three different polymers, from Brazilian industries were used. One with of high molecular weight (*Iqapol*) and the two other with low molecular weight (*Iqapac e Polyvinilacetate*). The study was carried out at different Reynolds numbers in the range between  $8 \times 10^3 - 10^5$  and with four concentrations of the polymeric solutions (5, 10, 15 and 20 ppm). The measurements of the streamwise velocity profiles in a developed turbulent flow were made by means of an one-component Laser Doppler Anemometer (L.D.A.). The results showed that the turbulent structure of the polymeric solutions changes in the near wall region,  $Y^+ < 100$ , in both the homogeneous and heterogeneous solutions. In the rheological analysis, the polymers induce modifications in the local viscosity, although the Newtonian characteristics were maintained. This property was considered more important than the elastic characteristic of the molecules. The analysis of the fluid dynamic, showed that the production and dissipation processes were sensibly changed. This is reflected in the small eddies scales and consequently in the energy cascade that cannot be totally developed. The diminishment of the head loss coefficient,  $f$  is meaningful ( $\approx 60\%$  to  $C_w=20$  ppm for *Iqapol*) and depends on the polymeric solutions concentration and the kind of polymer. The Maximum Entropy Principle (P.M.E.) was used to characterize the turbulence, through the parameter  $M$

which decreases when is compared to the solvent. The results of this work, showed that the low molecular weight polymers are able to drag reduction, although the effects are smaller if compared to the high molecular weight polymers. Finally it is concluded that polymers act in the direction of partially suppressing of turbulence.

## *CAPÍTULO I*

---

### *INTRODUÇÃO*

Os escoamentos turbulentos são muito comuns tanto na natureza quanto nas mais diversas aplicações industriais. Em vista disto, nas últimas décadas, uma concentração de esforço investigativo tem ocorrido, na tentativa de compreender as características estruturais dos mesmos, sendo este o alvo de numerosos estudos experimentais e mais recentemente de investigações numéricas. Como resultado deste esforço, hoje existe uma grande quantidade de informação sobre a estrutura do escoamento turbulento em tubulações e canais.

De uma forma geral, todos os trabalhos sobre este tema são coincidentes no que se refere à estrutura do escoamento na região do núcleo turbulento, porém as questões relativas às propriedades turbulentas na região de parede, ainda permanecem sem solução, sendo os resultados obtidos por simulação numérica, algumas vezes, inconsistentes e contraditórios com os resultados obtidos experimentalmente.

A região de parede apresenta grande importância já que é a região onde as maiores frações de tensões turbulentas e energia são produzidas e dissipadas, o que faz com que, atualmente, exista muito interesse no estudo da sua estrutura.

Na década de 1950 começaram a se desenvolver uma série de estudos sobre a camada limite turbulenta utilizando-se diferentes métodos de visualização de escoamentos. Este esforço teve um momento importante com a publicação do conhecido trabalho de Kline *et al* (1967) onde foram revelados novas características dos escoamentos na região de parede (Cantwell 1981). Do trabalho de Kline *et al* (1967)

pôde-se observar que, para escoamentos com baixo número de Reynolds e utilizando bolhas de hidrogênio como método de visualizá-lo, as bolhas se acumulavam em regiões alternadas de altas e baixas velocidades formando estrias. Estas estrias interagiam com o núcleo turbulento através do processo de erupções.

O processo de erupções é muito importante na produção de energia cinética turbulenta ( $P$ ), dominando os processos de transferência de quantidade de movimento entre as regiões interna e externa do escoamento e conseqüentemente influenciando na determinação da estrutura do escoamento nesta região. Corino & Brodkey (1969) e Kim *et al* (1971) estimaram que toda a produção de energia cinética turbulenta na região de parede ocorre durante estes eventos.

Por outro lado, resultados experimentais tem demonstrado que a estrutura dos escoamentos turbulentos reflete-se no balanço local de produção, transporte e dissipação de energia cinética turbulenta, o que faz necessário o conhecimento e estabelecimento de métodos de controle destes processos nas regiões próximas da parede, tendo em vista sua influência na redução dos custos de energia nos sistemas de escoamentos.

Neste sentido, a crise do petróleo dos anos 70, estimulou nas áreas de energia, o desenvolvimento de tecnologias para diminuir os processos de dissipação de energia (ou de arrasto viscoso) em escoamentos turbulentos.

Novas tecnologias tem sido desenvolvidas com o objetivo principal de reduzir o atrito nos escoamentos, destacando-se os processos de redução de atrito por meios passivos e ativos

A redução de atrito por meios passivos consiste em modificar as características geométricas das superfícies que limitam o escoamento, ou seja, podem afetar o

escoamento sem alterar o fluido: riblets, aletas, canaletas, curvaturas convexas e manipuladores de camada exterior.

Por outro lado, a característica básica da redução de atrito por meios ativos é que a composição do fluido é modificada e por esta razão o escoamento a ele associado. Exemplos deste método são: injeção de gás na camada limite, injeção de partículas e injeção de polímeros, grãos e soluções surfactantes.

Dentre os métodos de redução de atrito por meios ativos, a adição de polímeros tem-se mostrado das mais efetivas, podendo-se obter, com pequena quantidade de polímeros, diminuições da resistência hidráulica em escoamentos da ordem de 40-50%, em média, com respeito ao escoamento do solvente puro, para as mesmas condições.

Devido a isto, o uso de polímeros tem-se difundido, sendo algumas das suas aplicações:

- Tubulações e canais: De amplo uso, sobretudo em sistemas de transporte a longa distância. A injeção de polímeros reduz o consumo de energia nos escoamentos, levando a uma considerável diminuição do consumo de potência nos sistemas de bombeamento. Também é usado com frequência em sistemas de calefação e aquecimento de água;
- Durante grandes enchentes a adição de polímeros pode aumentar razoavelmente a capacidade de escoamento em um curto período de tempo. Apresenta uma boa relação custo-benefício;
- Sistemas contra-incêndio: A presença de polímeros pode incrementar a vazão e a distância dos jatos. Tem sido utilizado com sucesso em várias cidades da Europa e Estados Unidos;

- Barcos e outros meios de transporte marítimo: Redução de atrito é obtida injetando soluções poliméricas altamente concentradas na proa dos barcos, ou através de paredes porosas;
- Outras: Agricultura, estudos científicos etc.

Na sua forma mais simples, a redução de atrito por adição de polímeros pode ser definida como *o conjunto das modificações que ocorrem na estrutura dos escoamentos turbulentos, decorrentes da adição de polímeros.*

Algumas destas modificações, como veremos em breve, diz respeito aos processos de produção, dissipação e transferência de energia, isotropia das componentes flutuantes da velocidade e das propriedades reológicas destes escoamentos.

O fato de que alguns aditivos em forma diluída possam reduzir o atrito viscoso em escoamentos turbulentos é de certo modo contraditório, já que neste tipo de soluções ocorre um incremento da viscosidade, o que, em termos de escoamento Newtoniano, deveria provocar maior dissipação de energia quando comparado com o solvente. A tentativa de buscar uma justificativa para este comportamento, faz com que o estudo de escoamentos redutores de atrito resulte muito atraente e pressupõe que os aditivos devem interagir com o campo de escoamento de uma forma diferente daquela observada para o solvente.

Para pesquisadores deste tema, hoje existe a certeza de que o polímero diminui o atrito, todavia não há uma resposta convincente de como isso ocorre, sendo que os esforços investigativos hoje estão dedicados à interpretação física do mecanismo de redução de atrito.

O presente trabalho é uma extensão da Dissertação de Mestrado de Vilalta (1995), no qual se avalia o controle da turbulência devido à adição de polímeros e insere-se na linha de pesquisa das mudanças fenomenológicas na estrutura da turbulência.

Trata-se de um estudo experimental, cujo objetivo principal é investigar e diagnosticar as modificações estruturais que ocorrem nos escoamentos turbulentos devido à adição de polímeros. Para cumprí-lo, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Análise das modificações nos perfis adimensionalizados, de intensidade turbulenta, e das tensões de Reynolds.
2. Análise espectral da turbulência.
3. Estudo das modificações nas escalas de turbulência dos escoamentos redutores de atrito e sua influência nos processos de produção e dissipação de energia. Cascata de energia.
4. Modificações das características reológicas em escoamentos de soluções poliméricas e sua relação com a redução de atrito.
5. Mecanismo da Redução de Atrito.



## CAPÍTULO 2

---

### **REDUÇÃO DE ATRITO EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS.**

A redução de atrito por adição de polímeros tem-se apresentado para a comunidade científica como um grande mistério, desde a década de 1940, quando Toms (1948) apresentou as primeiras evidências sobre este fenômeno. Seus resultados mostraram que soluções de polimetilmetacrilato em monoclorobenzeno precisavam de menor energia que o solvente puro para escoar. Outros trabalhos posteriores confirmaram este fenômeno que ficou conhecido na literatura como *fenômeno Toms*.

No final dos anos 60, a redução de atrito por adição de polímeros começou a ser estudada fenomenologicamente. Ao lado das pesquisas sobre a turbulência em escoamentos Newtonianos, os cientistas necessitavam avançar na explicação do mecanismo físico responsável por este fenômeno. Apesar do desenvolvimento de novas técnicas de visualização e mapeamento de escoamentos e de instrumentos de medição de velocidade de última geração, ainda hoje, não existe consenso de qual é a real influência da adição de polímeros sobre a estrutura da turbulência.

A bibliografia técnica registra duas abordagens para o estudo da redução de atrito por adição de polímero:

- A abordagem molecular que estuda o comportamento e modificações que ocorrem nas moléculas de polímeros dentro do campo do escoamento e como isto pode levar à redução de atrito.

- A abordagem da dinâmica dos fluidos (considerados como meios contínuos) que considera as modificações que ocorrem na estrutura da turbulência quando da adição de polímeros.

### ***2.1 Abordagem Molecular***

Considerando a abordagem molecular, o modelo inicialmente aceito foi proposto por Lumley (1977). Este modelo, conhecido como Modelo de Extensão Molecular, foi posteriormente confirmado e enriquecido por outros autores (Hinch 1977, Zakin & Hunston 1980 e Rabin & Zielinska 1989), e questionado por outros [apud Lee *et al* (1995)].

No Modelo de Extensão Molecular de Lumley (1977) busca-se uma explicação através da relação entre a taxa de deformação e a vorticidade nas diferentes regiões do escoamento (a subcamada viscosa, a subcamada elástica e o núcleo turbulento), considerando-se para isto, a influência da extensão das moléculas na variação local da viscosidade das soluções poliméricas e como isto pode reduzir o atrito.

Lumley analisa o fato que, no núcleo turbulento de um escoamento a vorticidade e a taxa de deformação não estão correlacionadas uma com a outra, podendo ocorrer virtualmente qualquer combinação entre elas. Ambas apresentam uma distribuição de probabilidades com grandes caudas (“*long tail*”), não ocorrendo portanto uma distribuição Gaussiana. Deste modo, há uma possibilidade de se encontrar regiões em que ocorrem altas taxas de deformação com baixa vorticidade, sendo esta, a condição que permite a extensão da molécula. Na subcamada viscosa, no entanto, os valores da taxa de deformação e da vorticidade são da mesma ordem de grandeza, pelo que, não é de se esperar nesta região, a ocorrência de uma extensão molecular significativa.

Quando a molécula de polímero se estende, a viscosidade da solução se incrementa, como uma função do campo de velocidade ao redor da molécula. Como o diâmetro da molécula pode-se estender consideravelmente, o incremento local na viscosidade pode ser significativamente alto. Isto significa que a viscosidade no núcleo turbulento do fluido se incrementa mas não na subcamada viscosa. Este efeito provoca a supressão dos vórtices, que são grandes produtores de tensões de Reynolds, na subcamada intermediária, provocando um incremento da espessura desta subcamada sendo isto considerado um índice do efeito redutor de atrito. Hoje, esta teoria é apontada como uma das mais satisfatórias para explicar, molecularmente, a R. A.

É importante frisar que, quando proposta, esta teoria estava baseada no que “presumivelmente acontece” sem que existisse uma comprovação da mesma.

Rabin & Zielinska (1989) realizaram um amplo estudo teórico onde examinaram o efeito dos polímeros sobre a vorticidade, demonstrando que tanto em soluções poliméricas quanto em escoamentos Newtonianos, o fenômeno de esticamento de vórtices ocorre para todas as frequências.

Sua análise mostrou que a adição de polímeros inibe o processo de esticamento dos vórtices para as maiores frequências, o que se reflete em mudanças no processo de transferência de energia para as escalas menos energéticas.

Devido a isto a energia que seria dissipada nos vórtices menos energéticos é transferida e armazenada nas moléculas de polímeros que estão estendidas. Quando as moléculas entram em regiões da baixa taxa de deformação, readquirem o sua forma normal e transferem o conteúdo de energia que possuem ao campo de escoamento através das flutuações de velocidade de baixa frequência. Desta forma o processo dissipativo ocorre para frequências menores

Como resultado deste processo, a vorticidade nas escalas mais energéticas decresce e se incrementa nas escalas com maior frequência o que provoca que se iniba a cascata de energia na direção das escalas dissipativas. Baseados nestes resultados, os autores atribuem à resistência ao esticamento dos vórtices o mecanismo que provoca a redução de atrito.

Um elemento que difere dos argumentos de Lumley foi levantado por Massah *et al* (1993) e por Zametalin & Shtern (1982) [apud Lee *et al* (1995)], ao destacarem que é a elasticidade das moléculas e não a viscosidade estensional a responsável pela redução de atrito. Por exemplo, Massah *et al* (1993) utilizando um modelo tipo “*FENE bead spring*” para estudar como a molécula se comporta em um escoamento turbulento, predizeram que a extensão molecular pode ocorrer na subcamada viscosa (segundo Lumley isto só poderia ocorrer no núcleo turbulento) e que esta, pode não ser uma condição suficiente para que ocorra a redução de atrito. Como justificativa para esta afirmação os autores citam evidências experimentais nas quais, em escoamentos laminares em tubos capilares, onde não tem sido registrado redução de atrito, pode ocorrer extensão molecular.

O fato de ser a redução de atrito uma manifestação da característica elástica das soluções poliméricas em escoamentos turbulentos pressupõe que só os polímeros com alto peso molecular podem reduzir o atrito. Isto estaria relacionado à taxa de deformação imposta às moléculas durante a extensão e seu efeito sobre a viscosidade. É de se esperar então, que as moléculas de menor peso molecular se estendam a baixos valores da taxa de deformação onde predominam efeitos viscosos. Devido a isto, devem ser inelásticas não mostrando, portanto, capacidade para reduzir o arrasto viscoso.

Estes critérios tem-se mostrado contraditórios pois Lodes & Macho (1989), Sá Pereira & Pinho (1994) e Vilalta & Ortiz (1997a) demonstraram que soluções de polivinilacetato, de baixo peso molecular, são capazes de provocar diminuições de  $f$ .

De forma geral os trabalhos que estudam a dinâmica das moléculas de polímeros em escoamentos redutores de atrito, convergem com relação a afirmação de que a molécula se estende, mas não existe consenso sobre como ocorre este processo e qual seu impacto sobre a turbulência. Uma abordagem mais profunda sobre esta análise foge ao escopo deste trabalho, sugerindo-se neste caso, consultar Gyr & Bewersdorff (1995).

## ***2.2 Abordagem da Dinâmica dos Fluidos***

Uma extensa quantidade de trabalhos abordam o fenômeno da redução de atrito considerando as modificações que ocorrem na estrutura dos escoamentos turbulentos quando da adição de polímeros. Alguns trabalhos utilizam métodos de visualização (e mais recentemente de mapeamento) de escoamentos e outros realizam medições das principais quantidades turbulentas através de anemometria, fundamentalmente de anemometria laser.

Duas hipóteses (Tiederman *et al* 1985 e Vilalta & Ortiz 1997b) tentam explicar a redução de atrito através da dinâmica dos fluidos:

- Hipótese da sub-camada viscosa (S.C.V.);
- Hipótese da sub-camada intermediária (S.C.I.).

### ***2.2.1 Hipótese da Subcamada Viscosa (S.C.V.)***

Esta hipótese estabelece que o polímero atua na sub-camada viscosa, onde  $Y^+ < 5 \div 7$ , sendo que a causa da redução de atrito é a inibição da formação da estrutura de

estrias, típica desta região. Só algumas publicações deste tipo são conhecidas.

Para os estudos da turbulência de forma geral e da redução de atrito particularmente, um avanço significativo foi a definição da existência de uma estrutura de coerência na camada limite turbulenta apresentada por Kline *et al* (1967). Utilizando um método de visualização de escoamento através de bolhas de hidrogênio em canal, os autores revelaram a presença de movimentos muito bem organizados espacial e temporalmente. Estes movimentos levam à formação de uma estrutura de estrias de baixa velocidade na região de parede que interage com a região externa do escoamento através do seguinte processo: afastamento gradual, rápida oscilação, colapso e ejeção (ver Cantwell 1981).

O efeito do escoamento ao se aproximar ou se afastar da parede é o seu encurvamento, conforme mostrado na figura (2.1a). Este efeito de encurvamento deve atuar no sentido de alterar a componente transversal da vorticidade, provocando seu esticamento ou sua compressão. Como a componente transversal da vorticidade é devida, fundamentalmente a  $\partial u' / \partial y$ , estes processos de esticamento e compressão devem levar a variações de  $u'$  perto da parede. Onde o escoamento está aproximando-se à parede a componente transversal da vorticidade deve atuar no sentido de incrementar o valor de  $u'$ . Onde o escoamento está afastando-se  $u'$  deve ser reduzida pela compressão das linhas de vórtices. É esta variação de  $u'$ , que provoca a formação de regiões de alta e baixa velocidade que se movem ao longo do contorno sólido, sendo esta configuração definida como estria.

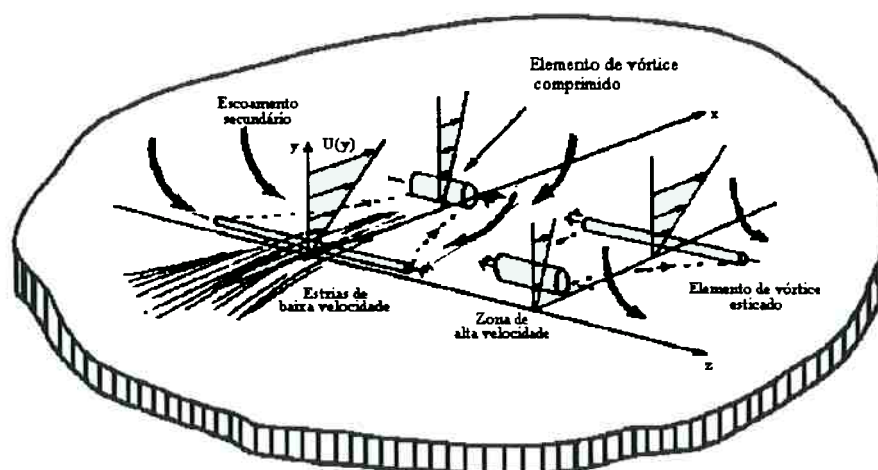


Figura. (2.1a) Mecanismo de formação das estrias. Tomado de Kline *et al* (1967).

A figura. (2.1b) mostra o mecanismo do colapso das estrias. Os elementos de vórtices esticados se afastam da região de parede entrando numa camada de tensões locais dinamicamente instável o que provoca o colapso das mesmas e a interação de estruturas típicas da região de parede com o núcleo turbulento.

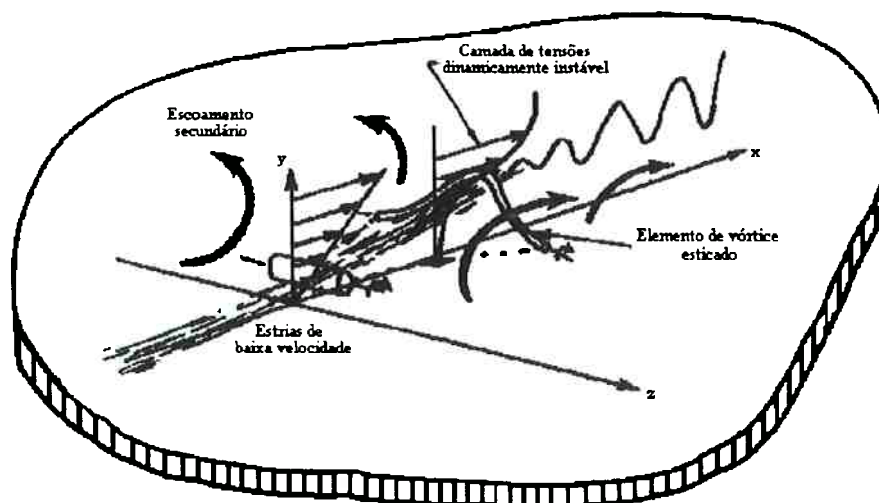


Figura (2.1b) Mecanismo de colapso das estrias. Tomado de Kline *et al* (1967).

A importância da etapa de erupções é que, de acordo com Kim *et al* 1971, aproximadamente 70% da energia cinética turbulenta é produzida durante estas erupções.

Os parâmetros básicos de uma estria, são:

- Espaçamento adimensional das estrias ( $\lambda^+$ );
- Taxa de erupções ( $F$ );
- Tempo entre erupções ( $T_B$ ).

De forma geral a análise destes parâmetros é feita através de estudos visuais da subcamada viscosa nos escoamentos turbulentos.

As principais modificações que ocorrem nestes parâmetros quando da adição de polímeros são resumidas a seguir.

**Espaçamento adimensional das estrias ( $\lambda^+$ ):** é interpretado como uma medida das menores escalas na direção transversal. Pode ser calculado pela expressão:

$$\lambda^+ = \lambda u_* / \nu \quad (2.1)$$

e seu valor para escoamentos Newtonianos é da ordem de  $100 \pm 20$ .

A literatura tem indicado uma tendência de maiores valores de  $\lambda^+$  para soluções poliméricas quando comparadas com os escoamentos Newtonianos. A relação de  $\lambda^+$  com  $\varphi$  e  $u_*$  é pouco nítida, tendo sido objeto de vários trabalhos, sendo que as diferenças mostradas correspondem ao grau de desenvolvimento dos métodos de visualização de escoamento utilizados.

Por exemplo, Fortuna & Hanratty (1972), Donoheu *et al* (1972) e Achia e Thompson (1972), utilizando diferentes métodos, obtiveram variações que vão desde modestos a grandes incrementos de  $\lambda^+$  com o aumento de  $\varphi$  e da velocidade de atrito,  $u_*$ .



Utilizando um método de visualização por injeção de corantes num canal bi-dimensional, Donohue *et al* (1972) fizeram um estudo para determinar se a adição de polímeros alterava a estrutura da subcamada viscosa e conseqüentemente os processos de produção de energia cinética turbulenta.

A figura (2.2) mostra seus resultados comparando-os com os resultados de outros trabalhos. Pode-se ver nesta figura que todos os resultados conduzem a um aumento da distância entre as estrias com o aumento da eficiência da redução de atrito,  $\varphi$ .

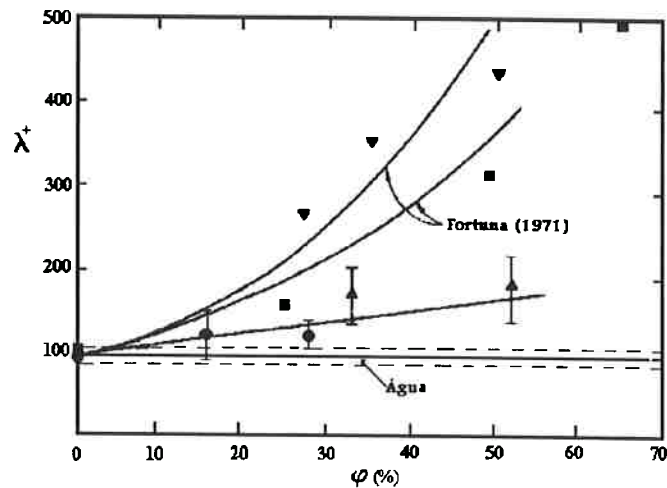


Figura (2.2) Efeito de  $\varphi$  sobre  $\lambda^+$ . ■ Eckelman *et al* (1972); ▼ Fortuna & Hanratty (1972); ▲ e ● Donohue *et al* (1972)

As diferenças entre os resultados são atribuídas a dois fatores fundamentais a saber: utilização de diferentes combinações polímero-solvente e diferentes interpretações de parâmetros estatísticos na avaliação de  $\lambda^+$ .

Fortuna & Hanratty (1972) utilizaram técnicas eletroquímicas e ferramentas estatísticas para estudar a influência de polímeros sobre  $\lambda^+$ , análise feita através da determinação do coeficiente de correlação ( $R_x$ ). Este foi calculado para diferentes valores

de  $\varphi$  e  $Re$  ( $\varphi=27\%$ ,  $Re=27\ 600$ ;  $\varphi=34,6\%$ ,  $Re=27\ 600$  e  $\varphi=49,3\%$ ,  $Re=39\ 200$ ). Seus resultados mostraram que o coeficiente de correlação axial é maior para as soluções poliméricas que para o solvente, indicando que as escalas nesta direção aumentam quando da adição de polímeros.

O valor de  $\lambda^+$  a partir de  $R_x$  é determinado tomando duas vezes a distância entre o primeiro e o segundo zero da função de correlação, verificando-se uma tendência similar à acima destacada.

Oldaker & Tiederman (1977), por outro lado, estudaram a estrutura espacial da sub-camada viscosa em escoamentos redutores de atrito, injetando corante através de fendas existentes na parede do canal. O parâmetro escolhido pelos autores para a análise, foi a relação entre a vazão de fluido corante e a vazão na sub-camada viscosa,  $M_c$ . Para escoamentos redutores de atrito e  $1/12 > M_c > 1/37$ , os resultados indicam um crescimento quase linear de  $\lambda^+$  com  $\varphi$ , seguindo a relação:

$$\lambda^+ = 1,9(\varphi) + 99,7 \quad (2.2)$$

Um outro resultado importante obtido por estes autores é a relação entre  $\lambda^+$  e  $\varphi$  para diferentes valores de  $Y^+$  que aparece representada na figura (2.3). Para  $Y^+ > 2$  a tendência de crescimento de  $\lambda^+$  com  $\varphi$  é linear. Para  $Y^+ < 2$  a taxa de crescimento é muito mais rápida.

Este resultado serve para explicar as diferenças nos resultados de Donohue *et al* (1972) e Eckelman *et al* (1972) (vide figura 2.2). Oldaker & Tiederman (1977) acreditam que as discrepâncias devem-se a medições feitas em diferentes regiões dentro da subcamada viscosa, ou seja, sem considerar o número de Reynolds de atrito, propondo que para representar a variação de  $\lambda^+$  versus  $\varphi$  seja escolhido o valor correspondente a  $\lambda^+ > 2$ .

A tabela 2.1 mostra, como exemplo, alguns dos resultados obtidos na determinação de  $\lambda^+$ , como função da porcentagem da redução de atrito e da concentração das soluções poliméricas.

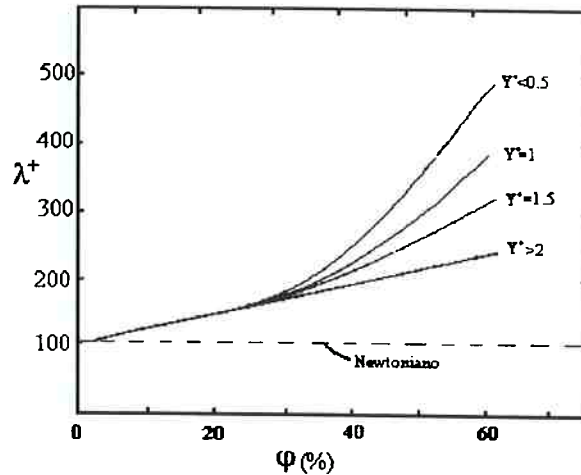


Figura (2.3) Influência de  $Y^+$  na relação de  $\lambda^+$  versus  $\varphi$

Tabela 2.1 Relação entre  $\lambda^+$ ,  $Cw$  e  $\varphi$ .

Trabalho	Determinação visual	Ajuste de curvas (mínimos quadrados)
Oldaker & Tiederman (1977)	s.p $Cw = 50$ ppm, $\lambda^+ = 169$ ( $\varphi=24\%$ )	$\lambda^+ = 1.9 (\varphi) + 99.7$
	s.p $Cw = 100$ ppm, $\lambda^+ = 175$ ( $\varphi=44\%$ )	
Tiederman <i>et al</i> (1985)	s.p $Cw = 100$ ppm, $\lambda^+ = 124$ ( $\varphi=22\%$ )	$\lambda^+ = 2.01 (\varphi) + 90.4$
	s.p $Cw = 200$ ppm, $\lambda^+ = 150$ ( $\varphi=27\%$ )	

**Taxa de erupções ( $F$ ):** o processo de erupções refere-se à seqüência de eventos envolvidos na ejeção do fluido da camada de parede para a região central do escoamento e está associado à contagem das ejeções que ocorrem por erupções sendo, que o valor determinado para escoamentos Newtonianos é  $F=2$  ejeções por erupção, de acordo com Tiederman *et al* (1977).

Os trabalhos iniciais de Donohue *et al* (1972) e Achia & Thompson (1977), empregaram o método de Kline *at al* (1967) para determinar a taxa de erupções em soluções poliméricas homogêneas. O método consiste na contagem de todas as erupções que ocorrem em um fluido marcado que penetra na região de parede através de uma pequena fenda transversal. Uma característica deste método é que para que se possa observar todas as erupções é necessário um campo de visão axial suficientemente grande (para escoamento de água é da ordem de  $100 < x^+ < 1500$ , sendo  $x^+$  a distância axial adimensionalizada, a jusante da fenda de injeção).

Desta forma o fluido marcado para que seja efetivamente contado, deve ter penetrado na estria antes do processo de ejeção do fluido para a região externa do escoamento. Um problema para a obtenção de informação precisa é que com o incremento da distância à jusante da fenda, mais difícil torna-se o processo de detecção experimental de novas erupções.

A literatura registra valores de  $x^+ = 1000 \div 2000$ , que para o caso do escoamento Newtoniano é adequado mas, como demonstrado por Tiederman *et al* (1977), para soluções poliméricas provavelmente não é suficiente.

Um outro método para determinar o valor de  $F$ , utilizando visualização de escoamento através de corante injetado por fendas, foi empregado por Tiederman *et al* (1985). Este método está baseado no conceito de que, mesmo que a taxa de erupções aumente a partir de zero e que com o incremento da distância axial eventualmente poderia diminuir, a taxa real de erupções não deve ser uma função desta distância em escoamentos totalmente desenvolvidos. Daqui, se há uma região axial onde o fluido semeado através de fendas na parede marca todas as erupções, então esta região estaria definida por um máximo no número de ejeções por unidade de tempo.

Os resultados da aplicação deste método tem-se mostrado razoavelmente precisos. Utilizando-o, os autores obtiveram um valor médio de 3,45 ejeções por erupção em escoamentos redutores de atrito com valores de concentração de 20-50 ppm. Estes resultados diferem daqueles encontrados para baixa concentração (1-2 ppm) por Luchick & Tiederman (1988). Para soluções homogêneas e de pequena concentração a taxa de ejeção por erupção cai para 2,3-2,5. Esta diferença pode indicar que, para  $C_w$  pequeno o mecanismo através do qual os polímeros são efetivos é diferente daquele que ocorre para altos valores de  $C_w$  ou que o perfil das concentrações pode produzir algum tipo de escoamento onde os mecanismos turbulentos ainda não alcançaram o estado de equilíbrio.

Os resultados gerais indicam que a taxa de erupções para escoamentos redutores de atrito é maior que para água. Uma característica importante destes resultados é que o decréscimo de  $F$  é maior do que o incremento no espaçamento transversal das estrias . Estes resultados coincidem com os de McComb & Rabie (1982) mas diferem dos de Donohue *et al* (1972) e Achia & Thompson (1977).

**Tempo médio entre erupções ( $T_B$ ):** Considerado como o tempo entre duas erupções consecutivas em uma mesma estria individual. Pela sua importância é considerado como um dos principais parâmetros no contexto da redução de atrito, já que o processo de erupção turbulenta pode controlar a difusão de polímeros da parede à região intermediária. Pode ser determinado pela relação:

$$T_B = 1/F\lambda. \quad (2.3)$$

Os resultados gerais mostram que  $T_B$  para as soluções poliméricas é maior do que para escoamentos Newtonianos. Achia & Thompson (1972) com auxílio da holografia interferométrica em tempo real e McComb & Rabie (1982) utilizando funções

de autocorrelação com pequeno tempo de amostragem obtiveram resultados qualitativamente similares.

É importante destacar que o trabalho de Luchick & Tiedeman (1988) tem sido citado aqui pelas características próprias dos estudos que realizaram, cujos resultados ajudam a interpretar as modificações na estrutura da S.C.V., embora em suas conclusões, os autores atribuam a redução de atrito a mudanças na sub-camada intermediária.

Dos estudos realizados chega-se à conclusão que o processo de produção turbulenta ocorre através de uma seqüência de eventos sendo que os aspectos mais importantes são: formação, afastamento, incremento ou crescimento oscilatório e colapso das estrias de baixa velocidade seguido de um evento de “*sweep*”. Acredita-se então, que para que o polímero afete a produção turbulenta seria necessário quebrar esta seqüência, resultando portanto uma nova seqüência ajustada às novas condições de equilíbrio.

Uma limitação ao estudo das estruturas coerentes em escoamentos redutores de atrito é a incapacidade de explicar, qualitativamente, por que a freqüência das erupções diminui ao se incrementar o espaçamento das estrias. Da análise visual, por exemplo, não é possível concluir que em todos os casos de redução de atrito,  $\lambda$  seja afetada no mesmo grau. Também não é possível prever as várias formas de suprimir as erupções que podem ocorrer depois da formação das estrias e qual é a importância de cada uma delas.

O conjunto das modificações até aqui analisadas mostram que, baseando-se nos resultados obtidos, os polímeros provocam modificações na estrutura da S.C.V. resumidas abaixo:

- Induzem a um processo de estabilização desta região;

- O elemento característico desta região é uma estrutura de estrias que é provocada por variações transversais da componente flutuante axial da velocidade,  $u'$ , sendo que a adição de polímeros inibe a formação destas estrias;
- Devido a isto diminuem as erupções a elas associadas;
- Consequentemente a produção de turbulência diminui na S.C.I.;
- Provoca alterações no processo de transferência entre as regiões interna e externa do escoamento.

### ***2.2.2 Hipótese da Subcamada Intermediária (S.C.I)***

Esta hipótese estabelece que as moléculas de polímeros atuam na região da Subcamada Intermediária ( $10 < Y^+ < 70$ ).

A ação dos polímeros provoca mudanças no balanço de energia (produção e dissipação) nos escoamentos turbulentos. Estas variações são geralmente analisadas a partir das medições das principais quantidades turbulentas e mediante a utilização de ferramentas estatísticas. Sendo os escoamentos turbulentos altamente randômicos nesta região é importante conhecer como as flutuações estão distribuídas ao redor do valor médio.

O desenvolvimento de modernos instrumentos de medição de velocidades utilizando elementos óticos, tem aumentado a confiabilidade das medições. O sistema de anemometria Laser (L.D.A.), por exemplo, não perturba as medições de campo de velocidade, já que o volume de medição é não intrusivo, além de ser altamente preciso.

O desenvolvimento de técnicas de medição escalar e vetorial do campo instantâneo de velocidades, como por exemplo a tomografia interferométrica, a imagem

por ressonância magnética nuclear e a utilização de sistemas tipo P.I.V.(Adrian 1991), tem contribuído muito na interpretação do processo de turbulência de parede.

Começaremos portanto a analisar as modificações que ocorrem no campo de velocidades turbulentas.

### **- Intensidade da turbulência**

É definida como a raiz média quadrática (*RMS*) das flutuações de qualquer uma das componentes da velocidade e pode ser determinada pela relação geral:

$$\sigma_i = \sqrt{\overline{u_i'^2}} = \int_{-\infty}^{\infty} u_i'^2 P(u_i') du_i' \quad (2.4)$$

sendo  $P(u_i')$  a função de densidade de probabilidade, ou seja, a probabilidade de encontrar  $u_i'(t)$  entre  $u_i'$  e  $u_i' + \Delta u_i'$ . O termo  $u_i'$  refere-se a qualquer uma das componentes flutuantes da velocidade.

Comumente nos trabalhos analisados apresentam-se medições da intensidade turbulenta das flutuações das componentes da velocidade nas direções axial,  $u'$  e normal à parede,  $v'$ , assim como, das tensões de Reynolds,  $-\langle u'v' \rangle$ , associadas às flutuações.

### ***Perfil de intensidade turbulenta axial, $u'/u_*$ .***

O perfil de intensidade turbulenta das componentes da velocidade tem sido medido para uma grande variedade de sistemas poliméricos.

Um dos primeiros estudos sobre o perfil de intensidade turbulenta em escoamentos redutores de atrito é o trabalho de Virk *et al* (1967) que utilizaram tubo de Pitot e anemômetro de filme quente para medir a componente axial da velocidade para diferentes sistemas poliméricos. Uma limitante à generalização dos resultados obtidos é o



fato que as medições da estrutura da turbulência foram feitas para um único valor de vazão.

Os resultados de Virk *et al* (1967) mostram que na região onde  $r/R=\xi < 0,4$ , os perfis do solvente e das soluções poliméricas são essencialmente iguais sendo que para a faixa  $0,4 < \xi < 1,0$  as soluções apresentam maiores valores de intensidade turbulenta com diferenças máximas de 20 % no eixo da tubulação. É importante salientar que Virk *et al* adotaram a origem do eixo na parede. Este resultado parece ser contraditório, a partir dos resultados obtidos neste trabalho, estimando-se que o lugar de ocorrência do efeito do polímero, longe da parede, deve-se à faixa de  $Y^+$  em estudo.

Neste trabalho, como contribuição importante, os autores propuseram o conceito da Assíntota de Máxima Redução de Atrito (A.M.R.A.). Este valor é definido como o limite a partir do qual incrementos na concentração do polímero não reduzem mais o atrito sendo representada pela relação:

$$\frac{I}{\sqrt{f}} = 19,0 \log_{10} Re \sqrt{f} - 32,4 \quad (2.5)$$

As primeiras medições do perfil de intensidade turbulenta utilizando L.D.A. foram feitas por Rudd (1971) e Logan (1972). Em ambos os casos foram utilizados dutos retangulares, de iguais dimensões, obtendo-se que  $u'/u_*$  se incrementava na região de parede para as soluções poliméricas. A existência de escoamentos secundários devido à forma geométrica da seção de teste empregada, leva a questionamentos sobre a relevância destes resultados aplicados a escoamentos em tubulações.

Por exemplo, em canais, que podem ser considerados como dutos retangulares com uma relação de aspecto muito grande, Reischman & Tiederman (1975) encontraram

diferenças nos seus resultados com os acima mencionados [apud McComb & Rabie (1982)].

McComb & Rabie (1982), estudaram a influência do ponto de injeção das soluções poliméricas (injeção por fendas na parede e no eixo) sobre a redução de atrito local. Seus resultados não mostraram influência significativa deste parâmetro sobre os perfis de intensidade turbulenta axial.

A figura (2.4) mostra os resultados obtidos por estes autores, onde é possível ver, que a posição dos máximos de intensidade turbulenta para as soluções poliméricas estão na faixa de  $Y^+ = 60 \div 80$ . Nota-se que o valor da máxima intensidade, para escoamento Newtoniano, está mais próximo da parede quando comparado com as soluções poliméricas. Também se observa que, para estas últimas, a região em análise é mais larga. É importante destacar que, as curvas foram obtidas para diferentes posições a jusante do ponto de injeção, o que significa diferentes valores do coeficiente de eficiência da redução de atrito,  $\phi$  conforme discutido anteriormente. Resultados similares tem sido obtidos por Luchik & Tiederman (1988), Usui *et al* (1988) e Wei & Willmarth (1992).

Wei & Willmarth (1992) destacam que, apesar da adição de polímeros provocar incrementos nos valores do perfil de intensidade turbulenta axial para as soluções poliméricas, para estes escoamentos os valores da componente  $u'$  não são maiores que para água. Isto deve-se a que, a velocidade de atrito diminui.

Os máximos valores nos perfis de intensidade turbulenta das soluções poliméricas ocorrem na faixa  $10 < Y^+ < 70$ , ou seja, na S.C.I. Isto significa que existe um deslocamento da produção de turbulência para regiões mais afastadas da parede, conforme pode ser visto na Fig. (2.4).

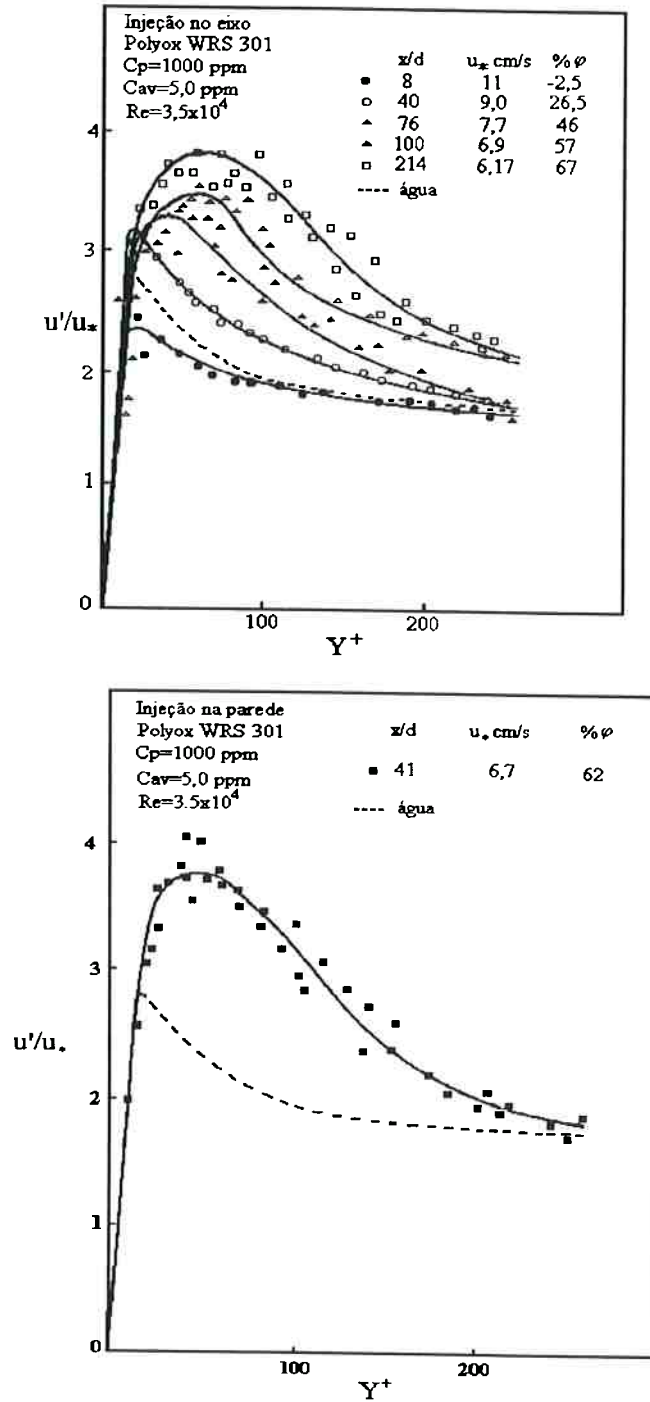


Figura (2.4) Perfil de intensidade turbulenta axial mostrando um deslocamento da zona de produção para pontos mais afastados da parede.

Gráfico superior: injeção no eixo, inferior: na parede

### ***Perfil de intensidade turbulenta normal, $v'/u_*$ .***

Foi a partir de 1985 que começaram a ser publicados os primeiros trabalhos que incluem a medição da componente flutuante normal da velocidade,  $v'$  e conseqüentemente do seu perfil de intensidade turbulenta. Isto coincide com o início da utilização dos sistemas de anemometria laser.

Os trabalhos de Luchik & Tiederman (1988), Usui *et al* (1988), Pinho & Whitelaw (1990), Wei & Willmarth (1992) e Sá Pereira & Pinho (1994) apresentam medições da componente  $v'$  cuja característica geral na região de parede,  $Y^+ < 100$ , é o amortecimento do perfil de intensidade turbulenta.

Estudando a redução de arrasto por injeção de polímeros no eixo da tubulação (soluções heterogêneas), Usui *et al* (1988), obtiveram que o amortecimento do perfil de intensidade turbulenta na fase polímero (também conhecida como fase de fio de polímeros) é muito maior que na fase água.

Quando comparadas, para um mesmo valor de concentração, as soluções heterogêneas apresentam amortecimentos mais significativos que as soluções homogêneas. Em ambos os casos o comportamento desta componente tende a uma relaminarização do escoamento.

Como será visto posteriormente, o comportamento desta componente tem uma grande importância na modificação das tensões de Reynolds e conseqüentemente na diminuição da transferência da quantidade de movimento na direção transversal, nos escoamentos redutores de atrito.

Resultados similares foram obtidos por Wei & Willmarth (1992). Os valores de  $v'/u_*$  para soluções de Óxido de Polietileno (P.E.O.) são amortecidos na faixa  $Y^+ < 100$ , com diminuições, aproximadamente, de 15 % com respeito à água. Isto significa que,

considerando os valores da velocidade de atrito, o valor máximo dimensionalizado de  $v'$  para as soluções poliméricas é 30 % menor que o correspondente para o solvente. Os máximos amortecimentos foram obtidos na faixa  $Y^+ \approx 4 \div 6$  com valores que chegam a 50%.

### Perfil das tensões de Reynolds, $-\langle \overline{u'v'} \rangle$ .

As primeiras análises deste termo coincidem com o início dos estudos dos perfis de intensidade turbulenta nas direções axial e normal à parede. A importância do estudo deste parâmetro é a sua influência no transporte de quantidade de movimento.

A figura (2.5) mostra o comportamento das tensões de Reynolds para soluções poliméricas, podendo-se observar a diminuição destes valores em relação aqueles para escoamento Newtoniano, além de valores negativos muito próximos da parede.

Conforme analisam Wei & Willmarth (1992) entre outros autores, este comportamento não pode ser somente associado à diminuição da componente  $v'$  mas também, a uma diminuição da correlação entre  $u'$  e  $v'$  cujo comportamento já foi acima analisado.

