

INFLUÊNCIA DO PESO MOLECULAR DOS POLÍMEROS NAS MODIFICAÇÕES DA ESTRUTURA DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM CANAIS

Guillermo Vilalta (e-mail: gvilalta@mecanica.ispjae.edu.cu)

Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renobables, ISPJAE, Marianao 14, CP 19 390, Habana, Cuba.

Jayme Pinto Ortiz (e-mail: jportiz@usp.br)

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP, CEP 05508-900

São Paulo, SP, Brasil.

Escola de Engenharia Mauá, IMT, São Caetano do Sul, Brasil.

Resumo

Apresenta-se um estudo experimental sobre a influência do peso molecular dos polímeros nas modificações da estrutura da turbulência e conseqüentemente na redução de atrito. Para isto utilizou-se como agente redutor o Iqapac 731, de baixo peso molecular, sendo os ensaios realizados para 4 valores de concentrações e uma faixa do número de Reynolds entre 8×10^3 e 10^5 . Os resultados mostram que, polímeros de peso molecular menor que 10^6 , são capazes de reduzir o atrito, embora o efeito qualitativo seja menor do que aquele correspondente a polímeros de alto peso molecular. Através de uma análise reológica, estimou-se que os efeitos viscosos predominam sobre os elásticos.

Palavras-chave: Redução de atrito, Turbulência, Polímeros

1. INTRODUÇÃO

Toms (1948) demonstrou que a adição de uma pequena quantidade de polímeros a um escoamento turbulento provoca significativas modificações na sua estrutura. Desde então, um sério esforço investigativo tem sido dedicado na tentativa de compreender os aspectos fenomenológicos destas mudanças. O uso de polímeros tem-se difundido, sendo que algumas de suas aplicações são: redução de consumo de energia em escoamentos em tubulações e canais, utilização em sistemas de tubulações contra incêndio e utilização em pesquisas científicas.

Conforme amplamente demonstrado, a redução de atrito por adição de polímeros depende de vários fatores: tipo de polímero, concentração e regime de escoamento entre outros. Quando da análise destas dependências, um dos aspectos mais controversos está relacionado com a influência do peso molecular dos polímeros na diminuição do coeficiente de perda de carga f .

Inicialmente, se associava o fenômeno em estudo a polímeros com alto peso molecular, $M > 10^6$. A justificativa a este critério está relacionada ao efeito das propriedades viscoelásticas das soluções poliméricas. Segundo Zametalin & Shtern (1982) e Massah *et al* (1993)[apud Lee *et al* (1995)], são as propriedades elásticas as responsáveis pela redução de atrito, o que implica que só polímeros de alto peso molecular podem reduzir o atrito. Isto estaria relacionado à taxa de deformação imposta às moléculas durante o processo de extensão molecular e seu efeito sobre a viscosidade. De acordo com este critério, era de se esperar que as moléculas de menor peso molecular se estendessem,

sensibilizadas por baixos valores da taxa de deformação, onde predominam os efeitos viscosos. Desta forma, estas moléculas deveriam ser pouco elásticas, não mostrando portanto maior capacidade para reduzir o arrasto viscoso.

Em princípio, estes critérios tem-se mostrado contraditórios, pois Sá & Pinho (1994) e Vilalta & Ortiz (1997) demonstraram que soluções de polivinilacetato, de baixo peso molecular, são capazes de provocar diminuições de f .

Com o objetivo de abordar mais amplamente este aspecto, o presente trabalho se constitui em um estudo experimental da influência da poliacrilamida *Iqapac 731*, de baixo peso molecular, nas modificações da estrutura de escoamentos turbulentos em canal.

2. INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A instalação experimental utilizada na realização deste trabalho é apresentada na Fig. 1.

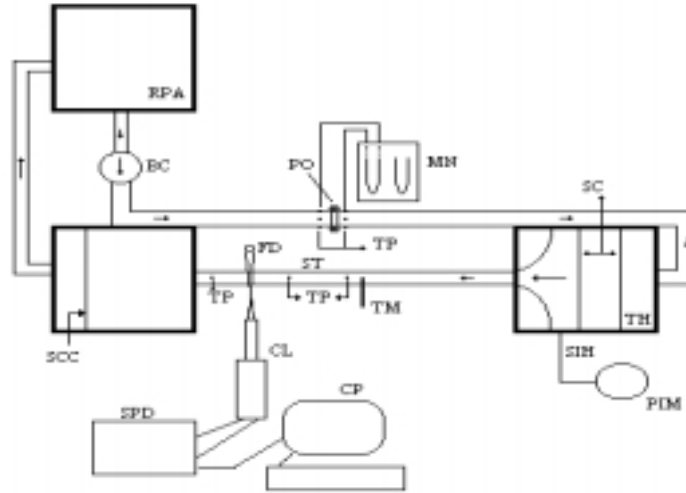


Figura 1. Esquema da Instalação Experimental

A nomenclatura que aparece nesta figura, é a seguinte:

