

## MEDIÇÕES DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM TUBOS NA PRESENÇA DE POLÍMEROS REDUTORES DE ATRITO

**Aluno: Renato Bichara Vieira**  
**Orientador: Luiz Fernando Alzuguir Azevedo**

### Introdução

O fator de atrito pode ser reduzido drasticamente dissolvendo uma minúscula quantidade de moléculas de polímero de cadeia-longa em um escoamento turbulento (Gyr & Berwersdorff, 1995). Nos fluxos em dutos, por exemplo, o atrito pode ser reduzido em até 70%, acrescentando apenas algumas partes por milhão (ppm) de polímeros.

Toms (1977) descobriu por acaso o fenômeno da redução de atrito por aditivos poliméricos. Desde esta descoberta, a aplicação do fenômeno de *DR* (do inglês, drag reduction) tem-se ampliado bastante.

Inúmeros são os trabalhos apresentados que buscam entender esse fenômeno. Apesar disto, ainda não há consenso sobre como o polímero interage com o fluido. Na literatura se apresentam três possíveis mecanismos para explicar o fenômeno da redução de atrito. O primeiro atribui a redução de atrito a um aumento na viscosidade efetiva em regiões de fluxo extensional, o segundo a um efeito anisotrópico causado pelos polímeros estendidos, e por último, a redução de atrito é atribuída à elasticidade introduzida no comportamento dos fluidos pelos polímeros. Dessa forma, tornou-se necessária a ampliação do campo de estudo do fenômeno de *DR*.

A redução de atrito devido à adição de polímeros em um tubo é função da concentração, vazão, peso molecular, tipo de substâncias e das próprias condições do escoamento, pelo qual no presente trabalho se terá um controle destes parâmetros.

O fenômeno de *DR* aumenta com o incremento da concentração polimérica, até atingir o valor da Assíntota de Máxima Redução de Atrito (siglas em inglês, *MDR*), valor a partir do qual maiores concentrações não produzem mais efeito redutor.

Segundo as medições feitas em outros trabalhos apresentados na literatura os polímeros interagem com a turbulência provocando uma mudança em sua estrutura. Portanto tem grande impacto sobre os estudos básicos de turbulência.

### Objetivo

O presente trabalho visa investigar o mecanismo de redução de atrito quando se adiciona ao escoamento turbulento hidraulicamente desenvolvido em um duto circular pequenas quantidades de polímeros redutores de atrito.

### Velocimetria por imagem de partículas – *PIV*

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição dos princípios de funcionamento da técnica de medição utilizada no presente trabalho denominada Velocimetria por Imagem de Partículas, conhecida pela sigla *PIV* (do inglês, *Particle Image Velocimetry*). Esta técnica é baseada no processamento digital de imagens de partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido e iluminadas por plano de luz laser pulsada. A técnica *PIV* vem experimentando um desenvolvimento acentuado nos últimos anos, acompanhando o desenvolvimento das tecnologias de câmera digitais, fontes de luz laser pulsadas, e da capacidade de processamento dos computadores. Trata-se de uma técnica não intrusiva que fornece campos instantâneos de velocidade em regiões extensas do escoamento.

A técnica *PIV* para a medição de campos instantâneos de velocidade baseia-se na determinação do campo de deslocamento de partículas traçadoras previamente distribuídas no

fluido em um dado intervalo de tempo. O tempo para a avaliação do deslocamento das partículas deve ser pequeno quando comparado às menores escalas de tempo características do escoamento, de modo que o campo de deslocamento medido possa ser considerado como sendo instantâneo. O campo de velocidade é obtido da razão entre o deslocamento e o tempo, como indicado na equação abaixo.

$$velocidade = \frac{deslocamento}{tempo}$$

O princípio geral de funcionamento da técnica *PIV* pode ser melhor compreendido com o auxílio da Figura 1, reproduzida de Raffel, M (2007). Na figura, de forma esquemática, é apresentado um escoamento de fluido contendo partículas traçadoras através de um duto de seção reta retangular. Um plano de luz é formado a partir de um feixe proveniente de uma fonte laser pulsada. Um conjunto de lentes é usado na formação do plano a partir do feixe do laser. O plano de luz incide sobre uma seção do escoamento iluminando as partículas traçadoras presentes na região do plano iluminado.