Em escoamentos Newtonianos em tubulações e canais, as tensões de Reynolds podem ser determinadas subtraindo as tensões de cisalhamento médias do gradiente de pressões. A partir do balanço de quantidade de movimento as tensões de Reynolds podem expressas pela relação:

$$-\frac{\langle \overline{u'v'} \rangle}{u_*^2} = \left[ 1 - \frac{y}{h} \right] - \left( \frac{\partial U^+}{\partial Y^+} \right) \quad (2.6)$$

Willmarth *et al* (1987) determinaram as tensões de Reynolds por dois métodos: através da medição direta, utilizando L.D.A., das flutuações  $u'$  e  $v'$  e por meio da equação (2.6). Seus resultados mostraram que as tensões de Reynolds para água,

calculada por ambos os métodos apresentam boa concordância. Porém os resultados utilizando o mesmo procedimento para soluções poliméricas (POLYOX) mostram que as tensões de Reynolds calculadas pelas medições diretas de  $u'$  e  $v'$  não eram iguais às determinadas pela equação (2.6). Estas diferenças estão mostradas na figura (2.5), que indica que em qualquer seção do canal a tensão de cisalhamento total é a soma das tensões viscosas,  $\mu \partial u / \partial y$ , mais as tensões de Reynolds,  $-\rho \langle u'v' \rangle$ , mais uma tensão adicional (de origem desconhecida), cujo valor é aproximadamente a metade das tensões de Reynolds medidas pelo L.D.A.

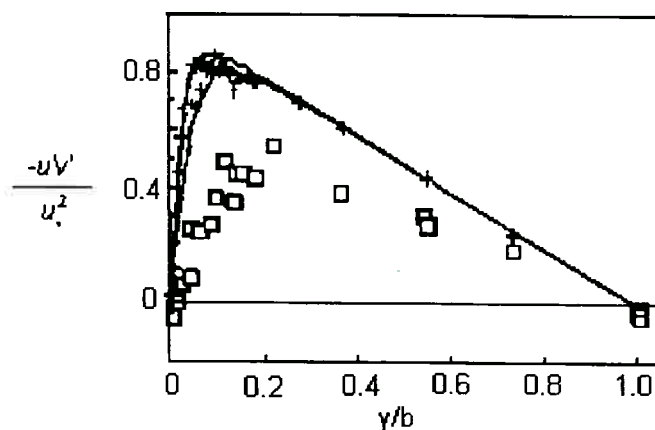


Figura (2.5) Perfil das tensões de Reynolds para solvente (+) e soluções poliméricas (□)  
Tomado de Willmarth *et al* (1987)

Ainda hoje, não existe uma clara definição e interpretação sobre as características desta tensão adicional, sendo a mesma, objeto de várias análises recentes.

Usui *et al* (1988) sugerem, por exemplo, a existência de um outro mecanismo de transporte de quantidade de movimento, o qual não é análogo aos mecanismos de transporte viscoso e das tensões de Reynolds.

Wei & Willmarth (1992), que obtiveram resultados semelhantes, confirmam que, pelos resultados obtidos em escoamentos Newtonianos, o método de medição dos

gradientes de velocidade e pressão para a determinação das tensões de Reynolds é suficientemente preciso, o que permite seu uso na tentativa de determinar a influência dos polímeros sobre as tensões de Reynolds. Seus resultados indicam que na região de parede os valores das tensões de Reynolds obtidos pela medição direta de  $u'$  e  $v'$  são aproximadamente 60% dos correspondentes valores calculados pela equação (2.6). Os autores concluem, como em Willmarth *et al* (1987), que este comportamento deve-se à introdução de forças não-Newtonianas pela ação do polímero. Sugerem a inclusão de um termo para considerar esta força. Devido a isto a equação (2.6) fica:

$$-\frac{\overline{u'v'}}{u_*^2} = \left[1 - \frac{y}{h}\right] - \left(\frac{\partial U^+}{\partial Y^+}\right) - G \quad (2.7)$$

Gyr & Bewersdorff (1995) denominaram o termo  $G$  como déficit de tensões de Reynolds ou tensão elástica. A equação (2.7) não oferece, porém, nenhuma informação sobre a origem deste termo. Os autores especulam que se  $G$  pode ser considerada como uma tensão elástica, então o déficit é devido às propriedades elásticas das soluções poliméricas como resultado dos efeitos reológicos. Outra possível explicação é que, como a estrutura dos escoamentos turbulentos é alterada, a influência da viscosidade pode ser efetiva numa distância maior desde a parede.

Um resultado relativamente surpreendente é a existência de Tensões de Reynolds negativas na faixa  $2 < Y^+ < 25$  (Durts *et al* (1985) e Wei & Willmarth (1992)). Isto significa que para determinadas concentrações a adição de polímeros conduz a um processo único de transporte na região de parede. Neste processo os elementos fluidos com velocidade maior que a velocidade média de escoamento, se afastam da região de parede e conseqüentemente aqueles com velocidade menor são transportados para a parede.

Este resultado tem sido objeto de discussão em vários trabalhos sem que exista um consenso sobre a faixa de ocorrência e sua magnitude. Durst *et al* (1985) [apud Wei & Willmarth 1992] obtiveram valores das tensões de Reynolds (adimensionalizadas com a velocidade de atrito) da ordem de -0.06 na faixa  $Y^+ \approx 2-3$ . A explicação para este resultado, segundo Durst *et al* (1985), está baseada em que nesta região  $U^+ = Y^+$ , portanto a equação (2.6) pode ser resumida a:

$$\frac{-\overline{u'v'}}{u_*^2} = -\frac{r}{R} \quad (2.8)$$

Da expressão anterior é possível ver que, perto da parede, as tensões de Reynolds necessariamente serão negativas. Os valores obtidos por Wei & Willmarth (1992) são mais negativos (-0,2) e ocorrem na região intermediária ( $5 < Y^+ < 25$ ). Ao estudarem este comportamento os autores analisam três possíveis causas que podem provocá-lo: fenômenos transientes iniciais (relativo à injeção de polímeros), desalinhamento do sensor e distribuição não uniforme de traçadores no escoamento (seeding)

### ***Outras ferramentas estatísticas***

#### ***Espectros de potências***

Caracterizam a energia cinética turbulenta. A área abaixo do espectro de potência de uma componente da velocidade é proporcional a energia cinética média da mesma.

Virk *et al* (1967) estudando o espectro de energia turbulenta axial concluíram que, perto da parede, os espectros das soluções poliméricas e dos escoamentos Newtonianos são essencialmente os mesmos, porém para medições efetuadas no eixo da tubulação os espectros de ambos os escoamentos apresentam diferenças. Estas ocorrem, fundamentalmente, na faixa inercial onde, para escoamentos Newtonianos têm-se uma



declividade aproximada de  $-5/3$ , para valores de  $2 < kw < 20$  o que não ocorre para as soluções poliméricas, nas quais há uma mudança abrupta na declividade de  $-2/3$  a  $-4$  em  $kw=6 \text{ cm}^{-1}$ .

Este resultado indica que a adição de polímeros provoca modificações nos espectros de potência, sendo a característica mais significativa, a ausência de faixa inercial.

A limitação fundamental do trabalho de Virk *et al* (1967) está no fato de que as medições das componentes da velocidade (portanto os perfis de intensidade turbulenta e o espectro de potência) foram feitas com anemômetro de filme quente para um único valor de vazão.

Mais recentemente Wei & Willmarth (1992), realizaram um abrangente estudo dos espectros de potências dos *rms* axial, normal e das tensões de Reynolds, utilizando anemometria laser para as medições de  $u'$  e  $v'$ . Estes espectros foram calculados para diferentes valores do número de Reynolds de atrito ( $Y^+=15, 22, 45$  e  $170$ ).

Para obtenção dos resultados foi utilizado um sistema introduzido por Perry & Abell (1975) no qual se representa na abcissa o logaritmo da frequência adimensionalizada,  $\omega^+ = \frac{\omega v}{u_*^2}$  e na ordenada o parâmetro  $\psi(\omega^+)$ , que é proporcional à raiz média quadrática (*RMS*) do sinal ( $u'$ ,  $v'$  ou  $u'v'$ ) adimensionalizado com variáveis internas ( $u_*$  e  $v$ ).

A relação entre  $\psi(\omega^+)$  e a densidade espectral de potência adimensionalizada  $\phi^+(\omega^+)$  é dada por:

$$\psi^+(\omega^+) = \omega^+ \phi^+(\omega^+) \quad (2.9)$$

Para  $Y^+=170$  (fora da região de parede) os espectros de potência dos três sinais não são modificados. Para as medições feitas na região de parede ( $Y^+<100$ ), vide figura (2.6) para  $Y^+=15$ , os resultados mostram que:

#### ***Espectros para a componente $u'$***

Quando  $Y^+$  diminui, existe uma redistribuição da energia das altas para as baixas frequências até a faixa  $-0,5 < \log(\omega^+) < 0$  para as soluções poliméricas. Nos três casos, ( $Y^+=15, 22, 45$ ), o comportamento para  $\log(\omega^+) < -1$  mostra que o espectro dos escoamentos Newtonianos é muito menor que o das soluções poliméricas. Esta tendência fica mais nítida para os pontos mais próximos da parede.

#### ***Espectros para a componente $v'$***

Em todos os casos, as amplitudes espectrais são muito menores para as soluções poliméricas em toda a faixa de frequência. Os autores consideram que, dos resultados obtidos para as componentes  $u'$  e  $v'$ , pode-se concluir que a adição de polímeros provoca uma redistribuição de energia na componente axial das altas para as baixas frequências e também provocam um severo amortecimento da componente normal em toda a faixa de frequência.

#### ***Espectros para as tensões de Reynolds $\overline{u'v'}$***

Os espectros de potência das tensões de Reynolds são significativamente afetados pelo comportamento das flutuações na direção normal  $v'$ , sendo que em todos os casos existe uma grande semelhança entre os espectros das tensões de Reynolds e de  $v'$ .

Os resultados de Wei & Willmarth (1992) são consistentes com os obtidos por Berman (1990) e Usui (1991) [apud Wei & Willmarth (1992)] que justificam a diferença entre os espectros da componente  $u'$  e das tensões de Reynolds devido ao fato que o

processo de colapso nas soluções poliméricas depende da concentração das mesmas. Para menores concentrações (500 ppm) o polímero injetado é rapidamente disperso no escoamento, no entanto, para maiores concentrações desde que menores que 5000 ppm este colapsa em uma grande quantidade de fios de polímeros.

Os resultados acima analisados mostram que para as soluções poliméricas o conteúdo energético dos vórtices de diferentes tamanhos é transferido dos pequenos para os maiores turbilhões (fenômeno de cascata invertida de Kolmogorov). Isto é interpretado como um amortecimento dos turbilhões menores e portanto uma diminuição no processo dissipativo.

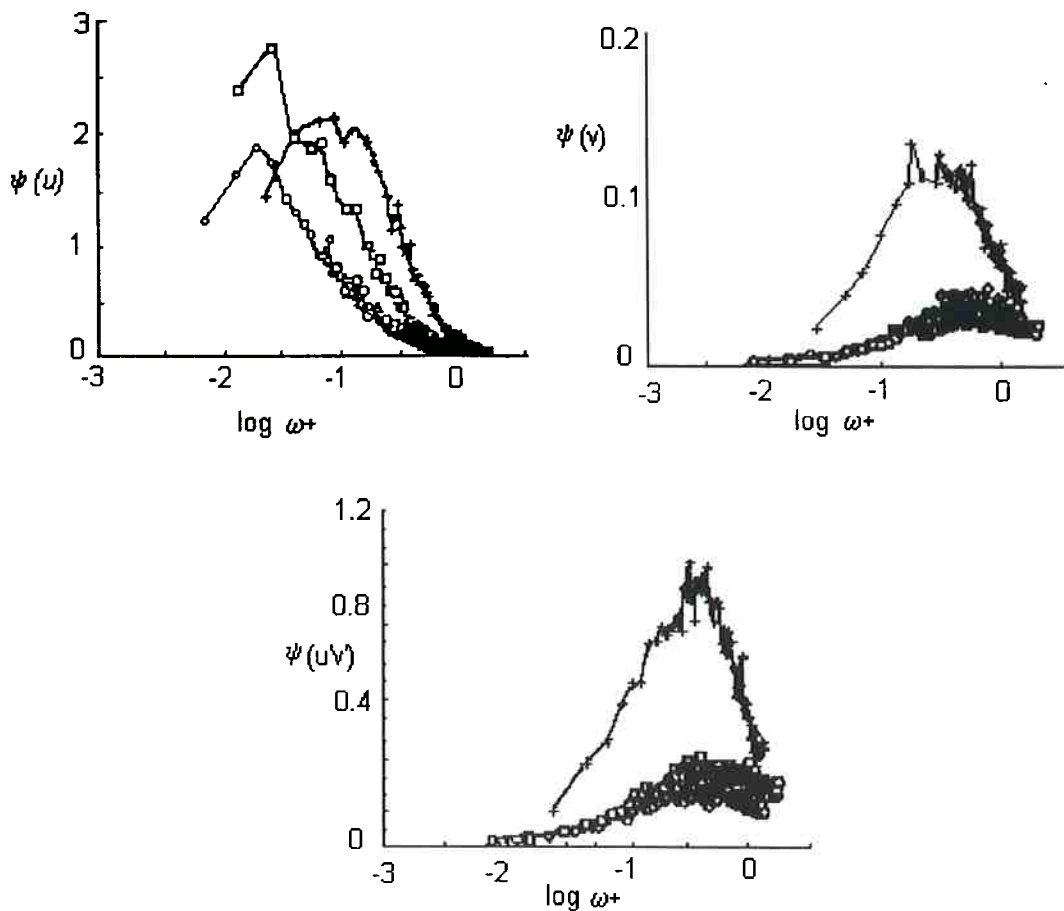


Figura (2.6) Espectros de energia de  $u'$ ,  $v'$  e  $u'v'$ . + água,  $\square C_{sm}=1000$  ppm  
o  $C_{sm}=500$  ppm. Tomado de Wei & Willmarth (1992)

***Funções de densidade de probabilidade conjunta (F.D.P.C.) e seus momentos superiores.***

Esta função não tem sido muito usada, porém Gyr & Bewersdorff (1995) opinam que para discutir aspectos relacionados com o transporte de quantidade de movimento, assim como as suas estruturas, é apropriado a utilização deste função. A F.D.P.C. mostra a probabilidade de se encontrar uma componente da velocidade ( $u'$  por exemplo) numa área do plano  $u'-v'$  em um tempo dado. Esta probabilidade é mostrada pelas linhas de contorno da função. Para escoamentos turbulentos o segundo e o quarto quadrantes são dominantes na distribuição dos valores de  $u'$  e  $v'$  e são aqueles que mais contribuem às tensões de Reynolds.

Estes autores citam o trabalho de Grampert & Yong (1990) para caracterizar o comportamento das soluções poliméricas. Pela análise da figura (2.7) podem-se ver as diferenças entre as F.D.P.C. das soluções poliméricas e do solvente, conforme comentado abaixo:

- a área limitada pela linha de contorno para as soluções poliméricas é menor e mostra flutuações predominantes na direção principal do escoamento;
- a turbulência é mais anisotrópica, sendo que os valores de  $u'$  são predominantes e os de  $v'$  são significativamente menores para os sistemas soluto-solvente;
- o eixo principal da elipse tem um comportamento mais paralelo com a direção do escoamento no caso das soluções poliméricas. Portanto neste caso, as flutuações transportam menos quantidade de movimento para a região de parede.

Dos trabalhos analisados dentro da hipótese da S.C.I., podemos concluir que a adição de polímeros provoca:

- Incremento da intensidade turbulenta axial,  $u'/u$ ;

- Amortecimento da componente flutuante na direção normal da velocidade  $v'$ ;
- Diminuição das Tensões de Reynolds, com valores negativos na região de  $2 < Y^+ < 25$ .  
Acredita-se, sem comprovação nem justificativa física, na existência de um termo não-Newtoniano na equação de balanço da quantidade de movimento;
- Redistribuição de energia das altas para as baixas frequências na região  $Y^+ < 100$ . Perto da parede ( $Y^+ < 20$ ) esta redistribuição fica mais clara e é consistente com o perfil de intensidade turbulenta da componente  $v'$ ;
- Diminuição da produção de energia cinética turbulenta;
- Maiores escalas de tempo dos vórtices menos energéticos ;
- Incremento na anisotropia das componentes flutuantes da velocidade,  $u'$  e  $v'$ .

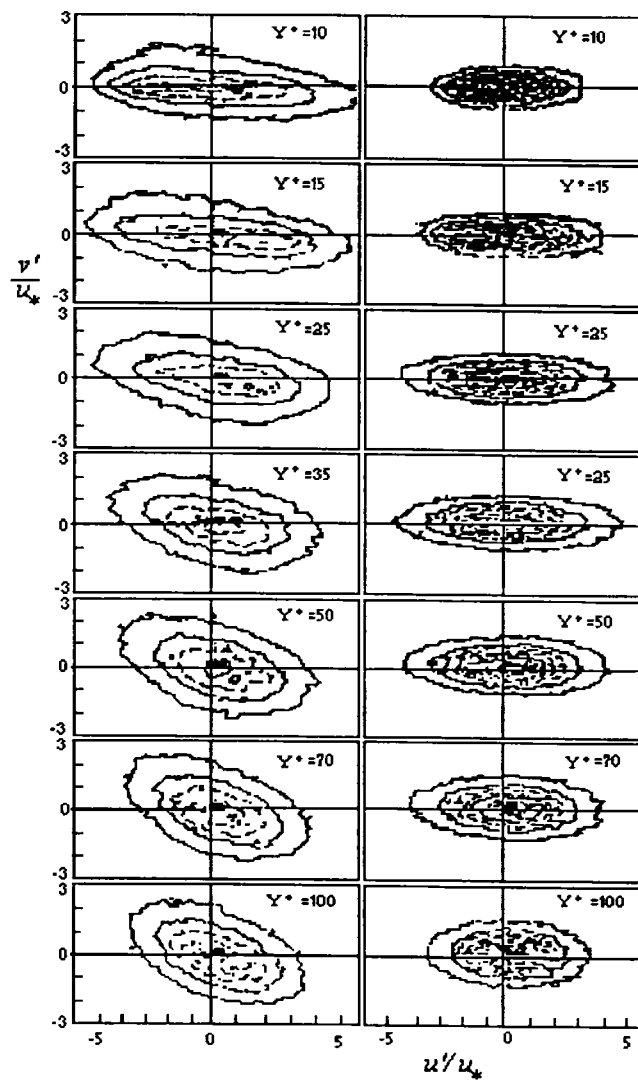


Figura (2.7) Função de densidade de probabilidade conjunta para água (à esquerda) e para soluções poliméricas (à direita). Tomado de Gyr & Bewersdorff (1995)

### 2.3 Tendências Atuais no Estudo da Redução de Atrito por Adição de Polímeros

A partir do início da década de 1990, tem-se verificado um rápido desenvolvimento de métodos de visualização de escoamentos, de instrumentos de medição e de suportes computacionais mais poderosos. Mesmo assim, as pesquisas sobre a turbulência oferecem aos investigadores inúmeros desafios na tentativa de obtenção de resultados que possibilitem uma melhor compreensão deste fenômeno.

Nos últimos anos algumas pesquisas tem-se direcionado, fundamentalmente, para a utilização de métodos de simulação numérica, que se converteram em uma poderosa ferramenta, juntamente com os métodos de análise experimental e de visualização de escoamentos, para aprofundar a compreensão das estruturas turbulentas e sua importância na redução de atrito. A grande quantidade de dados gerados por estes métodos tem nos levado a entender melhor os mecanismos que governam os processos de produção, distribuição e dissipação de energia cinética turbulenta. Por exemplo, Kim *et al* (1987) confirmaram por simulação numérica direta a importância dos eventos de erupções, observados experimentalmente por Kim *et al* (1971).

Um breve histórico sobre a aplicação da simulação numérica à redução de atrito, é apresentada a seguir.

A primeira tentativa de simular a redução de atrito utilizando “*riblets*”, foi apresentada por Orlandi (1989) [apud Orlandi 1995]. Posteriormente Choi *et al* (1993) [apud Orlandi 1995] através de uma simulação mais detalhada, mostraram que o desempenho dos “*riblets*” obtido por esta via, coincidem com resultados experimentais, destacando que, neste caso a simulação numérica precisa de um modelo numérico sofisticado para descrever a geometria dos “*riblets*”.

Orlandi (1995) simulou a redução de atrito por adição de polímeros através de um modelo simples para estudar a região de parede utilizando o método das diferenças centradas (malha de 32x97x64). Neste modelo se considera que a viscosidade é proporcional à concentração, que a extensão das moléculas altera as propriedades físicas do escoamento e que esta ocorre quando a taxa de deformação prevalece sobre a vorticidade. Nas regiões onde o polímero não está estendido as propriedades das soluções podem ser consideradas iguais às do solvente.

Os resultados da simulação são, em sentido geral, coincidentes com os resultados experimentais e mostram que a presença de polímeros reduz o número de vórtices axiais e sua intensidade quando comparadas com escoamentos Newtonianos. Este comportamento cria uma estrutura de estrias de alta e baixa velocidades de reduzida intensidade provocando uma redução das flutuações turbulentas.

Devido à dificuldade de quantificar o efeito da concentração do polímero sobre a viscosidade e às limitações de simulações para altos números de Reynolds, não são apresentadas comparações quantitativas.

O modelo desenvolvido por Orlandi, tem a característica de possuir vários efeitos misturados, não sendo possível, portanto, determinar separadamente os efeitos anisotrópicos sobre a Redução de Atrito.

Seguindo a linha de estudos da turbulência através de métodos computacionais e na tentativa de avaliar teoricamente a Redução de Atrito observada em soluções poliméricas diluídas, Massah & Hanratty (1997) simularam por Simulação Numérica Direta (D.N.S.) o comportamento de uma solução polimérica em um campo randômico de velocidades. Considerando a dificuldade de se obter em laboratório medições da configuração das moléculas de polímeros, nesta análise os autores estimaram que o desempenho das cadeias moleculares simuladas é representativo das moléculas de polímeros.

Como resultado obtiveram que as moléculas de polímeros podem ser estendidas em presença de grandes gradientes de velocidades. Isto, em escoamentos turbulentos pode resultar no surgimento de tensões adicionais, intermitentemente, e no intercâmbio (troca) de energia entre as moléculas e o fluido, cuja magnitude vai depender do grau de extensão da molécula e da sua orientação.



Na sub-camada viscosa as cadeias moleculares se estenderam aproximadamente 80% do seu comprimento total em um ângulo de  $4^\circ$  na direção do escoamento médio, sempre que a taxa de cisalhamento era dez vezes o recíproco da constante de tempo no modelo.

Na sub-camada intermediária estas se estenderam e contraíram intermitentemente, mudando sua orientação com respeito ao escoamento médio. Quando o movimento era para fora da S.C.I. as cadeias mantinham uma configuração contraída e quando regressavam para a S.C.I. se estendiam. Este resultado não foi previsto na teoria de Lumley.

Toonder den *et al* (1997) realizaram um estudo combinado no qual analisaram a importância dos efeitos anisotrópicos nas tensões durante a redução de atrito. Para isto analisaram dois modelos simulados por D.N.S. e ensaios feitos através de medições com L.D.V.

Os modelos simulados apresentam as seguintes características:

*Modelo Anisotrópico Viscoso (V.A.):* A equação constitutiva baseia-se na teoria de Batchelor sobre partículas estendidas suspensas em solvente Newtoniano. Descreve um processo puramente viscoso. São modelados os efeitos anisotrópicos viscosos causados pela orientação do polímero.

*Modelo Anisotrópico Viscoelástico (V.E.A.):* pode ser considerado como uma extensão do anterior agregando-se uma componente elástica e pode ser visto como uma variante do Modelo Anisotrópico de Maxwell.

Em ambos os modelos os polímeros são representados como partículas estendidas e alinhadas com o vetor instantâneo do escoamento.

A parte experimental deste trabalho foi feita usando um L.D.A. bi-dimensional com soluções de Super Floc A110 de alto peso molecular e  $C_w \approx 20$  ppm. Uma característica que diferencia este polímero de outros encontrados na literatura é a resistência à degradação mecânica.

Os resultados foram divididos em duas partes:

1ª parte: análise e comparação dos resultados do modelo V.A. com os experimentais.

Aqui ambos os resultados coincidem no que se refere ao incremento da “*buffer layer*”, comportamento dos perfis de intensidade turbulenta (axial e normal), espectros de potência e de energia cinética turbulenta. A única diferença é no comportamento das tensões de Reynolds onde para a simulação não existem evidências do chamado déficit das tensões de Reynolds, sendo que experimentalmente foi verificado.

As mudanças obtidas neste modelo parecem ser principalmente devido ao surgimento de uma tensão adicional na direção axial.

2ª parte: análise e comparação dos resultados do modelo V.E.A. com os experimentais.

Neste caso, a simulação numérica mostrou que a Redução de Atrito é consideravelmente menor que no modelo anisotrópico viscoso (V.A.). Os perfis de velocidade média não estão em conformidade com os resultados experimentais sendo que na região  $Y^+ = 40$  mostram ligeiros incrementos. Os perfis de intensidade turbulenta, assim como as características estatísticas de ordem superior e os perfis das tensões, apresentam a mesma tendência, embora as mudanças são muito menores, quantitativamente.

A partir destes resultados os autores concluem que dependendo da relação entre as escalas de tempo das moléculas e da turbulência, o polímero é estendido pelo escoamento. Quando os polímeros são estendidos, surgem efeitos de anisotropia viscosa

na relação entre as tensões e a taxa de deformação que causam mudanças na estrutura da turbulência e que levam a redução de atrito. Isto parece indicar que a elasticidade não exerce um papel importante no processo de Redução de Atrito, ou seja, quando considerados, os efeitos elásticos não mostram resultados favoráveis à ocorrência do fenômeno em estudo.

A utilização de métodos para simular os escoamentos redutores de atrito apresenta limitações tais como:

- obtenção de uma equação constitutiva confiável que relacione as taxas de deformação e as tensões;
- como considerar nos modelos, a presença de moléculas de polímeros e seu efeito sobre o escoamento.

As vantagens de utilização de modelos simplificados são:

- Possibilidades de isolar algumas propriedades moleculares e manter as outras fixas para estudar a influência de cada uma;
- Custo da pesquisa, relativamente barato.

#### ***2.4 Conclusões***

A leitura da vasta informação sobre o tema nos leva a um conjunto de conclusões que pretendemos resumir a seguir:

- A redução de atrito por adição de polímeros apresenta vários pontos “misteriosos”, quando tentamos explicá-la;
- Várias das prováveis causas que explicam a redução de atrito se complementam em alguns estudos, mas são contrapostos em outros;

- Existem discrepâncias, no que diz respeito à importância da S.C.V no processo da redução de atrito: é uma região passiva ou ativa?
- Pode a molécula de polímero realmente se estender na S.C.V.?
- Os efeitos anisotrópicos induzidos pela orientação das moléculas estendidas predominam sobre os efeitos elásticos das soluções poliméricas?
- Para reduzir o arrasto, é necessária a presença de polímeros na região de parede ou pode simplesmente existir alteração da estrutura na região central do escoamento?

Os objetivos propostos para este trabalho estão motivados no interesse de discutir, à luz dos resultados obtidos, as principais teorias sobre este tópico.

## CAPÍTULO 3

### INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Descrição da Instalação Experimental.

A instalação experimental utilizada na realização deste trabalho é apresentada na figura (3.1)

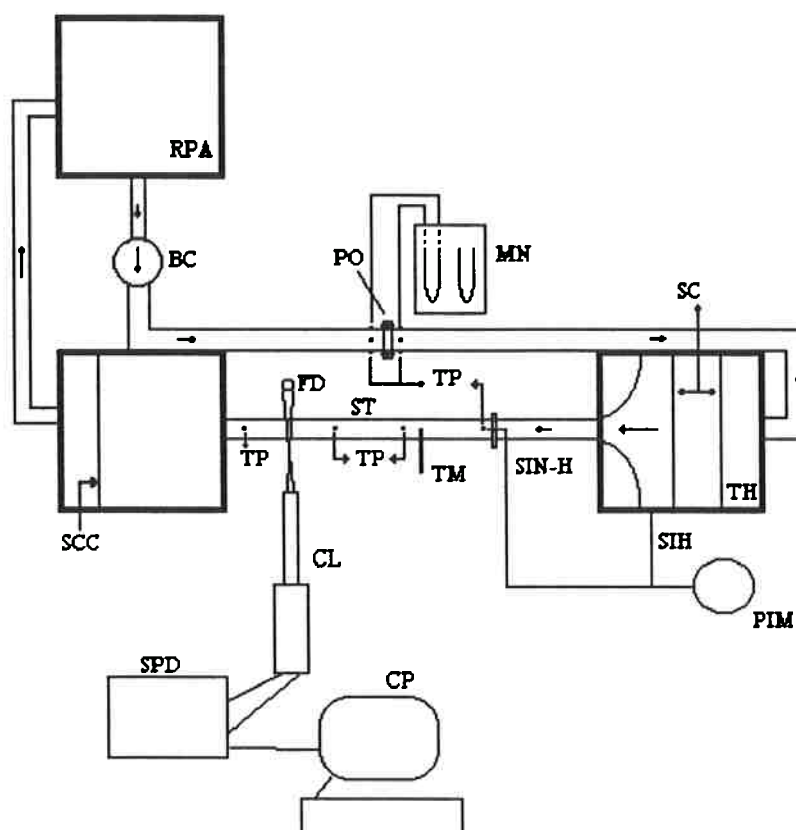


Figura (3.1) Instalação experimental

A nomenclatura que aparece na figura (3.1) é a seguinte:

- RPA** Reservatório Principal de Água;  
**BC** Bomba Centrífuga;

<b>PO</b>	Placa de Orifício;
<b>TP</b>	Tomada de Pressão;
<b>MN</b>	Manômetro;
<b>SC</b>	Placas Perfuradas;
<b>TH</b>	Tanque de Homogeneização;
<b>PIM</b>	Tanque para Injeção da Solução Mãe;
<b>SIH</b>	Sistema de Injeção das Soluções Homogêneas;
<b>SIN-H</b>	Sistema de Injeção das Soluções Não-Homogêneas;
<b>TM</b>	Termômetro;
<b>ST</b>	Seção de Testes;
<b>SCC</b>	Sistema para Carga Constante;
<b>FD</b>	Fotodetector do L.D.A;
<b>CL</b>	Canhão Laser do L.D.A;
<b>SPD</b>	Sistema de Aquisição e Processamento de Dados;
<b>CP</b>	Computador.

Conforme mostrado na figura (3.1) a bancada consiste de um canal no qual o fluido escoar em um circuito fechado, construído de acrílico e cujas dimensões são: 3,48 m de comprimento, 0,03 m de largura e 0,3 m de altura. As medições são feitas em uma estação situada a 2,5 m a jusante da entrada do canal.

O sistema opera da seguinte forma. Do reservatório principal de água (R.P.A.), esta é recalçada por uma bomba centrífuga (B.C.) até o tanque homogeneizador (T.H.). Na tubulação de recalque (de P.V.C. rígido de 2 polegadas de diâmetro interno) existe uma placa de orifício (P.O.) para medir a vazão que escoar no sistema. Isto é feito através

da leitura, em um manômetro diferencial de mercúrio (M.N.), da diferença de pressão entre a entrada e saída da placa de orifício.

O tanque homogeneizador, figura (3.2), é de acrílico com dimensões externas de 0,5 m de comprimento, 0,3 m de largura e 0,4 m de altura. Este tanque foi projetado no sentido de estabelecer uma região na qual o escoamento seja turbulento, mas sem grandes turbilhões, de forma tal que o polímero injetado possa ser uniformemente misturado antes de entrar no canal.

Para o amortecimento dos maiores turbilhões, aqueles com escalas da ordem do diâmetro da tubulação de entrada no tanque homogeneizador, foram colocadas duas placas perfuradas. A primeira destas apresenta furos de 6 mm de diâmetro e está colocada a 150 mm da entrada do tanque homogeneizador. A segunda placa, com furos de 2 mm, está colocada a 100 mm da primeira.

Para evitar a degradação mecânica das soluções poliméricas foi projetado um sistema no qual estas não passam pela bomba centrífuga antes de chegar à seção de testes. Para os ensaios com soluções homogêneas, as linhas que conduzem o polímero são conectadas, simetricamente, por ambas as faces laterais do tanque homogeneizador a uma distância de 50 mm a jusante da segunda placa perfurada.

Para o estudo das soluções não-homogêneas (ou heterogêneas) foi construído um dispositivo, no qual a solução mãe é injetada através de sistema semelhante ao utilizado na conhecida experiência de Reynolds, que está colocado a 0,20 m a jusante da entrada do canal (vide figura (3.6)).

Depois do fluido abandonar o tanque homogeneizador, o escoamento entra no canal, com dimensões acima referenciadas. No leito do canal foram construídas tomadas de pressão, a uma distância entre elas de 1,0 m.

Ao sair do canal, o escoamento entra em um tanque que dispõe de uma placa de carga constante (S.C.C.), tipo parábola, que permite maior controle das características do escoamento de montante (vazão, altura da lâmina d'água etc). Posteriormente o escoamento retorna ao R.P.A.

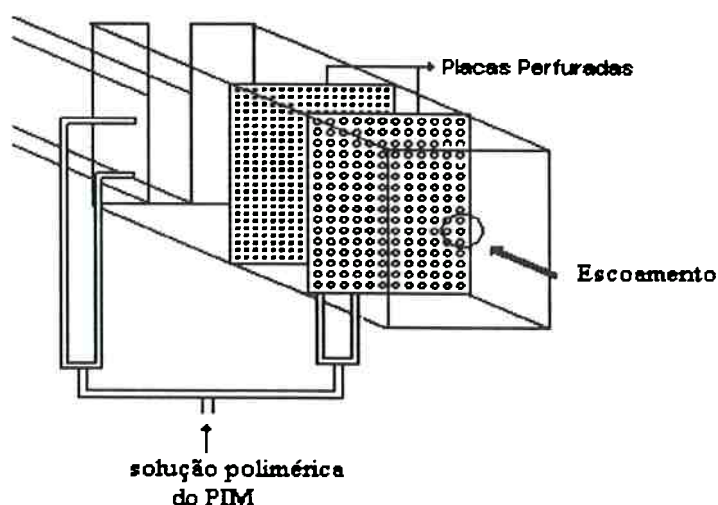


Figura (3.2) Tanque homogeneizador

De forma geral a instalação experimental pode ser dividida em três sistemas: sistema para medição da vazão, sistema para injeção das soluções poliméricas e sistema de medição, aquisição e processamento de dados. Abordaremos a seguir as características gerais de cada um dos sistemas.

### 3.1.1 Sistema de Medição da Vazão

Consta, conforme mostrado na figura (3.3), de duas partes: de uma placa orifício (P.O.) e do manômetro diferencial de Mercúrio (M.N.).



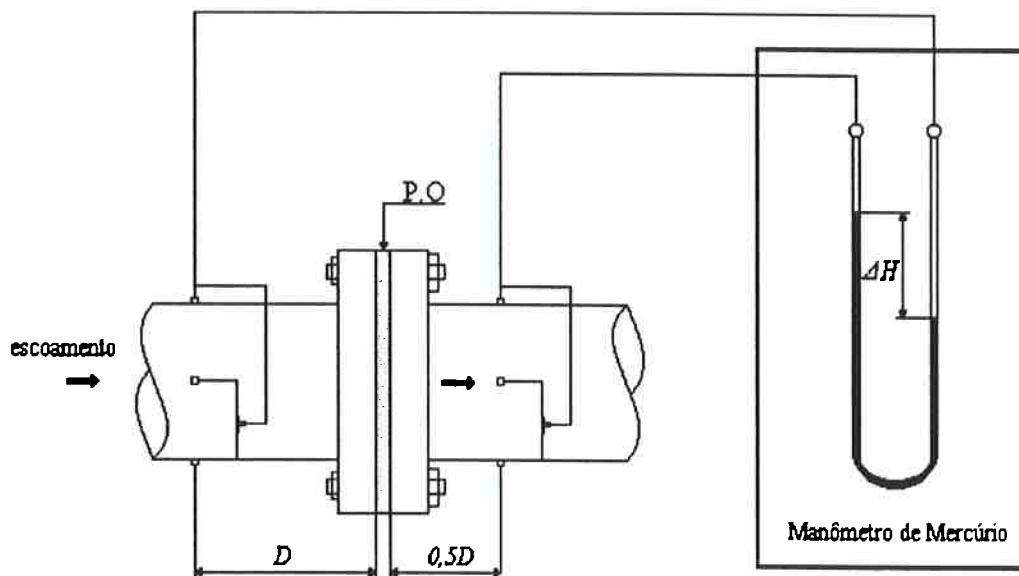


Figura (3.3) Esquema do sistema de medição de vazão

A placa de orifício foi projetada conforme a norma ISO 5167-1 (1991). As tomadas de pressão estão situadas a uma distância  $D$  a montante da placa de orifício e  $0,5D$  a jusante e foram construídas utilizando o método conhecido como “Triple T”.

Este método foi introduzido por Blake (1976). Para medir a pressão média em uma seção, são utilizadas quatro (4) tomadas situadas a  $90^\circ$  uma da outra, como pode ser visto na figura (3.4). A ligação entre elas é realizada através de conectores “T” até obter o ramo que vai ao manômetro. O diâmetro da tomada é de 3 mm, que está dentro do intervalo de 2 a 5 mm sugerido pelo autor.

A placa de orifício foi aferida utilizando a seguinte metodologia. Pesou-se um recipiente plástico, vazio, com capacidade aproximada de 100 L. Depois de ligar a bomba centrífuga, abriu-se o registro existente na tubulação de recalque com uma abertura previamente determinada medindo-se o tempo de enchimento do recipiente plástico. De forma simultânea foi registrada a diferença de altura ( $\Delta H$ ) entre os ramos do

manômetro. Finalmente pesou-se o recipiente. Isto foi feito repetidas vezes até chegar à abertura total do registro.

O procedimento acima descrito foi realizado três vezes para diminuir possíveis erros na determinação da equação da vazão como função de  $\Delta H$ .

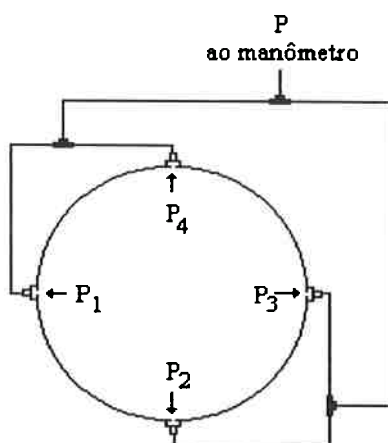


Figura (3.4) Esquema das tomadas de pressão utilizando o método do “Triple T”.

Com os valores da massa final e inicial do recipiente e o tempo de enchimento do mesmo, a vazão, para cada abertura do registro, é determinada pela relação:

$$Q = \frac{M_f - M_i}{t\rho} \quad (3.1)$$

Com os pares de pontos  $Q$  e  $\Delta H$ , se determina a equação da vazão como função do valor da diferença de altura entre os ramos do manômetro, que tem a forma geral:

$$Q = Const. \sqrt{\Delta H} \quad (3.2)$$

Para encontrar a regressão quadrática, a equação (3.2) foi transformada em uma linha reta aplicando logaritmo em ambos os membros. Na determinação dos coeficientes

da regressão foi utilizado o método dos mínimos quadrados a partir dos pontos medidos para  $Q$  e  $\Delta H$ , obtendo-se como resultado que a equação da vazão é expressa por:

$$Q = 0,699726\sqrt{\Delta H} \quad (3.3)$$

### ***3.1.2 Sistema de Injeção das Soluções Poliméricas. Preparo e Características da Solução Mãe.***

A novidade que apresenta este sistema, figura (3.5), é que evita-se a degradação mecânica das soluções poliméricas homogêneas, já que estas não passam pela bomba centrífuga antes da realização dos ensaios. Deve ser lembrado que a maior fonte de degradação das soluções é o intenso cisalhamento que ocorre no interior destes dispositivos mecânicos. Para o caso das soluções heterogêneas, esta análise carece de sentido ao ser nosso objetivo de estudo, a estrutura do fio de polímero injetado.

O processo de preparo das soluções poliméricas começa com o preparo da solução mãe. Esta é definida como uma solução altamente concentrada e que posteriormente será misturada ao solvente, na quantidade requerida, até alcançar a concentração de teste.

O polímero é despejado em um recipiente de acrílico que contém 30 L de solvente. A dissolução do polímero na água, é feita com ajuda de um agitador mecânico. Duas condições são cuidadosamente observadas:

- que a velocidade do agitador mecânico não seja muito grande (<450 rpm) para evitar a quebra das cadeias poliméricas e conseqüentemente a perda da eficiência do produto;
- a adição do polímero ao solvente é lenta e gradual, incidindo diretamente no vórtice formado pela agitação. Isto é para evitar grumo e má dissolução.

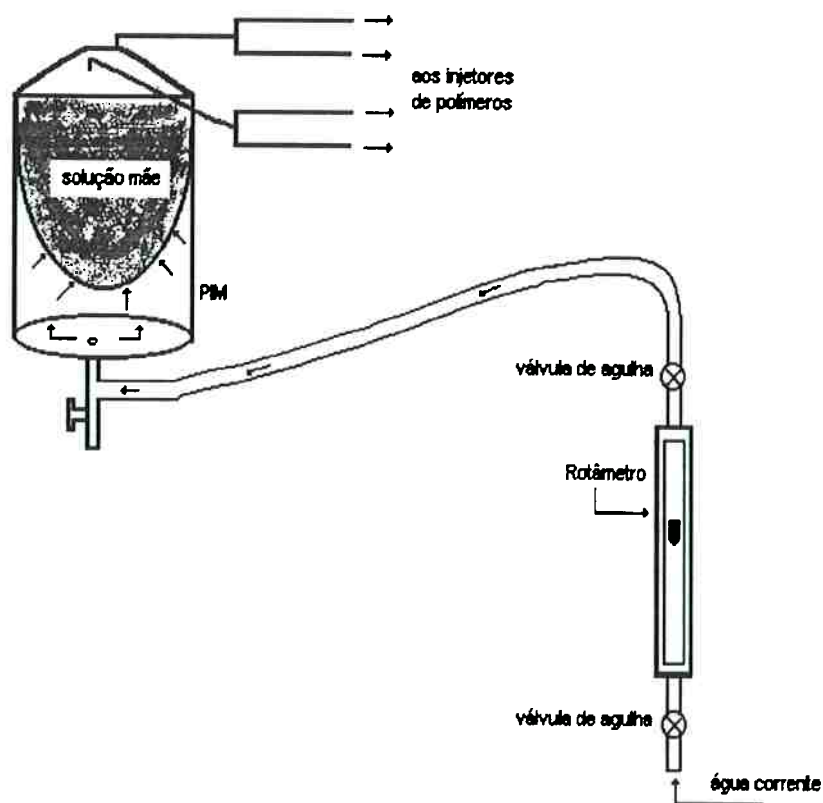


Figura (3.5) Sistema de injeção das soluções poliméricas

A solução mãe é preparada 24 horas antes da realização dos ensaios a fim de garantir sua hidrólise completa e a retirada das bolhas de ar devido ao processo de agitação. Dependendo dos ensaios a concentração desta varia entre 500 e 5000 ppm.

Para a realização dos ensaios a solução mãe é levada ao Tanque para Injeção da Solução Mãe (P.I.M.) que tem uma capacidade aproximada de 20 L. Dentro deste, é colocado um saco plástico onde é despejada a solução mãe (de concentração conhecida) até ocupar a capacidade total do P.I.M. Posteriormente este é fechado hermeticamente.

Para a injeção do polímero na seção de teste (no T.H para soluções homogêneas ou diretamente no canal para o estudo das soluções não-homogêneas) abre-se o registro de água colocado na parte inferior do P.I.M., sendo que a vazão de água é conhecida através do rotâmetro instalado neste lugar. Como o polímero ocupa todo o volume no

P.I.M, é empurrado pela água que está entrando e conseqüentemente sai, em igual vazão à da água, através de mangueiras existentes na parte superior. Na saída do rotâmetro existe uma válvula de agulha que permite o ajuste fino na fixação da vazão de trabalho.

Este método permite o controle da vazão de solução polimérica que se injeta ao sistema.

Como, para cada ensaio efetuado, são conhecidas a vazão que escoo no sistema (ou equivalentemente a leitura no manômetro de Mercúrio,  $\Delta H$ ), a concentração da solução mãe,  $C_{sm}$  e a concentração homogênea pretendida,  $C_w$ , procurou-se uma equação que nos permitisse determinar a vazão de injeção da solução mãe,  $Q_r$  e que tem a forma:

$$Q_r = \frac{2216,7324C_w\sqrt{\Delta H}}{C_{sm} - C_w} \quad (3.4)$$

### ***3.1.2.1 Estimativa Analítica da Dispersão do Polímero em Soluções Homogêneas***

A importância e confiabilidade dos resultados obtidos depende de como a solução mãe se difunde no escoamento de solvente durante o processo de injeção. Isto significa que senão existe uma rápida e total mistura do polímero na água os resultados vão apresentar uma tendência que dependerá das características do sistema de injeção-mistura.

Conforme mencionado anteriormente, vide figura (3.2), a solução mãe é injetada no escoamento através de quatro injetores de pequeno diâmetro (3 mm) colocados de forma simétrica em ambas as faces no T.H.

Apresentaremos a seguir alguns critérios que confirmam a rápida distribuição do polímero no solvente para as condições do presente trabalho.

O primeiro está associado a valores de concentração da solução mãe apresentado na literatura.

Stember *et al* (1977), Usui (1990) entre outros, tem demonstrado experimentalmente que as soluções poliméricas apresentam comportamentos típicos como função da concentração à que são injetadas. Para concentrações,  $C_{sm}$ , menores que 500 ppm, a característica dos polímeros é que os fios se dispersam rapidamente no escoamento.

Para valores entre 500 ppm e 5000 ppm, a chamada concentração intermediária, o polímero injetado colapsa em uma grande quantidade de fios o que é descrito como um esfolamento em camadas de polímeros a partir do fio injetado. Berman (1990) encontrou porém, que este comportamento pode ocorrer com concentrações de até 6000 ppm.

Para concentrações maiores que 8000 ppm o polímero não se difunde no escoamento, conservando-se como um fio coerente sem tendência ao esfolamento.

Neste trabalho, os resultados experimentais, através de visualização, demonstraram as tendências acima descritas, embora cada polímero estudado apresenta comportamento típico. O *Iqapol*, de alto peso molecular e granulado, apresenta uma aparência altamente viscosa, enquanto solução mãe, sendo que a dispersão ocorre em um processo de esfolamento que começa após sair pelos injetores. Observou-se também que este processo é menos efetivos para as concentrações,  $C_{sm}$  maiores.

O *Iqapac*, de baixo peso molecular e emulsionado, se dissolve muito rapidamente depois da injeção.

Considerando estas evidências, podemos concluir, portanto, que existe uma rápida difusão do polímero na água.

O segundo critério está associado a um trabalho experimental de visualização do processo de dispersão da solução mãe, a concentrações de 500 ppm e 2000 ppm, às quais foram adicionadas um corante. Os resultados mostraram, neste caso, que para uma distância a jusante da entrada do canal entre 7 a 10 cm, o corante estava totalmente misturado no canal.