RPA	Reservatório Principal de Água;	TM	Termômetro;
BC	Bomba Centrífuga;	ST	Seção de Testes;
PO	Placa de Orifício;	SCC	Sistema de Carga Constante;
TP	Tomada de Pressão;	FD	Fotodetector do LDA;
MN	Manômetro de Mercúrio;	CL	Canhão do Laser;
SC	Placa Perfurada;	SPD	Sistema de Aquisição e Processamento de Dados;
TH	Tanque Homogeneizador;	CP	Computador.
PIM	Tanque de injeção da solução Mãe;		
SIH	Sistema de Injeção das Soluções Homogêneas;		

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 foram feitas em um ponto situado a 2.5 m da entrada do canal.

O sistema opera da seguinte forma. Do **RPA** a água é recalçada por uma bomba centrífuga até o **TH**. Na tubulação de recalque (de PVC rígido de 2 polegadas de diâmetro interno) existe uma placa de orifício para medir a vazão que escoar no sistema, através do **MN**. O **TH**, de acrílico, foi projetado no sentido de que o escoamento seja turbulento, mesmo depois de passar pelas duas placas perfuradas, embora estas limitem o tamanho dos turbilhões.

Depois de abandonar o **TH**, o escoamento entra no canal e ao sair deste vai para um tanque que dispõe de uma placa de seção constante, tipo parábola, que permite maior controle das características do escoamento de montante (vazão, altura da lâmina d'água etc) retornando, finalmente, ao **RPA**.

2.1 Soluções poliméricas: preparo e injeção

O polímero utilizado durante a realização do presente trabalho, foi o *Iqapol 731*, poliacrilamida de baixo peso molecular ($4\text{-}6 \times 10^3$), produzido e fornecido pela Indústria Química Arujá, Ltda. O mesmo é uma emulsão com uma concentração aproximada de 40%.

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

Para o preparo da solução mãe, o polímero é dissolvido em 30 L de solvente com ajuda de uma agitador mecânico. Neste processo duas condições são cuidadosamente observadas. A primeira é que a velocidade do agitador não seja muito grande (< 450 rpm) para evitar a quebra das cadeias poliméricas. A segunda é que a adição do polímero seja lenta e gradual, incidindo no vórtice formado pela agitação a fim de evitar grumo e má dissolução.

Em todos os casos a solução mãe foi preparada 24 horas antes da realização dos ensaios para completar a hidrólise e para a retirada das bolhas de ar.

Para a realização dos ensaios a solução mãe é levada ao **PIM**, com capacidade aproximada de 20 L. Dentro deste é colocado um saco plástico onde é despejada a solução mãe até ocupar a capacidade total. Posteriormente é fechado hermeticamente.

Para a injeção da solução mãe no **TH**, abre-se o registro de água colocado na parte inferior do **PIM**, sendo que a vazão de água é conhecida através de um rotâmetro instalado neste lugar. Como a solução mãe ocupa todo o volume, é empurrada pela água que está entrando e sai em igual vazão através de uma mangueira existente na parte superior do **PIM**, até os 4 injetores situados, de forma simétrica, em ambas as faces do **TH**.

Os resultados a serem obtidos dependem de dois aspectos importantes. Um está relacionado ao processo de dissolução do polímeros no escoamento do solvente. Após ampla análise, que incluiu revisão bibliográfica e ensaios de visualização adicionando corante azul na solução mãe para diferentes valores de concentração, obteve-se como resultado que o polímero injetado, para as concentrações de ensaios, se dissolve no solvente. Isto oferece subsídios para justificar que as soluções poliméricas possam ser consideradas como homogêneas.

O segundo aspecto importante está relacionado à degradação mecânica das soluções poliméricas, que deve ocorrer. Devido ao fato da instalação ser de tipo circuito fechado, poderia existir presença de polímero remanescente que com o passar do tempo pudesse provocar alterações na concentração. Os ensaios realizados demonstraram que o polímero degrada-se totalmente durante sua passagem pelos dois dispositivos que existem na instalação e que geram altas taxas de cisalhamento (**BC** e **PO**).