Este resultado pode ser explicado partindo da seguinte análise. No T.H. o escoamento é turbulento mesmo depois de passar pelas duas placas perfuradas. Como a solução polimérica é injetada em direção perpendicular ao escoamento de solvente e sempre com velocidade maior que este, foi observada visualmente uma significativa mistura perto do ponto de injeção. Esta constatação, juntamente ao fato que na entrada do canal existe uma brusca redução de área (da área do T.H para a do canal), nos permite concluir que as condições existentes durante o processo de injeção, produzem altas taxas de mistura, sendo possível considerar a distribuição do polímero no canal como uniforme.

Finalmente foi estudado o critério da linearidade do gradiente de pressões que se constitui, talvez, na mais conclusiva das hipóteses estudadas.

Para analisar a linearidade do gradiente de pressões foram realizados vários ensaios com  $C_{sm}=500$  ppm e  $C_{sm}=2000$  ppm. Em ambos os casos, os parâmetros correspondentes ao solvente foram  $Re \approx 1,89 \cdot 10^4$  e  $Q \approx 1,95 \cdot 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s. O método consistiu em comparar visualmente a declividade da linha de água desde a primeira tomada de pressão (situada a 20 cm da entrada do canal) até a última (a 3,2 m do referido ponto), por meio de uma fina corda posicionada nas paredes externas do canal. Em cada ensaio realizado se obteve uma declividade linear em todo o canal, sendo que a maior diferença

entre o nível da primeira e da última tomada foi de  $\approx 2,2$  cm para água e  $\approx 1,5$  cm para escoamentos redutores de atrito ( $C_w=20$  ppm)

Se o polímero não se misturasse completamente na direção transversal, significaria que a redução de atrito seria uma função da distância a jusante da entrada do canal o que resultaria em variações na declividade do gradiente de pressão ao longo do comprimento do mesmo, dependendo do grau de dispersão do polímero na largura do canal. Isto significa que um gradiente de pressão linear, como o obtido, só é possível quando ocorre a dispersão transversal completa do polímero.

Resumindo os argumentos analisados, para a faixa de concentração estudada neste trabalho, podemos confirmar que existe dispersão completa do polímero na direção transversal do canal e conseqüentemente as soluções foram consideradas como soluções homogêneas.

### ***3.1.2.2 Degradação Mecânica das Soluções Poliméricas***

Definida como a perda da capacidade de reduzir atrito de um determinado polímero.

Para aplicações práticas de polímeros como método para diminuir a resistência hidráulica em escoamentos turbulentos, é importante a escolha de aditivos com alta resistência à degradação mecânica. Isto faz com que se diminuam os pontos de injeção e o processo resulte mais eficiente.

Em instalações de tipo experimental o estudo da degradação mecânica é necessário já que permite avaliar em que medida os resultados podem estar influenciados por parte remanescente de polímeros. Este fenômeno resulta mais importante ainda, em instalações tipo circuito fechado como a do presente trabalho.



Devido a isto foram realizados ensaios para verificar se ocorre ou não degradação mecânica. Consideremos inicialmente que na instalação existem dois dispositivos (bomba centrífuga e placa de orifício) nos quais ocorrem altas taxa de cisalhamento, que constitui a principal fonte de degradação das soluções poliméricas.

Os testes foram realizados para valores de  $C_{sm}=500$  ppm e 2000 ppm e dois valores de vazão,  $Q\approx 0.7$  l/s e 2.1 l/s. Depois de ligada a bomba esperou-se aproximadamente 15-20 minutos para estabilizar o escoamento. Posteriormente foi injetado o polímero durante um período de 30 minutos, tempo este três vezes maior que a duração média dos ensaios. Neste intervalo foram medidos repetidas vezes os níveis  $h_1$  e  $h_2$ , que se mostraram constantes.

Se considerarmos que durante este período a injeção de polímero foi contínua podemos induzir que não houve mudanças na concentração. Isto caracteriza como constante a redução de atrito, sendo estes resultados típicos de processos onde ocorre a degradação do polímero.

Se durante a passagem do escoamento pela bomba e pela placa de orifício não ocorresse degradação, significa que ao T.H. está chegando polímero remanescente, que com o tempo provocará incrementos na concentração e conseqüentemente variações nos valores de  $h_1$  e  $h_2$ . Desta forma os resultados obtidos seriam dependentes do tempo. Daqui confirma-se que as soluções poliméricas degradam durante a realização dos ensaios.

### ***3.1.2.3 Estudo de Soluções Não-Homogêneas***

O sistema de injeção para os ensaios com soluções não-homogêneas é apresentado na figura (3.6).

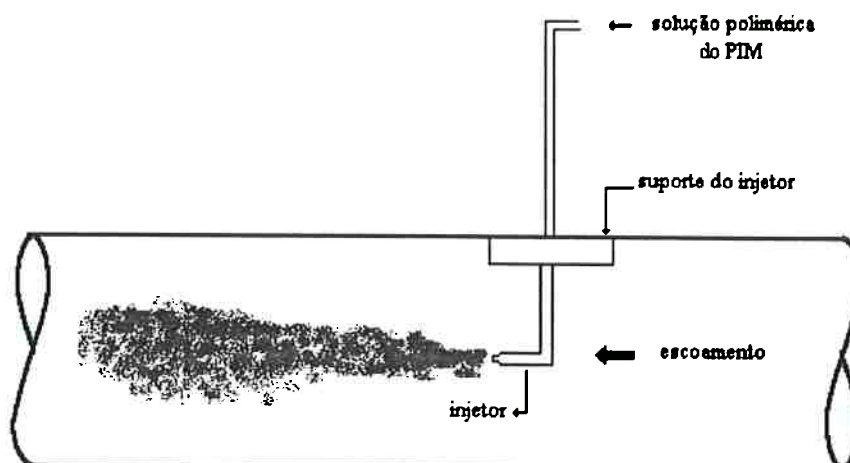


Figura (3.6) Sistema de injeção para soluções não-homogêneas

As soluções heterogêneas são definidas como aquelas nas quais o polímero e o solvente não se misturam completamente existindo duas fases bem definidas: fase água e fase polímero.

O objetivo fundamental destes ensaios é estudar como ocorre o processo de difusão da solução mãe no solvente e a relação entre este processo e a redução de atrito. Em essência: a redução de atrito ocorre quando o polímero tem-se difundido até chegar à região de parede ou estando, ainda, na região central do escoamento.

Para estes ensaios utiliza-se um injetor de latão de 3 mm de diâmetro interno posicionado sempre, a uma profundidade igual à metade da lâmina d'água ( $h_1/2$ ).

As condições experimentais estão baseadas nos seguintes parâmetros:

- $x/D_H$  Distância axial adimensionalizada com o diâmetro hidráulico;
- $d/D_H$  Relação entre o diâmetro do injetor e o diâmetro hidráulico;
- $C_{sm}$  Concentração da solução mãe injetada;
- $Re$  Número de Reynolds, baseado na altura média da lâmina d'água;
- $P$  Tipo de polímero utilizado;

$u_p/U$  Relação entre a velocidade de injeção da solução mãe e a velocidade média do escoamento.

Na tabela a seguir se apresentam os parâmetros que foram utilizados neste trabalho.

Tabela 3.1 Condições experimentais para ensaios de soluções heterogêneas

$x/D_H$	$d/D_H$	$C_{sm}$	$Re$	$P$	$u_p/U$
21,43,64	0.0558	100	$5 \cdot 10^4$	<i>Iqapol</i>	1
21,43,64	0.0558	500	$5 \cdot 10^4$	<i>Iqapol</i>	1
21,43,64	0.0558	1000	$5 \cdot 10^4$	<i>Iqapol</i>	1
21,43,64	0.0558	5000	$5 \cdot 10^4$	<i>Iqapol</i>	1
21,43,64	0.0558	100	$5 \cdot 10^4$	<i>Iqapac</i>	1
21,43,64	0.0558	500	$5 \cdot 10^4$	<i>Iqapac</i>	1
21,43,64	0.0558	1000	$5 \cdot 10^4$	<i>Iqapac</i>	1
21,43,64	0.0558	5000	$5 \cdot 10^4$	<i>Iqapac</i>	1

### 3.1.3 Sistema de Medição, Aquisição e Processamento de Dados

Conforme declarado nos objetivos do presente trabalho foram realizadas medições na região de parede, ou seja, muito próximo do contorno sólido que limita o escoamento. Devido a isto, a técnica de medição de velocidade utilizada deve ser capaz de efetuar-la cumprindo os requisitos necessários para satisfazer a resolução espacial e temporal necessárias nesta região.

A técnica que permite realizar isto é a anemometria laser, cujas vantagens principais com respeito a outros sistemas utilizados frequentemente, como os Anemômetros de Fio Quente (precisos para regiões mais afastadas da parede), são conhecidas:

- não intrusivo;
- maior precisão;
- facilidade de operação;
- ótima resolução espacial e temporal

As principais desvantagens destes instrumentos podem ser resumidas a seguir: alto custo do aparelho, mão de obra qualificada e necessidade de bom acesso ótico (Durst *et al* 1995)

No trabalho aqui apresentado, as medições da velocidade (média local e *RMS* das flutuações) foram feitas utilizando o Laser Doppler Anemometer (L.D.A.) Dantec 55X unidimensional Flow Velocity Analyzer, existente no Departamento de Engenharia Mecânica.

O princípio do L.D.A é o uso do raio Laser (Light Amplification by Stimulated Emission) para medir a velocidade. A interseção de feixes coerentes de luz gera um volume de medição no qual surgem as franjas de interferência que tem a característica de ser equidistantes e paralelas entre si. Quando uma partícula cruza esta região, passa por fases claras e escuras, espalhando a luz incidente sobre ela o que gera um sinal ótico com frequência diferente daquela emitida inicialmente. Esta diferença, a frequência Doppler, é diretamente proporcional à velocidade da partícula.

A relação entre a velocidade média local da partícula e a frequência Doppler é dada pela seguinte relação:

$$u = f_D \frac{\lambda}{2 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (3.5)$$

As características técnica do anemômetro utilizado são:

- feixe luminoso: He-Ne
- potência: 5 mW
- comprimento de onda: 632,8 nm
- distância focal: 300 mm
- Ângulo de interseção do feixe: 11,42°
- dimensões do volume de medição: comprimento: 3,2 mm  
diâmetro: 0,31 mm
- Célula de Bragg com defasagem de 40 MHz
- espaçamento entre franjas: 3,2  $\mu\text{m}$
- número de franjas: 95

A maior limitação no uso deste anemômetro está na dimensão de comprimento relativo ao volume de medição do sensor. Isto provocou algumas mudanças na idéia original sobre o projeto da instalação experimental.

Inicialmente foi construída uma bancada experimental, na qual os ensaios seriam realizados em uma tubulação. Duas dificuldades limitaram esta idéia. A primeira é a alta refração dos feixes devido à curvatura da tubulação, o qual não permite obter sinais de boa qualidade no fotodetector.

A segunda dificuldade é que, como pretende-se medir em pontos muito próximos da parede, o comprimento do sensor não permite obter medições nesta região.

Para tentar resolver a dificuldade relacionada com a refração dos feixes foi construída uma segunda seção cuja característica essencial é que apresenta duas faces planas coincidentes com as regiões de entrada e saída dos feixes da tubulação. A melhoria na qualidade do sinal recebido pelo fotodetector com esta configuração não foi

suficiente, além de não se resolver a limitação da resolução para medições na subcamada viscosa.

Finalmente optou-se pela seção aqui apresentada, muito utilizada em pesquisas atuais, e que resolve os dois problemas acima citados. O primeiro é resolvido devido a que as paredes do canal são planas, diminuindo-se consideravelmente a refração do feixe de luz. O segundo tem solução, já que as medições são feitas a partir do leito do canal e, neste caso o diâmetro do sensor (parâmetro preponderante) tem ordem de grandeza que permite medições em pontos muito próximos do contorno sólido.

O fotodetector, encarregado de transformar a energia luminosa em energia elétrica, opera na posição conhecida como direta (*forward scatter mode*), ou seja, a luz espalhada é capturada em uma posição em que a direção desta é a mesma da emitida. Aqui o fotodetector é ajustado no sentido de receber grande intensidade de luz refletida pela partícula o que permite uma melhor qualidade do sinal ótico.

O anemômetro é colocado na direção perpendicular à seção de testes, sendo desta forma medida a componente axial da velocidade,  $u'$ . Para a medição da componente normal  $v'$ , o sistema emissor de feixes é rodado em  $90^\circ$ .

### **3.1.3.1 Influência do Tamanho da Amostra na Aquisição dos Dados**

Esta análise está baseada na necessidade de estabelecer um critério para a aquisição de dados com uma precisão adequada com um mínimo de tempo de ensaio e baixa ocupação de memória do computador.

Como característica importante deve-se destacar que as paredes do canal são de acrílico novo, ou seja, perfeitamente transparentes o que possibilita a obtenção de um

sinal de boa qualidade, com altas taxas de validação das amostras. Os resultados a serem apresentados, a seguir, podem ser considerados adequados para o trabalho com o L.D.A.

A estimativa foi feita seguindo a metodologia de Araujo de (1994). Fixa-se um ponto do escoamento, com um valor do número de Reynolds determinado. Para cada valor de tamanho de amostra foram realizados diferentes medições ( $n$ ) do valor da velocidade média local. Os ensaios se realizaram para três valores de Reynolds diferentes.

Para avaliar o tamanho da amostra foi usado o Erro Absoluto Médio ( $E$ ) que é dado por:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n |u - U|}{nU} \quad (3.6)$$

A tabela (3.2) apresenta os resultados obtidos.

Inicialmente destaca-se que o ponto escolhido para realizar a análise está muito próximo do leito e portanto a velocidade média local,  $u$  é diferente (menor) que a velocidade média do escoamento,  $U$  na seção de testes no canal. Isto faz com que o valor do erro  $E$  seja aparentemente grande. Por outro lado da figura (3.7) podemos ver que não existe uma tendência clara que nos permita definir o tamanho “ideal” da amostra para levantar os perfis de velocidade, mantendo erros na faixa de 3,9÷5%.

Considerando os resultados mostrados na tabela (3.1) e na figura (3.7) escolhe-se o valor de 100 000 amostras para os ensaios de medição de velocidade. Verifica-se, via de regra, que os parâmetros correspondentes às taxas de validação e amostragem são altos o que garante a boa qualidade dos sinais processados.

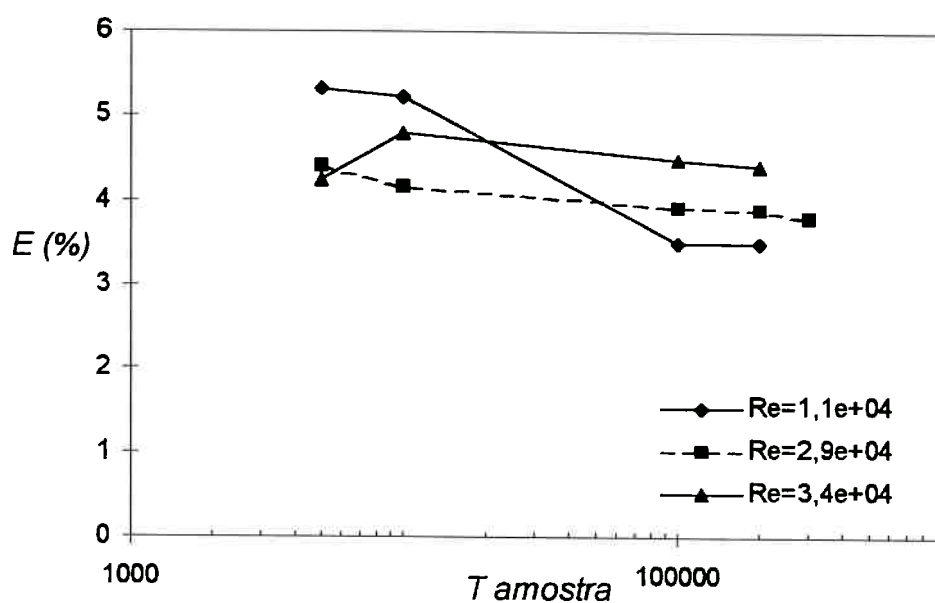


Figura (3.7) Relação entre o Erro Absoluto Médio ( $E$ ) e o tamanho da amostra

Tabela 3.2 Resultados da análise para determinação do tamanho da amostra.

$Re$	Tamanho da Amostra	Número de Medições $n$	Velocidade média local (m/s)	Erro $E$ (%)	Validação média (%)	Taxa de Amostragem (KHz)
1.1e+04	5 000	20	0,13009	5,3	81,08	5,78
1.1 e+04	10 000	20	0,1316	5,2	85,54	8,38
1.1e+04	100 000	20	0,1388	3,48	89,86	16,125
1.1e+04	200 000	20	0,1389	3,48	89,12	17,186
2.9e+04	5 000	20	0,3075	4,41	79,19	5,88
2.9e+04	10 000	20	0,3062	4,15	83,52	8,29
2.9e+04	100 000	20	0,3087	3,91	90,12	16,146
2.9e+04	200 000	20	0,3066	3,89	89,12	17,092
2.9e+04	300 000	20	0,3077	3,79	89,91	17,442
3.4e+04	5 000	20	0,3480	4,22	70,01	6,38
3.4e+04	10 000	20	0,3455	4,78	73,83	9,17
3.4e+04	100 000	20	0,3450	4,46	77,18	16,074
3.4e+04	200 000	20	0,3435	4,40	76,98	16,861



Estes resultados fixam o comprimento de registro em um valor ligeiramente menor que 20 segundos o que é considerado bom.

### **3.1.3.2 Partículas Traçadoras em Sistemas L.D.A.**

O princípio de funcionamento do L.D.A. estabelece que a medição da velocidade é feita através da diferença de frequência entre o sinal emitido e o espalhado por causa da passagem de uma partícula pelo sensor do anemômetro (cruzamento dos feixes). Isto significa que no fluido deve existir algum elemento, também conhecido como “*seeding*”, que provoque este efeito.

Os líquidos puros não permitem efetuar estas medições pelo que normalmente são inseridas partículas traçadoras, cuja velocidade é admitida igual à do fluido.

Algumas das partículas traçadoras utilizadas frequentemente são: Látex; Óxido de Polietileno, Dióxido de Titânio e Pó de Alumínio, cujas principais características são resumidas a seguir:

- a velocidade da partícula deve ser igual à do fluido em que está submerso, ou seja, não deve estar acelerada. Isto significa que as massas específicas de ambas devem ser muito parecidas;
- A razão ótima entre o raio médio da partícula ( $rp$ ) e o espaçamento entre franjas é  $1/4$ , embora tem-se registrado resultados razoáveis para valores de  $rp$  até duas vezes o espaçamento entre franjas (Araujo de, 1994).

No presente trabalho, a água corrente disponível para ser utilizada como solvente no laboratório, dispensa a utilização de qualquer tipo de partículas traçadoras.

### 3.1.3.3 Seleção da Seção de Testes

Para a realização dos ensaios é necessário que na seção de trabalho o escoamento esteja plenamente desenvolvido. Para determiná-la foi realizado o seguinte procedimento.

Escolheram-se três seções a 2.4 m, 2.5 m e a 2.6 m a jusante da entrada do canal. Estas seções estão suficientemente afastadas da entrada do canal e não muito próximas da saída, que são duas regiões que podem exercer influência nas seções de testes. Posteriormente foram levantados os perfis de velocidade para dois valores diferentes de velocidade média do escoamento. No primeiro ensaio a velocidade média foi de 0.3555 m/s e no segundo 0.4973 m/s (que correspondem a valores do número de Reynolds de  $4,83 \cdot 10^4$  e  $8,2 \cdot 10^4$ , respectivamente).

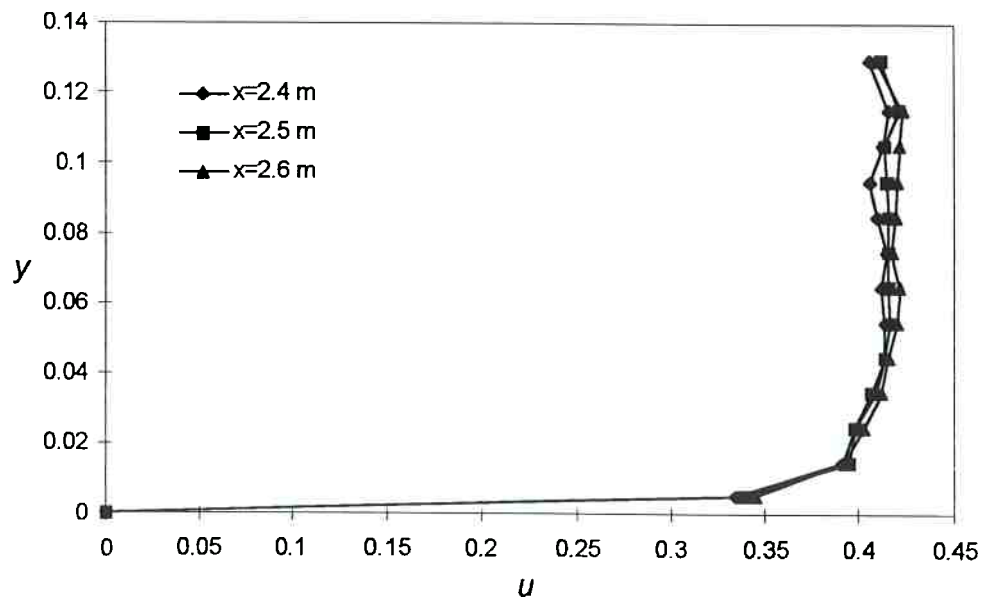
Utilizando-se a metodologia proposta por de Araujo (1994) os resultados obtidos são apresentados nas tabelas (3.3) e (3.4) e nas figuras (3.8) e (3.9).

Considerando que os erros absoluto médio,  $E$  foram de 0,79% e 0,57%, respectivamente, valores estes menores que o limite de desvio do anemômetro, como mostrado no Anexo I e que não existem mudanças nos perfis de velocidade na direção axial, pode-se considerar que nestas seções o escoamento está totalmente desenvolvido, escolhendo-se a correspondente a 2,5 m a jusante da entrada do canal como seção de trabalho.

Tabela 3.3 Perfis de velocidade em torno a seção em estudo,  $Re \approx 4,83 \cdot 10^4$ 

$u$ 2.4 m, (m/s)	$u$ 2.5 m, (m/s)	$u$ 2.6 m, (m/s)	$\Delta u(1-2)$ (m/s)*	$\Delta u(2-3)$ ,(m/s)*
0	0	0	0	0
0.335	0.34	0.3452	-0.005	-0.0052
0.3917	0.3953	0.3922	-0.0036	0.0031
0.3979	0.3986	0.4034	-0.0007	-0.0048
0.4084	0.407	0.412	0.0014	-0.005
0.4133	0.4133	0.4153	0	-0.002
0.414	0.4161	0.4199	-0.0021	-0.0038
0.4113	0.4151	0.4216	-0.0038	-0.0065
0.4148	0.4159	0.417	-0.0011	-0.0011
0.4101	0.4155	0.4193	-0.0054	-0.0038
0.4061	0.4143	0.4199	-0.0082	-0.0056
0.4129	0.4138	0.4212	-0.0009	-0.0074
0.4157	0.4213	0.4228	-0.0056	-0.0015
0.4063	0.4116	0.41	-0.0053	0.0016

\* $\Delta u(1-2)=u$  2.4- $u$  2.5;  $\Delta u(2-3)=u$  2.5- $u$  2.6

Figura (3.8) Perfis de velocidade para  $Re \approx 4,83 \cdot 10^4$ , para diferentes valores de  $x$ .

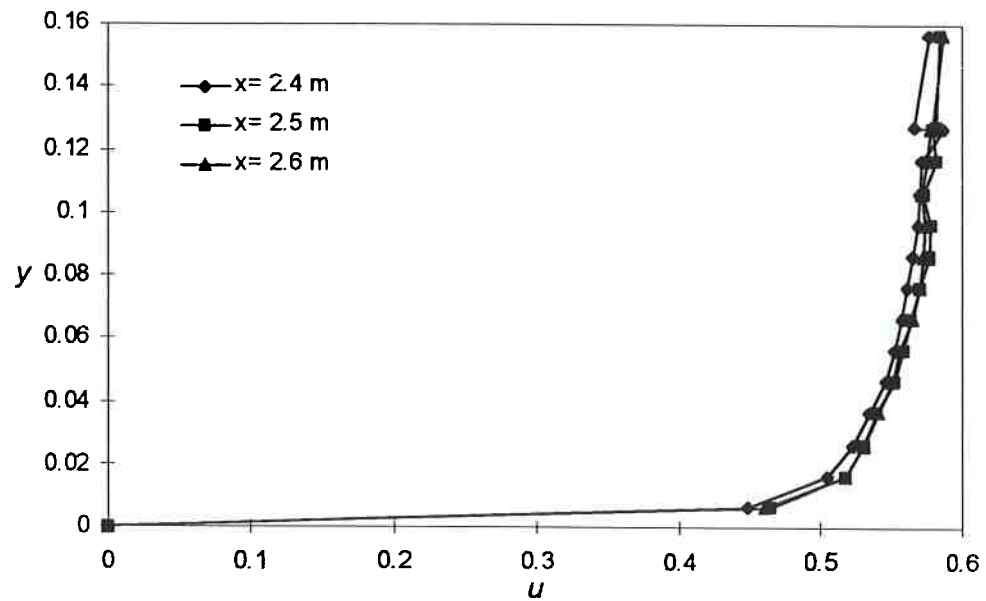


Figura (3.9) Perfis de velocidade para  $Re \approx 8,2 \cdot 10^4$ , para diferentes valores de  $x$ .

Tabela 3.4 Perfis de velocidade em torno a seção em estudo,  $Re \approx 8,2 \cdot 10^4$ .

$u$ 2.4 m, (m/s)	$u$ 2.5 m, (m/s)	$u$ 2.6 m, (m/s)	$\Delta u(1-2)^*$ , (m/s)	$\Delta u(2-3)^*$ , (m/s)
0	0	0	0	0
0.4475	0.4647	0.4602	-0.0172	0.0045
0.5047	0.5176	0.5173	-0.0129	0.0003
0.523	0.5304	0.5299	-0.0074	0.0005
0.5343	0.5392	0.54	-0.0049	-0.0008
0.545	0.5524	0.5503	-0.0074	0.0021
0.5518	0.5582	0.5555	-0.0064	0.0027
0.5575	0.5633	0.564	-0.0058	-0.0007
0.5604	0.569	0.5696	-0.0086	-0.0006
0.5647	0.5756	0.5723	-0.0109	0.0033
0.5681	0.5767	0.573	-0.0086	0.0037
0.5691	0.5725	0.5711	-0.0034	0.0014
0.5713	0.5809	0.5749	-0.0096	0.006
0.5856	0.5785	0.5766	0.0071	0.0019
0.5658	0.5805	0.5779	-0.0147	0.0026
0.5764	0.5832	0.5859	-0.0068	-0.0027

### 3.2 Polímeros

A bibliografia técnica registra que a Redução de Atrito pode ocorrer, utilizando meios ativos, através da injeção de gás na camada limite, adição de polímeros, grãos e surfactantes. A escolha de polímeros para este trabalho responde principalmente a duas questões:

- Dentre os meios ativos, tem-se mostrado o mais efetivo;
- Dar continuidade à pesquisa que começou ser desenvolvida em 1994.

Conforme estabelecido nos objetivos e na tentativa de obtenção de informação para estudar o mecanismo físico da redução de atrito foram selecionados polímeros com diferentes características no que se refere a peso molecular, estrutura, aparência física etc.

Na tabela a seguir são apresentados os polímeros a estudar e suas principais características.

Tabela 3.5 Polímeros utilizados no trabalho e suas características

Polímero	Fabricante	Peso Molecular	Caract. Físicas	Aparência
<i>Iqapol PA</i>	Ind. IQA	$\approx 1,7 \cdot 10^6$	puro	cristais brancos
<i>Iqapac 731</i>	Ind. IQA	$\approx 4 \div 6 \cdot 10^3$	emulsão	*
<i>Polivinilacetato</i>	ADDAX	$\approx 9 \cdot 10^3$	emulsão	**

\* Líquido transparente ligeiramente amarelo

\*\* Líquido branco

A escolha de polímeros de diferentes pesos moleculares responde ao interesse de definir com maior nitidez a dependência deste parâmetro com a Redução de Atrito (assunto que tem-se mostrado contraditório em trabalhos publicados). É objetivo também, abarcar com maior grau de profundidade a influência da estrutura dos polímeros.

### 3.3 Procedimento experimental

Para a realização dos ensaios experimentais estabelece-se a seguinte metodologia, executada para cada polímero e concentração estudada.

Inicialmente devemos destacar que determinar com precisão a posição exata de cada ponto com respeito ao leito do canal é muito difícil devido às distorções provocadas pelo efeito ótico dos feixes ao passarem pelas paredes laterais. Este aspecto é mais complicado ainda, nas regiões mais próximas das paredes.

Para a determinação da posição exata dos pontos foi realizado o seguinte procedimento, utilizando como fluido água.

Ligou-se a bomba sendo fixada uma vazão igual a  $1,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Para esta condição foi levantado o perfil de velocidades axial ( $u$  versus  $y$ ), determinando-se também a velocidade de atrito, conforme apresentado no Capítulo 4. Com os valores de  $u$  e  $u_*$  foi calculada a velocidade adimensional  $U^+$ . Posteriormente foi determinado o perfil de velocidades adimensionalizado  $U^+$  versus  $Y^+$ , conforme a região de escoamento. Na S.C.V. através da relação  $U^+ = Y^+$  e pela lei logarítmica na região correspondente, adotando os valores de  $k=0.41$  e a constante  $B=5.5$ , que são bem aceitos na literatura.

A partir daqui se determinaram os valores do número de Reynolds de atrito correspondente a cada valor de velocidade adimensional, sendo finalmente isolado o valor de  $y$ . Estes foram comparados com os lidos diretamente durante os ensaios. Em todos os casos verificou-se diferenças menores que 4%. Considerando estes resultados foi estabelecida a escala dos valores de  $y$ .

O procedimento experimental para a realização dos ensaios foi o seguinte:

Seleciona-se a vazão de trabalho, que depende do número de Reynolds a analisar. Como a altura da lâmina d'água é uma função da vazão, foi estabelecido um critério para

a quantidade de pontos a medir. Para os menores valores de  $Re$  os perfis de velocidades foram levantados com 10 pontos. Os sete primeiros a distância de 1 mm a partir do leito do canal. Os restantes divididos entre a metade de  $h_{st}$  e próximos da superfície.

Para maiores valores de  $Re$  foram medidos 15 pontos de velocidades, tendo estes uma distribuição comparativamente iguais: doze pontos a 1 mm e os outros nas regiões externas do escoamento. Esta divisão permite trabalhar a região próxima do contorno sólido e também obter informações suficientes para aplicação do princípio de máxima entropia (P.M.E.), conforme veremos no capítulo seguinte.

Uma vez estando em condições de começar os ensaios, liga-se a bomba esperando-se aproximadamente 20-25 minutos para garantir que o sistema esteja totalmente estabilizado. Procede-se à medição do perfil de velocidades. Quando das medições com soluções poliméricas, o procedimento acima é similar. Depois que o escoamento está estabilizado abre-se o registro embaixo do rotâmetro para injetar a solução mãe em vazão previamente estabelecida, como função da concentração homogênea pretendida. Um tempo mínimo de 5 minutos antes do início das medições foi necessário para garantir que o gradiente de pressões no canal estava estabelecido às novas condições, quando foram feitas as medições.

Realizam-se simultaneamente medições de temperatura do escoamento, altura da lâmina d'água nas seções 1,  $h_1$ , 2,  $h_2$  e na seção de testes,  $h_{st}$ .

Uma consideração que foi objeto de avaliação, e o que diz respeito à escolha do valor da viscosidade cinemática nos cálculos correspondentes às soluções poliméricas. O critério mais comum hoje para soluções com baixa concentração e perfeitamente diluídas é considerar este valor como o do solvente à temperatura medida durante a realização dos ensaios.

Para os ensaios com soluções heterogêneas o procedimento inicial é o mesmo que o descrito anteriormente. Depois da abertura do sistemas de injeção de polímeros (vide figura (3.6)) espera-se em média 4-5 minutos para estabilizar o sistema e mede-se a diferença de pressões para três trechos de 1.00 m de comprimento a jusante do injetor o que permitiu avaliar o processo de difusão de polímeros e sua influência na Redução de Atrito.

Posteriormente são feitas medições da velocidade na seção de testes sendo que esta abarca tanto a fase fio de polímero quanto para a fase água.

As medições da altura da lâmina d'água nos diferentes trechos foram feitas 5 vezes em um período de 10 minutos, sendo os valores finais a média dos valores lidos.

A tabela a seguir mostra, em resumo, as condições e parâmetros experimentais deste trabalho.

Tabela 3.6 Condições e parâmetros experimentais para soluções homogêneas.

Parâmetros →	$Q$	Polímero	$C_w$
$Re \approx 8-8,5 \cdot 10^3$	$\approx 2,286 \cdot 10^{-4}$	<i>Iqapol</i> pa	0, 5, 10, 15, 20 ppm
$Re \approx 8-8,5 \cdot 10^3$	$\approx 2,286 \cdot 10^{-4}$	<i>Iqapac</i> pa	0, 5, 10, 15, 20 ppm
$Re \approx 1,3-1,35 \cdot 10^4$	$\approx 3,89 \cdot 10^{-4}$	<i>Iqapol</i> pa	0, 5, 10, 15, 20 ppm
$Re \approx 1,3-1,35 \cdot 10^4$	$\approx 3,89 \cdot 10^{-4}$	<i>Iqapac</i> pa	0, 5, 10, 15, 20 ppm
$Re \approx 4,6-5,1 \cdot 10^4$	$\approx 1,29 \cdot 10^{-3}$	<i>Iqapol</i> pa	0, 5, 10, 15, 20 ppm
$Re \approx 4,6-5,1 \cdot 10^4$	$\approx 1,29 \cdot 10^{-3}$	<i>Iqapac</i> pa	0, 5, 10, 15, 20 ppm
$Re \approx 8 \cdot 10^4 - 10^5$	$\approx 2,43 \cdot 10^{-3}$	<i>Iqapol</i> pa	0, 5, 10, 15, 20 ppm
$Re \approx 8 \cdot 10^4 - 10^5$	$\approx 2,43 \cdot 10^{-3}$	Polyvinil acetato	0, 5, 10, 15, 20 ppm
$Re \approx 8 \cdot 10^4 - 10^5$	$\approx 2,43 \cdot 10^{-3}$	<i>Iqapac</i> pa	0, 5, 10, 15, 20 ppm



No capítulo seguinte, apresentaremos uma discussão conceitual sobre a estrutura de turbulência em canal utilizada neste trabalho. A aplicação da metodologia aqui explicada à esta estrutura ofereceu elementos importantes para estudar as modificações que ocorrem em escoamentos quando da adição de polímeros, cujos resultados serão apresentados no capítulo 5.

## ***CAPÍTULO 4***

---

### ***ESTRUTURA DA TURBULÊNCIA EM CANAIS***

Sabe-se pela sua própria natureza, que a caracterização da turbulência não é fácil.

Nos últimos anos, as pesquisas referentes à estrutura da turbulência, tanto em tubulações quanto em canais, tem avançado significativamente, embora ainda não exista consenso em vários aspectos. O grau de desenvolvimento das investigações experimentais depende fortemente dos instrumentos disponíveis durante a realização das mesmas. Neste sentido o presente capítulo tem como objetivo básico estabelecer quais parâmetros foram selecionados para estudar a estrutura da turbulência relativa ao trabalho aqui apresentado, assim como as equações e considerações utilizadas para defini-la.

Para o desenvolvimento das investigações experimentais, utilizou-se um anemômetro laser unidimensional, disponível no laboratório de Mecânica dos Fluidos, que, conforme citado anteriormente, apresenta algumas limitações.

A figura (4.1) apresenta o canal em estudo, onde se definem as principais seções às quais são referenciadas as equações aplicadas.

#### ***4.1 Velocidade de Atrito e Coeficiente da Eficiência da Redução de Atrito.***

Uma detalhada investigação da turbulência requer a determinação da velocidade de atrito,  $u_*$ , que constitui uma medida da intensidade dos turbilhões e da transferência da quantidade de movimento devido às flutuações da velocidade. Também representa a

escala de velocidade fundamental sendo, junto à viscosidade, a variável interna utilizada na adimensionalização de diferentes parâmetros, na região de parede.

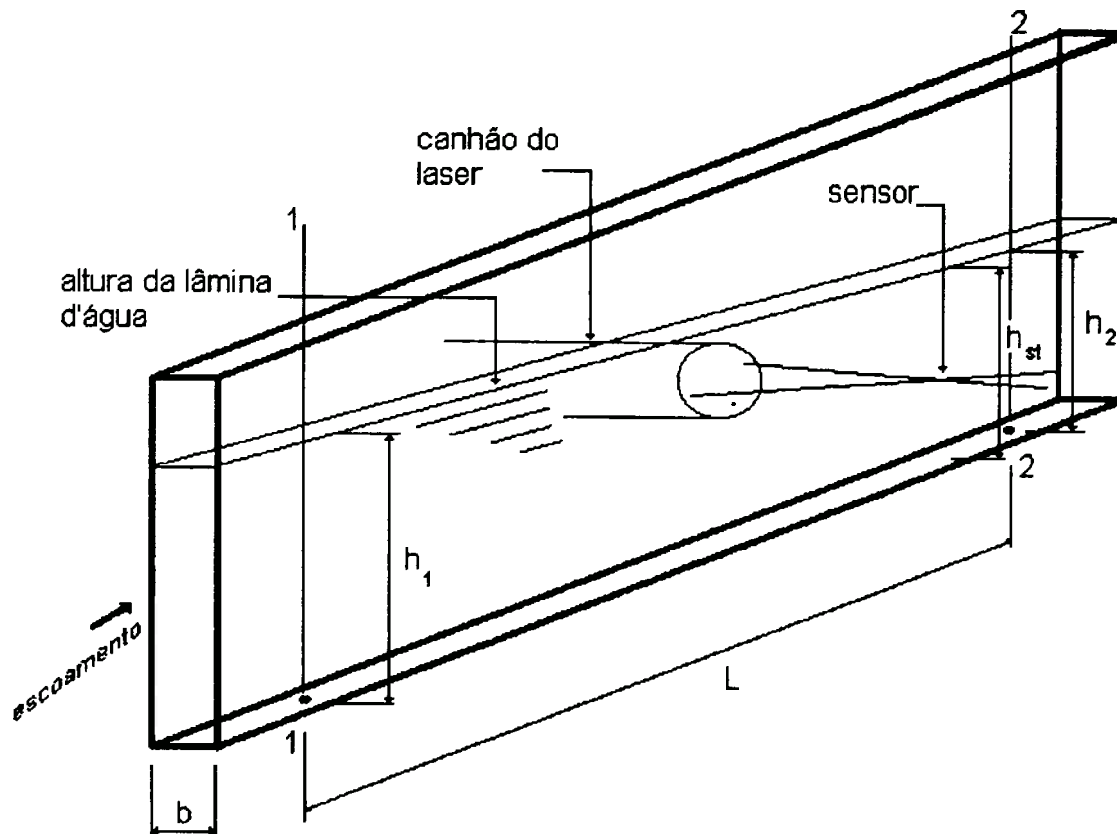


Figura (4.1) Vista oblíqua do canal em estudo, com suas principais denominações

No presente trabalho a velocidade de atrito foi determinada através da relação:

$$u_* = U \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (4.1)$$

O coeficiente de perda de carga,  $f$  se determinou aplicando a equação da energia entre as seções 1 e 2 (Vide figura (4.1)). Desta forma tem-se que:

$$f = \frac{(H_1 - H_2) 2gD_H \bar{h}^2 b^2}{LQ^2} \quad (4.2)$$

Na equação (4.2) o termo  $H$  representa a carga total em cada seção, que é igual à soma da carga em velocidade e da carga em altura, assumindo uma distribuição

hidrostática de pressões. O plano horizontal de referência, P.H.R é considerado como estando no leito do canal. Daqui obtém-se que:

$$H = \frac{2}{3}h + \frac{Q^2}{2gb^2h^2} \quad (4.3)$$

Se na equação (4.3) colocar-se o sub-índice 1 representa-se então, a carga total em 1. Da mesma forma o sub-índice 2 representa a carga total na seção final do canal.

Como entre as seções 1 e 2 existe uma declividade do gradiente de pressão linear, quando necessário, a altura da lâmina d'água foi considerada como o valor médio entre elas:

$$\bar{h} = \frac{(h_1 + h_2)}{2} \quad (4.4)$$

O diâmetro hidráulico foi determinado considerando a largura do canal,  $b$  e a altura média da lâmina d'água,  $\bar{h}$ :

$$D_H = 4 \left[ \frac{(b\bar{h})}{(b + 2\bar{h})} \right] \quad (4.5)$$

Para caracterizar os escoamentos redutores de atrito utiliza-se o coeficiente de Eficiência da Redução de Atrito (E.R.A),  $\varphi$  que relaciona o coeficiente de perda de carga,  $f$  para um mesmo valor de  $Re$  em ambos os escoamentos (solvente e soluções poliméricas). Este coeficiente é determinado pela relação:

$$\varphi = \frac{|f_s - f_p|}{f_s} 100 \quad (4.6)$$

## **4.2 Perfis Adimensionalizados de Velocidade Média, de Intensidade Turbulenta e das Tensões de Reynolds**

Durante o processamento dos resultados experimentais para o levantamento dos principais perfis de velocidade, teve-se como base a medição direta da velocidade axial e dos valores de “*RMS*” da componente flutuante nesta direção.

### **4.2.1 Lei de Parede**

Nos escoamentos turbulentos de soluções poliméricas, o estudo da lei de parede permite a análise de vários aspectos importantes. Neste trabalho foram avaliadas as modificações que ocorrem na constante de Von Kármán,  $k$  e na constante de integração,  $B$ .

Também resulta importante o estudo da teoria da Sub-camada Elástica (S.C.E) de Virk (1971), segundo a qual, esta região é típica de escoamentos redutores de atrito, sendo sua espessura considerada como um índice do efeito redutor de um determinado sistema polímero-solvente.

### **4.2.2 Perfis de Intensidade Turbulenta**

São apresentados na sua forma tradicional, ou seja,  $RMS_{u'}$  vs.  $Y^+$ . Através destes gráficos é possível avaliar onde ocorre o processo de produção de energia cinética turbulenta, os efeitos de amortecimento ou incremento da atividade turbulenta assim como as mudanças na correlação entre  $u'$  e  $v'$  e seu reflexo nas tensões de Reynolds.

### 4.2.3 Perfis das Tensões de Reynolds

As tensões de Reynolds são termos muito controversos na análise de escoamentos redutores de atrito. Não foi possível estudar o chamado “Déficit da Quantidade de Movimento” devido à impossibilidade de se medir as componentes flutuantes de velocidades nas direções axial e normal, simultaneamente. Porém, utilizando a equação da quantidade de movimento (2.6), foi possível determiná-las e analisar a influência de polímeros no processo de transporte devido às componentes  $u'$  e  $v'$ .

Em escoamentos turbulentos a influência das forças viscosas decresce com o incremento da distância da parede e podem ser desprezadas para distâncias maiores do que 80 unidades viscosas  $\left(\frac{y}{u_*}\right)$ . A partir dos resultados, analisa-se a influência destas forças com o incremento da distância à parede  $y$ .

### 4.3 Tensão de Cisalhamento de Parede

Termo importante na teoria do início da redução de atrito para explicar o comportamento geral do escoamento turbulento como função do número de Reynolds e da concentração,  $C_w$ . É determinada pela relação:

$$\tau_0 = u_*^2 \rho \quad (4.7)$$

### 4.4 Parâmetros de Ordem Superior

São poucos os estudos que apresentam resultados conclusivos relativos ao cálculo de momentos de ordem superior de análise estatística de sinais de escoamentos turbulentos com aditivos redutores de arrasto.

Neste trabalho tanto a assimetria,  $S$  como a curtose,  $F$ , foram determinados utilizando-se o próprio software disponibilizado pelo fabricante do anemômetro. Os resultados estão na forma  $S$  vs  $Y^+$  e  $F$  vs.  $Y^+$ .

Os mesmos podem ser importantes na explicação das modificações que os polímeros provocam na estrutura da turbulência.

#### **4.5 Produção e Dissipação de Energia Turbulenta**

Constituem dois dos processos mais importantes no estudo da turbulência. A produção,  $P$  está associada ao processo de erupções que ocorrem nos escoamentos turbulentos e desta forma, tem influência nos processos de transferência entre as regiões interna e externa.

A produção de energia cinética turbulenta foi calculada pela relação:

$$P = - \langle \overline{u'v'} \rangle \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.8)$$

Várias são as formas de poder determinar a taxa de dissipação de energia,  $\varepsilon$ . Neste trabalho utilizou-se o seguinte procedimento. Para escoamento Newtoniano (solvente) a equação que define o espectro de potência em função do número de onda,  $k\omega$ , tem sido experimentalmente bem definida e é expressa por:

$$S(k\omega) = \alpha \varepsilon^{2/3} k\omega^{-5/3} \quad (4.9)$$

onde  $\alpha$  é uma constante com valor aproximado de 1,5 (Tennekes & Lumley (1972)).

Inicialmente obteve-se o espectro em frequência conforme definido, e feitas as transformações pertinentes, equação (4.12) e equação (4.13), obteve-se o espectro no domínio do número de ondas,  $S(k\omega)$ . Depois ajustou-se este, visualmente, através de uma curva de declividade  $-5/3$ . Como a equação (4.9) é válida somente na região

inercial, a região de produção foi considerada a partir dos menores valores de  $kw$  que não se ajustem a esta curva. De forma similar, para os maiores valores do número de onda que não se ajustam a esta curva, foi definida a região de dissipação.

Os valores de  $S(kw)$  e  $kw$ , que caracterizam a fronteira entre as regiões inercial e de dissipação foram substituídos em (4.9) obtendo-se o valor de  $\varepsilon$ .

Os resultados obtidos para cada posição e número de Reynolds foram comparados com os valores da taxa de dissipação calculados considerando estimativa não viscosa, o que é possível porque o número de Reynolds, baseado na escala integral do escoamento,  $Re_L > 10$ , de acordo com a literatura (Tennenkes & Lumley 1972). Esta estimativa considera que a taxa à qual os turbilhões mais energéticos fornecem energia aos menores turbilhões é proporcional ao recíproco da escala de tempo dos maiores turbilhões. Desta forma a energia cinética por unidade de massa nas grandes escalas é da ordem de  $U^2$  e a taxa de transferência da mesma se assume proporcional a  $U/L$ .

A partir daqui, nota-se então que a taxa de suprimento de energia às menores escalas é da ordem  $U^2 \cdot U/L = U^3/L$ , a que deve ser dissipada a uma taxa  $\varepsilon$ , igual à taxa de suprimento:

$$\varepsilon = \frac{(U)^3}{L} \quad (4.10)$$

Esta relação expressa que a dissipação de energia pode ser estimada a partir da dinâmica das escalas mais energéticas, independentemente da viscosidade,  $\nu$ .

Segundo (Silveira-Neto 1998) esta consideração também é válida pelo fato que o escoamento na seção de testes é desenvolvido, conforme analisado anteriormente. Devido a isto pode ser assumida a hipótese de equilíbrio, que estabelece que a



dissipação,  $\varepsilon$  é igual à taxa de injeção de energia cinética turbulenta das escalas mais energéticas ( $\mathcal{W}^2/\mathcal{J}$ ). Portanto a taxa de dissipação poderia expressar-se conforme (4.10).

Pela importância do processo de produção, considera-se um parâmetro que representa a razão de variação deste processo, quando comparados os escoamentos de solvente e de soluções poliméricas. O mesmo avalia as mudanças que ocorrem em  $P$ , para valores iguais de  $Y^+$  a diferentes concentrações, sendo definido como:

$$\Pi_P = \left. \frac{P_p}{P_s} \right|_{Y^+ \rightarrow const} \quad (4.11)$$

#### 4.6 Análise Espectral, Escalas e Cascata de Energia

Os espectros de potência foram determinados utilizando o próprio software do anemômetro. As características do processamento dos dados para a obtenção de  $S(f)$  foram as seguintes:

- O espectro em frequência não foi normalizado;
- O comprimento do registro (100 000 amostras) foi dividido em 8 blocos, sendo que o programa aplica a transformada rápida de Fourier a cada um deles. O espectro resultante é a média do espectro de cada um destes blocos. Aumentando o número de blocos, o erro na estimativa espectral média diminui. Neste caso maiores valores não foram possíveis, por limitações do computador.
- Utilizou-se janela tipo Bartlett. Segundo a bibliografia consultada esta janela é de uso comum no processamento de sinais em escoamentos de fluidos.
- Os espectros foram determinados e comparados para três regiões do escoamento: próximo do leito do canal, à metade da altura da lâmina d'água e próximo da superfície livre.

A partir do espectro em frequência obtiveram-se:

Espectro de energia no domínio do número de ondas,  $k_w$ , mediante as seguintes transformações:

$$S(k_w) = \left(\frac{u}{2\pi}\right)S(f) \quad (4.12)$$

$$k_w = \frac{2\pi f}{u} \quad (4.13)$$

Na análise dos espectros foi considerado o valor da frequência máxima  $f_{max}$  definida como a frequência que ainda possui energia e que é expressa pela equação seguinte de acordo com Nezu & Nakagawa (1993):

$$f_{max} = \left(\frac{50}{\pi}\right)\left(\frac{u}{h_{st}}\right) \quad (4.14)$$

Nos escoamentos turbulentos, o processo de transferência de energia se realiza dos grandes para os pequenos turbilhões. Esta transferência é governada pelo mecanismo de esticamento dos vórtices e leva à dissipação viscosa de energia na microescala de Kolmogorov. Neste sentido considera-se importante estudar as modificações que ocorrem nas escalas de turbulência e como estas refletem na cascata de energia.

Em correspondência com as posições dos espectros de potência as modificações nas escalas de turbulência foram analisadas nas três regiões da seção transversal do canal.

Embora existam vários métodos para estimar as escalas integrais do escoamento, uma forma relativamente fácil e precisa é a partir de considerações geométricas, dependendo da posição do ponto de análise.

A partir deste critério, na figura (4.2) representam-se esquematicamente, a forma e dimensões dos possíveis turbilhões em cada região. Os elementos para esta escolha foram:

- Para pontos próximos do leito do canal ( $h_{rp}$ ).

Como se observa, na direção normal, os turbilhões estão limitados pelo fundo do canal, que está aproximadamente a  $1\div 1.5$  mm de distância deste. Devido a isto os turbilhões não podem-se desenvolver a escalas maiores que a referida distância. Com isto a escala integral de comprimento nesta região poderia ser considerada como sendo 1 mm.

- Para pontos na região central do escoamento, ( $h_m$ ).

Neste caso, se observa que os turbilhões poderiam-se desenvolver, tanto na largura,  $b$  quanto na altura da lâmina d'água ( $h_{st}$ ), sendo considerados como os maiores (possíveis) turbilhões existentes no canal. Daqui estima-se que a escala de comprimento nesta região seria da ordem do diâmetro hidráulico,  $D_H$  na seção de testes. Este parâmetro, conforme equação (4.5), pode relacionar  $b$  e  $h_{st}$ .

- Para pontos da região da superfície livre, ( $h_{st}$ ).

Esta região foi escolhida como sendo aquela onde existem as máximas velocidades. Conforme a figura, os turbilhões estariam limitados superiormente pela superfície livre. Devido a isto a escala de comprimento poderia ser considerada como a distância do ponto analisado à superfície livre,  $h_{mv}$ .

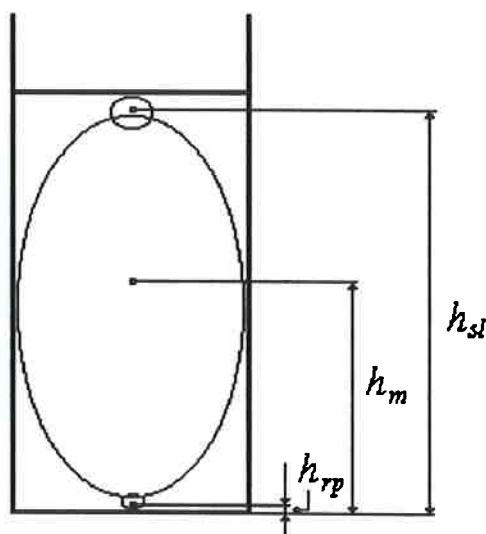


Figura (4.2) Esquema que representa a posição das regiões e as escalas integrais do escoamento a partir de considerações geométricas.

Neste trabalho, existe um fato que faz com que não seja possível a estimativa de  $\mathcal{L}$  utilizando unicamente o critério de consideração geométrica acima mencionado. Como visto no Capítulo 3, no Tanque de Homogeneização (TH na figura (3.1)) existem duas placas perfuradas, cujo objetivo é, fundamentalmente, quebrar os maiores vórtices. Se considerarmos que, a placa colocada mais à jusante (próximo da entrada do canal) apresenta furos de 2 mm, então os maiores turbilhões seriam desta ordem de grandeza. Além disto, um outro aspecto deve ser considerado. Na saída do TH, antes da entrada ao canal, a largura da seção transversal se reduz de 28 cm a 3 cm. Isto, necessariamente, provocará uma aceleração do escoamento e conseqüentemente constitui uma nova região de suprimento de turbulência.

Devido a isto existe a possibilidade de ligeiros incrementos nas escalas de comprimentos, sendo então sua determinação a partir de considerações geométricas muito difícil, senão inviável.

Para a região de parede manteve-se o critério acima discutido,  $\approx 1$  mm, já que o fundo do canal limita o desenvolvimento dos turbilhões. Nas outras duas regiões a escala foi determinada a partir dos espectros de potência (McComb & Rabie (1982)). A figura (4.3) representa estes critérios.

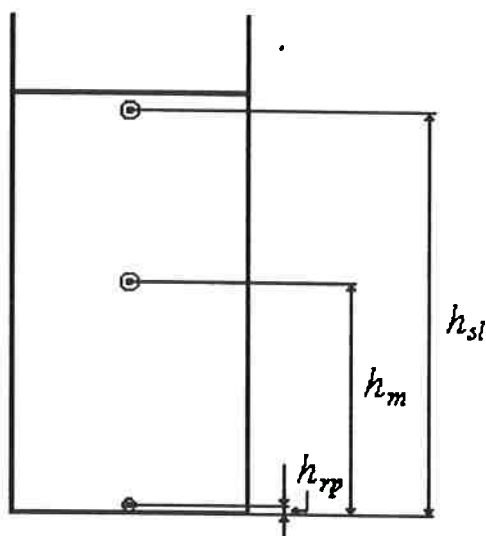


Figura (4.3) Representação esquemática dos turbilhões com suas escalas integrais de comprimento

Em todos os casos e considerando que o tamanho dos turbilhões mais energéticos é pequeno, a escala integral de velocidade,  $\mathcal{U}$  foi considerada como sendo a raiz média quadrática da componente flutuante da velocidade,  $RMS_u$ , que foi medida durante os ensaios.

A partir destas grandezas características as demais ficam definidas a seguir:

- Escala integral de tempo,  $\mathcal{T}$

$$\mathcal{T} = \frac{\mathcal{L}}{\mathcal{U}} \quad (4.15)$$

- Escala integral de vorticidade,  $\mathcal{W}$

$$\mathcal{W} = \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{L}} \quad (4.16)$$

- Escala integral de energia,  $\mathcal{E}$

$$\mathcal{E} = \mathcal{U}^2 \quad (4.17)$$

As escalas dissipativas ou de Kolmogorov estão definidas a partir da viscosidade cinemática e da taxa de dissipação, conforme a literatura.

#### 4.7 Princípio de Máxima Entropia (PME)

Muito recentemente, o PME tem sido utilizado com sucesso para determinar características básicas do escoamento em canais (naturais e artificiais), rios etc. Sua grande vantagem é que medindo-se a velocidade em poucos pontos na vertical (três), podemos obter o perfil de velocidade, a velocidade média e a vazão no corpo d'água de referência. Para sua aplicação neste trabalho, utilizou-se o programa desenvolvido por Minei (1999).

O procedimento para trabalhar com o programa é simples. Dos valores medidos experimentalmente escolheram-se três. Os critérios para esta escolha foram: um ponto próximo do leito do canal, outro correspondente ao de máxima velocidade e um terceiro que está entre o ponto de máxima velocidade e a superfície livre.

Os dados de entrada do programa constituem-se em seis (6) valores (três de velocidade com seus correspondentes  $y$ ) além da altura da lâmina d'água,  $h_{st}$  e da área da seção de testes,  $A_{st}$ .

Como resultado o programa oferece valores da velocidade máxima,  $U_{max}$  distância da superfície livre ao ponto de máxima velocidade,  $h_{mv}$ , o parâmetro de entropia  $M$  e um outro valor de velocidade calculado,  $u_{3\text{ calc}}$ .

Com estes valores se está em condições de utilizar a equação que descreve a distribuição de velocidades e que nos permite levantar o perfil de velocidades axial nesta seção. A equação tem a forma:

$$u = \frac{U_{max}}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \frac{y}{h_{st} - h_{mv}} \exp \left( 1 - \frac{y}{h_{st} - h_{mv}} \right) \right] \quad (4.18)$$

A velocidade média é determinada por:

$$U = \left[ \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \right] U_{max} \quad (4.19)$$

A partir de (4.19) a vazão é determinada multiplicando  $U$  pela área da seção de teste,  $A_{st}$ .

Por nunca antes ter sido estudado em soluções poliméricas, constitui-se em um tema relevante deste trabalho a caracterização do parâmetro  $M$  para este tipo de escoamento.

#### **4.8 Breve Caracterização Reológica das Soluções Poliméricas**

Devido à complexidade do tema, não é prática comum nos trabalhos sobre redução de atrito a realização de estudos mais abrangentes utilizando simultaneamente as duas abordagens definidas no capítulo 2. Este trabalho não foge desse princípio, embora tenha sido realizada uma análise reológica simplificada das soluções poliméricas utilizadas de modo a se obter maiores informações sobre o mecanismo estudado.

A essência da análise foi abordar a influência e importância das propriedades visco-elásticas das soluções poliméricas na redução de atrito, aspecto este muito controverso na literatura.

Para isto foi utilizado um reômetro “ DV III Rheometer V 3.1 External Control”, fabricado pela *Brookfield Engineering Laboratories*, existente no laboratório de Engenharia de Alimentos, do Departamento de Engenharia Química/EPUSP.

A configuração deste reômetro é de tipo cilindro concêntrico, sendo o cilindro exterior fixo e o interior (*spindle*) aquele que roda. Dependendo da faixa de viscosidade das soluções, escolhe-se o spindle correspondente. Como a viscosidade das soluções utilizadas é próxima da água, ou seja baixas, selecionou-se o “spindle” tipo *ULA*, que é aquele de maior diâmetro, dentre esta configuração.

O princípio de funcionamento deste reômetro é o seguinte:

O cilindro interno, rotor, é acionado por um motor cuja velocidade é controlada através de um programa controlador de velocidade, o cilindro externo é fixo. Quando o motor é acionado, o *spindle* roda à velocidade fixada, fazendo com que o líquido na fenda anular escoe. Isto cria uma distribuição de velocidades, devido à propriedade dos escoamentos de resistir ao fenômeno de cisalhamento entre as camadas, com valores máximos junto ao rotor e 0 junto ao cilindro externo.

A distribuição de velocidades é uma função das propriedades do fluido e da relação entre o torque aplicado e a área de escoamento, ou seja, da tensão de cisalhamento. Conforme conhecido a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidades, sendo a constante de proporcionalidade a viscosidade dinâmica do fluido,  $\mu$ . A temperatura é medida através de um sensor colocado na fenda anular



A partir da geometria dos cilindros (raio interno,  $r_i$ , raio externo,  $r_e$ , altura do cilindro externo,  $h_e$ ) da velocidade angular do motor,  $\Omega$  e do torque aplicado ao motor,  $M_t$  podem ser determinadas as características básicas destes ensaios: tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade dinâmica.

#### 4.8.1 Procedimento experimental dos ensaios reológicos

Para o processamento dos dados foi utilizado o programa *Rheocalc VI.1* fornecido pelo fabricante do instrumento. Para as condições deste trabalho, o programa foi configurado com os seguintes parâmetros:

- Faixa de velocidade do motor: 330÷350 rpm;
- Incremento de velocidade de rotação: 1 rpm;
- Tempo de aquisição da dados: 30 seg.

A faixa de velocidade do motor é muito ampla, de 0 até 350 rpm. A escolha da faixa de trabalho deve-se a que, para atingir a precisão do reômetro, a porcentagem do torque que recebe o spindle deve estar entre 10-90%. Estes valores só puderam ser obter para velocidades maiores que 330 rpm. A partir daqui fixou-se um incremento pequeno para obter uma quantidade razoável de pontos experimentais. O tempo de aquisição foi o sugerido no manual do instrumento.

A amostra solução a ser analisada, é colocada no cilindro externo introduzindo-se o *spindle*. Nestas condições, começa-se a aquisição da dados, conforme configuração acima. Para cada concentração e tipo de polímero, foram realizados três ensaios, sendo que, para cada um destes, a amostra foi trocada e lavado o cilindro e o *spindle*.

Do processamento dos resultados se obtém, para cada rpm do motor: a viscosidade dinâmica,  $\mu$  (mPa-s), a taxa de deformação,  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ ), a temperatura,  $T$  ( $^{\circ}C$ ).

Os resultados obtidos permitiram a análise pretendida sobre as características reológicas das soluções estudadas.

#### ***4.8.2 Preparo das soluções poliméricas para ensaios reológicos***

Para a realização dos ensaios reológicos, as amostras foram preparadas como soluções à concentração requerida (5,10,15 e 20 ppm). O procedimento foi similar ao preparo da solução mãe. Em dois litros de água, foi adicionado o polímero, na quantidade correspondente. A dissolução foi feita com ajuda do agitador mecânico. Foram observados os cuidados necessários, conforme descrito em 3.1.2.

Pelas suas próprias características moleculares, o tempo de preparo para soluções de *Iqapol* foi de 1 hora e 0.5 horas para as soluções de *Iqapac*. Em todos os casos o preparo ocorreu 24 horas antes da realização dos ensaios reológicos.

#### ***4.9 Considerações Finais***

O desenvolvimento dos itens expostos neste capítulo, geraram uma vasta quantidade de informação, que possibilitou avaliar aspectos importantes das modificações na estrutura da turbulência, decorrentes da adição de polímeros e conseqüentemente do mecanismo da redução de atrito.

## CAPÍTULO 5

---

### *ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS*

#### *5.1 Considerações Gerais*

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos é importante destacar, de forma resumida, alguns aspectos que em certa medida ajudam à leitura do trabalho.

A faixa do número de Reynolds estudada abarca desde  $8 \cdot 10^3$  até  $10^5$  aproximadamente, correspondendo estes ao mínimo e máximo valores possíveis da instalação experimental. Isto dará condições para analisar os aspectos correspondentes ao fenômeno de início da redução de atrito, característico desta faixa de número de Reynolds e elemento importante na formulação do mecanismo estudado. Neste sentido, e para maior facilidade de leitura e redação, os valores do número de Reynolds declarados na tabela (3.6) serão representados da seguinte forma:

- $Re \approx 8 - 8,5 \cdot 10^3$  como  $Re_0$
- $Re \approx 1,33 - 1,5 \cdot 10^4$  como  $Re_1$
- $Re \approx 4,6 - 5,1 \cdot 10^4$  como  $Re_2$
- $Re \approx 8 \cdot 10^4 - 10^5$  como  $Re_3$

Durante os cálculos as propriedades físicas das soluções poliméricas são consideradas com valores idênticos ao da água, para as condições do escoamento (temperatura), tendo em vista que as soluções são diluídas e de baixas concentrações, conforme já mencionado.

Talvez a maior limitação à realização deste trabalho se constitui no fato de que as medições correspondentes à componente normal,  $v$  não deram os resultados esperados.

Inicialmente, e durante a validação do modelo experimental, as medições desta componente foram coerentes com a teoria. Porém quando das medições com soluções poliméricas os resultados mostraram-se contraditórios. Tendo em vista as limitações experimentais e de equipamento deste trabalho, decidiu-se não se considerar na análise dos resultados a componente normal da velocidade  $v'$ .

Finalmente se destaca que, quando necessário, se assumirão tendências e/ou definições de reconhecida validade na literatura para argüir critérios que justifiquem determinadas conclusões.

Embora com as limitações acima mencionadas foi possível obter informações suficientes para cumprir os objetivos deste trabalho. Toda esta informação será apresentada e discutida, a seguir, a partir das definições dadas no capítulo anterior.

## **5.2 Campo do Escoamento Turbulento**

### **5.2.1 Lei de Parede**

Durante o estudo de escoamentos a forma mais comum de apresentar o perfil de velocidade é através do perfil adimensionalizado de velocidades,  $U^+$  versus  $Y^+$ .

Conforme conhecido, um gráfico deste tipo, apresenta três regiões bem definidas.

- A sub-camada viscosa, S.C.V ( $Y^+ < 5$ ) onde  $U^+ = Y^+$ ;
- A região intermediária ( $5 < Y^+ < 30$ ). Resultados recentes indicam que esse região pode ser representada pela função de van-Driest;
- A região logarítmica ( $30 < Y^+ < 100$ , aproximadamente) que obedece a relação:

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(Y^+) + B \quad (5.1)$$

onde  $k$  é a constante de Kármán e  $B$  é a constante de integração.

Na região da superfície livre ( $y/h > 0.6$ ) para números de Reynolds altos, os valores de  $U^+$  não seguem a lei logarítmica, sendo que este desvio não pode ser desprezado. A solução para esta região é modificar a equação (5.1) incluindo nela uma função de esteira (*wake function*).

Inicialmente será feita a análise correspondente à validação do modelo experimental utilizado neste trabalho. A figura (5.1) mostra os resultados obtidos para água a partir dos diferentes valores de  $Re$  estudados, comparando-se estes resultados com o perfil teórico, com valores de  $k = 0.41$  e  $B = 5.5$ .

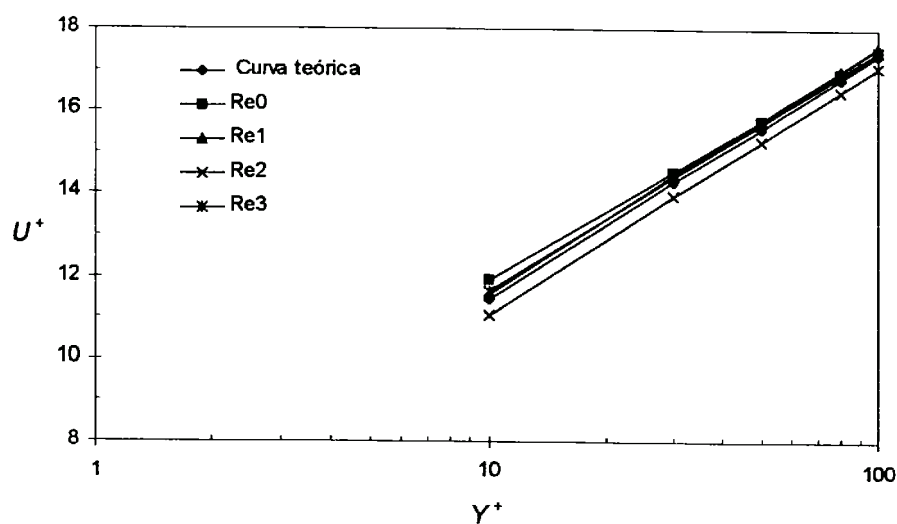


Fig. (5.1) Perfil de velocidades adimensionalizado para água a diferentes valores de  $Re$ .

A literatura registra que estas constantes apresentam diferentes faixas de valores. Por exemplo, Nezu & Nakagawa (1995) resumiram os resultados obtidos em vários estudos experimentais, sendo que o valor de  $k$  mantém-se fixo em 0.41 e  $B$  varia numa faixa entre 5-5.29. Propõem que  $k=0.41$  e  $B=5.29$ , independentemente dos números de Reynolds e Froude, podem ser escolhidos para representar o perfil de velocidade na região logarítmica. Por outro lado, Tam *et al* (1992) oferecem faixas mais amplas para o

termo  $B$  que pode, segundo estes autores, variar entre 3.8 e 10. Experimentalmente obtiveram que  $B=6.5$ .

Observa-se, dos resultados acima referenciados, que os valores para a constante de Kármán,  $k$  divergem menos que os de  $B$ . De forma geral, em trabalhos de tipo experimental, os valores de  $k$  e  $B$  são selecionados pelos autores, em correspondência aos resultados experimentais obtidos.

Neste trabalho, os valores de  $k$  para água variaram entre 0.382 e 0.414, o que representa diferenças entre 0.01% e 7% com respeito à constante de Kármán teórica. O valor de  $B$  variou em geral entre 5.54 e 6.53 para os maiores valores de  $Re$  e igual a 7.33 para  $Re_0$ .

Com isto, pode ser considerado válido o modelo experimental, escolhendo-se para os cálculos, os resultados obtidos experimentalmente para cada valor de  $Re$  (vide Tabelas (5.1 e 5.2)).

Para o caso de soluções poliméricas o comportamento dos perfis adimensionalizados e conseqüentemente das constantes que definem a lei logarítmica variam consideravelmente. Devido a isto os perfis para soluções poliméricas podem ser representados da seguinte forma:

$$U^+ = A \ln Y^+ + B + \Delta B \quad (5.2)$$

Nesta equação introduz-se o coeficiente  $A$ , em substituição a constante de Kármán, de caráter universal para escoamentos Newtonianos, como costumeiramente é conceituada na literatura e o termo  $\Delta B$  que representa o deslocamento do perfil de velocidade adimensionalizado devido à presença de polímeros. Portanto os valores de  $\Delta B$  podem ser considerados como típicos de escoamentos redutores de atrito, com valores característicos para cada sistema soluto-solvente.

Para o menor valor de Reynolds testado,  $Re_0$  os perfis não apresentam variações significativas para concentrações de 5 e 10 ppm nos dois polímeros. Para  $C_w=20$  ppm existem ligeiras modificações nos perfis de ambos os polímeros, sendo estas maiores para o *Iqapol*. Da teoria do início da redução de atrito, sabe-se que este fenômeno começa a se manifestar para valores de Reynolds,  $Re \approx 10^4$ . Neste caso, como  $Re_0 < 10^4$ , embora muito próximo, é de se esperar que não ocorra redução de atrito (como acontece para os menores valores de  $C_w$ ) ou se ocorrer os valores de redução devem ser pequenos (como sucede para os maiores valores de concentração).

Com o incremento de  $Re$ , a redução de atrito começa a se manifestar para todos os valores de concentração, sendo que as modificações do perfil de velocidade acompanham o efeito de redução de atrito.

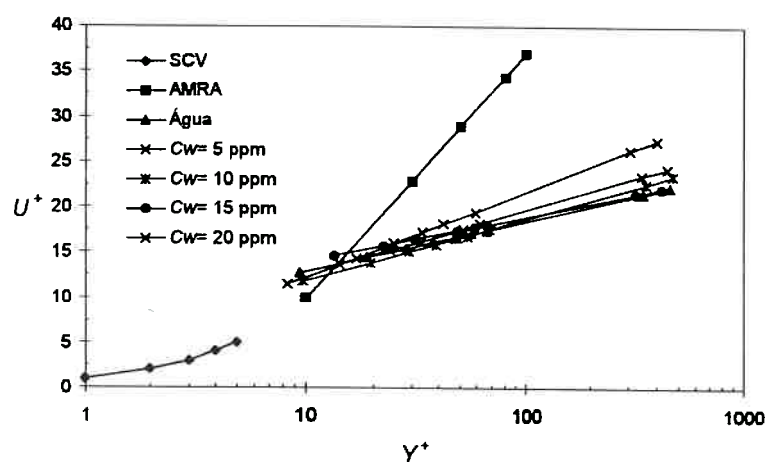
As figuras (5.2) e (5.3) mostram, a modo de exemplo, o comportamento dos perfis de velocidade para os polímeros em estudo e diferentes números de Reynolds.

Como é comum tem-se incluído nestes gráficos, para uma melhor visualização, as curvas que representam a Sub-camada Viscosa (S.C.V) e a Assíntota de Máxima Redução de Atrito (A.M.R.A).

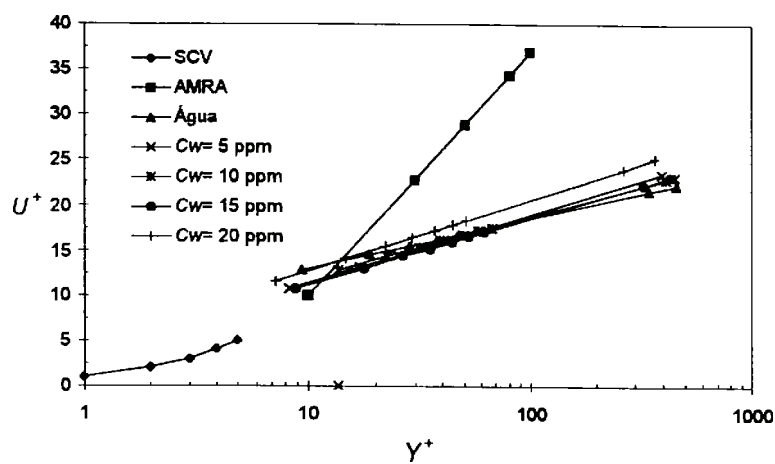
A partir das figuras (5.2) e (5.3) e das Tabelas (5.1) e (5.2) podemos analisar as características básicas das modificações que ocorrem nos perfis adimensionalizados para cada polímero, que conforme visto, apresentam diferenças bem definidas.

No caso do *Iqapol* podemos observar que o coeficiente  $A$  na equação (5.2) tende a aumentar com o incremento da concentração e do número de Reynolds, chegando a valores de 6.02 para  $C_w=20$  ppm e  $Re_3$ . Quando comparado com o valor da constante de Kármán para escoamentos Newtonianos,  $k$  verifica-se variações de até 60%. A manifestação deste comportamento é interpretada como a perda do paralelismo entre os

perfis com o incremento da concentração. Da mesma forma o termo  $B+\Delta B$ , que representa o intercepto da curva, sofre modificações. A tendência neste caso é a diminuição. Portanto para soluções poliméricas com estas características a parcela  $\Delta B$  é de sinal negativo.



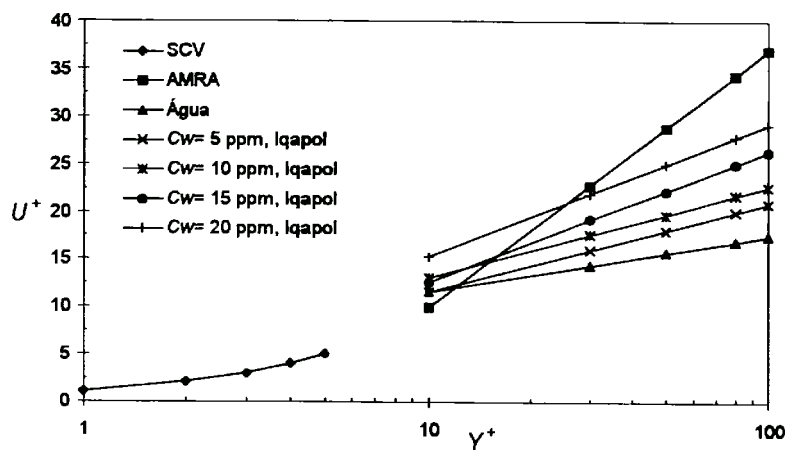
(a)



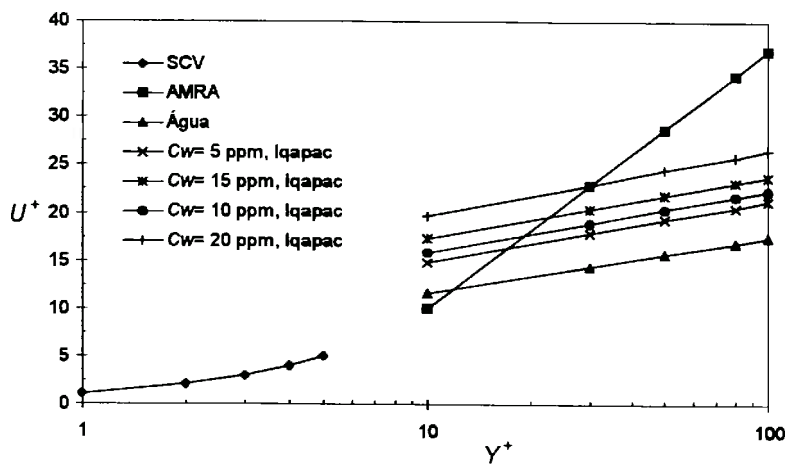
(b)

Figura (5.2) Perfis adimensionalizado de velocidade para  $Re_0$ : (a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*.

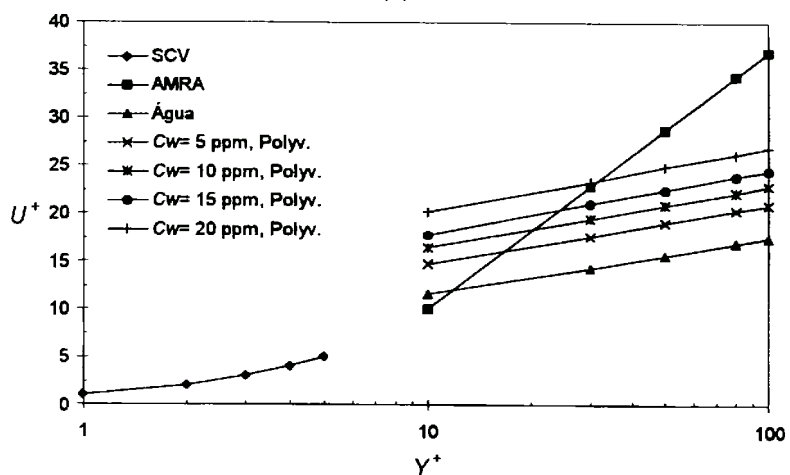




(a)



(b)



(c)

Figura (5.3) Perfis adimensionalizados de velocidade para  $Re_3$ :

(a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*; (c) Polyvilacetato.

Tabela 5.1 Valor do coeficiente  $A$  para água e soluções poliméricas

Polímero →	Iqapol					Iqapac					Polyvinilacetato				
	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm
Concentração → $Re$ ↓															
$Re_0$	2.413	3.05	2.98	2.14	3.5	2.413	3.26	2.89	3.13	3.42	-	-	-	-	-
$Re_1$	2.613	3.17	4.01	5.10	5.18	2.613	2.78	2.72	3.54	3.47	-	-	-	-	-
$Re_2$	2.41	3.99	4.08	5.68	5.69	2.41	2.71	2.38	2.48	2.66	-	-	-	-	-
$Re_3$	2.531	4.05	4.19	5.92	6.02	2.531	2.75	2.81	2.82	3.01	2.531	2.65	2.79	2.92	2.91

Tabela 5.2 Valor do coeficiente  $B + \Delta B$  para água e soluções poliméricas

Polímero →	Iqapol					Iqapac					Polyvinilacetato				
	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm
Concentração → $Re$ ↓															
$Re_0$	7.33	5.51	4.93	9.03	2.97	7.33	3.8	5.26	3.99	4.77	-	-	-	-	-
$Re_1$	5.54	5.47	3.94	1.28	5.01	5.54	6.06	8.07	4.70	10.63	-	-	-	-	-
$Re_2$	6.53	2.42	3.59	0.35	3.7	6.53	7.25	8.4	10.07	11.74	-	-	-	-	-
$Re_3$	5.72	2.12	3.31	-1.02	1.35	5.72	8.52	10.82	9.23	12.64	5.72	8.63	9.94	11.01	13.45

A tendência do *Iqapol* a ter este comportamento, já foi obtida por Vilalta & Ortiz (1997a) só que em condições experimentais diferentes: tubulação circular e  $Re > 10^5$ .

Quando se analisam os resultados para o *Iqapac* observa-se comportamentos qualitativa e quantitativamente diferentes em relação ao *Iqapol*. Em geral, o *Iqapac* provoca modificações mais modestas nos perfis. Característica importante para este polímero é que as curvas tendem a serem paralelas. Devido a isto as variações do coeficiente  $A$  não são tão significativas quanto para o *Iqapol*. Desta forma podemos observar, na Tabela (5.2), que os valores do termo  $B + \Delta B$  aumentam consideravelmente e que na faixa em estudo a parcela  $\Delta B$  é de sinal positivo.

Quando comparados os gráficos (5.3b) e (5.3c) se observa que ambos os gráficos apresentam tendências semelhantes. Isto deve-se a que os dois polímeros têm, em comum, baixo peso molecular.

As diferenças encontradas no comportamento destes polímeros são, em geral, típicas de aditivos com diferentes pesos e estão associadas à capacidade dos mesmos de reduzir o atrito em diferente magnitude. Verifica-se via de regra que, como o *Iqapol* consegue maiores diminuições do arrasto deve atingir a AMRA mais rapidamente que o *Iqapac* e o *Polyvinilacetato*. Embora não testadas, devemos supor que se aumentarmos mais a concentração, o *Iqapac* e o *Polyvinilacetato* comecem a ter o mesmo comportamento até atingir o valor máximo de redução de atrito.

Em todos os casos as modificações nos perfis do *Iqapol* são mais significativas que para o *Iqapac* e a *Polyvinilacetato*.

Algumas teorias estão baseadas na forma destes gráficos para explicar a redução de atrito. A literatura registra, fundamentalmente, dois modelos: o modelo de duas camadas e o modelo de três camadas.

O primeiro, proposto inicialmente por Meyer (1966) e posteriormente modificado por Elata *et al* (1966) [apud Poreh & Hassid (1977)], considera a existência de duas camadas no escoamento: A S.C.V,  $Y^+ < 5$ , e a camada logarítmica. Este modelo prevê que a adição de polímeros provoca incrementos na espessura da S.C.V. podendo chegar esta até  $Y^+ \div 10-12$ , dependendo do sistema polímero-solvente.

O segundo, foi proposto por Virk (1971). Neste modelo, diferentemente do anterior, Virk assume que a espessura da S.C.V permanece constante e que o efeito do polímero pode ser observado pela formação de uma região entre a S.C.V. e o núcleo turbulento, que chamou de Sub-camada Elástica (S.C.E.), atribuindo-a ao comportamento elástico das soluções poliméricas nesta região.

Para analisar este modelo se apresenta a figura (5.4), onde estão representadas as curvas do  $I_{qapol}$  e do  $I_{qapac}$  para a concentração  $C_w = 20$  ppm e para o número de Reynolds  $Re_2$ .

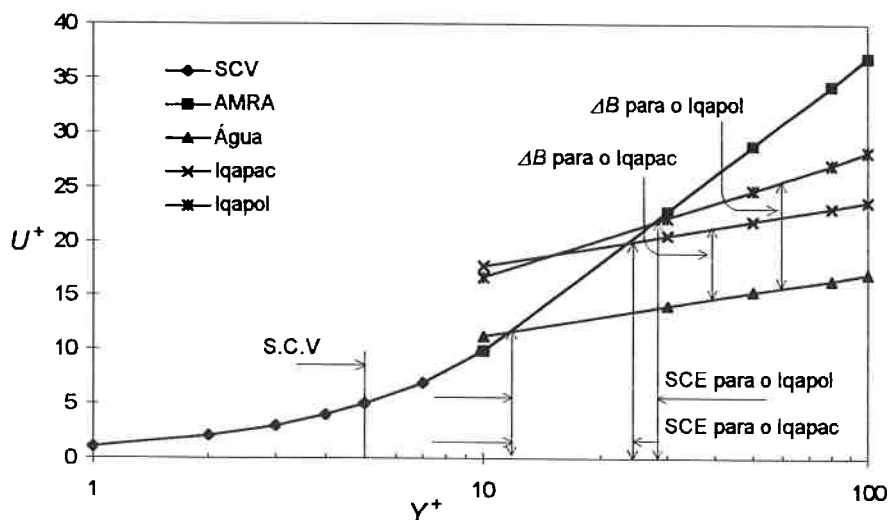


Figura (5.4) Representação do modelo de três camadas de Virk (1971)

Nesta figura se observa o seguinte comportamento para cada fluido. No caso do solvente o perfil está dividido em três regiões: A S.C.V, uma região que começa em

$Y^+ \approx 10$  e que se corresponde com a interseção da curva logarítmica com a curva da A.M.R.A e uma região intermediária entre estas duas.

Para as soluções poliméricas, independentemente do tipo de polímero, estas regiões são modificadas. Observa-se que a interseção entre as curvas dos polímeros e a A.M.R.A ocorre para valores maiores do número de Reynolds de atrito  $Y^+$ . Como este método assume que a espessura da S.C.V não muda vai ocorrer um incremento na espessura da região intermediária com respeito à do solvente. Esta nova região que se cria pelo efeito do polímero é chamada de Sub-Camada Elástica (S.C.E)

Daqui é possível de se observar que a existência da S.C.E é típica de escoamentos redutores de atrito, em geral, e de cada sistema polimérico em particular. A espessura aumenta com o incremento da concentração e na condição de máxima redução pode chegar a ocupar toda a seção transversal do escoamento. Para o caso mostrado nesta figura, o incremento na área que representa esta sub-camada é da ordem de 28%, e  $Y^+$  passa aproximadamente de 25 para 30. Este modelo, embora simples, oferece a possibilidade de estimar de forma rápida as características redutoras de atrito de qualquer sistema polimérico.

Porém, algumas limitações deste método devem ser mencionadas. Inicialmente, destaca-se o fato que ainda existem dúvidas sobre a real importância das características elásticas das soluções poliméricas, portanto resulta um tanto arriscado definir o método como sendo devido à elasticidade. Desde o ponto de vista fenomenológico, a redução de atrito ocorre como resultado de modificações na estrutura da turbulência e uma adequada explicação deve de estar baseada na correta interpretação destas. A lei de parede não oferece informações sobre a estrutura física desta sub-camada, nem de como esta pode ser alterada pela presença de polímeros.

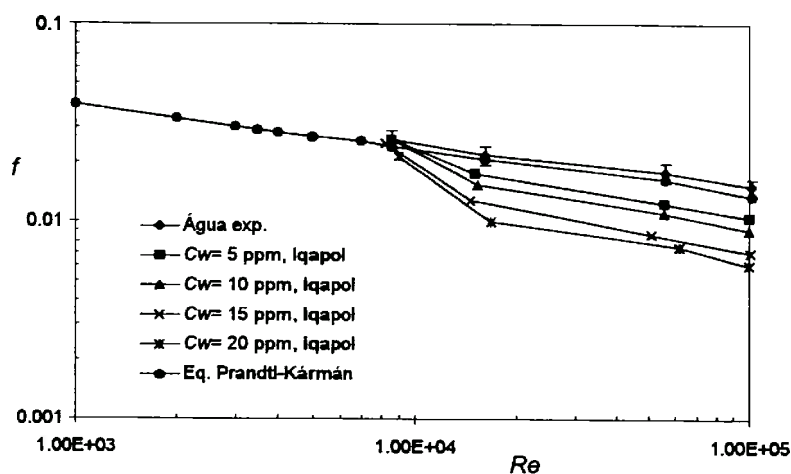
### 5.2.2 Relação $f$ versus $Re$

Do ponto de vista macroscópico o principal efeito dos polímeros sobre o escoamento turbulento está relacionado com a diminuição do gradiente de energia entre duas seções, o que se reflete na diminuição do coeficiente de perda de carga  $f$ . Portanto em um estudo desta natureza é importante poder avaliar (quantitativa e qualitativamente) o comportamento deste coeficiente assim como sua dependência com o tipo de polímero e a concentração.

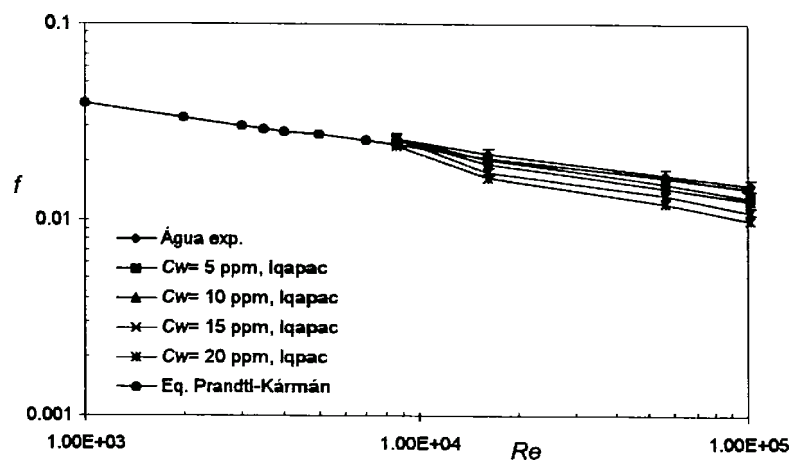
A figura (5.5) apresenta a relação  $f$  versus  $Re$  para o *Iqapol* (a) e para o *Iqapac* (b). Analisando globalmente os gráficos, se observa que as curvas correspondentes ao solvente acompanham a equação de Prandtl-Kármán para canais lisos, com diferenças menores que 5% na faixa de Reynolds coberta neste trabalho. Para soluções poliméricas ocorre um gradual afastamento da curva da água o qual depende do tipo de polímero e da concentração.

Na figura (5.5) é possível analisar o comportamento das soluções poliméricas, observando-se as diferentes regiões características que estão associadas ao *efeito Toms*. Para  $Re < 9 \cdot 10^4$ , independentemente dos parâmetros poliméricos, não existe redução de atrito. Esta região cobre o regime laminar, o regime de transição do escoamento laminar para o escoamento turbulento e uma parte do regime turbulento, conhecido como regime turbulento sem redução de atrito. Em todos os casos, tanto o solvente quanto as soluções poliméricas, apresentam o mesmo comportamento.

A partir de  $Re \approx 9 \cdot 10^4$ , se inicia a redução de atrito. As curvas das soluções poliméricas começam a se afastar da curva do solvente entrando na região polimérica.



(a)



(b)

Figura (5.5) Diagrama da relação  $f$  versus  $Re$ : (a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*

Aqui o comportamento das soluções poliméricas depende de diferentes parâmetros como são: tipo de polímero, concentração, peso molecular e número de Reynolds. Na figura de referência, se observam claramente estas dependências. Os polímeros de alto peso molecular provocam maiores reduções no coeficiente  $f$  quando comparados com polímeros de baixo peso molecular. Com o incremento da concentração, para um mesmo polímero, a diminuição de  $f$  é mais acentuada. Ou seja,

para os aditivos estudados, cujas características foram apresentadas na tabela (3.5), o *Iqapol* provoca maiores reduções de arrasto que o *Iqapac*.

Embora não atingida pelas faixas de concentrações selecionadas para este trabalho, existe uma outra região, a Assíntota de Máxima Redução de Atrito (A.M.R.A), que representa o valor limite da redução de atrito. Incrementos no valor da concentração das soluções poliméricas não conseguem mais diminuir  $f$ .

Uma das formas mais nítidas para avaliar o efeito dos polímeros sobre o coeficiente  $f$ , é através do coeficiente de Eficiência de Redução de Atrito,  $\varphi$  definido pela relação (4.6), que relaciona  $f$  para ambos os escoamentos para as mesmas condições ( $Re$ ). A figura (5.6) mostra a relação  $\varphi$  versus  $C_w$  para os diferentes valores de Reynolds. Pode-se observar que, em todos os casos os valores de  $\varphi$  para o *Iqapol* são maiores que para o *Iqapac*. A redução de arrasto começa para  $Re_0$  e  $C_w=20$  ppm, com valores de  $\varphi \approx 8\%$  para o *Iqapac*, sendo que nestas condições, pode chegar a quase 17% para o *Iqapol*. Estes valores são considerados pequenos quando comparados com outros polímeros, como por exemplo, o PEO 301 (Scrivener *et al* (1977)) que consegue valores de  $\varphi$  da ordem de 40% com baixos valores de concentração (1-2 ppm).

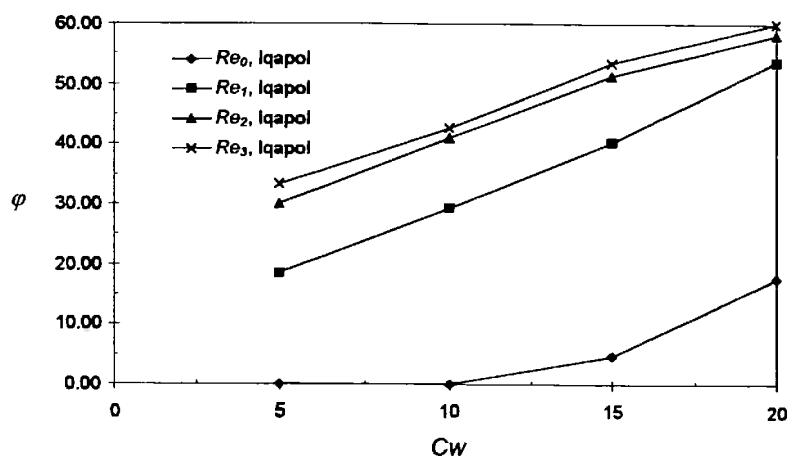
Significativos valores de  $\varphi$  começam ser obtidos para valores de  $Re$  maiores, podendo-se chegar a mais do que 50% na redução de  $f$ .

Destaca-se um aspecto significativo. Comparando as figuras (5.2), (5.3) e (5.6) podemos observar o seguinte. A perda do paralelismo entre as curvas do *Iqapol* é um índice de que, possivelmente, a concentrações relativamente baixas ( $C_w < 100$  ppm) pode-se atingir a A.M.R.A. Isto significa que incrementos posteriores de  $C_w$  não provocam mais efeito sobre o gradiente de energia, o que pode ser corroborado na figura (5.6a).