2.2 Sistema de medição de velocidade e processamento de sinais

As medições de velocidade foram feitas utilizando um *Laser Doppler Anemometer* (LDA) Dantec 55X unidimensional. Este sistema permite que as medições possam ser feitas em pontos próximo de contorno sólido com uma adequada resolução espacial e temporal do sinal. O volume de controle, definido como o cruzamento dos feixes do sistema LDA tem dimensões iguais a 3.2 mm de comprimento e 0.31 mm de diâmetro.

O processamento dos sinais aquisitados foi feito utilizando o próprio software fornecido pelo fabricante do anemômetro, a partir do qual são obtidos a velocidade média do escoamento e os diferentes momentos (*RMS*, Assimetria e Curtose). Para a análise espectral da turbulência foram escolhidos os seguintes critérios para a obtenção do espectro em frequência, $S(f)$:

- O espectro $S(f)$ não foi normalizado, ou seja, o resultado é dado na forma $S(f)$ versus f ;
- 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 dos resultados;
- Utilizou-se janela Bartlett, de uso comum no processamento de sinais em escoamento de fluidos;

- Os espectros foram analisados em duas regiões do escoamento: próximo do leito do canal e na região central do escoamento ($h_{st}/2$).

A transformação do espectro em frequência em espectro no domínio do número de ondas $S(kw)$ foi feita utilizando as seguintes transformações (Nezu & Nakagawa 1993):

$$S(kw) = \left(\frac{u}{2\pi} \right) S(f) \quad (1)$$

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

sendo u a velocidade média local no ponto, onde são analisados os espectros.

2.3 Análise de incertezas

As incertezas na determinação das diferentes magnitudes foram calculadas pela relação geral:

$$U_z = \sqrt{P_z^2 + B_z^2} \quad (3)$$

onde P é o limite de precisão e B o limite de desvio.

Como, durante a realização dos ensaios cada ponto foi medido uma única vez, o termo correspondente ao limite de precisão não foi considerado. Devido a isto, e expandindo em séries de Taylor, a expressão (3) fica:

$$U_z = \sqrt{B_z^2} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \right)^2 U x_i^2} \quad (4)$$

A aplicação da Eq. (4) às principais magnitudes é resumida na tabela 1, sendo os resultados obtidos com um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 1. Incerteza das principais magnitudes

Magnitude	Incerteza	Incerteza abs. (%)
Coef. de atrito, f	0.000287	4.01
Vazão, Q (m ³ /s)	1.78E-06	2.5
Vel. Atrito, u_* (m/s)	0.0003661	5.23
Tensões de Reynolds	0.00039	6.11
Dissipação de ECT	2.91E-06	5.24
Produção de ECT	2.37E-05	6.89

2.4 Procedimento Experimental

Para a realização dos ensaios, o processamento experimental é o seguinte:

Liga-se a bomba e abrindo-se o registro existente na tubulação de recalque, estabelece-se a vazão de trabalho. Espera-se aproximadamente 20-25 minutos para garantir que o sistema esteja estável, quando procede-se o levantamento do perfil de velocidades. Simultaneamente são lidos os valores de temperatura do escoamento, T , e altura da lâmina d'água nas seções de entrada, saída e de testes, h_1 , h_2 e h_{st} respectivamente. Quando das medições com soluções poliméricas o processamento 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 entre 4-5 minutos é necessário para garantir que o gradiente de pressões no canal está estabelecido.

Na tabela 2, a seguir, se apresentam as condições experimentais do presente trabalho.

Tabela 2. Condições experimentais do presente trabalho

Re	Vazão (m ³ /s)	Cw (ppm)
$Re_0 \approx 8-8.5 \times 10^3$	2.286×10^{-4}	0,10, 20
$Re_1 \approx 4.6-5.1 \times 10^4$	1.29×10^{-3}	0,10, 20
$Re_2 \approx 8 \times 10^4 - 10^5$	2.43×10^{-3}	0,10, 20

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 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 8×10^3 até 10^5 aproximadamente. Isto dá a possibilidade de analisar um dos aspectos mais importantes deste fenômeno: o início da redução de atrito.

Durante os cálculos, as propriedades das soluções poliméricas foram consideradas com idênticos valores às da água, devido ao fato das soluções serem da baixa concentração e bem diluídas.