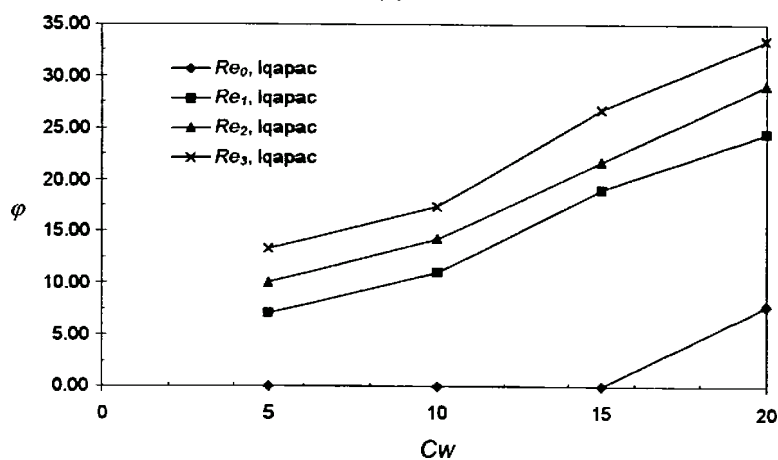


Aqui se observa que as curvas de  $\varphi$  para o *Iqapol* apresentam incrementos menores e tendem a coincidir com o incremento de  $C_w$ .

Para o *Iqapac* este comportamento é diferente. O paralelismo nas curvas dos perfis de velocidades se correspondem com as tendências de  $\varphi$  mostradas no gráfico da figura (5.6b). Na faixa em estudo, se observa que  $\varphi$  aumenta de forma tal, que mantém uma diferença aproximadamente igual entre os diferentes valores de Reynolds. Devido a isto, a A.M.R.A para este polímero deverá ser atingida com incrementos maiores de concentração.



(a)



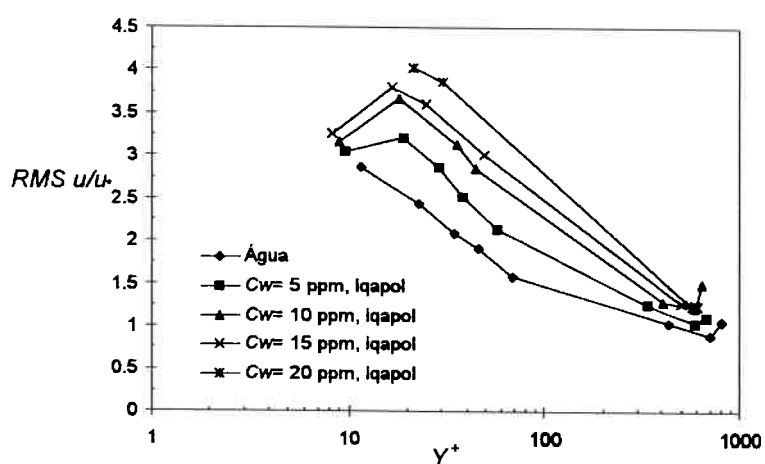
(b)

Figura (5.6) Coeficiente da Redução de Atrito,  $\varphi$ : (a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*

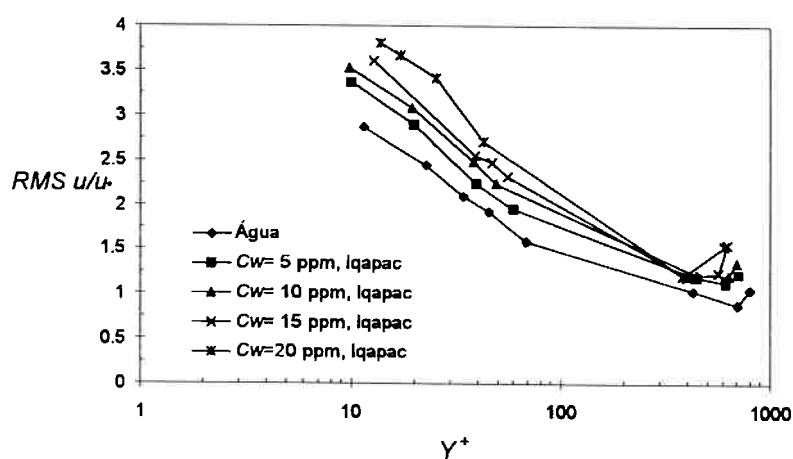
### 5.2.3 Intensidade Turbulenta

Em sentido geral os resultados obtidos para os perfis de intensidade turbulenta axial,  $RMS u'/u_*$ , são coincidentes com os da literatura, mostrando que a adição de polímeros incrementa a intensidade turbulenta axial, independente do tipo de polímero, da concentração e do número de Reynolds, .

As figuras. (5.7) e (5.8) mostram os perfis de intensidade turbulenta axial para os valores de Reynolds  $Re_1$  e  $Re_2$  respectivamente.



(a)



(b)

Figura (5.7) Perfis de intensidade turbulenta axial para  $Re_1$ : (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*

Analisando os resultados experimentais para  $Re_0$ , se observa que, quando comparados, os perfis das soluções poliméricas apresentam mínimas diferenças com respeito ao da água. Não existem significativos incrementos, embora em sentido geral pode-se observar que os pontos de máxima intensidade turbulenta tendem a ocorrer para valores de  $Y^+$  um pouco maiores. Somente para concentrações de 15 e 20 ppm do *Iqapol* este valor se incrementa de aproximadamente 4-5%.

Para  $Re_1$  observa-se que a tendência acima descrita para  $Re_0$  se acentua. Os resultados mostram que, para os dois polímeros, a máxima intensidade turbulenta ocorre em pontos mais afastados da parede. Para o *Iqapol* o incremento em  $RMSu'/u_*$  é de aproximadamente 40% para  $C_w = 20$  ppm com deslocamentos dos máximos para  $Y^+ \approx 15$ .

No gráfico (5.7b) estima-se para o *Iqapac*, incrementos de intensidade turbulenta na faixa de 25%, para a máxima concentração testada, a que ocorre em  $Y^+ \approx 15$ , também.

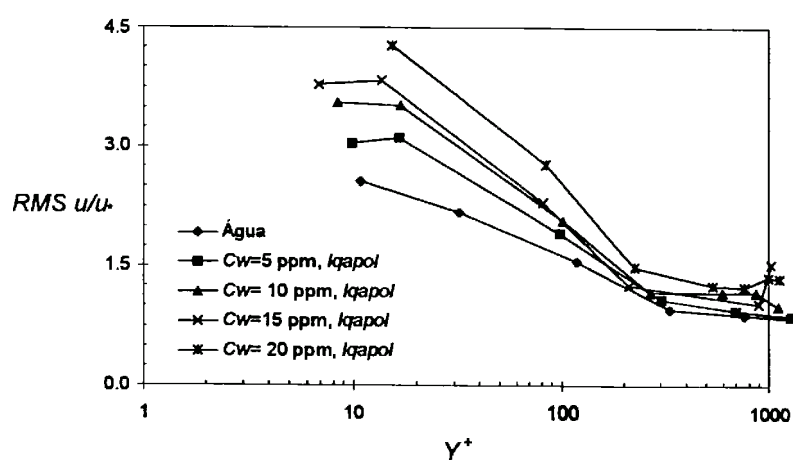
Para  $Re_2$  (figura (5.8)) e  $Re_3$  as tendências são similares chegando-se obter incrementos de 64% na intensidade turbulenta para valores de  $Y^+ \approx 30$ .

Também é possível de se observar que a região onde se produzem os máximos valores de  $RMS u'$  adimensionalizada, é mais larga para escoamentos poliméricos que para o solvente. Se considerarmos que esta região é equivalente à região de produção de energia cinética turbulenta, podemos concluir, de forma primária, que a adição de polímeros provoca modificações neste processo. Ou seja, para escoamentos redutores de atrito o processo de produção ocorre em regiões mais afastadas da parede que para escoamento de água.

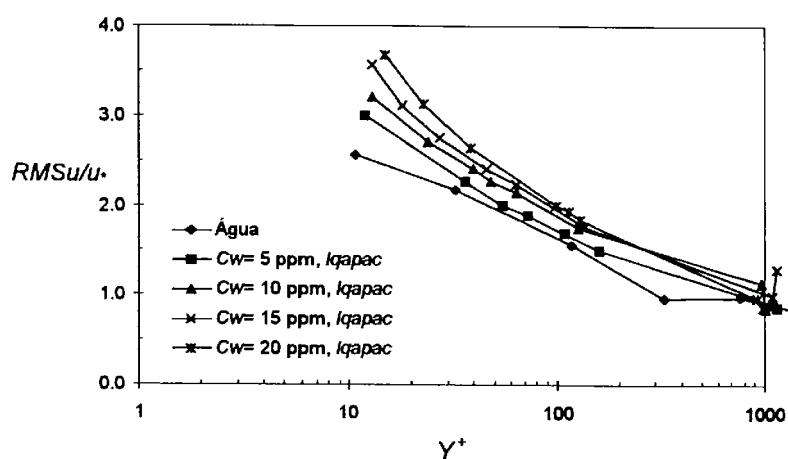
Uma análise mais detalhada da magnitude do incremento da intensidade turbulenta e do lugar de ocorrência é limitada pelo fato que, com o aumento do número de Reynolds, a espessura da S.C.V diminui. Devido a isto e pelas próprias características

do anemômetro utilizado não foi possível obter informações para números de Reynolds de atrito menores, conforme pode ver-se nas figuras acima.

Finalmente, pode-se observar que as modificações no perfil de intensidade turbulenta, devido à adição de polímeros, ocorrem fundamentalmente na região de parede. Ou seja, para  $Y^+ > 300-400$  as curvas tendem a apresentar um comportamento pouco diferenciado.



(a)



(b)

Figura (5.8) Perfis de intensidade turbulenta axial para  $Re_2$ : (a)  $Iqapol$ , (b)  $Iqapac$ .

### 5.2.4 Momentos de Ordem Superior

Se as componentes turbulentas dos escoamentos fossem randomicamente independentes, poderiam ser descritas por uma função de densidade de probabilidades normal, ou seja, com uma distribuição Gaussiana. Mas as componentes turbulentas nem sempre estão correlacionadas em tempo e espaço. Devido a isto, momentos de ordem superior, terceiro e quarto, podem também serem considerados na tentativa de se obter informações sobre a turbulência. No caso de escoamentos redutores de atrito estes parâmetros não tem sido muito estudados. Apresenta-se a seguir, os resultados obtidos neste estudo, lembrando que, tanto o fator de assimetria,  $S$  quanto o de curtose,  $F$  foram obtidos diretamente, do processamento dos sinais pelo software do anemômetro.

#### 5.2.4.1 Coeficiente de Assimetria Axial

Descreve a assimetria nas funções de densidade de probabilidade das flutuações turbulentas.

Os resultados obtidos coincidem com os de Wei & Willmarth (1992) e os de Yong (1990) [apud Gyr & Bewersdorff (1995)] e são apresentados em forma resumida na figura (5.9). Aqui mostram-se os resultados para os dois polímeros,  $C_w = 5$  e 20 ppm e  $Re = Re_0$  e  $Re_2$ .

Observam-se os seguintes aspectos. Inicialmente para  $C_w = 5$  ppm as curvas do solvente e das soluções poliméricas tendem a cruzar a abcissa aproximadamente no mesmo ponto. No caso de  $C_w = 20$  ppm isto ocorre para maiores valores de  $Y^+$ , correspondendo ao *Iqapol* o valor mais afastado da parede.

Neste tipo de gráfico, o intercepto do coeficiente de assimetria com a abcissa se corresponde com a região de máxima geração de energia cinética turbulenta. Isto

corroborar os resultados discutidos anteriormente. A adição de polímeros provoca modificações no processo de produção de turbulência o qual ocorre em posições mais afastadas da parede.

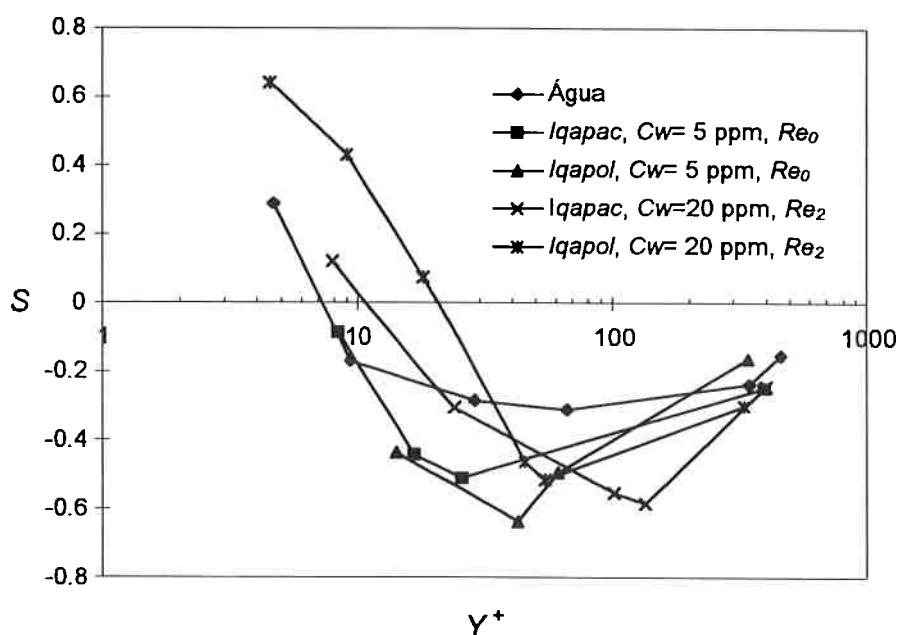


Figura (5.9) Fator de assimetria na direção axial.

Observa-se também que a assimetria,  $S$  nas soluções poliméricas difere da do solvente, na faixa  $20 < Y^+ < 100$ . A partir deste valor, como observado na figura os perfis tendem a coincidir.

#### 5.2.4.2 Coeficiente de Curtose Axial

Os resultados obtidos na análise do coeficiente de Curtose na direção axial,  $F$  são mostrados na figura (5.10). Aqui, de forma similar que na figura (5.9) se mostram os resultados obtidos para o Iqapol e Iqapac,  $C_w=5$  e 20 ppm, e valores de Reynolds  $Re_0$  e  $Re_2$ .

Desta figura pode-se ver que a curtose aumenta com o incremento da concentração e que as modificações ocorrem fundamentalmente para valores de  $Y^+ < 70$ . A partir daqui o coeficiente  $F$  apresenta comportamentos similares, passando o solvente a ter valores ligeiramente superiores, embora tendam a um mesmo patamar.

Da análise destes dois parâmetros podemos concluir que:

- As modificações em  $S$  e  $F$  podem indicar, em essência, mudanças na estrutura da turbulência devido à adição de polímeros, embora estas não estejam muito claras a partir dos resultados obtidos;
- Os resultados parecem indicar que as flutuações da velocidade estão correlacionadas espacial e temporalmente, não existindo, portanto, uma distribuição normal da função de densidade de probabilidades. Este comportamento já foi previsto na teoria de Lumley, conforme discutido no capítulo 2.

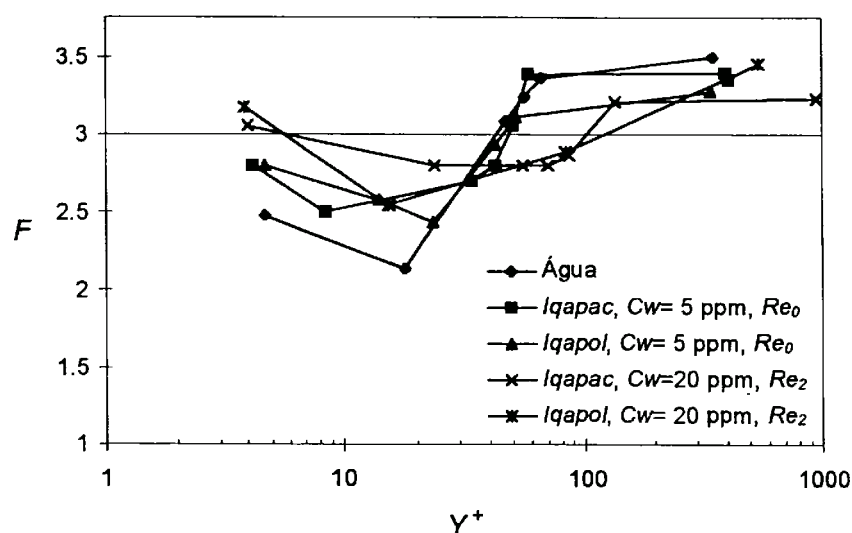


Figura (5.10) Coeficiente de Curtose na direção axial.

### 5.2.5 Perfil das Tensões de Reynolds

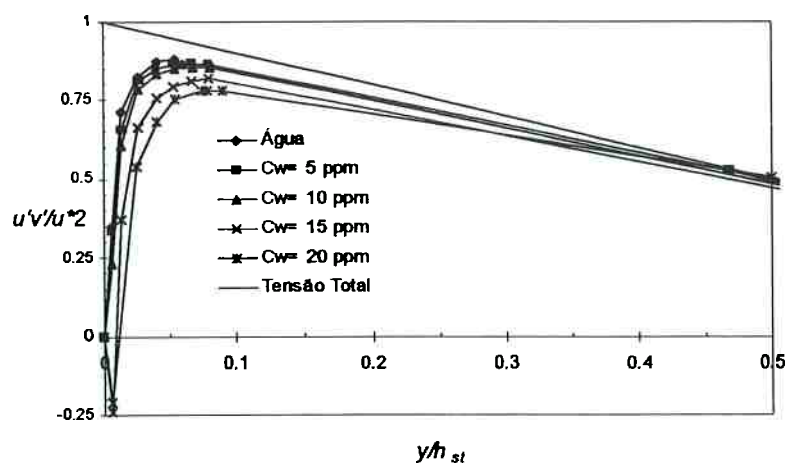
O complexo fenômeno em estudo tem, na análise das tensões de Reynolds, um dos elementos mais interessantes e de menor consenso. Alguns autores tem encontrado o chamado “*Déficit das tensões de Reynolds*”. Isto significa que, quando determinadas através de medições diretas, existe uma diferença no valor das tensões de Reynolds com respeito às determinadas pela equação da quantidade de movimento, sempre que nos cálculos seja utilizada a viscosidade do solvente. Neste sentido, no presente trabalho não foi possível abordar este aspecto pela impossibilidade de medir simultaneamente as componentes flutuantes  $u'$  e  $v'$ . Desta forma as tensões de Reynolds foram determinadas pela equação (2.6).

Da análise dos resultados obtidos, dois aspectos resultam de interesse. Primeiro é o amortecimento das tensões de Reynolds quando da adição de polímeros. A tendência é que, com o incremento da concentração das soluções poliméricas, o amortecimento das tensões de Reynolds é mais significativo o que foi obtido para ambos os polímeros. O segundo é a existência de valores negativos muito próximo da parede.

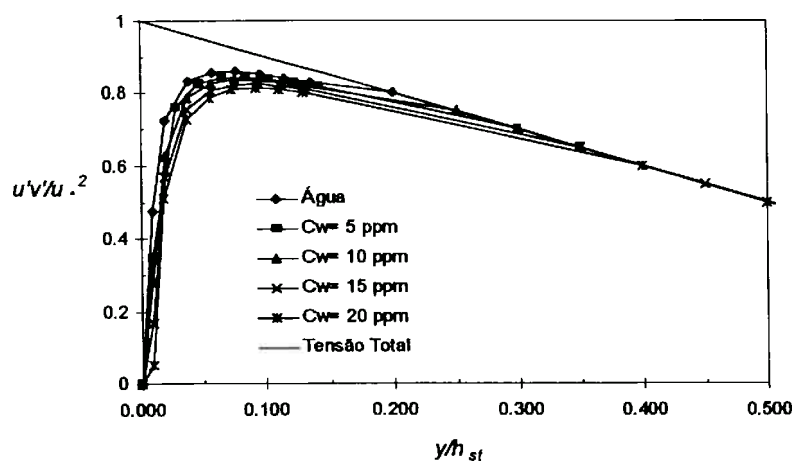
No que diz respeito ao primeiro aspecto, esta tendência foi verificada para todas as faixas que cobrem este trabalho. Da mesma maneira, os máximos valores das tensões de Reynolds tendem a se deslocarem para pontos mais afastados da parede. Este comportamento, a modo de exemplo, pode ser visto na figura (5.11) para o *Iqapol* e  $Re_1$  (a) e para o *Iqapac* e  $Re_0$  (b).

Diferentemente de outras análises, aqui tem se representado diferentes valores do número de Reynolds por simplicidade visual, dos gráficos.





(a)



(b)

Figura (5.11) Perfis das tensões de Reynolds:  $Iqapol$  e  $Re_1$  (a),  $Iqapac$  e  $Re_0$  (b).

Para  $Re_0$  as tensões de Reynolds devido à adição de  $Iqapac$  diminuem em 5% aproximadamente, embora os pontos de máximas tensões de Reynolds não se desloquem significativamente. Para água estes ocorrem a  $y/h_{st} \approx 0.077$  e para soluções poliméricas na faixa de  $0.077 < y/h_{st} < 0.083$ .

Para o  $Iqapol$  o comportamento acima descrito é mais acentuado com valores de, aproximadamente 10% de diminuição e deslocamentos maiores com respeito à parede.

Com o aumento do número de Reynolds o comportamento acima descrito é similar.

Duas conclusões são possíveis de serem obtidas destes resultados. Conforme conhecido, a influência das forças viscosas decresce como o aumento da distância à parede. O amortecimento das tensões de Reynolds indica que o efeito dos polímeros provoca que as tensões viscosas sejam mais significativas, aumentando a influência da viscosidade até posições mais afastadas da parede.

Segundo aspecto é que os processos de transferência de quantidade de movimento no escoamento devido às flutuações da velocidade diminui. Isto se corresponde com a tendência dos perfis de intensidade turbulenta já analisados e que podem ser interpretado como uma perda na correlação entre as componentes flutuantes axial e normal da velocidade.

É importante também enfatizar a existência de valores negativos das tensões de Reynolds. Este resultado tem sido obtido por vários autores (Wei & Willmarth (1992), Durst *et al* (1985)), embora as causas que as provocam, o lugar de ocorrência e a magnitude não são de consenso. Os resultados obtidos aqui, coincidem com os de Wei & Willmarth (1992) em magnitude embora não ocorram na mesma região. As tensões de Reynolds adimensionalizadas com a velocidade de atrito para as soluções poliméricas são da ordem da aproximadamente -0.2 e na faixa de  $Y^+ \approx 4$ . Uma possível resposta a estes resultados, (Dursts *et al* (1985)), é que na S.C.V.  $U^+ = Y^+$ , portanto a equação de balanço da quantidade de movimento (2.6) fica:

$$-\frac{u'v'}{u_*^2} = -\frac{y}{h_{st}} \quad (5.3)$$

Ou seja, nesta região, as tensões de Reynolds serão necessariamente negativas.

### 5.2.6 Produção de Energia Cinética Turbulenta

De forma geral a produção de energia cinética turbulenta é amortecida devido à adição de polímeros, conforme pode ser visto nas figuras (5.12), (5.13) e (5.14).

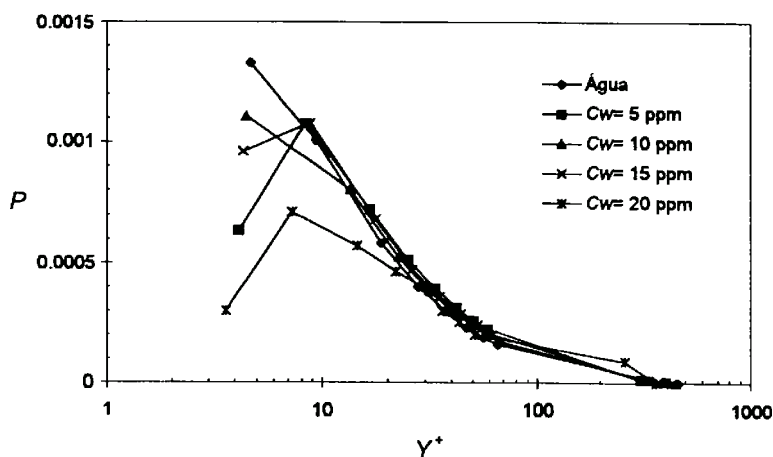
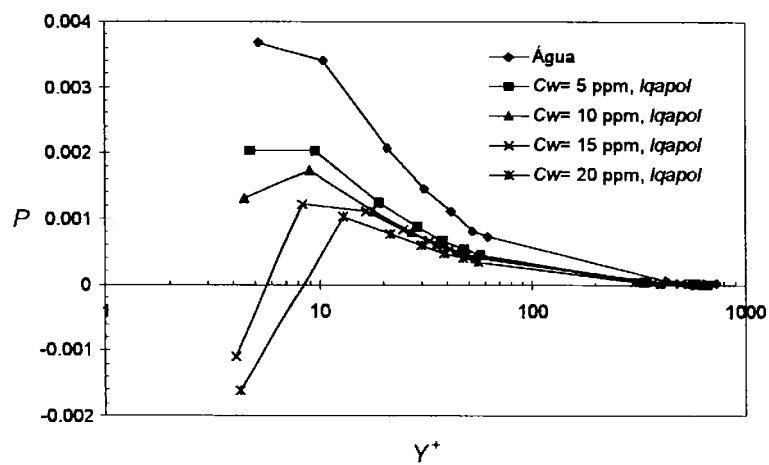


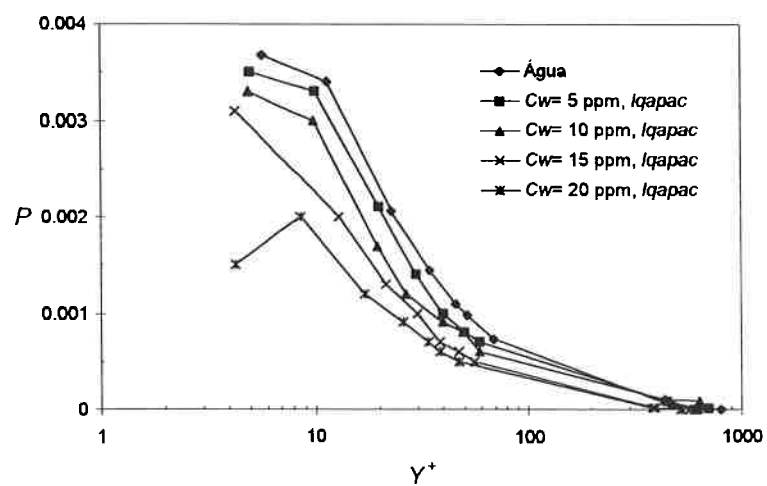
Figura (5.12) Perfil de produção de energia cinética turbulenta, para o *Iqapac*,  $Re_0$

A figura (5.12) mostra os resultados obtidos para  $Re_0$  (*Iqapac*). Pode-se observar que, em essência, não existem modificações significativas nos processo de produção exceto para  $C_w = 20$  ppm, que apresenta ligeiros amortecimentos na faixa de  $Y^+ < 30$ .

Para  $Re_1$  se observam diferenças significativas no comportamento de ambos os polímeros. Na figura (5.13a) mostra-se que o *Iqapol* apresenta efeitos importantes sobre a produção. Com o incremento da concentração das soluções poliméricas esta tendência é mais forte. Por exemplo, para  $C_w = 5$  ppm a diminuição em  $P$  é da ordem de, aproximadamente 50%, valor este que aumenta com o incremento de  $C_w$ . Os pontos correspondentes a  $C_w = 15$  e 20 ppm, apresentam valores negativos muito próximos da parede. Isto, como já foi analisado em 5.2.5, coincide com pontos de tensões de Reynolds negativas. Da mesma forma os pontos da máxima produção se afastam da parede com o incremento da concentração das soluções poliméricas.

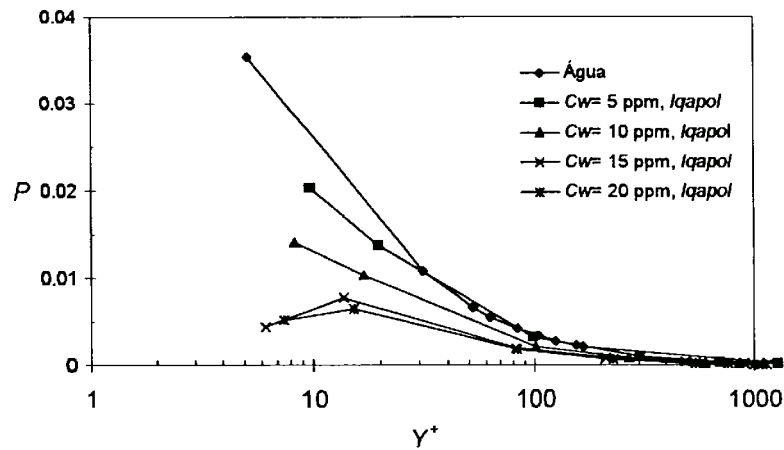


(a)

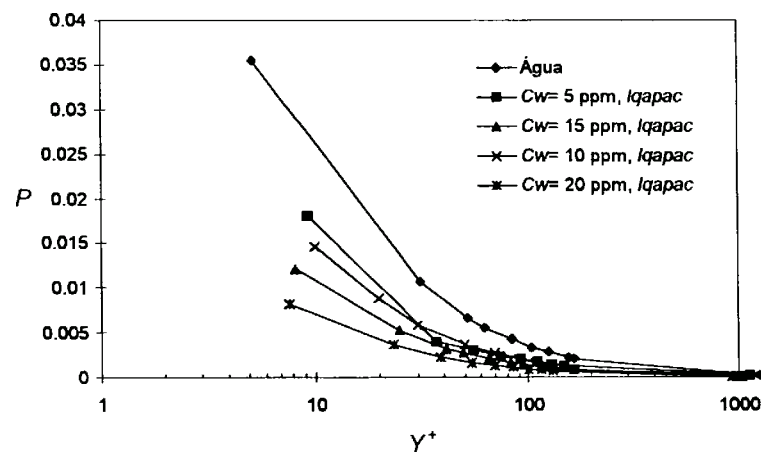


(b)

Figura (5.13) Perfis de produção de energia cinética turbulenta para  $Re_I$ :(a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.



(a)



(b)

Figura (5.14) Perfis de produção de energia cinética turbulenta para  $Re_2$ :(a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.

Para o *Iqapac* a tendência acima descrita é similar qualitativamente, embora o efeito seja menos significativo. Por exemplo, para  $C_w = 5$  ppm o amortecimento de  $P$  é menor que 5%.

Este comportamento ocorre similarmente para  $Re_2$  (figura (5.14)) e  $Re_3$ . Observe-se que com o incremento do número de Reynolds as medições próximas da parede (baixos valores de  $Y^+$ ) tornaram-se menos precisas devido à diminuição da S.C.V.

Embora isto aconteça, é possível de se estabelecer as tendências gerais do comportamento dos processos de produção de energia cinética turbulenta quando da adição de polímeros.

De forma geral vários são os aspectos comuns, independentemente do valor do número de Reynolds, da concentração e do tipo de polímero:

- A produção de energia cinética é amortecida;
- As modificações ocorrem na região onde  $Y^+ < 100$ , sendo que não existem modificações significativas na região externa do escoamento;
- As regiões de máxima produção estão mais afastadas da parede e o valor de máxima produção diminui com o incremento da concentração das soluções.

Da análise feita até agora, poderia-se perguntar. Como as modificações nos perfis das tensões de Reynolds e no processo de produção influem na estrutura da turbulência? Para responder a esta pergunta, vamos nos basear no modelo proposto por Kline *et al* (1967) que já foi analisado no capítulo 2.

Recordemos que a S.C.V é formada por uma estrutura de estrias que é constituída por regiões alternadas de alta e baixa velocidade. Estas estrias interagem com a região externa do escoamento através do processo de erupção que consta de três etapas: afastamento gradual, rápida oscilação e colapso. No caso de escoamentos Newtonianos, a oscilação começa para  $8 < Y^+ < 12$  aproximadamente, a qual se amplifica e termina colapsando para  $10 < Y^+ < 30$ . Posteriormente a este processo a estria é contorcida, esticada e ejetada para a região externa do escoamento. Daqui podemos inferir que a ejeção envolve a rápida saída de fluido de baixa velocidade da região de parede e está acompanhada da entrada de fluido de alta velocidade para ocupar o espaço deixado na região de parede. Este último processo é conhecido como “*sweep*”.

Os processos de ejeção e *sweep* são movimentos capazes de produzir tensões, cuja contribuição pode chegar a ser de  $\approx 70\%$  das tensões de Reynolds totais. Também estão relacionados com o fenômeno de esticamento dos vórtices. Os vórtices são esticados nas regiões onde ocorre o *sweep* e comprimidos nas regiões de ejeção.

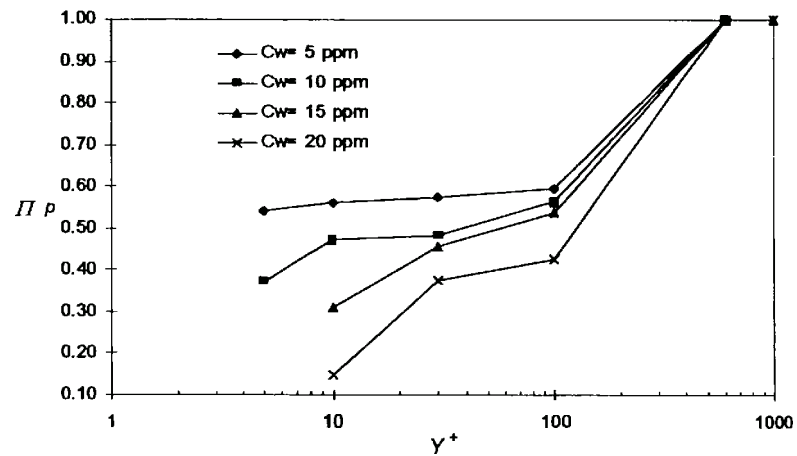
Segundo Klebanoff [apud Kline *et al* (1967)], na região de parede se produz quase 80% da produção total de energia turbulenta. Os resultados aqui obtidos mostram que os pontos de máxima  $P$  estão mais afastados da parede podendo estar na região logarítmica. Isto se constitui em uma primeira modificação importante na estrutura de escoamentos redutores de atrito quando comparados com o solvente, com consequência direta sobre o processo de erupções.

Desta forma os polímeros diminuem a intensidade das erupções e aumentam o tempo entre elas. Devido a isto deve existir um reajuste na seqüência de eventos que, conforme acima descrito, definem as erupções.

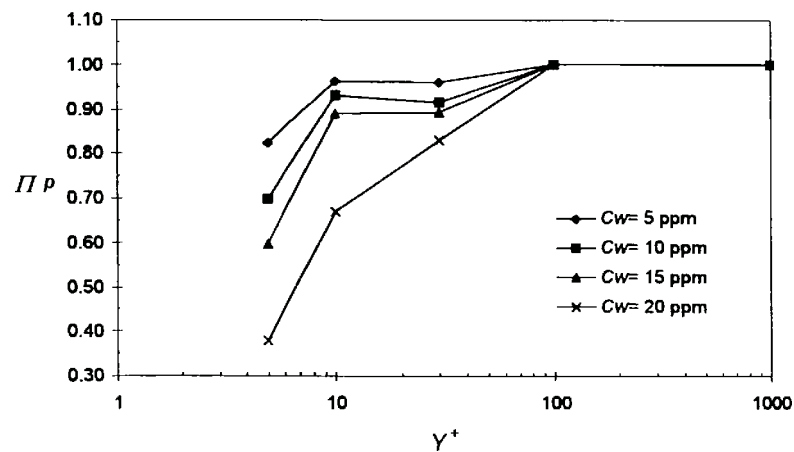
Como as soluções poliméricas apresentam resistência ao esticamento dos vórtices, os processos de ejeções e “*sweep*” são modificados e conseqüentemente as tensões que estes produzem serão menores. Este comportamento justifica também o amortecimento das tensões de Reynolds em escoamentos redutores de atrito.

Analisaremos em seguida, o parâmetro que representa a variação do processo de produção de energia cinética,  $P$  quando comparados ambos os escoamentos.

A figura (5.15) mostra o gráfico  $\Pi_p$  versus  $Y^+$  para o *Iqapol* e  $Re_1$  (5.15a) e para o *Iqapac* e  $Re_0$  (figura 5.15b), em correspondência com os aspectos representados nas figuras (5.12), (5.13) e (5.14). A vantagem deste tipo de gráfico é que permite de forma rápida analisar, em termos de porcentagem, onde o efeito dos polímeros sobre  $P$  é maior e seu lugar de ocorrência.



(a)



(b)

Figura (5.15) Variação da produção de energia cinética turbulenta:

(a) *Iqapol*,  $Re_1$ , (b) *Iqapac*,  $Re_0$ .

Pela sua própria definição  $\Pi_p$  deve ser menos que zero na região onde ocorre redução de atrito, tendendo a 1 na região onde não existe influência dos polímeros.

Na figura (5.15a)  $\Pi_p$  começa a aumentar até que na região externa do escoamento tende à unidade, representando a faixa onde o processo de produção não é afetado pela presença de aditivos. Esta tendência é coerente com o comportamento observado na figura (5.12).



Observe-se que para o *Iqapac*, figura (5.15b),  $\Pi_p$  aumenta sempre para valores de  $Y^+ < 100$ . A partir deste valor  $\Pi_p$  é igual a 1.

Estes resultados indicam nitidamente três aspectos:

- As maiores diferenças em  $\Pi_p$  ocorrem na região da máxima produção de energia cinética turbulenta;
- Para valores de  $Y^+ > 100$  os polímeros analisados não exercem mais influência sobre a produção de energia cinética turbulenta;
- Para o *Iqapac*, o valor de  $\Pi_p$  tende à unidade em posições mais próximas da parede. Isto significa que o *Iqapol* provoca maiores modificações na produção de energia cinética que o *Iqapac*.

## 5.2.7 Análise Espectral e Escala da Turbulência

### 5.2.7.1 Análise Espectral da Turbulência

Por simplicidade a análise será dividida em duas partes. Inicialmente discutem-se aspectos relacionados com o escoamento de solvente (água) sendo de interesse abordar a validade da equação (4.9), considerando que os espectros foram obtidos através do software do anemômetro. Posteriormente estuda-se a influência dos polímeros.

A figura (5.16) mostra os espectros de potência  $S(kw)$  do solvente para as três regiões e quatro valores do número de Reynolds estudados. Tem-se incluído em todos os casos, para comparação, uma curva genérica com declividade  $-5/3$ .

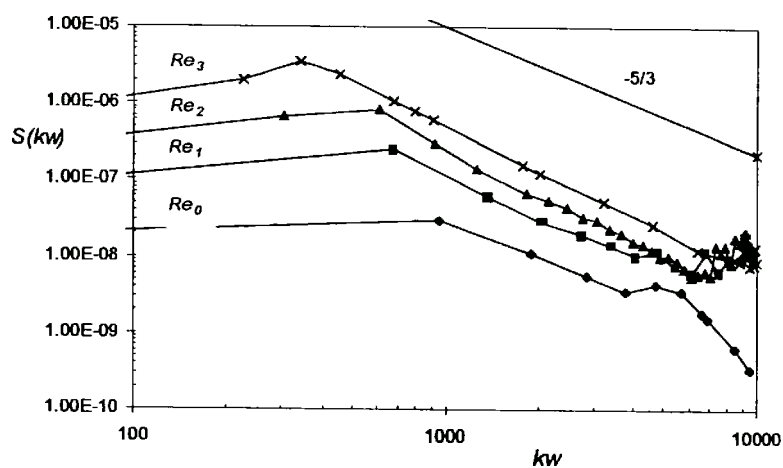
Pode-se observar que em todos os espectros existe uma faixa de  $kw$  que apresenta uma declividade aproximada de  $-5/3$ . Esta parte do espectro se corresponde com a conhecida região inercial, para a qual a equação de Kolmogorov é válida e que está relacionada com o início do processo de dissipação de energia cinética turbulenta.

Com o incremento de  $Re$ , a faixa inercial se estende, ou seja, o máximo valor de  $k\omega$  com declividade  $-5/3$ , aumenta. A consequência direta disto se reflete em um incremento da taxa de dissipação e conseqüentemente em uma diminuição das menores escalas dos turbilhões menos energéticos. Os máximos valores de  $k\omega$ , com declividade  $-5/3$ , que corresponde ao início da região de dissipação são apresentados na tabela (5.3).

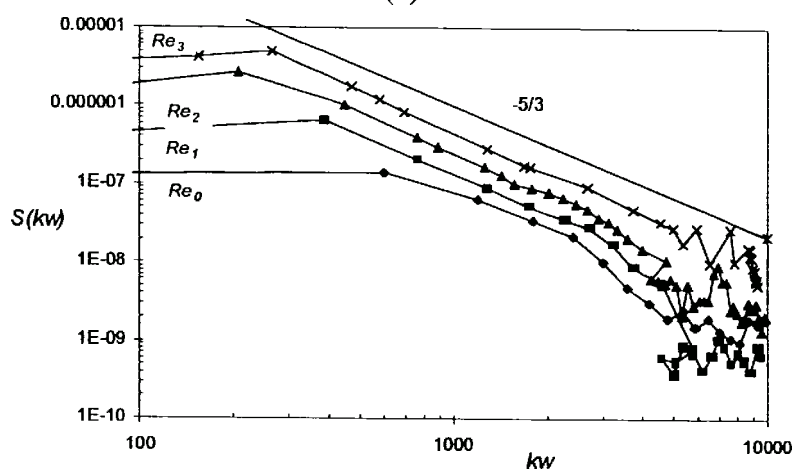
As modificações básicas dos espectros de potência para o solvente podem ser resumidas da seguinte forma, considerando que estes estão relacionados à energia da  $RMS_u$ . Para um mesmo ponto no campo de escoamento o incremento do número de Reynolds indica incremento da energia turbulenta. Portanto, para um mesmo valor de  $k\omega$  o valor de  $S(k\omega)$  é maior.

Por outro lado para um mesmo valor de  $Re$  e diferentes pontos dentro do campo de escoamento, o espectro diminui na medida que o valor de  $y$  aumenta (pontos mais afastados da parede). Este comportamento é coerente com os perfis de intensidade turbulenta discutidos anteriormente. A modo de exemplo, a figura (5.17) apresenta os espectros de potência nas três regiões do escoamento para  $Re_0$ .

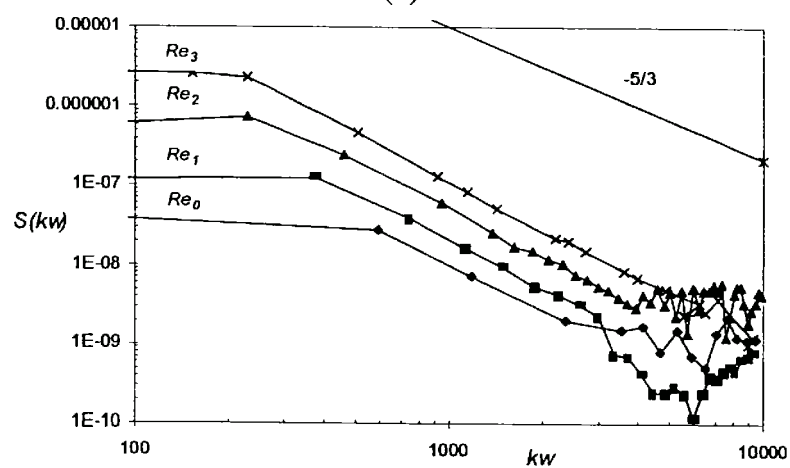
Considerando estes resultados, conclui-se que o processo utilizado para a obtenção dos espectros é correto e que estes apresentam uma limitada faixa de número de ondas, bem definida, com declividade  $-5/3$ , de acordo com a teoria de Kolmogorov para escoamentos Newtonianos.



(a)



(b)



(c)

Figura (5.16) Espectros de potência do solvente para os diferentes valores de Reynolds analisados e regiões dentro do campo de escoamento: (a) Região de parede; (b) Região central e (c) Região da superfície livre.

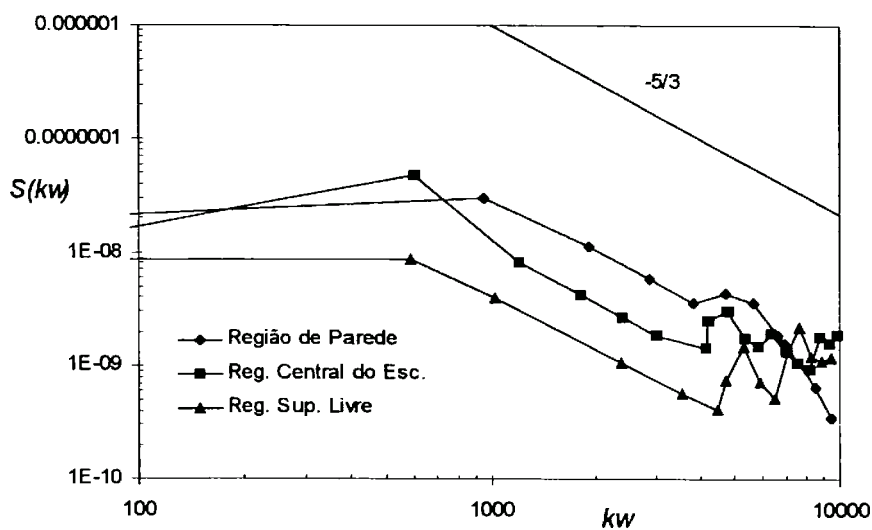


Figura (5.17) Espectros de potência do solvente, para  $Re_0$  nas diferentes regiões do escoamento.

Tabela 5.3 Máximos valores de  $kw$  (final da região inercial) para escoamento de água nas diferentes regiões e para diferentes números de  $Re$ .

Região esc. →	$kw$ ( $m^{-1}$ ) na Reg. Parede	$kw$ ( $m^{-1}$ ) na Reg. Central	$kw$ ( $m^{-1}$ ) na Reg. Sup. Livre
$Re_0$	3802	2400	2365
$Re_1$	4093	3228	2986
$Re_2$	5209	3981	3920
$Re_3$	6426	4910	4909

#### 5.2.7.1.1 Análise Espectral da Turbulência para Soluções Poliméricas

Os espectros de potência para as soluções poliméricas correspondente a componente flutuante  $u'$  na região de parede,  $Y^+ < 20$  estão apresentados na figura (5.18).

De forma geral se observa que nesta região os espectros apresentam mudanças significativas.

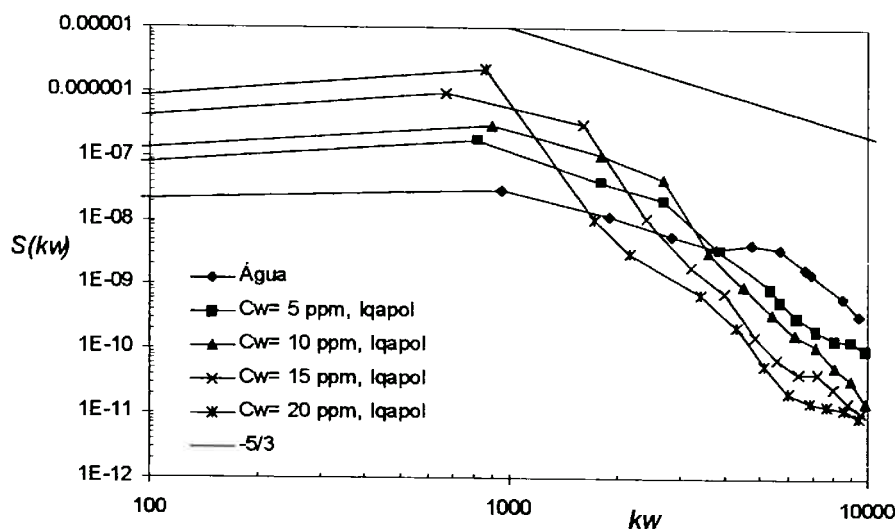
Da simples inspeção visual destes gráficos observa-se que as soluções poliméricas não apresentam, em nenhuma região, uma faixa de  $k\omega$  onde a declividade seja de  $-5/3$ , como ocorre em escoamentos Newtonianos. Dois fatos sustentam este comportamento. O primeiro estaria relacionado às inúmeras modificações que os polímeros provocam na estrutura da turbulência, mesmo que a análise seja feita para condições de escoamentos similares ( $Re$ ). Outro aspecto, muito importante, é que a equação (4.9) foi determinada sob condições de isotropia das componentes flutuante da velocidade nas escalas dissipativas. Conforme discutido neste trabalho, uma das mudanças mais significativas dos polímeros sobre a estrutura da turbulência esta relacionada à anisotropia das componentes flutuantes. Devido a isto é de se esperar que nas soluções poliméricas, os espectros apresentam comportamentos diferentes.

Nesta região o comportamento para ambas as soluções poliméricas é qualitativamente semelhante, embora apresentem diferenças quantitativas, conforme já analisado para outros parâmetros. Quando comparadas com o solvente, se observa que para os maiores valores do número de onda,  $k\omega$  (menores escalas) a energia diminui, entanto para as menores frequências, aumenta. Isto pode ser interpretado como uma redistribuição de energia das maiores para as menores frequências.

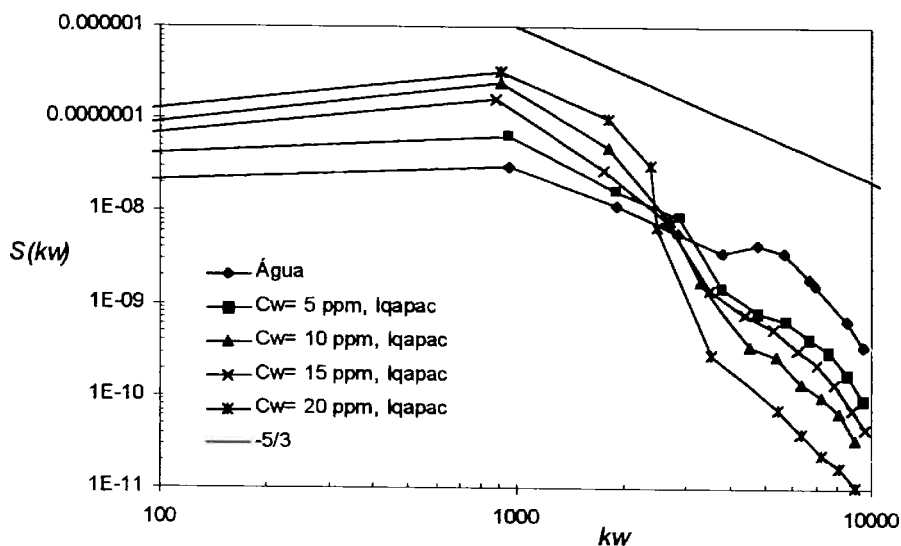
Esta tendência é maior com o incremento da concentração das soluções poliméricas e com o aumento do peso molecular dos polímeros.

O comportamento acima indica, em certa medida, que a região inercial tende a desaparecer em escoamentos redutores de atrito, de forma tal que, existe uma maior proximidade entre as faixas produtivas e dissipativas. Se a taxa de dissipação é uma

função de  $kw$ , o deslocamento de energia dos altas para os baixos valores de número de onda deve resultar em uma diminuição da dissipação de energia em escoamentos redutores de atrito, quando comparados com o solvente e consequentemente as escalas de comprimentos dos menores turbilhões são maiores.



(a)



(b)

Figura (5.18) Espectros de potência na região de parede e  $Re_0$ , para (a)  $Iqapol$ , (b)

$Iqapac$

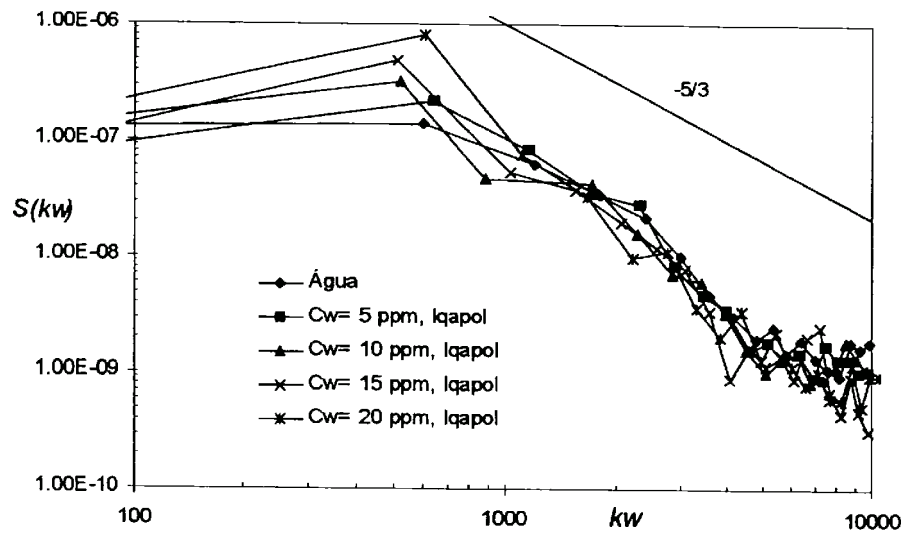
A figura (5.19) mostra os espectros de potência para as soluções poliméricas estudadas na a região central do escoamento. Os aspectos mais relevantes a serem destacados desta figura são:

- Para as soluções poliméricas, não há uma tendência claramente definida, que possa revelar influência alguma dos polímeros sobre os espectros de potência;
- Os espectros para soluções poliméricas, da mesma forma que para a região de parede, não apresentam a declividade  $-5/3$ ;
- Para menores valores de  $kw$  existe uma tendência geral, para a qual os valores dos espectros aumentam com o incremento da concentração das soluções poliméricas.

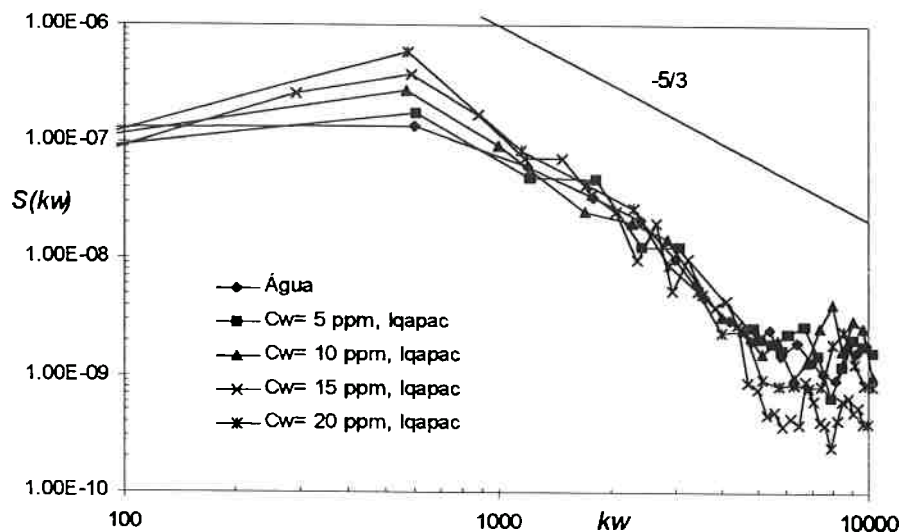
Os resultados para a região da superfície livre, são semelhantes aos da região central do escoamento.

Os resultados aqui discutidos são consistentes com os da literatura (Virk *et al* (1967, Wei & Willmarth (1992), den Toonder *et al* (1997)), que também mostram que os espectros de potência para a componente flutuante normal  $v'$  são amortecidos para toda a faixa de números de onda. O comportamento espectral, tanto da componente axial, quanto da componente normal, é coerente com os perfis de intensidade turbulenta e das tensões de Reynolds.

Em todos os casos, os espectros foram limitados a número de onda menores do que  $10^4$ , ou seja,  $f < 100$  Hz. A causa disto é que os sinais que aparecem nos espectros para altas frequências, e que deveriam representar a energia contida nelas, não aportam informações úteis, podendo ser estes sinais considerados como ruídos sem contribuição significativa.



(a)



(b)

Figura (5.19) Espectros de potência na região central do escoamento e  $Re_0$ :

(a) *Iqapol*; (b) *Iqapac*

Desta análise pode-se inferir que a determinação das características dissipativas dos escoamentos redutores de atrito, não deve ser feita utilizando o mesmo método que para escoamento de água, devido a que, em ausência da região inercial, não é possível a determinação da taxa de dissipação, utilizando o espectro de potência.



### 5.2.7.2 Escalas da Turbulência

Conforme analisado, a adição de polímeros provoca modificações nos processos dissipativos e de produção de energia cinética turbulenta. Devido a isto as escalas turbulentas são alteradas. Pretende-se em seguida, estudar quais são as variações nas escalas turbulentas em escoamentos redutores de atrito. Deve ser considerado que, uma vez definidas as escalas integrais, para determinar as escalas dissipativas ou de Kolmogorov, é necessário estimar de que forma e quanta energia é dissipada nas menores escalas.

Considerando que a adição de polímeros a escoamento turbulento, conforme já obtido neste trabalho, modifica a estrutura turbulenta na região de parede,  $Y^+ < 100$ , só foram analisados as escalas nas regiões de parede e central do escoamento, por serem as de maior interesse.

#### 5.2.7.2.1 Modificações das Escalas de Turbulência na Região de Parede

Conforme definido, as escalas integrais de comprimento e velocidade,  $\mathcal{L}$  e  $\mathcal{U}$  nesta região foram consideradas iguais a 1 mm e  $RMS_u$ , respectivamente.

Para determinar as escalas de Kolmogorov, é necessário obter o valor da taxa de dissipação,  $\varepsilon$  que será calculada por duas vias. A primeira a partir do espectro de potência  $S(k\omega)$  e a segunda considerando a Hipótese de Equilíbrio, equação (4.10). A validação do procedimento de cálculo da taxa de dissipação,  $\varepsilon$ , será feita a partir dos resultados do item anterior, para escoamento do solvente e posteriormente será discutida a sua aplicação para escoamentos redutores de atrito.

A partir dos espectros de potência, para cada valor de  $Re$ , foram obtidos os valores de  $S(k\omega)$  e  $k\omega$ , na região que limita as faixas inercial e dissipativa, ou seja, o

máximo valor de  $kw$  onde o espectro mantém declividade  $-5/3$ . Estes valores foram substituídos na equação (4.9), obtendo-se desta forma o valor da taxa de dissipação,  $\varepsilon$ .

O segundo método para determinar a taxa de dissipação, consistiu em substituir os valores das escalas integrais de comprimento e velocidade na equação (4.10).

Os resultados obtidos por estes métodos são apresentados na tabela (5.4)

Tabela 5.4 Valores da taxa de dissipação,  $\varepsilon$  para água, na região de parede

Método $\rightarrow$ $Re \downarrow$	$\varepsilon$ ( $s^2/m^3$ ) pelo Espectro de Potência	$\varepsilon$ ( $s^2/m^3$ ) pela 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

Da análise destes resultados, observa-se que a diferença entre os valores de  $\varepsilon$  é muito pequena, a partir do qual é possível de se concluir que ambos os critérios são válidos, para o estudo de escoamento Newtoniano.

No caso das soluções poliméricas, foi analisado que o método do espectro de potência não é válido, pois estes não apresentam a faixa com declividade  $-5/3$ . Em vista disto, e dos resultados acima, optou-se por determinar a taxa de dissipação através da hipótese de equilíbrio, que se mostrou válida nestes casos.

Os resultados obtidos para  $Re_0$  e para as soluções de *Iqapol* e *Iqapac* são mostrados nas Tabelas (5.5) e (5.6). Na Tabela (5.7), se apresentam as relações entre as escalas integrais e de Kolmogorov para os polímeros analisados.

### 5.2.7.2.2 Modificações das Escalas de Turbulência na Região Central do escoamento

A determinação da taxa de dissipação na região central do escoamento, apresenta uma diferença importante com respeito ao método discutido para a região de parede.

O problema consiste em que não é possível estimar, por considerações geométricas, as escalas integrais devido à presença da placa perfurada a montante do canal, com furos da ordem de 2 mm, que limita  $\mathcal{L}$  a um valor, no máximo, desta ordem. Por outro lado a redução da área de escoamento na entrada do canal (vide figura (3.1)), cria uma região de suprimento de energia, que poderia levar a incrementos na escala integral. A dificuldade consiste em que não existem elementos para, a partir do incremento de energia cinética do escoamento médio na região de suprimento de energia, estimar um possível valor de  $\mathcal{L}$ .

Considerando estes aspectos e, para escoamento do solvente, nesta região utilizaram-se os seguintes métodos, para determinar a taxa de dissipação:

- A partir do espectro de potência, conforme anteriormente definido;
- Considerando que o espectro de potência em função do número de ondas,  $S(kw)$  estabelece relações entre flutuações vizinhas separadas de uma distância  $r$ , o valor de  $S(kw)_{kw \rightarrow 0}$  dá uma idéia da distância à qual essas flutuações podem ou não estar correlacionadas e conseqüentemente uma noção da escalas integral das mesmas. Portanto, segundo Virk *et al* (1967),  $\mathcal{L}$  pode ser estimada como:

$$\mathcal{L} = \left( \frac{\pi}{2RMS_u^2} \right) S(kw)_{kw \rightarrow 0} \quad (5.4)$$

Utilizando o primeiro dos métodos acima descrito, o procedimento foi o seguinte. Utilizando os espectros de potência para escoamento de água na região central, figura (5.16b), estimou-se a taxa de dissipação, de forma semelhante à região de parede.

Através da equação (5.4) e de dados dos espectros, foi obtido um valor da escala integral de escoamento. Este valor de  $\mathcal{L}$  junto à escala integral de velocidade nesta região, foram substituídos na equação (4.10) obtendo-se um segundo valor de  $\varepsilon$ . Ambos os valores foram comparados, sendo que os resultados são apresentados na tabela (5.8).

Tabela 5.8 Valores da taxa de dissipação,  $\varepsilon$  para escoamento de solvente, na região central do escoamento

Método → $Re \downarrow$	$\varepsilon$ (s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) pelo Espectro de Potência	$\varepsilon$ (s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) pela Equação (4.10)	$L_x$ (mm) Equação (5.4)
$Re_0$	6.1E-04	6.4E-04	1.5
$Re_1$	6.5E-04	7E-04	1.76
$Re_2$	1.73E-03	1.8E-03	1.58
$Re_3$	5E-03	5.8E-03	1.64

A partir destes resultados pode-se assumir que, na região central do escoamento, a escala integral de comprimento pode ser considerada igual a 2 mm. Isto representa um incremento de 100% quando comparada com  $\mathcal{L}$  na região de parede. Um aspecto interessante nesta análise é que, ao se determinar o incremento da energia cinética do escoamento médio devido à redução da área na entrada do canal, se observou que esta se incrementa, também, em 100%. Embora destes resultados, não se possa ter uma conclusão generalizadora, observa-se que as regiões de aceleração do escoamento, podem provocar incrementos na escala integral de comprimento do escoamento.

O resultado acima valida, para sua utilização em escoamentos redutores de atrito, o método de determinar a taxa de dissipação de energia a partir do valor do espectro de potência quando o número de onda,  $kw$  tende a zero,  $S(kw)_{kw \rightarrow 0}$ . Os resultados, para  $Re_0$  se apresentam nas tabelas (5.9) e (5.10).

De forma análoga, na tabela (5.11) são mostradas as relações entre as escalas integrais e de Kolmogorov.

À luz dos resultados obtidos, alguns aspectos podem ser discutidos:

- Conforme pôde ser deduzido da análise dos espectros de potência, a taxa de dissipação em escoamentos redutores de atrito diminui, mostrando que as escalas de comprimento dos menores turbilhões são maiores. Isto, evidentemente, leva à variações nos processos de transferência de energia e na cascata de energia, a qual não pode-se desenvolver totalmente.
- As escalas de vorticidade diminuem com o incremento da concentração, o que está relacionado com as modificações que sofre a vorticidade nos escoamentos redutores de atrito.
- A transferência de energia das altas para as baixas frequências, típico de escoamento redutores de atrito, mostra que o valor das frequências máximas diminuem com o incremento da concentração. Estas variações são maiores para o *lqapol*.
- A relação entre as escalas de velocidades  $u_k/\mathcal{U}$  mostra que a energia dos menores turbilhões é menor do que a energia contida nos turbilhões de grande escala e, desta forma, no escoamento turbulento do solvente a maior parte da energia está associada ao movimento das escalas maiores. Para o caso de escoamentos redutores de atrito, com o aumento da concentração a relação entre estas escalas aumenta o que significa que a energia associada às menores escalas passa a ter maior significância em relação ao caso de escoamento de solvente.

Tabela 5.5 Escalas integrais e de Kolmogorov na região de parede, para  $Re_0$  e  $Iqapol$

Escoam. ↓	$\varepsilon$ ( $m^2/s^3$ )	$\mathcal{L}$ (m)	$\mathcal{U}$ (m/s)	$\mathcal{T}$ (s)	$\mathcal{E}$ ( $m^2/s^2$ )	$\mathcal{W}$ ( $s^{-1}$ )	$l_k$ (m)	$u_k$ (m/s)	$t_k$ (s)	$e_k$ ( $m^2/s^2$ )	$w_k$ ( $s^{-1}$ )
Água	0.01697	0.001	0.0257	0.039	6.6E-04	25.64	8E-05	0.01108	0.00724	1.22E-04	138.12
<i>Iqapac</i> 5 ppm	0.01488	0.001	0.0246	0.041	6E-04	24.39	8.28E-05	0.01072	0.0076	1.14E-04	137.74
<i>Iqapac</i> 10 ppm	0.01281	0.001	0.0234	0.042	5.4E-04	23.8	8.39E-05	0.01024	0.0081	1.1E-04	124.45
<i>Iqapac</i> 15 ppm	0.01094	0.001	0.0222	0.045	4.9E-04	22.22	9.23E-05	0.01	0.0092	1E-04	108.69
<i>Iqapac</i> 20 ppm	0.0098	0.001	0.0214	0.047	4.5E-04	21.27	9.35E-05	0.0097	0.0096	9.4E-05	104.16

Tabela 5.6 Escalas integrais e de Kolmogorov na região de parede, para  $Re_0$  e  $Iqapac$

Escoam. ↓	$\varepsilon$ ( $m^2/s^3$ )	$\mathcal{L}$ (m)	$\mathcal{U}$ (m/s)	$\mathcal{T}$ (s)	$\mathcal{E}$ ( $m^2/s^2$ )	$\mathcal{E}$ ( $m^2/s^2$ )	$l_k$ (m)	$u_k$ (m/s)	$t_k$ (s)	$e_k$ ( $m^2/s^2$ )	$w_k$ ( $s^{-1}$ )
Água	0.01697	0.001	0.0257	0.039	6.6E-04	25.64	8E-05	0.01108	0.00724	1.22E-04	138.12
<i>Iqapac</i> 5 ppm	0.01677	0.001	0.0256	0.03906	6.55E-04	25.60	8.18E-05	0.01104	0.0074	1.21E-04	135.1
<i>Iqapac</i> 10 ppm	0.01581	0.001	0.0251	0.03984	6.3E-04	25.10	8.22E-05	0.0109	0.00751	1.18E-04	133.55
<i>Iqapac</i> 15 ppm	0.01417	0.001	0.0242	0.0413	5.8E-04	24.21	8.5E-05	0.01080	0.00787	1.16E-04	127.06
<i>Iqapac</i> 20 ppm	0.01365	0.001	0.0239	0.04184	5.7E-04	23.90	8.62E-05	0.01078	0.00798	1.16E-04	125.31

Tabela 5.7 Relação entre escalas integrais e de Kolmogorov na região de parede, para  $Re_0$  e as duas soluções poliméricas analisadas

Relação	$\mathcal{M}_k = Re_\nu^{3/4}$		$\mathcal{M}_k = Re_\nu^{1/2}$		$\mathcal{G}_k = Re_\nu^{-1/2}$		$\mathcal{W}_k = Re_\nu^{-1/2}$		$Re_\nu \mathcal{L}^2 \nu$	
	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac
Polímero $\rightarrow$ Escoamento $\downarrow$										
Água	12.47	12.47	2.3199	2.3189	5.37	5.37	0.1848	0.1848	0.1859	0.1859
$C_w = 5$ ppm	12.06	12.43	2.2937	2.3167	5.26	5.36	0.1900	0.1865	0.1900	0.1863
$C_w = 10$ ppm	11.91	12.04	2.2841	2.2922	5.21	5.25	0.2037	0.1904	0.1916	0.1903
$C_w = 15$ ppm	10.80	11.25	2.2108	2.2405	4.88	5.02	0.2041	0.1992	0.2045	0.1991
$C_w = 20$ ppm	10.50	10.88	2.1902	2.2158	4.79	4.91	0.2088	0.2036	0.2084	0.2036

Tabela 5.9 Escalas integrais e de Kolmogorov na região central do escoamento, para  $Re_0$  e  $Iqapol$

Escoam.	$\varepsilon$ ( $m^2/s^3$ )	$\mathcal{L}$ (m)	$\mathcal{U}$ (m/s)	$\mathcal{T}$ (s)	$\mathcal{E}$ ( $m^2/s^2$ )	$\mathcal{W}$ ( $s^{-1}$ )	$l_k$ (m)	$u_k$ (m/s)	$t_k$ (s)	$e_k$ ( $m^2/s^2$ )	$w_k$ ( $s^{-1}$ )
Água	6.4E-04	0.002	0.0109	0.183	1.19E-04	5.45	1.81E-04	0.00488	0.0373	2.38E-05	26.84
<i>Iqapol</i> 5 ppm	6.8E-04	0.002	0.0111	0.18	1.23E-04	5.55	1.79E-04	0.00496	0.0362	2.45E-05	27.66
<i>Iqapol</i> 10 ppm	7.6E-04	0.002	0.0115	0.174	1.32E-04	5.75	1.7E-04	0.00506	0.0336	2.55E-05	29.74
<i>Iqapol</i> 15 ppm	7.2E-04	0.002	0.0113	0.177	1.28E-04	5.65	1.82E-04	0.00509	0.0359	2.58E-05	27.82
<i>Iqapol</i> 20 ppm	8.0E-04	0.002	0.0117	0.171	1.37E-04	5.85	1.75E-04	0.00519	0.0337	2.69E-05	29.67

Tabela 5.10 Escalas integrais e de Kolmogorov na região central do escoamento, para  $Re_0$  e  $Iqapac$

Escoam.	$\varepsilon$ ( $m^2/s^3$ )	$\mathcal{L}$ (m)	$\mathcal{U}$ (m/s)	$\mathcal{T}$ (s)	$\mathcal{E}$ ( $m^2/s^2$ )	$\mathcal{W}$ ( $s^{-1}$ )	$l_k$ (m)	$u_k$ (m/s)	$t_k$ (s)	$e_k$ ( $m^2/s^2$ )	$w_k$ ( $s^{-1}$ )
Água	6.4E-04	0.002	0.0109	0.183	1.19E-04	5.45	1.81E-04	0.00488	0.0373	2.38E-05	26.84
<i>Iqapac</i> 5 ppm	8.2E-04	0.002	0.0112	0.179	1.25E-04	5.60	1.83E-04	0.00532	0.0345	2.82E-05	29.01
<i>Iqapac</i> 10 ppm	8.4E-04	0.002	0.01	0.200	1E-04	5.00	1.73E-04	0.00526	0.0329	2.76E-05	30.4
<i>Iqapac</i> 15 ppm	5.6E-04	0.002	0.0106	0.189	1.12E-04	5.30	1.94E-04	0.00478	0.0408	2.28E-05	24.54
<i>Iqapac</i> 20 ppm	5.9E-04	0.002	0.0108	0.185	1.17E-04	5.40	1.88E-04	0.00481	0.0393	2.31E-05	25.48



Tabela 5.11 Relação entre escalas integrais e de Kolmogorov na região central do escoamento, para  $Re_0$  e as duas soluções poliméricas analisadas.

Relação	$\mathcal{M}_k = Re_\varphi^{3/4}$		$\mathcal{M}_{uk} = Re_\varphi^{1/4}$		$\mathcal{M}_k = Re_\varphi^{1/2}$		$\mathcal{G}e_k = Re_\varphi^{-1/2}$		$\mathcal{M}_{wk} = Re_\varphi^{1/2}$		$Re_\varphi = 228\nu$	
	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac	Iqapol	Iqapac
Polímero → Escoamento ↓ Água	10.99	10.99	2.23	2.23	4.92	4.92	4.98	4.98	0.203	0.203	24.53	24.53
$C_w = 5$ ppm	11.16	10.91	2.24	2.11	4.98	5.18	5.01	4.44	0.201	0.193	24.98	22.99
$C_w = 10$ ppm	11.76	11.57	2.27	1.90	5.17	6.08	5.17	3.62	0.193	0.164	26.76	22.00
$C_w = 15$ ppm	10.94	10.27	2.22	2.22	4.92	4.63	4.93	4.92	0.203	0.216	24.30	22.80
$C_w = 20$ ppm	11.43	10.59	2.25	2.24	5.07	4.72	5.08	5.04	0.197	0.212	25.75	23.76

### 5.2.8 Princípio de Máxima Entropia

Só em anos recentes o conceito de entropia e o princípio de máxima entropia foram trazidos à hidráulica, procurando fazer a ligação entre o universo determinístico e o probabilístico. Vários métodos (Chiu, 1988, Calisto, 1996 e Minei, 1999 [apud Minei 1999] tem sido desenvolvidos, no sentido de fornecer subsídios na determinação do perfil de velocidade e vazão em corpos d'água. A essência destes métodos consiste na medição da velocidade em pontos de diversas linhas verticais da seção do canal.

O mais recente deles, Minei (1999), tem-se mostrado altamente preciso na medição da vazão tanto em rios de pequeno porte quando em rios caudalosos. A vantagem deste método é que a partir da medição da velocidade em três pontos na vertical onde se localiza a máxima velocidade podemos determinar de forma rápida e simples o perfil de velocidades, a velocidade média e a vazão. A vertical onde se localiza a máxima velocidade é considerada como sendo aquela de maior profundidade (Minei 1999)

Conforme as equações (4.18) e (4.19), vemos que a distribuição de velocidades depende de: altura da lâmina d'água,  $h_{st}$ , distância da superfície livre ao ponto de máxima velocidade,  $h_{mv}$  e do adimensional  $M$ . Este parâmetro é denominado por alguns autores como “parâmetro de entropia” e foi definido por Chiu (1988) como uma medida de uniformidade da distribuição de probabilidades das velocidades.

Se considerarmos que  $M$  está relacionada ao grau de turbulência do escoamento através da sua relação com  $f$ , é importante estudar como se modificam os valores deste adimensional, quando da adição de polímeros. É importante frisar também que esta avaliação nunca foi feita antes.

Inicialmente foram avaliados os perfis de velocidade para água com diferentes valores do número de Reynolds conforme mostrado na figura (5.20).

Desta figura é possível de se observar a coincidência dos perfis obtidos experimentalmente com os obtidos aplicando o princípio de máxima entropia. Os valores de  $M$  variam na faixa de 6.28 para  $Re_0$  até 10,93 para  $Re_3$ . Em todos os casos as diferenças entre os valores de vazão e de velocidade média por ambos os métodos não ultrapassaram 0.5%.

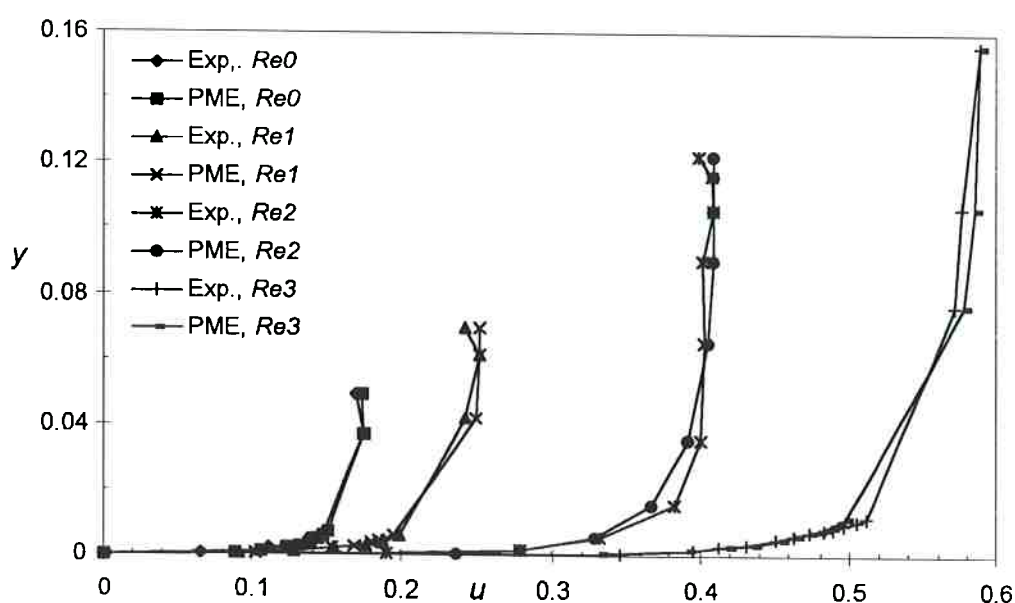
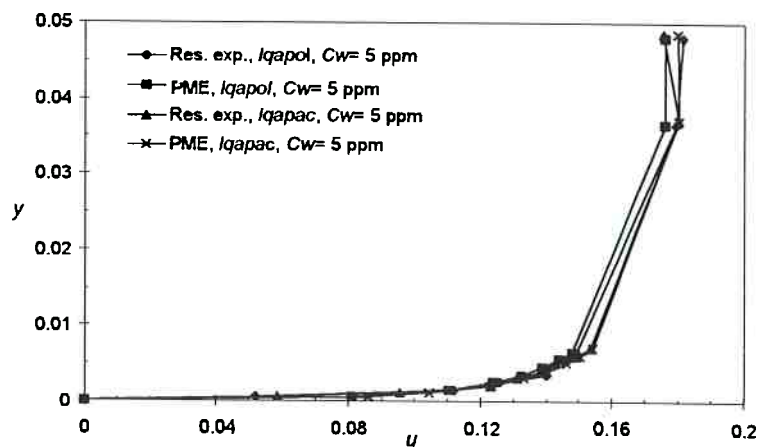


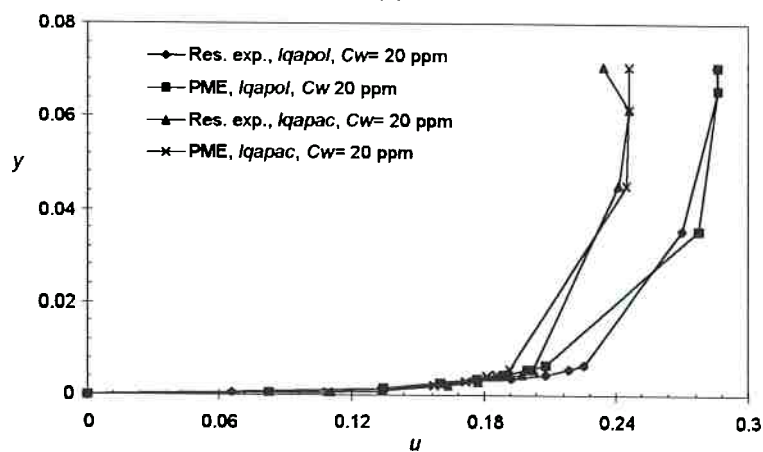
Fig.(5.20) Comparação dos perfis de velocidade experimentais com os obtidos pelo PME, para diferentes valores do número de Reynolds.

A aplicação do método ao escoamento de soluções poliméricas, em geral, apresentou bons resultados, mostrados a seguir.

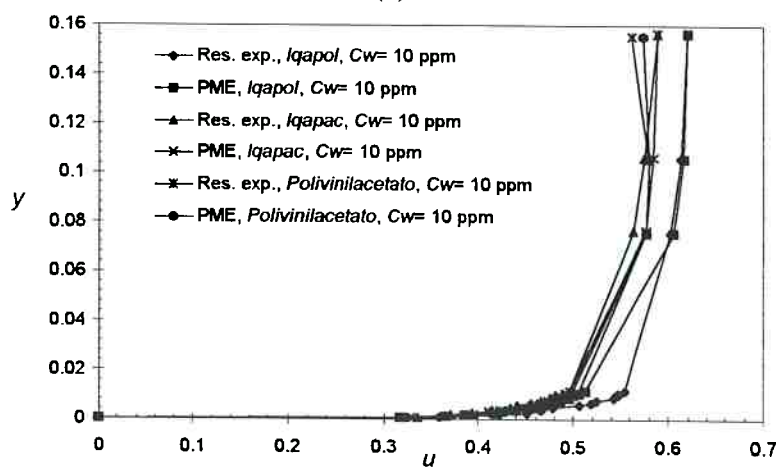
Na figura (5.21) aparecem representados os perfis de velocidade axial para  $Re_0$  e  $C_w = 5$  ppm,  $Re_1$  e 20 ppm e para  $Re_3$  e  $C_w = 10$  ppm para os polímeros estudados.



(a)



(b)



(c)

Figura (5.21) Comparação dos perfis de velocidades axial: (a)  $Re_0$  e  $Cw= 5$  ppm, (b)  $Re_1$  e  $Cw= 20$  ppm, (c)  $Re_3$  e  $Cw= 10$  ppm

Podemos observar que, de forma geral, existe boa coincidência entre os perfis experimentais e os determinados pelo princípio de máxima entropia. Destacam-se alguns elementos que serão discutidos a seguir.

Do gráfico (a) da figura (5.21) se observa que os perfis não são modificados significativamente pela adição de qualquer polímero (*Iqapol* ou *Iqapac*), conforme já analisado em 5.2.1. Isto se corresponde com o critério de que, para valores de Reynolds menores que  $10^4$  e concentrações pequenas, não ocorre redução de atrito.

A diferença maior entre os valores de velocidade no levantamento dos perfis, quando comparados o experimental e o obtido pelo PME, são da ordem de 1%, em ambos os polímeros.

O gráfico (b) da própria figura mostra que, com o incremento do número de Reynolds, os perfis de velocidade experimentais para ambos os polímeros apresentam diferenças que podem chegar a 12% na região correspondente à metade da altura da lâmina d'água. Este comportamento é compatível com a redução de atrito que se verifica aqui. O PME mostrou-se igualmente preciso com diferenças máximas da ordem de 5% para  $0.0035 < y < 0.0065$ .

Os resultados para  $Re_3$  e  $Cw=10$  ppm, são mostrados no gráfico (c). Inclui-se aqui, o *Polivinilacetato*, polímero de baixo peso molecular que apresenta comportamento similar ao *Iqapac*. De forma análoga se observa que o perfil experimental do *Iqapol* se diferencia daqueles do *Iqapac* e da *Polivinilacetato*. Porém, quando comparados os perfis experimental e o obtido pelo PME para cada polímero, os resultados são satisfatórios.

O comportamento de  $M$  para soluções poliméricas se corresponde com as tendências de redução de atrito analisadas anteriormente e pode ser avaliado a partir do

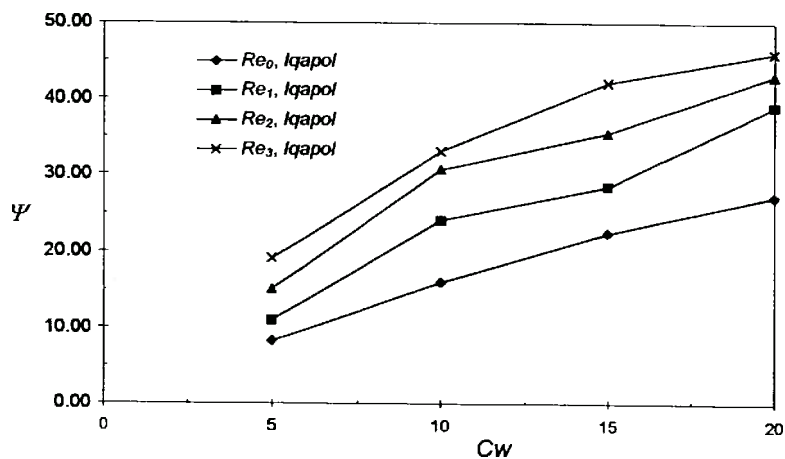
coeficiente de variação da turbulência,  $\Psi$  que, de forma análoga ao coeficiente de eficiência da redução de atrito, relaciona as variações de  $M$  como função do tipo de polímeros, da concentração e do número de Reynolds, através de relação:

$$\psi = \frac{|M_s - M_p|}{M_s} 100 \quad (5.5)$$

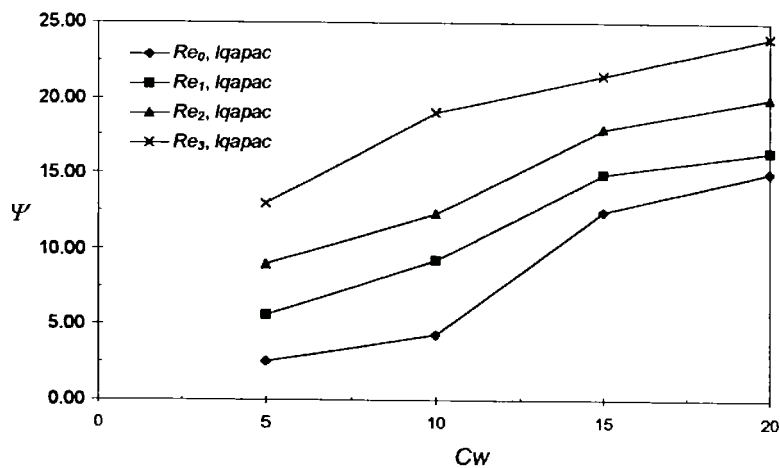
Na tabela (5.12) são mostrados os resultados de  $M$  para os ensaios realizados. Na figura (5.22) se apresentam os gráficos de  $\Psi$  versus  $C_w$  para os diferentes valores de  $Re$ . É possível observar como com o incremento de  $C_w$  e de  $Re$  o coeficiente  $\Psi$  aumenta para os dois polímeros, sendo esta variação maior para o *Iqapol*.

Desta análise, alguns aspectos merecem ser destacados. Conforme mencionado,  $M$  pode ser considerado como um parâmetro para definir a turbulência e depende do perfil de velocidade na seção. Reconhecidamente, um dos possíveis efeitos dos polímeros sobre o escoamento é a variação da vazão o que provocaria modificações no perfil de velocidade. Devido a isto é de se esperar que a presença de aditivos altere o valor de  $M$ , inclusive para condições de escoamento muito similares, como as aqui analisadas.

As tendências no comportamento de  $M$  parecem lógicas à luz dos resultados analisados anteriormente. Se a adição de polímeros provoca, em geral, diminuição da atividade turbulenta é de se esperar então que com o incremento de  $C_w$  o valor de  $M$  diminua, conforme pode ser visto.



(a)



(b)

Figura (5.22) Comportamento de  $\Psi$  como função da concentração para diferentes valores de  $Re$ .

Uma análise detalhada das figuras (5.6) e (5.22) mostra que ambos os coeficientes,  $\Psi$  e  $\phi$ , apresentam comportamentos similares, embora se observem duas peculiaridades:

- Os valores de  $\phi$  são sempre maiores que os de  $\Psi$ ;
- Para  $Re_0$  e  $Cw=5$  e  $10$  ppm, em ambas as soluções poliméricas, a análise do coeficiente  $\phi$  não mostra qualquer influência dos polímeros sobre a redução de atrito, porém o coeficiente  $\Psi$  varia para estas mesmas condições.

Tabela 5.12 Valor do parâmetro adimensional de entropia,  $M$  para água e soluções poliméricas

Polímero → $Re$ ↓	Iqapol					Iqapac					Polyvinilacetato				
	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm	0	5 ppm	10 ppm	15 ppm	20 ppm
$Re_0$	6.28	5.6	5.15	4.51	4.01	6.28	6.12	6.01	5.5	5.18	-	-	-	-	-
$Re_1$	6.83	6.28	5.74	5.31	4.98	6.83	6.45	6.2	5.81	5.71	-	-	-	-	-
$Re_2$	10.27	8.99	7.12	6.63	6.45	10.27	10.03	9.01	8.43	7.6	-	-	-	-	-
$Re_3$	10.93	8.85	7.32	6.33	5.9	10.93	9.51	8.85	8.58	8.30	10.93	9.62	9.01	8.73	8.34



Na prática o programa utilizado para determinar o parâmetro  $M$ , mostrou-se muito sensível a pequenas variações de velocidade. Isto deve justificar por que, mesmo que as variações de velocidade não modifiquem significativamente o perfil, alteram o valor de  $M$ .

### **5.3 Início da Redução de Atrito**

Do ponto de vista do estudo e da compreensão da redução de atrito é importante a análise dos aspectos relacionados com o início da redução de atrito.

Várias teorias explicam o início da redução de atrito (Ortiz & Vilalta 1998). A seguir serão apresentadas as evidências experimentais obtidas neste trabalho e que ajudam a entender o mecanismo em estudo.

Fisicamente o início da redução de atrito implica em uma incipiente interação entre as moléculas e o escoamento turbulento. Alguns parâmetros parecem ser relevantes neste aspecto. Do ponto de vista da dinâmica dos fluidos o mais representativo é a tensão de cisalhamento na parede,  $\tau_0$ . Para determinados sistemas polímero-solvente, a redução de atrito começa quando  $\tau_0$  atinge um determinado valor, que é menor que o correspondente ao escoamento de solvente nas mesmas condições.

Considerando a característica física das moléculas de polímeros, o parâmetro mais importante é o raio de giração das moléculas,  $R_g$ .

Por convenção, os parâmetros correspondentes ao início da redução de arrasto são representados, na literatura, utilizando um \* sobrescrito ao símbolo em questão.

Comumente, e como feito neste trabalho, para estudar o início da redução de atrito os resultados são plotados, por conveniência, num gráfico com coordenadas de Prandtl-Kármán, ou seja,  $1/f^{1/2}$  versus  $\log(Re f^{1/2})$ , que tem a vantagem de se representar

como linhas retas. Em todos os casos o valor de Reynolds foi determinado baseado na viscosidade cinemática do solvente. Neste gráfico, define-se o início da redução de atrito a partir da interseção das linhas das soluções poliméricas com a do solvente. A diferença na declividade,  $\delta$  entre estas linhas é interpretada como uma magnitude da redução de atrito para um determinado sistema polímero-solvente.

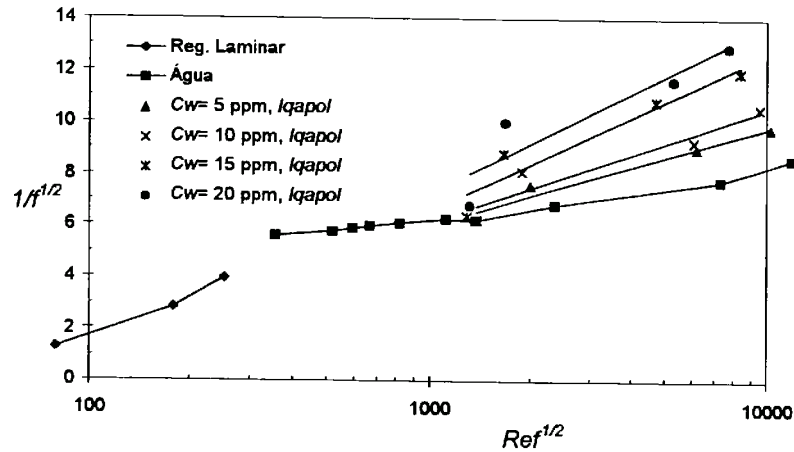
Vários fatores exercem influência sobre o início da redução de arrasto, sendo os mais importantes a concentração, o peso molecular e o diâmetro hidráulico. Em seguida faremos uma análise da cada um destes fatores.

### ***5.3.1 Efeito da Concentração das Soluções Poliméricas Sobre o Início da Redução de Atrito***

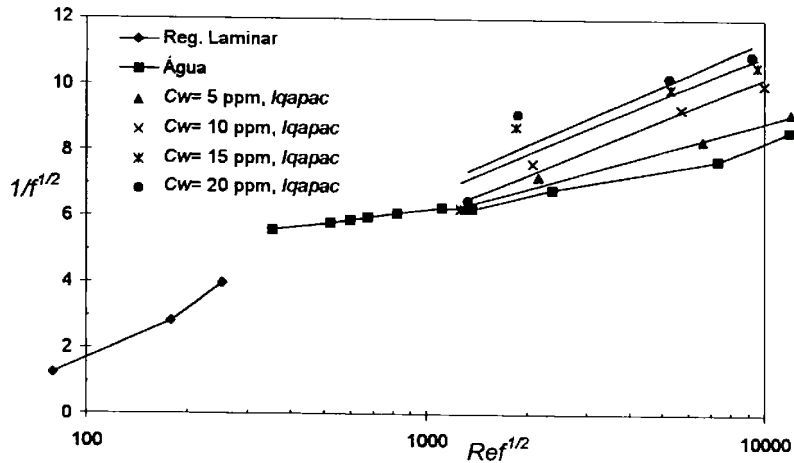
A figura (5.23) mostra o efeito da concentração das soluções poliméricas sobre o início da redução de atrito (I.R.A), considerando variável o número de Reynolds.

Para os dois polímeros estudados parece que o início de redução de atrito ocorre em uma faixa de  $Re_f^{d/2}$  bem definida. Para o *Iqapol*, este valor é aproximadamente  $1340 \pm 30$  e para o *Iqapac*  $1350 \pm 20$ . Este resultado pode nos indicar duas coisas. Primeiro que, embora muito próximas as duas faixas de valores, para o *Iqapol* a redução de atrito começa primeiro. Este resultado já foi analisado anteriormente.