Como não foi possível de se medir a componente normal da velocidade, v' , quando necessário, assumiram-se tendências e/ou definições de reconhecida validade na literatura, para a definição de critérios que justificassem determinadas conclusões.

Uma grande quantidade de informação foi gerada no processamento dos resultados dos ensaios. Apresenta-se a seguir, um resumo destes resultados, acompanhado de uma análise e discussão, que trazem informações importantes para uma melhor compreensão do processo de redução de atrito nos escoamentos de soluções poliméricas em canal.

3.2 Lei de parede

A Fig. (2) mostra os perfis adimensionalizados de velocidade U^+ versus Y^+ , para Re_0 (a) e Re_2 (b). Inicialmente pode ser visto que, para Re_0 não existem modificações significativas. Somente para concentração $Cw=20$ ppm os perfis tendem a um ligeiro afastamento com respeito ao solvente. No gráfico (b), se observa, para Re_2 , o comportamento típico de escoamentos redutores de atrito, neste caso para polímeros de baixo peso molecular. Com o incremento da concentração, os perfis das soluções começam a se afastar daquele do solvente de forma paralela. Portanto, para escoamentos de soluções poliméricas, a lei de parede apresenta diferenças quando comparadas com a dos escoamentos Newtonianos e pode ser expressa pela relação:

$$U^+ = A \ln Y^+ + B + \Delta B \quad (5)$$

Na Equação (5) introduz-se o coeficiente A , em substituição a constante de Kármán e o termo ΔB que representa o deslocamento do perfil de velocidades. Portanto, este último termo pode ser considerado como típico de escoamentos redutores de atrito, com valores característicos para cada sistema soluto-solvente.

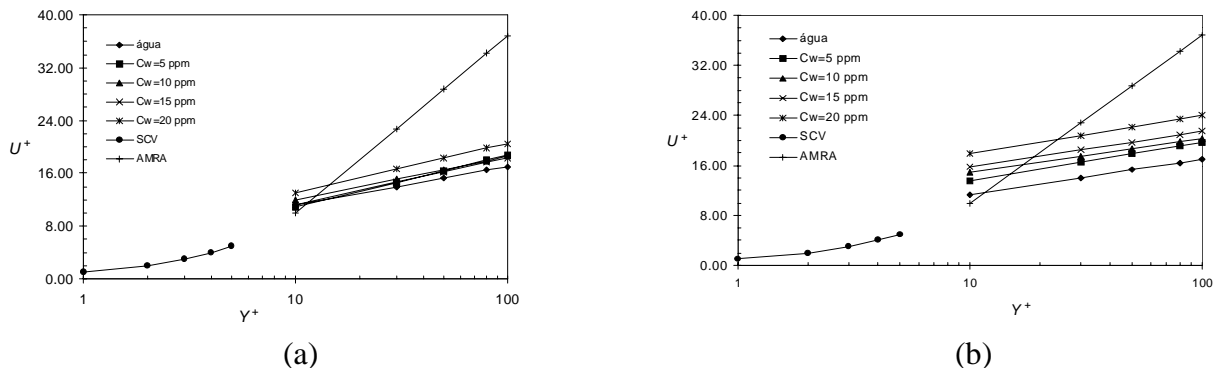


Figura 2. Perfis adimensionalizado para Re_0 e Re_2

Dos resultados obtidos se observa que o termo A não varia significativamente e ΔB é de sinal positivo. Este comportamento é qualitativamente diferente daquele de polímeros de alto peso molecular (Vilalta & Ortiz 1999), e está associado à menor capacidade dos polímeros de baixo peso molecular de reduzir o atrito em escoamentos turbulentos.

3.3 Perfil de Intensidade Turbulenta

A análise da $RMSu'$, adimensionalizada com a velocidade de atrito, é representada na Fig. (3) para Re_1 (a) e Re_2 (b). Para Re_0 os resultados mostraram que as modificações são significativas somente para $Cw=20$ ppm.

Como característica importante a observar nesta figura, destaca-se que as regiões correspondentes aos máximos valores de intensidade turbulenta são mais largas que no caso do solvente e que as principais modificações ocorrem na região de parede

Considerando-se que a região onde ocorrem os máximos valores de intensidade turbulenta são equivalentes à de produção de energia cinética turbulenta (ECT), pode-se concluir, de forma primária por enquanto, que a adição de polímeros modifica o processo de produção.