O segundo aspecto importante está relacionado com o valor da tensão de cisalhamento na parede  $\tau_0^*$ . Como para cada polímero o termo  $Re_f^{d/2*}$  é essencialmente constante, pode-se deduzir que, no início da redução de atrito, o valor da tensão de cisalhamento,  $\tau_0$  é independente da concentração das soluções poliméricas. Resultados experimentais indicam nestes caso que para o *Iqapol*  $\tau_0^* = 0.059 \text{ N/m}^2$  e para o *Iqapac*  $\tau_0^* = 0.068 \text{ N/m}^2$ .



(a)



(b)

Figura (5.23) Influência da concentração das soluções poliméricas sobre o início da redução de atrito para os sistemas estudados: (a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.

Após estarem satisfeitas as condições para o início da redução de atrito, o comportamento das soluções poliméricas pode ser descrito da seguinte forma. Com o incremento de  $Ref^{1/2}$  as curvas correspondentes às soluções poliméricas começam-se a afastar da do solvente com uma declividade que é função da concentração.

Para o *Iqapol* a relação entre  $\delta$  e  $Cw$  é  $\delta=(0.7295, 1.2, 1.7445, 1.9065)$  para  $Cw=(5, 10, 15, 20)$  ppm. Para o *Iqapac* esta relação se mostra a seguir:  $\delta=(0.3408, 0.7,$

0.9667, 1.0613) para os mesmos valores de  $C_w$ . Uma análise cuidadosa destes resultados revelará que  $\delta$  varia, aproximadamente como a raiz quadrada da concentração, com  $\delta/C_w^{1/2} \approx 0.38 \pm 0.06$  para o *Iqapol* e  $\delta/C_w^{1/2} \approx 0.2 \pm 0.05$  para o *Iqapac*. Estes resultados coincidem com vários resultados da literatura [apud Virk (1975)] e são representados na figura (5.24).

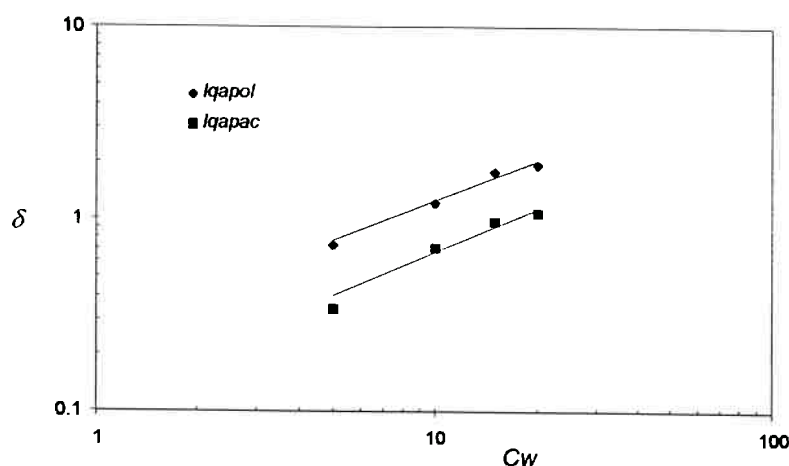


Figura (5.24) Efeito da concentração das soluções poliméricas sobre a declividade,  $\delta$

As próprias figuras (5.23) e (5.24) permitem analisar o efeito do peso molecular sobre o início da redução de atrito. Observe-se que com o incremento do peso molecular a redução de atrito começa para valores de  $Re_f^{1/2}$  menores, embora, como obtido neste trabalho, não muito diferentes. Este efeito é mais nítido ao se analisar as variações na declividade,  $\delta$ . Para polímeros com maior peso molecular, uma determinada declividade, e conseqüentemente determinada magnitude de redução de arrasto, pode ser obtida com menor concentração que para um polímero com menor peso molecular.

Daqui conclui-se que o peso molecular exerce influência sobre o início da redução da atrito. Com o incremento do peso molecular, o início da redução de arrasto se verifica para menores valores de  $Re$ . A relação entre estes parâmetros pode ser

resumida da seguinte forma: com o aumento do peso molecular dos polímeros, o início da RA ocorre para um valor de  $Re f^{1/2*}$ , ou equivalentemente  $\tau_0^*$ , menor e a declividade  $\delta$  aumenta.

### 5.3.2 Efeito do Diâmetro Hidráulico Sobre o Início da Redução da Atrito

Nos estudos de escoamentos redutores de atrito em tubulações, existe uma relação entre o diâmetro de diferentes tubulações com os respectivos termos  $Re f^{1/2*}$ . Esta relação é representada a seguir:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{Re f_1^{1/2*}}{Re f_2^{1/2*}} \quad (5.6)$$

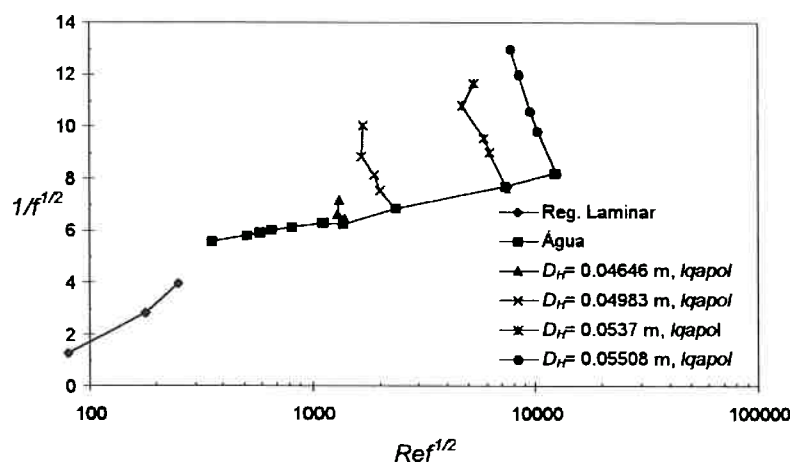
Em canais, não existe uma relação simples, devido à própria definição de diâmetro hidráulico. Em seguida faremos uma análise da relação entre o diâmetro hidráulico do escoamento e o início da redução de atrito a que é apresentada na figura (5.25).

Em ambos os polímeros se observa que com o incremento do  $D_H$  a redução de atrito começa com maiores valores de  $Re f^{1/2}$ .

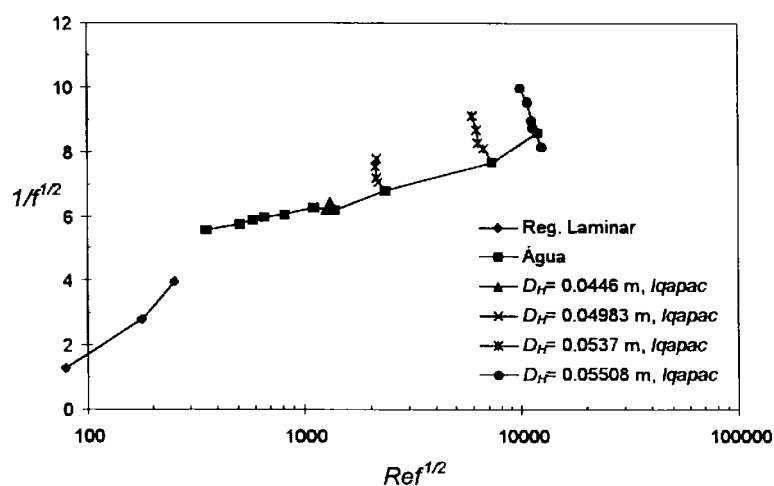
No presente trabalho a relação entre o  $D_H$  para diferentes valores do número de Reynolds, decresce menos rapidamente que a relação entre os respectivos valores de  $Re f^{1/2*}$ . Ou seja:

$$\frac{Re f^{1/2*} \Big|_{Re_0}}{Re f^{1/2*} \Big|_{Re_1}} \neq \frac{D_H \Big|_{Re_0}}{D_H \Big|_{Re_1}} \quad (5.7)$$

Observa-se também que para  $D_H$  aproximadamente equivalentes, o início da R.A. depende da concentração das soluções poliméricas. Isto explica o comportamento das curvas mostradas neste gráfico.



(a)



(b)

Figura (5.25) Relação entre o início da redução de atrito e o diâmetro hidráulico.

(a) *Iqapol*, (b) *Iqapac*.

#### 5.4 Redução de Atrito em Soluções Heterogêneas

Dentre as diferentes formas de se injetar a solução mãe ao solvente, neste trabalho foi utilizada a forma conhecida como *injeção de fio de polímero* que se caracteriza porque o polímero, altamente concentrado, é injetado na linha central do canal na direção do escoamento, sem que exista difusão total do polímero no escoamento.

Quando a solução mãe é injetada no escoamento de solvente, a redução de atrito local à jusante do injetor é uma função dos seguintes parâmetros:

$$\varphi = f\left(\frac{x}{D_H}, \text{Re}, \frac{d}{D_H}, P, \frac{u_p}{U}, C_{sm}\right) \quad (5.8)$$

Em seguida será realizada uma análise dos resultados obtidos tendo como base as condições estabelecidas na tabela (3.1).

Na análise da redução de atrito em soluções heterogêneas, é importante estudar o comportamento dos fios de polímeros à jusante do injetor. O método empregado para isto foi o da observação visual que não se mostrou altamente preciso pelo fato de ambos os escoamentos (de solvente e a solução mãe) apresentarem tonalidades muito semelhantes. Realizou-se apenas um ensaio de visualização, para cada polímero, utilizando corante azul. Estes testes foram realizados para: *Iqapol*;  $C_{sm} = 100$  ppm, *Iqapac*;  $C_{sm} = 1000$  ppm.

Ambos os polímeros tiveram comportamentos bem diferenciados. Estes critérios já foram, de certa forma, discutidos no item 3.1.2.1 embora achamos importante abordá-los novamente.

O *Iqapol*, quando altamente concentrado, apresenta uma aparência “fibrosa” devido a sua viscosidade. Para  $C_{sm} = 5000$  ppm o fio de polímero injetado apresentou pouca variação de seu diâmetro com o incremento da distância adimensionalizada  $x/D_H$ . Somente para  $x/D_H > 43$  o diâmetro do fio diminuiu aproximadamente à metade. Visualmente observou-se como um fio coerente com pouca tendência ao esfolamento.

Para as menores concentrações de polímero injetado a visualização não foi tão nítida, embora tenha sido possível de se observar o processo de difusão. Para  $C_{sm} = 1000$  ppm o fio não se conservou coerente por muito tempo, com nítida tendência a colapsar

em fio menores que se difundiram no escoamento. Este processo de colapso do fio, foi ficando mais intenso com a diminuição de  $C_{sm}$ . Por exemplo, para a menor concentração de solução mãe testada (100 ppm) e a partir de  $x/D_H > 15$ , foi muito difícil observar visualmente o fio.

O *Iqapac*, teve um comportamento totalmente diferente. Observou-se que o processo de difusão era muito rápido e que para distâncias  $x/D_H > 21$ , o polímero se dissolvia totalmente no solvente. Este comportamento ocorreu para todas as concentrações testadas sendo uma característica a destacar, que a difusão aumentava com a diminuição da concentração,  $C_{sm}$ . Estimamos que isto é devido às próprias características moleculares do polímero, conforme já discutido. Quando as soluções apresentam este tipo de comportamento, o método de injeção é chamado de *injeção difusiva* e as soluções podem ser consideradas aproximadamente homogêneas na seção de testes.

Portanto, quanto aos efeitos de se considerar a utilização de soluções heterogêneas será discutido somente o comportamento do *Iqapol*.

O método de visualização utilizado mostrou, para o *Iqapol*, e para todas as concentrações, que à jusante do injetor os fios começavam a oscilar com amplitudes que aumentavam com a diminuição de  $C_{sm}$ . Isto nos levou pensar que os fio interagem com os maiores turbilhões do escoamento o que ajuda ao processo de difusão. A intensidade deste fenômeno, mostrou-se dependente da concentração da solução mãe.

#### **5.4.1 Redução de Atrito Local**

A partir do comportamento dos fios de polímeros discutido acima, será analisado como isto deve refletir-se na redução da atrito local. Esta definição surge da própria



interpretação física das soluções heterogêneas.

A figura (5.26) mostra a variação da redução de atrito local com a distância à jusante do injetor para o *Iqapol*.

Ao serem injetados, os polímeros viajam à jusante difundindo-se, simetricamente, em toda a seção do canal. Devido a isto a concentração de polímeros na região de parede tendem a aumentar com o incremento da distância  $x/D_H$ , pelo que a redução de atrito também deve mostrar a mesma tendência. Se a distância for suficientemente grande o polímero chegaria a se difundir completamente no canal atingindo um valor assintótico o que corresponderia a um escoamento homogêneo.

Dos resultados discutidos até agora para soluções homogêneas, observou-se que as principais modificações na estrutura dos escoamentos turbulentos ocorrem na região de parede. Isto é importante para analisar os resultados da figura (5.26) que, aparentemente, são contraditórios. Obteve-se neste caso, que a redução de atrito aumenta com a diminuição da concentração da solução mãe.

A justificativa para este comportamento é a seguinte. Para  $C_{sm} = 5000$  ppm observou-se que existe pouca dispersão e o fio se mantém de forma coerente. Isso significa que só uma pequena porção de polímero está chegando à região de parede e consequentemente haverá pouca redução de atrito. Com a diminuição da concentração da solução mãe, esta vai-se tornando menos viscosa o que favorece o processo de difusão de polímero. Isto faz com que se incremente a presença de polímeros próximo da parede. Devido a isto a redução de atrito também deve aumentar. Para  $C_{sm} = 100$  ppm obtiveram-se os maiores valores de redução de atrito local. Estima-se que com a diminuição da concentração o polímero se difunde mais e melhor.

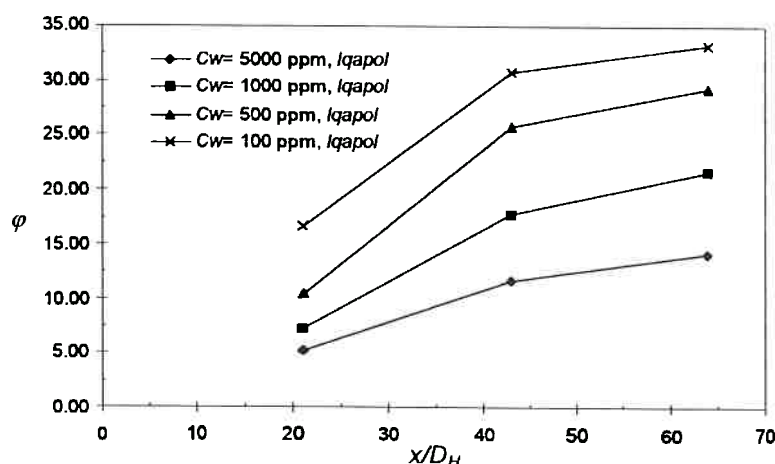


Figura (5.26) Variação da redução de atrito com o incremento da distância à jusante do injetor

Outro aspecto interessante pode ser observado na figura (5.27), que representa o perfil de intensidade turbulenta na direção axial para diferentes valores de  $C_{sm}$ .

Inicialmente se destaca que a intensidade turbulenta axial se incrementa devido à adição de polímeros, como ocorre também nas soluções homogêneas, embora aqui se inverte a relação com respeito à concentração.

O aspecto mais interessante nesta figura é que para  $Y^+ \approx 30 \div 40$ , os gráficos mudam seu comportamento. Como visto anteriormente, os polímeros ao se desprenderem do fio, se difundem na direção axial e começam a ocupar partes na região de parede provocando incrementos na  $RMS_{u'}$ , como pode ser visto na figura (5.27). Com o incremento de  $Y^+$  chega-se à região onde o polímero está em forma de fio. Como aqui a concentração é muito alta os incrementos na intensidade turbulenta são significativos. Para posições próximas da superfície livre o perfil volta à tendência inicial.

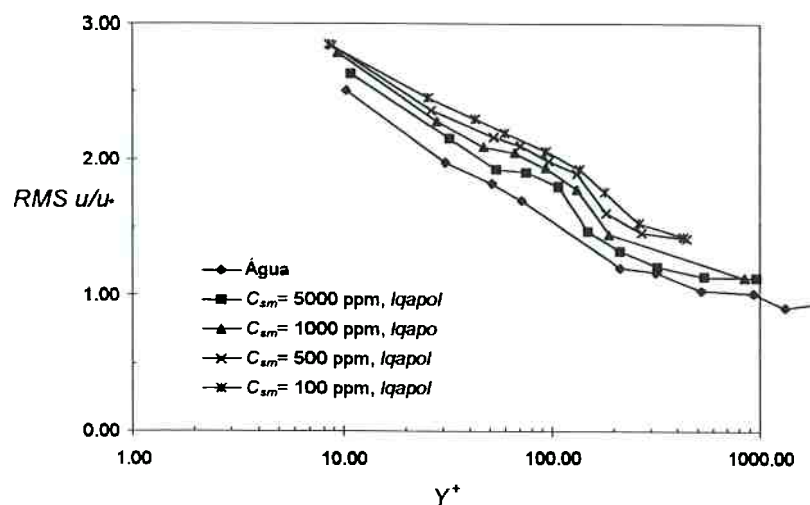


Figura (5.27) Perfil de intensidade turbulenta axial para soluções heterogêneas.

Isto, graficamente, pode ser interpretado da seguinte forma. Para  $C_{sm} = 5000$  ppm existe “uma barriginha” muito bem definida. Isto se corresponde com a região onde o polímero encontra-se na fase fio sem difusão. Com a diminuição da concentração e o aumento da difusão, a região que representa o polímero não difundido vai-se incrementando em correspondência com os aspectos acima discutidos, até que para  $C_{sm} = 100$  ppm o perfil de intensidade turbulenta apresenta uma forma que tende a ser semelhante, ao perfil de soluções homogêneas. Comportamentos semelhantes foram obtidos entre outros por Usui *et al* (1988).

Isto deve-se a que, para este valor de  $C_{sm}$ , a interação fio-escoamento é maior provocando que o esfolamento do polímero seja mais intenso.

A partir destes resultados, podemos obter as seguintes conclusões sobre a influência da injeção, no centro do canal, de soluções poliméricas altamente concentradas, sobre a turbulência.

A redução de atrito local se incrementa com a diminuição da concentração da solução mãe. A interação dos vórtices maiores do escoamento com o fio de polímero,

atua no sentido de difundir porções de polímeros que ao se separarem do fio, podem viajar para a região de parede. Esta interação pode ser vista pela existência de movimentos oscilatórios que se caracterizaram por aumentar sua amplitude com a diminuição da concentração da solução mãe.

Com o incremento da distância à jusante do injetor verificou-se maiores quantidades de polímeros na região de parede e equivalentemente maiores valores de  $\varphi$ . Portanto para que a redução de atrito ocorra o polímero deve estar na região da parede.

### ***5.5 Resultados da Análise Reológica das Soluções Poliméricas***

De acordo com a literatura, a maioria das soluções poliméricas podem exibir um comportamento de tipo pseudo-plástico (*shear thinning*). Isto é típico de fluidos cuja viscosidade varia (decrece) como o incremento da taxa de deformação. Em um gráfico  $\mu$  versus  $\dot{\gamma}$ , o comportamento das soluções poliméricas é o seguinte. Para baixos valores da taxa de deformação, a viscosidade resulta constante. Este valor da viscosidade (constante) a baixos valores de  $\dot{\gamma}$  é chamado de *zero-shear viscosity*. Com o incremento da taxa de deformação a viscosidade tende a decrescer, sendo esta diminuição mais pronunciada com o incremento da concentração.

Os resultados obtidos para as soluções estudadas se apresentam nas Figuras (5.28), para o *Iqapol* e (5.29) para o *Iqapac*.

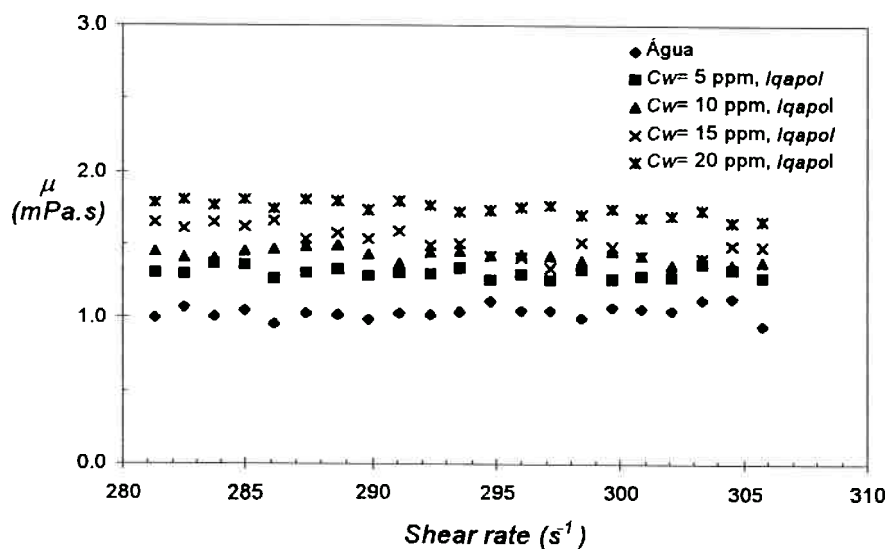


Figura (5.28) Relação entre a viscosidade,  $\mu$  e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) para soluções de *Iqapol* às concentrações de estudo.

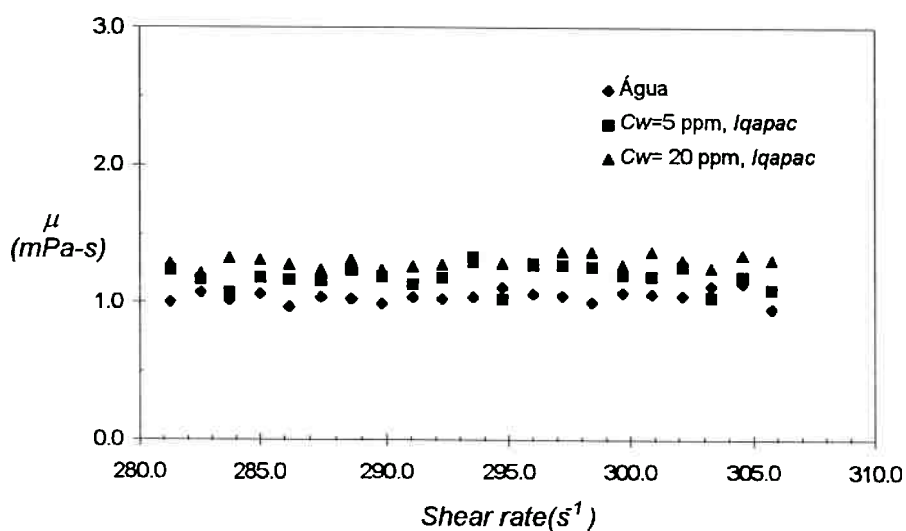


Figura (5.29) Relação entre a viscosidade,  $\mu$  e a taxa de deformação ( $\dot{\gamma}$ ) para soluções de *Iqapac* para  $C_w = 15$  e 20 ppm.

Para o caso do *Iqapac*, somente são representadas as curvas para as maiores concentrações (15 e 20 ppm) para maior clareza da análise.

Os aspectos mais significativos destas duas figuras são:

- Para as concentrações testadas não foi observado comportamento pseudoplástico, embora exista redução de atrito;
- Nos dois polímeros, a viscosidade não varia com o incremento da taxa de deformação, para as concentrações em estudo;
- As variações da viscosidade das soluções de *Iqapol*, com o incremento da concentração, podem ser diferenciadas com nitidez;
- O *Iqapac* não apresenta incrementos da viscosidade de forma apreciável.

Outro aspecto interessante a destacar é que, durante o preparo das soluções poliméricas, não foi observado o efeito Weissenberg, ou seja, sempre ocorreu uma depressão na superfície do fluido na região correspondente à haste do agitador. Deve ser lembrado que o efeito Weissenberg consiste em que o fluido sobe pela haste do agitador e é típico de fluidos não-Newtonianos.

A partir daqui pode-se concluir que:

- As soluções poliméricas, na faixa de concentração estudada, apresentam comportamento que pode ser considerado como Newtoniano. Isto pode ser visto por:
  - A viscosidade dinâmica não varia com o incremento da taxa de deformação (vide figuras (5.28) e (5.29));
  - Não ocorrência do efeito Weissenberg, típico de escoamentos não-Newtonianos, durante o preparo das soluções poliméricas.
- Das propriedades reológicas das soluções poliméricas, os efeitos viscosos, que se manifestam pelo incremento da viscosidade, parecem ser os que exercem influência na redução de atrito;
- A influência dos efeitos viscosos aumenta com o incremento da concentração e com o peso molecular dos polímeros.

### ***5.6 Considerações Finais***

Conforme observado a adição de polímeros a escoamentos turbulentos modifica significativamente a estrutura destes. Em seguida serão abordadas as principais teorias existentes sobre a redução de atrito. Pretende-se, a partir dos resultados apresentados neste capítulo, fazer uma avaliação no que diz respeito aos pontos coincidentes e discordantes sobre este fenômeno.

## ***CAPÍTULO 6***

---

### ***DISCUSSÃO DO MECANISMO DA REDUÇÃO DE ATRITO A PARTIR DOS RESULTADOS OBTIDOS NESTE TRABALHO***

Os estudos sobre redução de atrito por adição de polímeros se mantém hoje como um aspecto importante dentro das pesquisas sobre a turbulência, devido às vantagens econômicas resultantes das inúmeras aplicações práticas e por ser hoje um tema altamente polêmico.

O interesse sobre este tópico, revela-se nas próprias etapas que acompanham o desenvolvimento das pesquisas, desde seu descobrimento no final da década de 1940, e se reflete em freqüentes publicações em revistas especializadas, artigos “*reviews*” e em eventos internacionais dedicados exclusivamente a discutir os mais recentes avanços neste campo.

De forma geral o efeito dos polímeros pode ser analisado como resultado da interação das moléculas com o escoamento, e embora todas as teorias existentes que discutem a redução de atrito considerem esta premissa, existem contradições tendo em vista as evidências experimentais.

No sentido de tentar responder a estas contradições, analisam-se a seguir, à luz dos resultados aqui obtidos, as principais hipóteses teórica-experimentais.

#### ***6.1 Análise Reológica***

Embora não tenha sido objetivo deste trabalho, resumem-se a seguir, as principais evidências do mecanismo da redução de atrito, considerando as modificações na



configuração das moléculas de polímeros.

Talvez o elemento de maior consenso dentre as teorias sobre o comportamento reológico das soluções poliméricas é que as moléculas de polímero se estendam em regiões onde a taxa de deformação predomine sobre a vorticidade. Ao mesmo tempo as moléculas se orientam, alinhando-se na direção do escoamento o que provoca diferentes modificações na estrutura do fluido.

A característica básica destas pesquisas, devido à complexidade de se caracterizar experimentalmente as propriedades reológicas das soluções poliméricas, é que a maioria dos trabalhos são desenvolvidos através de modelagem numérica. A grande vantagem da modelagem numérica é que dá a possibilidade de analisar separadamente as propriedades de interesse, isolando-as umas das outras. As desvantagens estão associadas a modelagem numérica da turbulência em escoamentos Newtonianos e a dificuldade de se definir corretamente as equações constitutivas para considerar a presença no escoamento das moléculas de polímeros.

Alguns aspectos da análise reológica parecem contraditórios. Dentre estes aspectos pode-se relacionar a influência dos efeitos viscosos e elásticos que serão discutidos a seguir.

### ***6.1.1 Influência dos Efeitos Viscosos***

A importância dos efeitos viscosos sobre a redução de atrito, tem sido comprovada tanto em trabalhos de tipo experimental, quanto em trabalhos de modelagem numérica.

O primeiro a propor que o incremento local da viscosidade das soluções poliméricas era o responsável pela redução de atrito foi Lumley (vide Cap. 2). Porém,

Toonder den (1995) utilizando um modelo que previa o incremento local da viscosidade determinou que, embora importante, este efeito por si só não era suficiente para produzir a diminuição de  $f$ . A limitação básica destes trabalhos é que nenhum dos dois consideram os efeitos da orientação das moléculas sobre a estrutura do escoamento: surgimento de tensões anisotrópicas.

Já em 1973, Landahl tinha investigado a influência de diferentes modelos constitutivos sobre a estabilidade de um modelo de escoamento turbulento simples. Seus resultados mostraram que, ao se considerar na modelagem efeitos moderados de elasticidade, o modelo de escoamento mostrou-se desestabilizado. Porém quando modelou a molécula como estando esticada e alinhada na direção de escoamento médio, encontrou um forte efeito de estabilização. A partir destes resultados, Landahl propôs que, para escoamentos redutores de atrito, os efeitos anisotrópicos causados pelo alinhamento da molécula esticada são mais importantes que os efeitos elásticos.

Estes resultados foram, experimentalmente, confirmados por Virk & Vagger (1990), Sasaki (1991-1992) e Toonder den (1997) através da modelagem.

Como resultado destes trabalhos, acredita-se que a redução de atrito pode ser uma resposta anisotrópica do escoamento a um campo de viscosidade anisotrópico induzido pelas moléculas de polímeros esticadas.

### ***6.1.2. Influência dos Efeitos Elásticos***

Os principais trabalhos que defendem o mecanismo elástico para a redução de atrito são os de Gennes de (1990) e Joseph (1990). Dentre suas considerações estão que, mesmo suficientemente diluídas, as soluções poliméricas podem ser consideradas como fluidos viscoelásticos. Neste tipo de fluido, a viscosidade cuida da difusão e da

suavização das descontinuidades do cisalhamento, enquanto que a elasticidade é capaz de propagá-las. Além disso, em escoamentos puramente viscosos, as tensões e a taxa de deformação são proporcionais o que não ocorre em escoamentos viscoelásticos, devido à capacidade dos polímeros de poder armazenar energia elástica.

Outro aspecto importante nesta análise é que, segundo Gennes de, em soluções poliméricas a velocidade característica das descontinuidades do cisalhamento fornecem um limite para velocidades cujas flutuações tem uma alta frequência (maiores que o recíproco da escala de tempo que caracteriza a elasticidade dos polímeros). Este limite é muito importante para a faixa de flutuações típicas de escoamentos redutores de atrito, já que provoca a supressão dos menores turbilhões (dissipação viscosa a menores frequências), impedindo o desenvolvimento da cascata de energia.

As grandes limitações às teorias elásticas podem ser resumidas a seguir:

- Não são capazes de explicar a dinâmica da turbulência de parede nem o impacto dos efeitos elásticos no campo de velocidades;
- Experimentalmente, requerem equipamentos reológicos que descrevem as propriedades elásticas das soluções poliméricas. Nos reômetros convencionais isto não é possível, pois são necessárias modificações nestes instrumentos, geralmente caras, o que faz com que poucos trabalhos façam esta abordagem.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e dos aspectos acima analisados, estima-se que são, efetivamente, os efeitos viscosos que provocam a redução de atrito. Deve-se observar, porém, que não foi possível, na presente pesquisa, determinar experimentalmente até que ponto os efeitos elásticos tem influência, tendo em vista as limitações de tipo instrumental. Finalmente, um aspecto importante que reforça esta conclusão, é que vários trabalhos destacam que, nem todos os escoamentos redutores de

atrito são viscoelásticos, ou nem todos os fluidos viscoelásticos reduzem o atrito. Por exemplo, soluções aquosas de ácido poliacrílico de Carbopol, podem ser consideradas viscoelásticas embora não reduzam atrito.

### ***6.2 Análise das Modificações na Estrutura da Turbulência por Adição de Polímeros***

Os resultados obtidos confirmam a redução de atrito como um fenômeno de parede. Ou seja, as principais modificações ocorrem para  $Y^+ < 100$ . Os resultados deste trabalho mostram claramente que a adição de polímeros exerce influência na região da S.C.I. ( $10 < Y^+ < 70$ ), embora não fica claro se esta influência atinge a S.C.V. Portanto as informações deste trabalho conduzem à conclusão de que o polímero atua na região da parede.

Conforme expresso anteriormente, a justificativa para explicar a redução de atrito, via modificações na região de parede, indica mudanças no balanço de energia, sendo os processos de produção e dissipação, modificados.

Kostic (1994) resume como duas as possíveis teorias para explicar a redução de atrito, a diminuição dos processos de produção e de dissipação de energia. No primeiro caso, destaca que a adição de polímeros interfere no processo de produção de energia cinética turbulenta, independentemente do comportamento do processo de dissipação, causando uma redução da turbulência.

No segundo caso destaca que a adição de polímeros diminui o processo dissipativo, através dos turbilhões menos energéticos, em uma magnitude equivalente à redução de atrito.

A análise do processo de produção mostra-se relativamente polêmica na literatura. Por exemplo, Tsinober (1990) [apud Gyr & Bewersdorff (1995)], estimou que

a redução de atrito pode não estar associada à redução da intensidade turbulenta, portanto não será necessário suprimir a turbulência ou sua produção. Daqui propõe que a adição de polímeros resulta na alteração da estrutura dos escoamentos turbulentos, através da redução da taxa de dissipação.

Esta suposta independência entre os processos de produção e dissipação pode ser questionada a partir dos resultados deste trabalho. Se conforme a hipótese de equilíbrio a taxa à qual os maiores turbilhões transferem energia aos menores turbilhões deve ser igual à taxa em que esta é dissipada, a diminuição de  $\varepsilon$  quando da adição de polímeros (que é de consenso geral), levará necessariamente a modificações no processo de produção.

Os resultados experimentais aqui discutidos mostram que, embora foi considerado que a escala integral de comprimento dos maiores turbilhões não muda, o processo de produção é atenuado. A diminuição de  $P$  indica que o polímero atua no sentido de amortecer a retirada de energia do escoamento médio para as flutuações turbulentas.

Por outro lado, também experimentalmente, foi obtido que a taxa de dissipação diminui para as soluções poliméricas, de forma tal que as menores escalas ocorrem para maiores valores de  $k\omega$ . Daqui conclui-se que a transferência de energia dos maiores para os menores turbilhões se desenvolve em uma menor faixa de número de onda.

Ao analisar o espectro de potência na região correspondente aos maiores turbilhões, se observa que os parâmetros principais são aqueles que descrevem a transferência de energia do escoamento médio para as flutuações e a transferência de energia dos maiores para os menores turbilhões. As flutuações turbulentas recebem energia da taxa de deformação,  $S$ , do escoamento médio e a transfere às menores escalas

a uma taxa  $\varepsilon$ . A taxa de deformação do escoamento médio pode ser definida como sendo da ordem de  $S=U/L$  e  $\varepsilon$  conforme equação (4.10). O fato observado da diminuição do processo de produção é consequência de uma diminuição da taxa de deformação, que indica que foi alterada a transferência de energia do escoamento médio para as flutuações turbulentas devido à adição de polímeros. Por sua vez, as variações nas escalas de Kolmogorov podem ser interpretadas como um amortecimento da transferência de energia entre as escalas do escoamento turbulento.

Ou seja, para escoamentos redutores de atrito, os espectros de potência, apresentam uma forma gráfica e uma interpretação diferentes. Se caracterizam por não ter região inercial, no sentido da teoria de Kolmogorov, existe uma maior relação entre os processos de produção e de dissipação, a partir da qual se observa que aumenta a influência das escalas menos energéticas quando comparadas com as escalas integrais. Estas modificações, em geral, explicam como se modifica a cascata de energia em escoamentos redutores de atrito.

Os espectros de potência obtidos para os diferentes polímeros, apresentam tendências similares à da literatura. Para a componente axial da velocidade existe uma redistribuição das altas para as baixas frequências, levando a modificações nas escalas de Kolmogorov (que depende da concentração), aspecto este também, de consenso na literatura.

Finalmente destaca-se que as variações de  $\varepsilon$  não se correspondem com a diminuição equivalente da redução de atrito, como foi cogitado por vários pesquisadores [apud Kostic (1994)].

### **6.3 Mecanismo de Redução de Atrito em Soluções Heterogêneas**

O termo Redução de Atrito em Soluções Heterogêneas (ou também conhecido como Redução de Atrito em Soluções Não-Homogêneas) é normalmente utilizado em sistemas onde ocorre injeção de uma solução altamente concentrada, a solução mãe, em forma de fio no escoamento de solvente. A importância do estudo deste tipo de escoamento, deve-se às aplicações industriais da adição de polímeros, onde este é injetado em estações construídas para estes fins e conseqüentemente, é necessário determinar onde o processo de injeção é mais eficiente (através de fendas ou na região central do escoamento).

Nos últimos anos a literatura registra vários estudos que abordam as principais dependências de escoamentos heterogêneos, sobre a redução de atrito: diâmetro da tubulação e/ou diâmetro hidráulico do canal, geometria do injetor, lugar de injeção, tipo de polímero etc.

Existem, fundamentalmente, duas teorias para explicar a redução de atrito em soluções heterogêneas. A primeira considera que a redução de arrasto é causada pela interação direta do fio de polímero com o escoamento, sendo que o efeito do fio só é possível se este permanece em forma compacta.

A segunda teoria está baseada no processo de dispersão do polímero, que se difunde até ocupar a região de parede, provocando a redução de atrito.

Os principais argumentos que sustentam a primeira teoria são discutidos em Bewersdorff *et al* (1993). A partir de uma ampla análise sobre os vários fatores que podem influenciar na redução de atrito em soluções heterogêneas, demonstraram que esta pode, ser causada pela interação do fio de polímero injetado com a turbulência. A experiência que demonstrou isto, consistiu em injetar água na região de parede de um

escoamento com injeção no eixo da tubulação, com o objetivo de modificar a concentração do fluido nesta região. A taxa de injeção variou entre 5-10% da vazão principal no sistema. Como resultado obtiveram que a relação  $f$  versus  $Re$  não se alterou quando comparada com o mesmo sistema sem injeção de água. Segundo estes autores, outro mecanismo, que não a presença de polímeros na região de parede, deve modificar a estrutura da turbulência e provocar redução de atrito.

Embora não apresentam elementos que justifiquem este comportamento, os autores especulam que deve existir algum tipo de mecanismo que provoque a supressão das tensões de Reynolds na região do núcleo turbulento.

Virk (1990) [apud Bewersdorff *et al* (1993)] propõe um mecanismo a partir do qual a redução de atrito é produto da combinação das duas teorias acima definidas. Virk estima que uma parte do polímero se separa do fio e permanece na região do núcleo turbulento e que é este polímero dissolvido quem produz o efeito sobre a turbulência, mesmo que não consiga alcançar a região de parede.

A maior limitação a esta teoria é que ainda não foi possível explicar o mecanismo físico da interação entre o fio de polímero e a turbulência e sua influência sobre a redução de atrito.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e outros da literatura (Smith & Tiederman (1991), Saadeh & Strehlow (1993)) se considera que a teoria que explica satisfatoriamente a redução de atrito para este tipo de soluções é a difusão de polímero, a partir do fio injetado, até ocupar a região de parede. Em função disto se propõe o seguinte mecanismo para explicar este fenômeno.

O polímero ao ser injetado no escoamento (em forma de fio) começa a interagir com a turbulência, via maiores vórtices do escoamento. Este processo pode ser visto



através de um movimento sinuoso do fio, cuja amplitude se incrementa com o aumento da distância axial (para concentração constante) e/ou com a diminuição da concentração da solução injetada. Esta interação constitui um elemento essencial para a difusão do polímero, de forma simétrica, na seção do canal. Devido a isto, com o aumento de  $x/D_H$ , a presença de polímero na região de parede se incrementa e conseqüentemente a redução de atrito (vide figura 5.26).

Nesta análise se considera essencial para a ocorrência da redução de atrito o comportamento do fio de polímero altamente concentrado. Quando a concentração é muito alta o fio se comporta de forma coerente com pouca tendência a colapsar, com taxas de misturas fio-solvente muito pequenas pelo que não é de se esperar significativa redução de atrito.

Com a diminuição da concentração muda a viscosidade da solução mãe. Devido a isto, aumenta a tendência do fio a colapsar numa grande quantidade de fios menores, provocando um incremento das taxas de mistura e de difusão do polímero. As conseqüências deste comportamento são: maior presença de polímero na região de parede, incremento da redução de atrito e amortecimento do processo de transferência de quantidade de movimento devido à supressão das flutuações de velocidade na direção transversal.

Também é importante de se observar que, independentemente da concentração, para distâncias muito grandes à jusante do injetor a redução de atrito tenderá a um valor assintótico, com um comportamento semelhante ao das soluções homogêneas.

No mecanismo aqui proposto, o fio de polímero pode ser considerado importante, apenas como um meio eficiente para a “entrega” de polímero à região de parede.

Finalmente pode-se fazer uma analogia entre o mecanismo da redução de atrito de soluções heterogêneas, de acordo com as teorias acima discutidas, com o debate sobre a região principal na produção de turbulência. Existem fundamentalmente duas hipóteses sobre a origem da turbulência de parede. Uma estabelece que o núcleo turbulento governa a região de parede. A outra hipótese consiste em que as instabilidades típicas da região de parede são responsáveis pela estrutura da turbulência. Estudos recentes tem indicado que aproximadamente 80% da turbulência em escoamentos Newtonianos, resulta de mecanismos típicos da região de parede. Para soluções poliméricas não homogêneas, os resultados aqui obtidos, demonstram que a estrutura da turbulência é modificada somente quando o polímero atinge a região de parede o que enfatiza a importância desta região.

#### ***6.4 Mecanismo da Redução de Atrito em Soluções Homogêneas***

A essência dos resultados apresentados no Capítulo 5, foi discutir o efeito dos polímeros sobre a estrutura turbulenta, quando consideradas as soluções homogêneas. Portanto considera-se oportuno analisar, macroscopicamente, o comportamento destas soluções, lembrando que são tecnologicamente importantes, no processo de redução de atrito, conforme citado na Capítulo 1.

##### ***6.4.1. Aspectos Gerais da Redução de Atrito***

A essência da definição da redução de atrito por adição de polímeros pode ser explicada da seguinte forma: um escoamento turbulento de soluções poliméricas precisa de uma menor energia quando comparado com o escoamento turbulento do solvente puro. Isto significa que, para um mesmo gradiente de pressões ao longo de um sistema

(tubulação ou canal) poder-se-ia aumentar a vazão ou mantendo a vazão constante poder-se-ia diminuir o consumo de energia.

A redução de atrito por adição de polímeros depende de vários fatores, sendo que os mais importantes são: tipo de polímero, concentração das soluções poliméricas, características geométricas dos sistemas etc. Conforme discutido, este é um fenômeno típico de escoamentos turbulentos, com um comportamento que pode ser explicado a partir da figura (6.1).

Na figura (6.1), na região onde  $Re < 10^4$ , independentemente dos parâmetros poliméricos, não existe efeito redutor de arrasto das soluções poliméricas. Nesta região ocorrem os seguintes regimes:

- Regime laminar ( $Re < 2300$ );
- Regime de transição do escoamento laminar para turbulento;
- Regime turbulento sem redução de atrito.

A partir do ponto *A* (início da redução de atrito), as curvas das soluções poliméricas começam a se afastar da curva de Prandtl-Kármán, entrando o escoamento na região polimérica que está caracterizada pelos seguintes regimes:

- Regime turbulento com redução de atrito: O comportamento das soluções poliméricas, conforme acima descrito, depende de parâmetros tais como: concentração, peso molecular, solvatação (associação molecular soluto-solvente) etc. Para um mesmo polímero, com o aumento de  $C_w$  o afastamento das curvas é maior. Para polímeros de diferente peso molecular e igual concentração, a curva correspondente ao polímero de maior peso molecular está mais afastada da curva do solvente.

- Regime turbulento com redução de atrito, independentemente dos parâmetros poliméricos: Quando o escoamento alcança o ponto *B*, na figura (6.1), o fenômeno em estudo é limitado por um valor que é independente dos parâmetros poliméricos, ou seja, incrementos dos valores da concentração não conseguem mais melhorar o desempenho dos polímeros. Este limite é conhecido na literatura como Assíntota de Máxima Redução de Atrito (A.M.R.A).

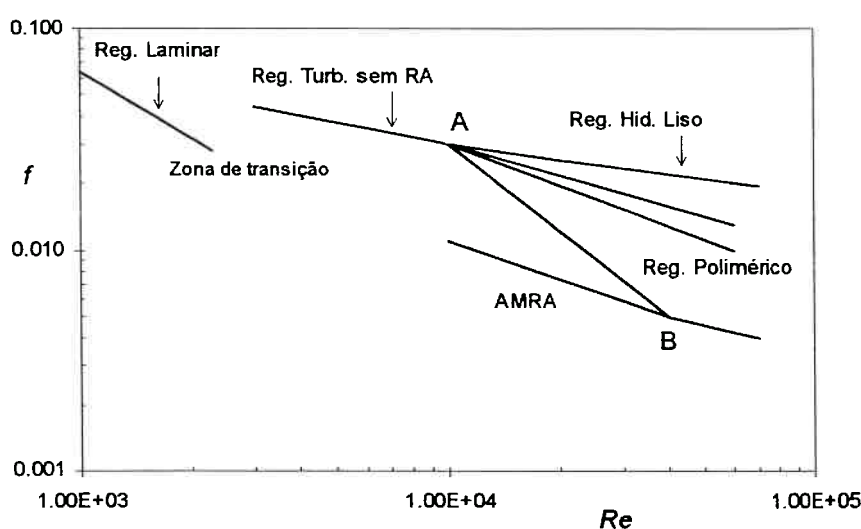


Figura (6.1) Regiões típicas de um escoamento de soluções poliméricas

Um aspecto importante é aquele que se refere ao início da redução de atrito, ponto *A*. A figura (6.1) mostra que até este ponto, o coeficiente de perda de carga  $f$  para soluções poliméricas acompanha a curva do solvente. Foi demonstrado neste trabalho que, a partir do ponto (*A*), que é quando estão criadas as condições para que a redução de atrito comece a se manifestar, incrementos da concentração conduzem a uma diminuição da tensão de parede,  $\tau_0^*$  e conseqüentemente  $f$  segue uma tendência de se afastar do comportamento tipicamente Newtoniano, entrando na região polimérica.

As principais dependências obtidas neste trabalho, que relacionam o início da redução de atrito com os parâmetros estudados são resumidas a seguir:

Quando o diâmetro hidráulico,  $D_H$  aumenta a redução de atrito se inicia para maiores valores de  $Re$ , não existindo uma relação definida entre valores de  $D_H$  e seus respectivos valores de  $Re f^{1/2}$ . Com o incremento da concentração e do peso molecular dos polímeros, o início da redução de atrito, ocorre para menores valores da tensão de cisalhamento da parede. Este comportamento pode ser visto nas figuras (5.23), (5.24) e (5.25).

#### **6.4.2 Aspectos fenomenológicos da Redução de Atrito**

A região próxima da parede está dominada por eventos intermitentes que realizam grandes contribuições à produção de energia cinética turbulenta. Na análise das estruturas que estão relacionadas a estas regiões de alta produção de turbulência, se observa a existência de sistemas vorticais, do tipo ferradura.