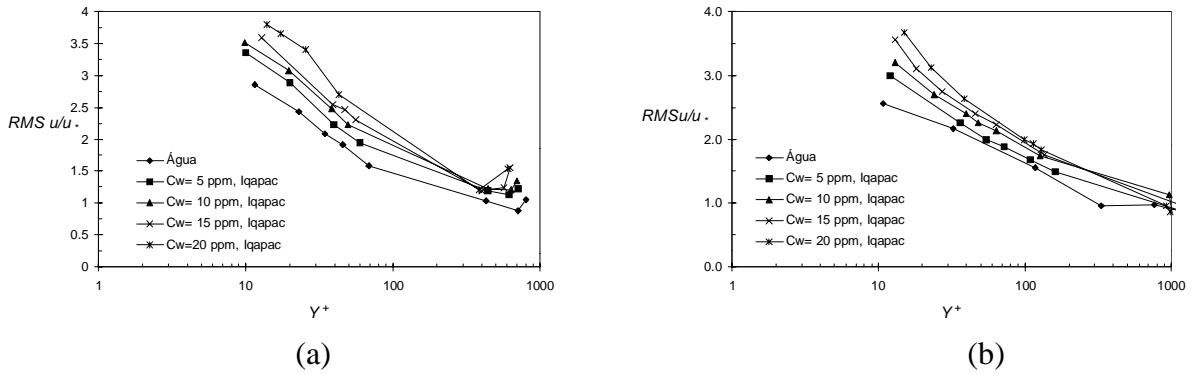


Figura (3) Perfis de intensidade turbulenta: para Re_1 (a) e para Re_2 (b).

3.4 Tensões de Reynolds

Os resultados experimentais obtidos, demonstram que a componente axial da velocidade, u' , se incrementa para escoamentos redutores de atrito. Se, como amplamente confirmado da literatura, a componente normal da velocidade, v' diminui, prevê-se que exista uma perda na correlação entre estas, que deve conduzir a um amortecimento nos processos de transferência de energia devido às flutuações da velocidade, ou seja, nas tensões de Reynolds. A Fig. (4), que mostra o comportamento das tensões de Reynolds para Re_1 corrobora esta afirmação. Verifica-se que quando da adição de polímeros as tensões diminuem, tendência que se acentua com o incremento de concentração.

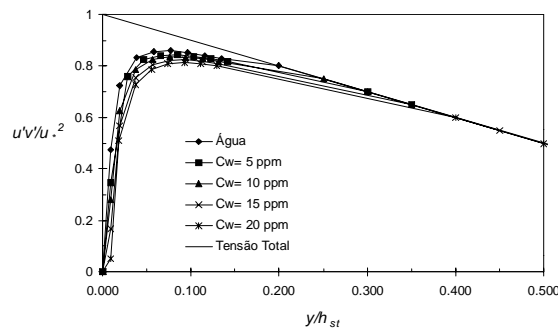


Figura (4) Tensões de Reynolds

O comportamento acima descrito, indica que as tensões viscosas em escoamentos redutores de atrito, são mais significativas, aumentando a influência da viscosidade até posições mais afastadas da parede.

3.5 Produção de Energia Cinética Turbulenta (ECT)

De forma geral, a produção de ECT é amortecida devido à adição de polímeros, conforme pode ser visto na Fig. (5) para Re_1 e Re_2 . Os resultados para Re_0 , não mostraram modificações significativas, de forma similar aos parâmetros anteriormente analisados.

Da análise da figura de referência destaca-se que:

- O amortecimento da produção depende do número de Reynolds e da concentração. Com o incremento destes parâmetros, a tendência acima é mais acentuada;
- As modificações ocorrem na região onde $Y^+ < 100$, sem variações significativas na região externa do escoamento;
- As regiões de máxima produção de turbulência, estão mais afastadas da parede e seu valor diminui com o incremento da concentração. Isto já foi previsto na análise da intensidade turbulenta.

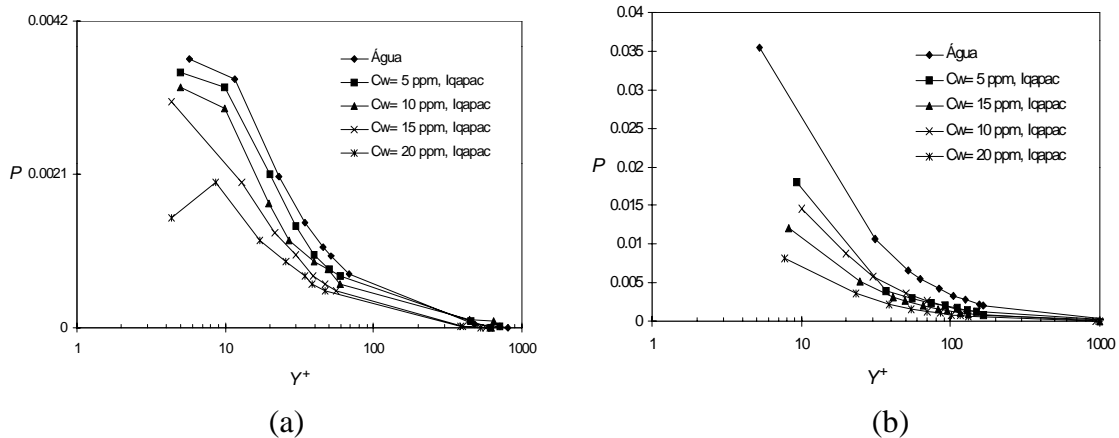


Figura (5) Produção de ECT: (a) para Re_1 , e (b) para Re_2 .

3.6 Análise espectral e escalas de turbulência

Tanto para o solvente quanto para as soluções poliméricas a análise espectral e das escalas de turbulência foi feita em três regiões diferentes: na região de parede (a 1 mm aproximadamente do leito do canal), na região central do escoamento (metade da altura da lâmina d'água) e na região da superfície livre (próximo da zona de máximas velocidade). Considerando-se que, conforme discutido, os polímeros são efetivos na primeira das regiões acima mencionadas, somente serão analisados os resultados nesta região.

A Fig. (6) mostra o espectro de potência para Re_1 e diferentes concentrações. Quando comparado com o correspondente ao solvente, se observam diferenças significativas, sendo a mais importante, a ausência da região inercial. Isto deve-se a dois aspectos fundamentais. O primeiro está relacionado à essência das modificações que a adição de polímeros provoca na estrutura da turbulência. O segundo deve-se a que, a equação que define o espectro de potência nesta zona (equação de Kolmogorov) foi determinada sob condições de isotropia das componentes da velocidade o que não ocorre neste tipo de escoamentos.

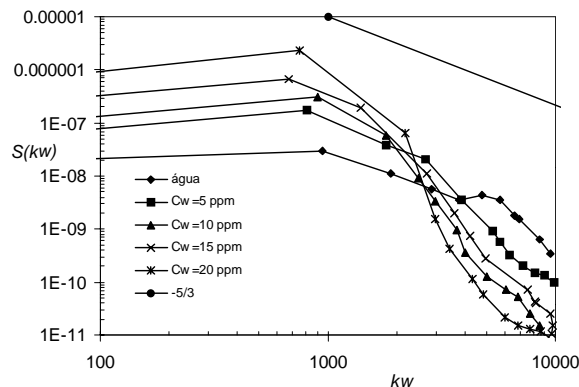


Fig. (6) Espectros de potência

Outro aspecto relevante no espectro de potência para soluções poliméricas é a ocorrência de uma redistribuição de energia das altas para as baixas frequências. Devido a isto ocorre uma

diminuição da dissipação de energia, que provoca que as escalas dissipativas de comprimento sejam maiores para as soluções poliméricas. Como consequência disto as faixas de produção e de dissipação estão mais próximas.

A partir de estimativas geométricas a escala integral de comprimento, L foi considerada como sendo igual á distância entre o ponto em análise e o leito do canal que, conforme já mencionado, é aproximadamente igual a 1mm. A escala integral de velocidade, U foi escolhida como sendo a $RMSu'$ neste ponto, independentemente do tipo de escoamento. Para determinar as escalas dissipativas é necessário avaliar quantitativamente a taxa de dissipação, ε , o que foi feito utilizando a Hipótese de Equilíbrio, que relaciona as grandes escalas com a dinâmica dos turbilhões menos energéticos, através da relação:

$$\varepsilon = \left(\frac{U^3}{L} \right) \quad (6)$$

Os resultados obtidos mostram que a taxa de dissipação pode diminuir em até 42% para $C_w=20$ ppm. Se considerarmos que as escalas dissipativas dependem de ε e da viscosidade cinemática do escoamento (função da temperatura, independentemente do tipo de fluido), obtemos que as escalas dissipativas de comprimento e tempo aumentam e as de velocidade, energia e vorticidade diminuem.