Os vórtices ferradura estão relacionados à estrutura de estrias típica desta região, sendo que, pela sua própria distribuição espacial, as estrias de alta e baixa velocidades estão separadas por estes vórtices. Ambas, por sua vez, se relacionam com o fenômeno de esticamento de vórtices. A relação entre a estrutura de estrias, o processo de erupção e o fenômeno de esticamento de vórtices é apresentada, com certa abrangência, nos itens 2.2.1 e 5.2.6, passando-se a analisar diretamente o efeito dos polímeros sobre a estrutura da turbulência.

Baseado em Lumley (1969), as soluções poliméricas provocam alterações no processo de esticamento molecular que inibe a formação da estria, sendo desta forma o modificado o processo de erupções destas estrias, conforme discutido anteriormente.

Portanto a somatória destes dois efeitos conduzem a modificações na estrutura de estrias, sendo as mais importantes: o incremento do espaçamento transversal da estria,  $\lambda$ , o aumento do tempo entre duas erupções consecutivas, ou seja, a diminuição da frequência entre erupções.

O fato de  $T_B$  aumentar, indica uma maior estabilidade da estria. Isto pode ser explicado pelo surgimento de regiões que são, localmente, mais viscosas e que atuam no sentido de amortecer as perturbações, controlando o processo de erupções.

A estabilização da estrutura de estrias significa que os processos de transferência entre as regiões de parede e externa são amortecidos. Isto tem reflexo nos processos de produção e dissipação e pode ser analisado a partir dos resultados dos espectros de potência e das escalas de turbulência, apresentados neste trabalho.

Para soluções poliméricas, os processos de produção e dissipação diminuem. A diminuição de  $\varepsilon$  implica que a energia contida nas menores escalas diminua, sendo esta redistribuída nos turbilhões mais energéticos. Este comportamento pressupõe uma forma diferente de interpretar os espectros de potência. A não existência de uma região inercial, conforme definido pela teoria de Kolmogorov para escoamentos Newtonianos, indica mudanças na cascata de energia, que é “encurtada”, sendo esta modificação maior com o incremento da concentração. Isto é ilustrado nas figuras (5.12), (5.13), (5.14) e (5.18).

Como consequência disto, as escalas de Kolmogorov variam. Os resultados mostram que a relação entre as escalas de comprimento,  $\mathcal{L}/l_k$  diminui o que significa uma maior proximidade entre as regiões de produção e dissipação. A relação entre as escalas de velocidade,  $\mathcal{U}/u_k$  também diminui o que representa que se está transferindo menos energia dos maiores para os menores turbilhões, (vide tabelas (5.5) e (5.6)). Estas variações ocorrem como esperado para  $Y^* < 100$ . Já os resultados para valores de  $y$

correspondentes à metade da altura da lâmina d'água não mostram qualquer influência dos polímeros sobre os processos de transferência, (vide tabelas (5.8) e (5.9)).

O fato de que as modificações na estrutura da turbulência, ocorram nitidamente na região da S.C.I., oferece subsídios para estimar que a S.C.V. tem um papel passivo na redução de atrito.

Os aspectos mencionados anteriormente, fundamentalmente no que diz respeito às modificações dos processos de produção, transferência e dissipação de energia turbulenta, mostram que a adição de polímeros provoca uma importante perda na correlação entre as componentes flutuantes da velocidade  $u'$  e  $v'$ , induzindo a um processo de anisotropia entre as mesmas.

Considerando-se a importância do processo de anisotropia na redução de atrito, poder-se-ia formular neste momento a seguinte pergunta: Qual seria o escoamento de solução polimérica mais eficiente na redução de atrito?

Uma tentativa de responder esta pergunta está representada na figura (6.2). Nesta figura estão representadas as curvas que limitam o efeito dos polímeros sobre o escoamento. O limite superior,  $\varphi$  máximo, que é a Assíntota de Máxima Redução de Atrito e o limite inferior,  $\varphi=0$  constituída pela equação de Prandtl-Kármán. Incluem-se também a curva para regime laminar e seu prolongamento para altos valores do número de Reynolds que será identificada como regime laminar estendido (R.L.E), e que corresponde a uma região hipotética, que tende a ficar próxima da A.M.R.A.

Para um escoamento bi-dimensional, a quantidade de movimento devido às flutuações da velocidade pode ser determinada pelas tensões de Reynolds, da seguinte forma:

$$\tau = -\rho \overline{u'v'} \quad (6.1)$$

Conforme analisado, o comportamento das componentes flutuantes da velocidade depende da concentração das soluções poliméricas. Com o incremento da concentração, a perda na correlação entre  $u'$  e  $v'$  se acentua até que, para determinado valor de  $Cw$  o produto  $u'v'$  atinge um valor mínimo que deverá coincidir com a situação de A.M.R.A. Em outras palavras ocorre a supressão das tensões de Reynolds. Esta diminuição, evidentemente, não pode alcançar a “*máxima redução de atrito possível*” (100%) que corresponderia ao R.L.E., já que nenhum polímero, ou aditivo em geral, pode suprimir totalmente as instabilidades dos escoamentos turbulentos para altos valores do número de Reynolds. Isto deve-se a que, mesmo que os polímeros modifiquem os processos dissipativos, via turbilhões menos energéticos, os turbilhões mais energéticos não são sensivelmente afetados. Este comportamento justifica, por um lado, a capacidade dos polímeros de reduzir atrito e por outro lado, a existência de turbulência em escoamentos redutores de atrito e a impossibilidade de se obter o R.L.E.

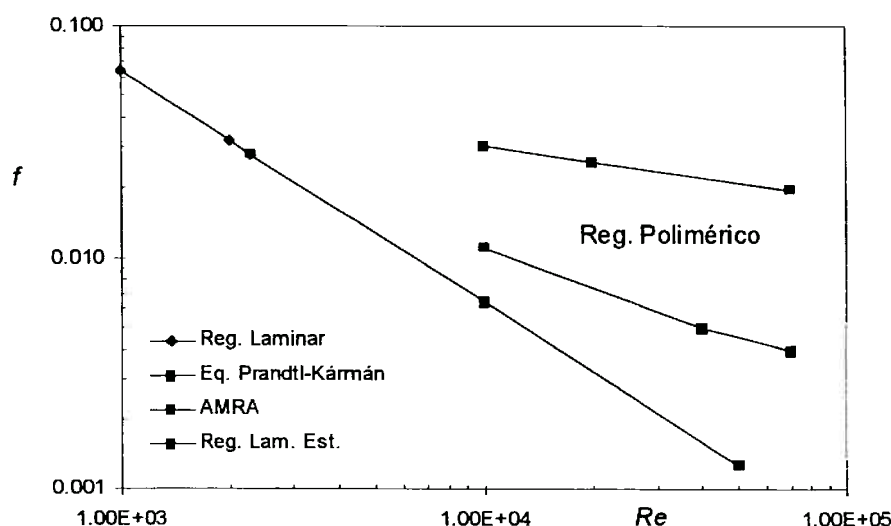


Figura (6.2) Relação  $f$  versus  $Re$  para uma situação hipotética do escoamento



Portanto, teoricamente, o escoamento mais eficiente seria aquele no qual as tensões de Reynolds fossem totalmente suprimidas. Daqui conclui-se que, no limite, o escoamento mais eficiente seria um escoamento tendendo a laminar, independentemente do valor do número de Reynolds, e para o qual o coeficiente de perda de carga,  $f$  seria o menor possível e resultante basicamente, do atrito viscoso.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho observa-se que existe uma série de modificações na estrutura turbulenta, quando comparados com o solvente como: incrementos na intensidade turbulenta da componente axial e diminuição da normal, amortecimentos do processo de produção de energia cinética turbulenta e das tensões de Reynolds, estabilização na S.C.V, alterações nas propriedades reológicas das soluções poliméricas que mostram que os efeitos viscosos aumentam sua influência para posições mais afastadas da parede, entre outras. Todas estas alterações fazem com que os escoamentos “consumam” menos energia para cumprir a sua principal função que é escoar uma determinada vazão. Esta diminuição do consumo de energia, tem sua expressão macroscópica na diminuição do gradiente de energia com consequência direta na diminuição, constatada, no coeficiente de perda de carga,  $f$ .

Finalmente, estima-se que o grande desafio que se impõe a análise contida neste trabalho deveria ser a busca do aditivo mais eficiente (possivelmente artificial) que possa transformar, no limite, os escoamentos turbulentos em escoamentos sem turbulência, independentemente do número de Reynolds. Pode-se, portanto interpretar a influência da adição de polímeros sobre a estrutura da turbulência, como uma tendência à supressão parcial da turbulência.

## CAPÍTULO 7

---

### CONCLUSÕES

No presente trabalho desenvolveu-se um estudo experimental para determinar as modificações na estrutura da turbulência quando da adição de polímeros. As medições foram feitas utilizando um anemômetro laser 1D em um escoamento desenvolvido em canal, utilizando polímeros de alto e baixo peso molecular.

Os resultados confirmam a redução de atrito como um fenômeno de parede, devido às modificações da estrutura da turbulência que ocorrem na região em que  $Y^+ < 100$ .

A redução de atrito mostrou-se dependente do tipo de polímero, da sua concentração e do regime do escoamento. Para o Iqapol, polímero de alto peso molecular, o coeficiente de eficiência da redução de atrito,  $\varphi$  foi da ordem de 60% para  $C_w = 20$  ppm e  $Re \approx 10^5$ . No caso do Iqapac, de baixo peso molecular, estas magnitudes foram menores, com valores de aproximadamente 30% para a concentração e número de Reynolds acima indicados. Este resultado mostra que, também os polímeros de baixo peso molecular, podem alterar a estrutura da turbulência, aspecto este relativamente controverso na literatura.

A adição de polímeros modifica o perfil de velocidade adimensionalizado, embora de forma diferente em função do peso molecular dos polímeros. Para o Iqapol, os perfis apresentam declividades maiores e o termo que representa o deslocamento com respeito ao solvente,  $\Delta B$ , tende a ser de sinal negativo. Devido a isto, este polímero deve alcançar a AMRA para valores de concentração,  $C_w$  não muito elevados. Para o Iqapac o perfil

tende a se deslocar paralelamente à lei logarítmica para o solvente, indicando menor capacidade para reduzir atrito.

O início da redução de arrasto continua a ser um aspecto importante. Conforme a literatura, este ocorre na faixa de  $Re \approx 10^4$ . Várias foram as dependências estudadas: diâmetro hidráulico, concentração e peso molecular.

Em um gráfico de coordenadas Prandtl-Kármán, a redução de atrito se inicia quando a curva das soluções poliméricas se interceptam com a de solvente, sendo a declividade,  $\delta$ , que é função da concentração, um parâmetro que pode ser utilizado como indicador de redução de atrito. A relação entre  $\delta$  e  $Cw$ , para ambos os polímeros, tem a forma  $\delta/Cw^{1/2}$ , que coincide com outros resultados da literatura [apud Virk *et al* (1967)].

Com o incremento do diâmetro hidráulico a redução de atrito se inicia para menores valores de  $Re_f^{1/2}$ , sendo que não existe uma relação entre  $D_H$  e  $Re_f^{1/2}$  (equação (5.6)), como ocorre para tubulações circulares.

Para  $D_H$  da mesma ordem o início da redução de atrito depende da concentração e do peso molecular. Com o incremento deste, observou-se que o polímero começa a ser efetivo para menores valores de  $Re_f^{1/2}$ .

A redução de atrito de solução heterogênea, estudada através da injeção da solução mãe no centro do canal, apresentou comportamentos interessantes. Para soluções muito concentradas (5000 ppm) o fio de polímero apresenta um movimento sinuoso, cujas amplitudes se incrementaram com o aumento da relação  $x/D_H$ . Pela sua alta viscosidade estas apresentaram pouca difusão e conseqüentemente menores valores de  $\varphi$ . Com a diminuição da concentração, estes movimentos sinuosos aumentaram de amplitude e ocorreram mais próximos do ponto de injeção. Devido a isto, a interação fio-turbulência atua no sentido de aumentar a difusão de polímero na seção transversal

do canal, e com isto a quantidade de polímero na região de parede, efeito este que, pode ser visto pelo incremento da redução de atrito.

Uma análise reológica simplificada foi feita no sentido de estimar algumas características reológicas das soluções poliméricas. Estas se comportaram como escoamentos Newtonianos, o que verificado por duas vias. A primeira no gráfico de  $\mu$  versus  $\dot{\gamma}$  que mostrou que  $\mu$  não varia com o incremento da taxa de deformação. A segunda, durante o preparo das soluções quando não foi observado o efeito Weissenberg, típico de escoamentos não-Newtonianos.

No trabalho aqui apresentado mostrou-se que, na ocorrência de redução de atrito, é mais importante a influência de efeitos viscosos do que a dos efeitos elásticos.

Pela primeira vez em escoamentos redutores de atrito foi aplicado o princípio de máxima entropia (PME), através do qual foi possível avaliar o parâmetro de entropia  $M$  que está relacionado ao grau de turbulência do escoamento. Os perfis obtidos pelo PME apresentam boa coincidência com os perfis experimentais o que permitiu a comparação de  $M$  para ambos os escoamentos. Para as soluções poliméricas,  $M$  é menor quando comparados com a água, sendo que a diminuição é mais significativa com o incremento de  $C_w$ . Pelas suas características, este parâmetro poderia também ser considerado para caracterizar a redução de atrito.

A análise das modificações na estrutura turbulenta mostra que:

- A intensidade turbulenta axial aumenta. Os incrementos são mais significativos com o aumento de  $C_w$  e ocorrem principalmente para  $Y^+ < 300-400$ . A partir deste valor as curvas tendem a coincidir. Os máximos valores de  $RMS_u$  ocorrem em regiões mais afastadas da parede, indicando variações na produção de energia turbulenta;

- Muito pouco estudados na literatura, os momentos de ordem superior (Curtose e Assimetria) foram analisados neste trabalho. Embora tenha observado modificações, os resultados não são muito conclusivos;
- As tensões de Reynolds são amortecidas e seus valores máximos, também se afastam da parede. Este comportamento se acentua com o incremento de  $C_w$ . Isto significa que a viscosidade é mais efetiva em pontos mais afastados de parede. Em alguns ensaios foram obtidos valores negativos das tensões de Reynolds, em pontos na S.C.V.;
- Conforme a literatura, é de consenso geral que a adição de polímeros provoca um amortecimento da componente flutuante normal,  $v'$ , o que junto ao comportamento da componente  $u'$  indica uma tendência à anisotropia em escoamentos redutores de atrito. Esta perda de correlação entre as componentes da velocidade induzem a diminuições nos processos de transferência de energia;
- A adição de polímeros provoca um efeito estabilizador na estrutura de estrias diminuindo a frequência das erupções, processo este responsável pela produção de turbulência. Desta forma o processo de produção é menos intenso;
- Experimentalmente foi demonstrado que a produção de energia cinética turbulenta diminui e seu valor máximo ocorre em pontos mais afastados. Com o incremento de  $C_w$  e do peso molecular este amortecimento é mais acentuado;
- Para escoamento de solvente foi comprovado a validade da equação de Kolmogorov, sendo que, para todos os valores do número de Reynolds e regiões de escoamento analisados os espectros de potência  $S(kw)$  apresentaram uma faixa com declividade -  $5/3$ ;

- Para escoamento de soluções poliméricas os espectros não apresentam região inercial, o que demonstra uma maior proximidade entre os processos de produção e dissipação. A dissipação diminui o que pode ser interpretado como uma redistribuição de energia das altas para as baixas frequências. As modificações dos espectros ocorreram somente na região de parede;
- A hipótese de equilíbrio de Kolmogorov, mostrou-se válida para determinar a taxa de dissipação em soluções poliméricas;
- No modelo em estudo, avaliou-se a possibilidade de estimar as escalas integrais do escoamento a partir de considerações geométricas. Isto não foi possível pela existência de placas perfuradas na instalação experimental, que limitam a escala em função do tamanho dos furos (2 mm neste caso) e de uma região de emboque do canal com geração de turbulência., sendo necessária a utilização de métodos estatísticos;
- Na região de parede, a adição de polímeros provocou modificações nas escalas de Kolmogorov: as escalas de comprimento e tempo aumentaram, as de velocidade, energia e vorticidade diminuíram. Nas regiões central e da superfície livre não ocorreram modificações importantes;
- Devido às modificações nos processo de produção, transferência e dissipação de energia, via influência dos polímeros sobre o campo de escoamento, a cascata de energia é modificada;
- As incertezas das diferentes magnitudes são satisfatórias podendo-se validar a metodologia experimental utilizada (vide Anexo I);

Da análise de todos os aspectos discutidos neste trabalho, conclui-se que a adição de polímeros leva a um conjunto de modificações na estrutura de escoamentos

turbulentos, que fazem com que o consumo de energia para conseguir escoar uma determinada vazão, seja bem menor. Isto se reflete em menos perdas de energia no escoamento, conforme inicialmente observado por Toms e confirmado no trabalho aqui apresentado.

### ***Comentários Finais***

O resultados aqui apresentados, são frutos de um intenso e criterioso trabalho experimental, apoiado na literatura especializada e que trouxeram uma nova contribuição ao fenômeno estudado, sendo algumas contradições elucidadas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

## ANEXO I

---

### ANÁLISE DE INCERTEZAS

Para investigações de tipo experimental, como neste caso, é essencial a análise das incertezas das magnitudes lidas e/ou determinadas que intervêm nos fenômenos estudados.

Pretende-se neste caso apresentar a metodologia utilizada que nos permitiu avaliar a -se como referências as normas ANSI-ASME PTC 85, ISSO 5167 (1991) e “Policy propagação das incertezas desde as medições realizadas até a obtenção do resultado final, utilizando on Reporting Uncertainties in Experimental Measurements and Results” publicado pelo “Journal of Heat Transfer”.

A incerteza  $U$  na determinação de uma magnitude  $Z$  qualquer é calculada pela relação:

$$U_Z = \sqrt{P_Z^2 + B_Z^2} \quad (\text{A.1})$$

onde  $P$  é o limite de precisão e  $B$  o limite de desvio.

O limite de precisão,  $\pm P$  é 95% da estimativa de confiança da banda, na qual deve estar o valor médio de um resultado se o ensaio ou experimento foi repetido muitas vezes, sob as mesmas condições, usando os mesmos equipamentos. Desta forma o limite de precisão é uma estimativa da falta de repetibilidade dos resultados devido a erros randômicos.

O limite de desvio  $\pm B$  é uma estimativa da magnitude de um erro fixo, constante.

A incerteza  $\pm U$  representa o intervalo no qual um resultado está na faixa de 95% do intervalo de confiança do valor real.



Naquelas experiências onde os ensaios são realizados uma única vez, o termo do limite de precisão não se considera. Daqui, e expandindo em séries de Taylor, a expressão (A.1) fica:

$$U_z = \sqrt{B_z^2} = \sqrt{\sum \left( \frac{\partial Z}{\partial x_i} \right)^2 B_{x_i}^2} \quad (\text{A.2})$$

O termo  $B_{x_i}$  pode ser considerado como uma função do tipo de medição: para medições diretas pode ser considerado como sendo o fundo de escala do instrumento, ou seja, a menor divisão da escala. Já para medições indiretas este valor é determinado mediante a propagação de erros de cada grandeza.

A incerteza relativa,  $U$  é determinada pela seguinte relação:

$$U = \frac{U_z}{Z} \quad [\%] \quad (\text{A.3})$$

Em continuação faremos uma análise para determinar as incertezas das principais magnitudes calculadas neste trabalho avaliando os termos mais sensíveis.

### **I.1 Incertezas durante o processo de aferição da placa de orifício.**

O objetivo neste caso é determinar a incerteza no cálculo da constante, na equação (3.2), durante o processo de aferição da placa orifício. Como anteriormente exposto, este processo constitui um método indireto de determinação da vazão, em função da leitura no manômetro,  $\Delta H$ . Considerando as equações (3.1) e (3.2):

$$Q = Const \sqrt{\Delta H} \Rightarrow Const = \frac{\Delta M}{t \rho \sqrt{\Delta H}} \quad (\text{A.4})$$

Nesta equação os termos de diferença de massa ( $\Delta M = M_f - M_i$ ), o tempo ( $t$ ) e a leitura do manômetro,  $\Delta H$  foram medidos diretamente, enquanto que a massa específica

( $\rho$ ) é uma constante. Desta forma os erros sistemáticos destes parâmetros foram considerados como as menores divisões da escala dos instrumentos.

Para o tempo considera-se  $B_t = \pm 0,01$  seg., para a leitura no manômetro,  $B_{\Delta H} = \pm 0,002$  m e  $B_\rho = \pm 1$  Kg/m<sup>3</sup> para a aceleração da gravidade. No caso do termo  $\Delta M$ , foi utilizada uma balança com fundo de escala igual a 0,1 Kg. Como este termo é determinado pela medição de  $M_f$  e  $M_i$  independentemente o limite de desvio fica:

$$B_{\Delta M} = \sqrt{(B_{M_i}^2 + B_{M_f}^2)} = 0,1414 \text{ Kg} \quad (\text{A.5})$$

Considerando que durante o processo de aferição da placa de orifício a vazão foi medida uma única vez para diferentes aberturas do registro colocado na saída da bomba centrífuga, o termo do limite de precisão,  $P_Q$  não foi considerado. Desta forma temos que a incerteza das medições diretas é igual ao limite de desvios das mesmas. Aplicando a equação (A.1) à relação (A.4) temos que:

$$U_{Const} = \sqrt{\left(\frac{\partial Const}{\partial \Delta M}\right)^2 U_{\Delta M}^2 + \left(\frac{\partial Const}{\partial t}\right)^2 U_t^2 + \left(\frac{\partial Const}{\partial \rho}\right)^2 U_\rho^2 + \left(\frac{\partial Const}{\partial \Delta H}\right)^2 U_{\Delta H}^2} \quad (\text{A.6})$$

## 1.2 Incertezas na determinação da vazão $Q$ .

Como anteriormente referenciado a relação entre a vazão  $Q$  e a leitura do manômetro,  $\Delta H$  é dada por (3.3). O erro de desvio  $B_{\Delta H}$ , é determinado pela soma da menor divisão em cada ramo do manômetro. Portanto  $B_{\Delta H} = 2$  mm

A incerteza  $U_Q$  é:

$$U_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta H}\right)^2 U_{\Delta H}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial Const}\right)^2 U_{Const}^2} \quad (\text{A.7})$$

Nesta relação pode ser visto que o termo de maior sensibilidade é a leitura no manômetro, já que usamos como líquido manométrico mercúrio que tem massa

específica muito grande. Devido a isto, erros de medição podem levar a incertezas grandes.

### I.3 Incertezas na determinação da temperatura do escoamento

A temperatura do escoamento é medida no Tanque Homogeneizador, TH com um termômetro com erro de desvio  $B_T = 1$  °C.

O valor da temperatura em cada ensaio foi considerado como a média aritmética do valor da temperatura no início e no final do teste.

$$U_T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial T_i}\right)^2 U_{T_i}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial T_f}\right)^2 U_{T_f}^2} \quad (\text{A.8})$$

### I.4 Incertezas na determinação da velocidade média local axial, $u$ e normal, $v$ .

As velocidades média local (axial e normal) e suas *RMS*, são medidas utilizando o anemômetro laser, sendo que a incerteza na medição é determinada pelo desvio sistemático do aparelho cuja ordem é de 1%.

### I.5 Incertezas na determinação da carga total, $H$ .

O valor de  $H$  nas seções de entrada (1) e saída (2) do canal (vide Fig. (4.1)) se determina como a soma da carga em velocidade e a carga em altura, considerando distribuição hidrostática de pressões. Assume-se que o plano horizontal de referência, PHR, está colocado no leito do canal.

A relação é:

$$H = \frac{2}{3}h + \frac{Q^2}{2gb^2h^2} \quad (\text{A.9})$$

Consideram-se os seguintes erros de desvios para as medições diretas:  $B_h = \pm 0.001$  m,  $B_b = \pm 0.001$  m. Neste caso, como o limite de desvio da aceleração da gravidade é muito menor que os desvios nas medições este termo não foi considerado. Daqui tem-se que a incerteza de  $H$  fica:

$$U_H = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial h}\right)^2 U_h^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial Q}\right)^2 U_Q^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial b}\right)^2 U_b^2} \quad (\text{A.10})$$

### **I.6 Incertezas na determinação da altura média entre as seções de entrada e saída do canal, $\bar{h}$ .**

Nos cálculos realizados neste trabalho, frequentemente temos de avaliar como varia a altura da lâmina d'água entre a seção de entrada e de saída. Considerando, como analisado no Cap. 3, que a declividade do gradiente de pressões é linear, onde necessário, o valor de  $h$  foi estimado como o valor médio entre as seções, obtendo-se que a incerteza na determinação da altura média da lâmina d'água,  $U_{\bar{h}}$  é:

$$U_{\bar{h}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial h_1}\right)^2 U_h^2 + \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial h_2}\right)^2 U_h^2} \quad (\text{A.11})$$

### **I.7 Incertezas na determinação do diâmetro hidráulico, $D_H$ .**

Considerando as características do escoamento em canais, no qual o fluido que escoar não ocupa toda a seção do mesmo, a definição e aplicação do conceito de diâmetro hidráulico é muito importante. Este é determinado pela relação (4.5), sendo que seu valor depende dos valores de  $\bar{h}$  e  $b$ . Utilizando o mesmo procedimento acima descrito temos que:

$$U_{D_H} = \sqrt{\left(\frac{\partial D_H}{\partial h}\right)^2 U_h^2 + \left(\frac{\partial D_H}{\partial b}\right)^2 U_b^2} \quad (\text{A.12})$$

### I.8 Incertezas na determinação do coeficiente de perda de carga, $f$ .

O coeficiente de perda de carga é determinado aplicando a equação da energia entre as seções de entrada e saída do canal, conforme (4.2).

$$f = \frac{(H_1 - H_2) 2g D_H \bar{h}^2 b^2}{L Q^2} \quad (4.2)$$

O erro de desvio de  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $D_H$  e  $\bar{h}$  foi determinado pela propagação de erros de cada grandeza, sendo  $B_L = \pm 0,001$  m. A incerteza de  $f$  fica:

$$U_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial H_1}\right)^2 U_{H_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial H_2}\right)^2 U_{H_2}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial D_H}\right)^2 U_{D_H}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \bar{h}}\right)^2 U_{\bar{h}}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 U_b^2 \dots} \\ \dots \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial L}\right)^2 U_L^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Q}\right)^2 U_Q^2} \quad (\text{A.13})$$

### I.9 Incertezas na determinação da velocidade média na seção de testes, $\bar{u}_{st}$ e da velocidade média no canal, $U$

A velocidade média na seção de testes foi determinada considerando a vazão no sistema e a área desta seção. Daqui temos que:

$$U_{\bar{u}_{st}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}_{st}}{\partial Q}\right)^2 U_Q^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_{st}}{\partial b}\right)^2 U_b^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_{st}}{\partial h_{st}}\right)^2 U_{h_{st}}^2} \quad (\text{A.14})$$

Em (A.14), a incerteza  $U_{h_{st}}$  é definida pela menor divisão da escala com que foi medido este valor,  $B_{h_{st}} = \pm 0,001$  m.

De forma análoga, a incerteza em  $U$  é definida considerando o valor da altura média da lâmina d'água,  $\bar{h}$  obtendo-se:

$$U_U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial Q}\right)^2 U_Q^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial b}\right)^2 U_b^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial \bar{h}}\right)^2 U_{\bar{h}}^2} \quad (\text{A.15})$$

### I.10 Incertezas na determinação da velocidade de atrito, $u_*$ .

No estudo de escoamentos a determinação da velocidade de atrito é muito importante, sendo utilizada tanto na adimensionalização de algumas magnitudes quanto na análise dos processos de transferência de quantidade de movimento devido às flutuações da velocidade. O cálculo é feito pela relação (4.1).

Com as incertezas de  $f$  e  $U$  já determinadas, temos que:

$$U_{u_*} = \sqrt{\left(\frac{\partial u_*}{\partial U}\right)^2 U_U^2 + \left(\frac{\partial u_*}{\partial f}\right)^2 U_f^2} \quad (\text{A.16})$$

### I.11 Incertezas na determinação do número de Reynolds, $Re$

Neste trabalho, o número de Reynolds foi definido considerando como velocidade característica a velocidade média na seção de testes o como comprimento característico a altura da lâmina d'água nesta seção. Devido a isto, as incertezas no cálculo de  $Re$  são determinadas por:

$$U_{Re} = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial u_{st}}\right)^2 U_{u_{st}}^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial h_{st}}\right)^2 U_{h_{st}}^2} \quad (\text{A.17})$$

A viscosidade cinemática do fluido,  $\nu$  é determinada em função da temperatura. Analisando a influência da incerteza da viscosidade na incerteza na determinação do número de Reynolds, vemos que esta é muito pequena, pelo qual foi desprezada.

### I.12 Incertezas na determinação da velocidade adimensionalizada, $U^+$ e do número de Reynolds de atrito, $Y^+$ .

Uma das formas mais comuns de apresentar os perfis de velocidade é através do perfil adimensionalizado  $U^+$  vs.  $Y^+$ . Desta forma é importante determinar as incertezas associadas aos respectivos cálculos.

Na equação  $Y^+ = yu_* / \nu$ ,  $y$  representa a posição do ponto medido, a partir do leito do canal cuja velocidade média local é  $u$ . Considerando que  $U^+ = u/u_*$ , as incertezas destes dois parâmetros são:

$$U_{Y^+} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y^+}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial Y^+}{\partial u_*}\right)^2 U_{u_*}^2} \quad (\text{A.18})$$

$$U_{U^+} = \sqrt{\left(\frac{\partial U^+}{\partial u}\right)^2 U_u^2 + \left(\frac{\partial U^+}{\partial u_*}\right)^2 U_{u_*}^2} \quad (\text{A.19})$$

No caso da relação (A.18) no é considerada também a influência da viscosidade.

### I.13 Incertezas na determinação da dissipação de energia cinética turbulenta, $\varepsilon$ .

A dissipação de energia cinética turbulenta é determinada pela relação (4.9). Como já analisado, a escala integral de escoamento foi considerada a partir da geometria do escoamento com valor igual à metade do diâmetro hidráulico. Daqui temos que a incerteza é determinada pela expressão:

$$U_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial (RMS_{u'})}\right)^2 U_{(RMS_{u'})}^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial L}\right)^2 U_L^2} \quad (\text{A.20})$$

#### I.14 Incertezas na determinação da tensão de cisalhamento na parede, $\tau_0$ .

Considerando a equação (4.7) a incerteza em  $\tau_0$  fica:

$$U_{\tau_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial \tau_0}{\partial u_*}\right)^2 U_{u_*}^2 + \left(\frac{\partial \tau_0}{\partial \rho}\right)^2 U_{\rho}^2} \quad (\text{A.21})$$

#### I.15 Incertezas na determinação das tensões de Reynolds, $\overline{u'v'}$

A tensão total em um escoamento turbulento é a soma das tensões viscosas e das tensões turbulentas e pode ser determinada aplicando a equação da quantidade de movimento a um canal bi-dimensional e integrando-a entre a parede,  $y=0$  até, por exemplo, a metade da altura da lâmina d'água,  $\bar{h}/2$ .

$$U_{\overline{u'v'}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial u_*}\right)^2 U_{u_*}^2 + \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}\right)^2 U_y^2 + \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial \bar{h}}\right)^2 U_{\bar{h}}^2 + \left(\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial Y^+}\right)^2 U_{Y^+}^2} \quad (\text{A.22})$$

#### I.16 Incertezas na determinação da produção de energia cinética turbulenta. $P$ .

O valor de  $P$  foi determinado combinando a equação da quantidade de movimento e a lei de viscosidade de Newton. Desta forma as incertezas no cálculo deste parâmetro é:

$$U_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \overline{u'v'}}\right)^2 U_{\overline{u'v'}}^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial u_*}\right)^2 U_{u_*}^2} \quad (\text{A.23})$$

Neste caso, como em outros já analisados, é desprezada a influência da temperatura devido a que o limite de desvio é muito pequeno quando comparado com o limite de desvio dos outros parâmetros que intervêm nos cálculos.



A metodologia acima apresentada foi aplicada para cada ensaio. Na tabela a seguir se apresentam os resultados obtidos para as magnitudes mais importantes e significativas deste trabalho.

Tabela A.1 Resultados da análise das incertezas.

Magnitude	Incerteza, $U$	Incerteza Rel., $U$ [%]
Constante na aferição da P.O	6.1E-06	0.98
Coefficiente de perda de carga, $f$	0.0002876	4.01
Vazão, $Q$ , [m <sup>3</sup> /s]	1.78E-06	2.5
Número de Reynolds, $Re$	619	5.72
Número de Reynolds de atrito, $Y^+$	3.41	3.41
Velocidade adimensionalizada, $U^+$	0.752	3.76
Tensão de cisalhamento, $\tau_0$ [N/m <sup>2</sup> ]	0.01386	6.3
Velocidade de atrito, $u_*$ [m/s]	0.0003661	5.23
Tensões de Reynolds, $\overline{u'v'}$ [N/m <sup>2</sup> ]	0.0003953	6.11
Dissipação de ECT, $\varepsilon$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	2.91E-06	5.24
Produção de ECT, $P$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	2.37-05	6.89

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHIA, B.U.; THOMPSON, D.W. Structure of the turbulent boundary in drag-reducing pipe flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 81, pt. 3, p. 439-464, 1977.
- ADRIAN, R.J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanic. **Annual Review Fluid Mechanics**, v. 23, p. 261-304, 1991.
- ARAÚJO de, J.C. **Estudo da distribuição bidimensional de velocidades longitudinais em canais abertos**. São Paulo, 1994. 261 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BERMAN, N.S., Flow time scales and drag reduction. **Physics of Fluids**, v. 20, n. 10, pt. II, p. S168-S174, out., 1977.
- BERMAN, N.S., Large eddies and polymer strings. In: Structure of turbulence and drag reduction. In: IUTAM SYMPOSIUM, Zurich, 1990. **Structure of turbulence and drag reduction**. s.l., Springer, 1990. p.275.
- BEWERSDORFF, H.W.; GYR, A.; HOYER, K.; TSINOBER, A. An Investigation of possible mechanism of heterogeneous drag reduction in pipe and channel flows. **Rheol. Acta**, v. 32, p. 140-149, 1993.
- BLAKE, A.K The design of piezometer rings. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 78, pt. 2, p. 415-428, 1976.
- BRADSHAW, P. The effect of wind tunnel screens on nominally two-dimensional boundary layers. **Journal of Fluid Mechanics**, v.22, p. 679, 1965.
- BEWERSDORFF, W. H. Heterogene widerstandsver-minderung in turbulenten rohrströmungen. **Rheol. Acta**, v. 23, p. 522, 1984.
- CANTWELL, B.J. Organized motion in turbulent flow. **Annual Review Fluid Mechanics**, v. 13, p. 457-515, 1981.
- CHIU, C. L. Entropy and 2-D velocity distribution in open channels. **Journal Hydraulic Engineering**, v. 114, n.7, p. 738-756, jul., 1988.
- CORINO, E.Z.; BRODKEY, R.S. A visual study of turbulent flow. **Journal Fluid Mechanics**, v. 56, p. 559, 1969.
- DONOHUE, G.L.; TIEDERMAN, W.G.; REISCHMAN, M.M. Flow visualization of the near-wall region in a drag-reducing channel flow. **Journal Fluid Mechanics**, v. 56, pt. 3, p. 559-575, 1972.
- DURST, F., KECK, T. & KLEINE, R. Turbulence quantities and Reynolds stress in pipe flow of polymeric solutions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LASER ANEMOMETRY, 1., **Proceedings**. p.31, 1985.
- DURST, J.J.; SENDER, J. LDA measurement in the near-wall region of a turbulent pipe Flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 295, p. 305-335, 1995.
- ECKELMAN, L.D.; FORTUNA, W.C.; HANRATTY, T.J. Drag reduction and the wavelength of flow-oriented wall eddies. **Nature**, v. 236, p. 94, 1972.
- FARELL, C.; IYENGA; A.K.S. **Time series analysis with application to velocity fluctuation data measured in a wind tunnel atmospheric boundary layer**. S.l., University of Minnesota/ St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, 1994. (Project Report, n.363)
- FORTUNA, G.; HANRATTY, T.J. The influence of drag reducing polymer on turbulence in the viscous sublayer. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 53, pt.3, p. 575, 1972.

- GENES, P.G. DE. **Introduction to polymer dynamics**. S.I., Cambridge University Press, 1990.
- GYR. A.; BEWERSDORFF, H.W. **Drag reduction of turbulent flows by additives**. Dordrecht, Kluwer Academic, 1972. 234p.
- GYR. A.; TSINOBER, A. A Critical discussion of the So-called momentum deficit of drag reducing flows. In: EUROPEAN DRAG REDUCTION WORKING MEETING, 10., Berlin, 1997. **Book of abstracts**. S.n.t.
- HOYT, J.W.; SELLIN, R.H.J. Polymer thread and drag reduction. **Rheol. Acta**, v. 30, p. 307-315, 1991.
- HINCH, E.J. Mechanical model of dilute polymer solutions in strong flows. **Physics of Fluids**, v. 20, n. 10, pt. II, p. S22, out., 1977.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices**. ISO5167-1 S.I., 1991. pt.1
- JOSEPH, D.D. **Fluid dynamics of viscoelastic liquids**. S.I., Springer, 1990.
- KIM, H.T.; KLINE, S.J.; REYNOLDS, W.C. The production of turbulence near a smooth wall in turbulent boundary layers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 50, p. 133-160, 1971.
- KIM, J.; MOIN, R.; MOSER, R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low reynolds number. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 177, p. 133-166, 1987.
- KLINE, S.J.; REYNOLDS, W.C.; SCHRAUB, F.A.; RUNSTADLER, P.W. The structure of turbulent boundary layers. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 30, p. 741-773, 1967.
- KOSTIC, M. On turbulent drag and heat transfer reduction phenomena and laminar heat transfer enhancement in non-circular duct flow of certain non-Newtonian fluids. **International Journal Heat Mass Transfer**, v. 37, p. 133-147, suppl. 1, mar., 1994.
- LANDAHL, M.T.; Drag reduction by polymer addition. In: **Theoretical and applied mechanics**, s.I., Springer. 1973. p.177-199.
- LEE, S. H-K, SENGUPTA, S., WEI, T. Effect of polymer additives on Görtler vortices in Taylor-Couette flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 282, p. 115-129, 1995.
- LODES, A.; MACHO, V. The influence of polyvinylacetate additive in water on turbulent velocity field and drag reduction. **Experiments in Fluids**, v. 7, p. 383-387, 1989.
- LOGAN, S.E. **A laser velocimeter measurement of Reynolds stress**. In: Dilute polymer solutions. California, Institute of Technology, 1972. (Ph. D. thesis)
- LUCHIK, T.S.; TIEDERMAN, W.G. Turbulent structure in low-concentration drag-reducing channel flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 190. p. 241-263, 1988.
- LUMLEY, J.L. Drag reduction by additives. **Annual Review Fluid Mechanic**, n.1, p. 367-884, 1969.
- LUMLEY, J.L. Drag reduction in two phase and polymer flows. **Phys Fluids**, v. 20, n. 10, Pt. II, p. S64-S71, out., 1977.
- MASSAH, H.; KONTOMARIS, K.; SCHOWALTER, W.R.; HANRATTY, T.J. The configurations of a FENE bead-spring chain in transient rheological flows and in a turbulent flow. **Physics of Fluids**, v. 5, pt.A. p. 881, 1993.
- MASSAH, H; HANRATTY, T.J. Added stresses because of the presence of FENE-p bead-spring chains in a random velocity field. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 337, p. 67-101, 1997.

- McCOMB, W.D.; RABIE, L.H. Local drag reduction due to injection of polymer solutions into turbulent flow in a pipe. **Aiche Journal**, v.28, n.4, pt.I, p.547-557, Jul., 1982.
- McCOMB, W.D.; RABIE, L.H. Local drag reduction due to injection of polymer solutions into turbulent flow in a pipe. **Aiche Journal**, v.28, n.4, pt.II, p.558-564, jul., 1992.
- MINEI, N. **Um método expedito para a medição de vazão em rios e canais abertos**. São Paulo, 1999. 164p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica.
- NEZU, I.; RODI, W. Open-channel flow measurement with a laser doppler anemometer. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 112, p. 335-355, 1986.
- NEZU, I.; NAKAGAWA, H. **Turbulence in open-channel flows**. Rotterdam, Balkema, 1993. 281p.
- OLDAKER, D.K.; TIEDERMAN, W.G. Spatial structure of the viscous sublayer in drag-reducing channel flows. **Physics of Fluids**, v. 20, n. 10, pt. II, p. s133-s144. out., 1977.
- ORLANDI, P. A Tentative approach to the direct simulation of drag reduction by polymer. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 60, p. 227-301, 1995.
- ORTIZ, J.P.; VILALTA, G. Estudo da influência da poliacrilamida *iqapol PA* na redução de atrito em escoamentos turbulentos. **Revista Brasileira de Ciências Mecânicas**, v. 20, n. 2, p.219-232, 1998.
- PERRY, A.E; ABELL, C.J. Scaling laws for pipe-flow turbulence. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 67, pt. 2, p. 257-272, jan., 1975.
- PINHO, F.T.; WHITELAW, J.H. Flow of non-Newtonian fluids in a pipe. **Journal Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 34, p. 129-144, 1990.
- POREH, M., HASSID, S. Mean velocity and turbulent energy closures for flows with drag reduction. **Physics of Fluid**, v. 20, n 10, pt. 2, out., 1977.
- RABIN, Y.; ZIELINSKA, B.J.A. Scale-dependent enhancement and damping of vorticity disturbances by polymers in elongational flow. **Phys. Rev. Lett.**, v. 63, n.5, p. 512-515, jul., 1989.
- RENARDY, M. On the mechanism of drag reduction. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 59, p. 93-101, 1995.
- RUDD, M.J. Laser dopplermeter and polymer drag reduction. **Chem. Eng. Progr. Symp.** v. 67, n.1,p. 21, 1971.
- SAADEH, M., STREHLOW, A. The influence of the injection system on drag reduction. **Rheologica Acta**, v. 32, p. 398-404, 1993.
- SÁ, P.A.; PINHO, F.T. Turbulent pipe flow characteristics of low molecular weight polymer solutions. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 55, p. 321-344, 1994.
- SASAKI, S. Drag reduction effect of rod-like polymer solutions. I influences of polymer concentration and rigidity of skeltal back bone. **J. Phus. Soc. Japan.**, v. 60, p. 868-878, 1991.
- SASAKI, S.; Drag reduction effect of rod-like polymer solutions. III molecular weight dependence. **J. Phus. Soc. Japan.**, v. 61, p. 1960-1963, 1992.
- SILVEIRA-NETO, A. Fundamentos da turbulência nos fluidos. In: TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA; I ESCOLA DE PRIMAVERA, Rio de Janeiro, 1998. **Mini cursos**. Rio de Janeiro, ABCM/UFRJ, 1998. v.1, p.3-48.

- SMITH, R.E.; TIEDERMAN, W.G. The mechanism of polymer thread drag reduction. **Rheologica Acta**, v. 30, p. 103-113, 1991.
- STEMBER, L.G.; LAGERSTEDT, T.; SEHLÉN, O.; LINDGREN, E.R. Mechanical mixing of polymer additive in turbulent drag reduction. **Physics of Fluids**, v. 20, p. 258, 1977.
- TENNEKES, H.; LUMLEY, J.L. **A first course in turbulence**. Cambridge, MIT Press, 1972. 300p.
- TIEDERMAN, W.G.; SMITH, A. J.; OLDAKER, D.K. Structure of the viscous sublayer in drag-reducing channel flows. In: ZAKIN & PATTERSON, G.K. **Turbulence in liquids**. Princeton, Science Press, 1977.
- TIEDERMAN, W.G.; LUCHIK, T.S.; BOGARD, D.G. Wall-layer structure and drag reduction. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 156, p. 419-437, 1985.
- TOMS, B.A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds number. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON RHEOLOGY, 1., North Holland, 1948. **Proceedings**. North Holland, s.ed., 1948. v.2, p.135-141.
- TOONDER, J.M.J. DEN.; HULSEN, M.A.; KUIKEN, G.D.C.; NIEUWSTADT, F.T.M. Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and Laboratory Experiments. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 337, p. 193-231, 1997.
- USUI, H.; MAEGUCHI, K.; SANO, Y. Drag reduction caused by the injection of polymer thread into a turbulent pipe flow. **Physics of Fluids**, v. 31, p. 2518-2523, set., 1988.
- USUI, H.; Drag reduction caused by the injection of a polymer solution into a pipe flow. In: IUTAM SYMPOSIUM, Zurich, 1990. **A structure of turbulence and drag reduction**. s.l., Springer, 1990. p.45-49.
- VILALTA, G. **Análise da redução de atrito em escoamentos por adição de polímeros: ensaios experimentais com soluções de poliacrilamida**. São Paulo, 1995. 103 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.
- VILALTA, G.; ORTIZ, J.P. Estudo experimental da redução de atrito em escoamentos turbulentos em tubulações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., Vitória, 1997. **Anais**. Vitória., Abrh, v.4, p.321-328, 1997.
- VILALTA, G.; ORTIZ, J.P. Dinâmica dos fluidos e mecanismos da redução de atrito em escoamentos turbulentos. (em CD-Rom) In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA, 3., La Habana, 1997. **Memórias**. La Habana, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 1997.
- VIRK, P.S.; MERRILL, E.W.; MICKLEY, H.S.; SMITH, K.A.; MOLLO-CHRISTENSEN, E.L. The Toms phenomenon: turbulent pipe flow of dilute polymer solutions. **Journal of Fluid Mechanics**, vol. 30, pt. 2, p. 305-328, 1967.
- VIRK, P.S. An elastic sublayer model for drag-reduction by dilute solutions of linear macromolecules. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 45, pt. 3, p. 417-440, 1971.
- VIRK, P.S.; Drag reduction fundamentals. **Aiche Journal**, v. 21, n 4, p. 625-656, 1975.
- VIRK, P.S., WAGGER, D.L. Aspect of mechanisms in type B Drag reduction. In: IUTAM SYMPOSIUM, Zurich, 1990. **Structure of turbulence reduction**. s.l., Springer, 1990. p.201-213.

- Vlassopoulos, D.; Schowalter, W.R. Characterization of the non-Newtonian flow behavior of drag-reducing fluids. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 49, p. 205-250, 1993.
- Vleggaar, J.; Tels, M. Drag reduction by polymer threads. **Chemical Engineering Science**, v. 28, p. 965-968, 1973.
- Wei, T.; Willmarth, W.W. Modifying turbulent structure with drag-reducing polymer additives in turbulent channel flows. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 245, p. 619-641, 1992.
- Willmarth, W.W.; Wei, T.; Lee, C.O. Laser anemometer measurements of Reynolds stress in a turbulent channel flow with drag reducing polymer additives. **Physics of Fluids**, v. 30, n. 4, p. 933-935, 1987.
- Zakin, J.L.; Hunston, D.L. Effect of polymer molecular variables on drag reduction. **J. Macromol. Sci. Phys.**, B18, n.4, p. 795-814, 1980.