Pode-se portanto concluir do que foi dito anteriormente, que, para escoamento de soluções poliméricas, tanto a produção quanto a dissipação de ECT diminuem, modificando as escalas dissipativas, numa relação conforme descrito acima. O fato da relação entre as escalas de velocidade integral e dissipativas diminuir, representa que se está transferindo menos energia dos maiores turbilhões para os menores. A combinação destes efeitos mostra a dependência entre os processos de produção e dissipação e tem uma influência direta na cascata de energia cujo desenvolvimento é inibido.

3.7 Relação Re versus f

Conforme observado da análise anterior, a adição de polímeros provoca um amortecimento dos processos energéticos dos escoamentos turbulentos. Do ponto de vista “macroscópico” o principal efeito dos polímeros, está relacionado com a diminuição do gradiente de energia entre duas seções o que se reflete numa diminuição do coeficiente de perda de carga, f . A Fig. (7) representa a relação entre Re versus f , para o aditivo em estudo. Analisando-a se observa que a redução de atrito começa a se manifestar para $Re \approx 10^4$. Isto significa que para menores valores do número de Reynolds os polímeros não afetam a estrutura da turbulência, aspecto este que se corresponde com a teoria do início da redução de atrito. Esta é a razão pela qual neste trabalho, para Re_0 , não existem modificações significativas na estrutura dos escoamentos poliméricos.

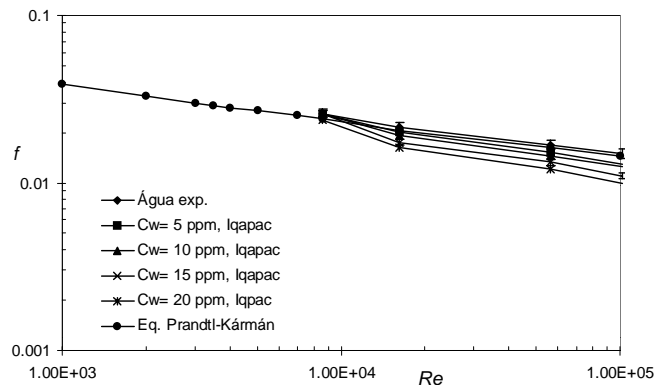


Figura (7) Relação entre Re e f para o $lqapac$.

Com o incremento do número de Reynolds e da concentração se observa um gradual afastamento das curvas das soluções poliméricas com respeito à do solvente. Nesta região,

conhecida como região polimérica, a magnitude da redução de atrito depende do tipo de polímero, da concentração e do regime de escoamento (Re). Se compararmos, por exemplo, a redução de atrito do *Iqapac 731* com a do *Iqapol*, polímero de alto peso molecular (Vilalta & Ortiz 1999), se observa que, para valores de Reynolds e de concentração semelhantes, o segundo consegue reduções de atrito maiores, o que demonstra a dependência do tipo de polímero e de suas características sobre o fenômeno em estudo.

Normalmente, o efeito dos polímeros sobre o coeficiente f é avaliado, quantitativamente, através do coeficiente de Eficiência da Redução de Atrito, ϕ , que varia em função do tipo de polímero, do valor de Re e dos diferentes valores de concentração. Os resultados obtidos, estão mostrados na Fig. (8).

Como se observa nesta Fig. (8), a redução de atrito começa para Re_0 e $C_w=20$ ppm com valores de $\phi \approx 8\%$. Com o incremento do número de Reynolds, e da concentração, o coeficiente ϕ aumenta, chegando a aproximadamente 35% para Re_2 e $C_w=20$ ppm. Um aspecto importante pode ser visto quando da análise e comparação das Figs. (2) e (8). O paralelismo nas curvas dos perfis de velocidades se corresponde com a tendência de variação de ϕ . Na faixa em estudo, se observa que ϕ aumenta de forma tal que mantém uma diferença aproximadamente igual entre os diferentes valores do número de Reynolds. Isto significa que a Assintota de Máxima Redução de Atrito (AMRA) para este polímero deverá ser atingida para valores de concentração maiores. Para esses valores de concentrações, possivelmente maiores que 200 ppm, deve-se esperar que as curvas correspondentes aos perfis de velocidade adimensionalizados comecem a perder o paralelismo, o aumento de ϕ seja menor e finalmente o escoamento de soluções poliméricas entrem na zona de máxima redução de atrito. Esta região se caracteriza como uma região onde incrementos da concentração não conseguem mais reduzir o atrito.

Finalmente destaca-se que esta última fase se corresponderia com a de um polímero de alto peso molecular, mas com concentrações muito menores.

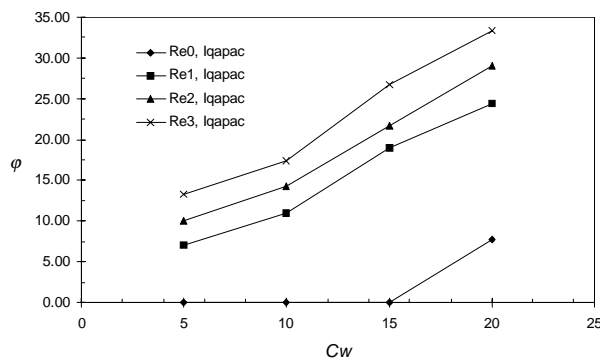


Figura (8) Coeficiente de Redução de atrito, ϕ , para diferentes valores de Re .

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho constitui a sequência de um estudo para avaliar as modificações na estrutura da turbulência devido à adição de polímeros com diferentes características. Dentre estas, a influência do peso molecular do agente redutor é das mais importantes por seu caráter controverso na literatura. Os resultados correspondentes a polímeros de alto peso molecular foram apresentados em Vilalta & Ortiz (1999). Da análise do presente trabalho, dedicado a avaliar polímeros de baixo peso molecular, conclui-se que:

1. Os polímeros de baixo peso molecular, são capazes de produzir redução de atrito em escoamentos turbulentos. Quando comparados com polímeros de alto peso molecular os efeitos quantitativos são menores;

2. Estima-se que a capacidade de polímeros de baixo peso molecular de modificar a estrutura da turbulência deve-se a que, conforme determinado através de uma análise reológica simplificada, os efeitos viscosos são mais importantes do que os efeitos elásticos, na redução de atrito;
3. As modificações na estrutura da turbulência ocorrem na região de parede, ou seja, para $Y^+ < 100$;
4. Devido a presença do *Iqapac 731*, ocorre um amortecimento nos processos de produção e de dissipação de ECT. Como consequência disto, as escalas dissipativas se modificam sendo que as de comprimento e tempo aumentam e as de velocidade, energia e vorticidade diminuem;
5. O espectro de potência para soluções poliméricas de *Iqapac 731*, não apresenta região inercial.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES/BRASIL e ao CNPq pelos auxílios concedidos durante a realização desta pesquisa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lee, S. H-K., Sengupta, S., Wei, T.; 1995, "Effect of polymer additives on Görtler vortices in Taylor-Couette flow". **J. Fluid Mech.**, v.282, p. 115-129.
- Nezu, I.; Nakagawa, H. 1993, "Turbulence in open channel flows", Rotterdam/Balkema, 281 p.
- Sá, P.A., Pinho, F.T., 1994, "Turbulent pipe flow characteristics of low molecular weight polymer solutions". **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, vol. 55, p. 321-344.
- Toms B.A.; 1948, "Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds number. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON RHEOLOGY, 1., North Holland, Proceeding., vol. 2, pp. 135-141.
- Vilalta, G., Ortiz, J.P., 1997, "Estudo experimental da redução de atrito em escoamentos turbulentos em tubulações". Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES, Brasil, vol. 4, p. 321-328.
- Vilalta, G., Ortiz, J.P., 1999, "Modificações na estrutura de escoamentos turbulentos em canal devido a adição de polímeros". Memórias del IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Vol. 3, Santiago de Chile, Chile.

INFLUENCE OF THE POLYMER MOLECULAR WEIGHT IN THE TURBULENT CHANNEL FLOW STRUCTURE MODIFICATIONS

Abstract

In this work, an experimental study about the influence of the polymer molecular weight in the turbulent channel flow structure and, consequently, in the drag reduction, is presented. The Iqapac 731, low molecular weight polymer was used in the tests, that were carried out at four concentrations of the polymeric solutions and at different Reynolds numbers in the range between 8×10^3 e 10^5 . The results showed that polymers with low molecular weight, lower than 10^6 , are able to drag reduction, although the effects are smaller if compared to the high molecular weight polymers. By mean of rheological analysis it is estimated that the viscous properties are more important than elastic properties.