Uma câmera fotográfica é posicionada ortogonalmente ao plano de iluminação. A captura das imagens das partículas é sincronizada com os pulsos do laser, cujo intervalo de tempo é conhecido e precisamente determinado pelo equipamento eletrônico que controla a fonte laser. Desta forma, obtêm-se duas imagens consecutivas das partículas passando no plano iluminado. Tipicamente, utilizam-se ampliações das imagens capturadas na faixa de 0,1 a 10, dependendo da aplicação em questão.

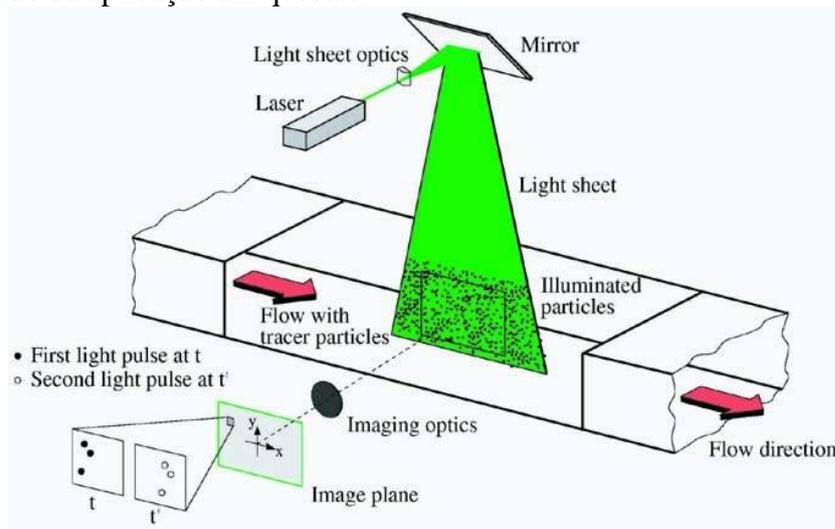


Figura 1 - Ilustração da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (Ptasinski, 2000)

Uma vez capturado um par de imagens consecutivas das partículas traçadoras, a fase seguinte da técnica *PIV* é a análise das imagens com o objetivo de determinar o campo de deslocamento das partículas traçadoras no intervalo de tempo correspondente ao intervalo entre os pulsos dos lasers.

Devido ao elevado número de partículas presentes em uma imagem típica de *PIV*, torna-se impossível identificar a posição de cada partícula em cada uma das imagens. Esta é uma técnica possível de ser utilizada em imagens com pequeno número de partículas traçadoras, sendo conhecida como Velocimetria por Acompanhamento de Partículas, ou pela sigla em inglês *PTV*, *Particle Tracking Velocimetry*. O número de vetores velocidade obtidos com esta técnica é, obviamente, muito menor que aquele obtido pela técnica *PIV* que utiliza valores de concentrações de partículas muito maiores. Também, como será descrito brevemente a seguir, na técnica *PIV* os vetores velocidades são medidos nas posições previamente determinadas pelo usuário, ao contrário da técnica *PTV* onde os vetores velocidade são determinados nas

posições aleatórias onde se encontram as partículas, exigindo uma etapa posterior de interpolação do campo vetorial para posições mais convenientes para o estudo do escoamento.

Para determinar o deslocamento desejado das partículas utiliza-se a técnica estatística conhecida como correlação cruzada de funções, utilizada para determinar padrões de semelhança entre funções. Para aplicar este tipo de análise às imagens de partículas, abre-se mão da determinação do deslocamento individual de cada partícula e determina-se o deslocamento de pequenas regiões no escoamento contendo grupos de poucas partículas, digamos 10 partículas. As dimensões destas regiões, denominadas janelas de interrogação, estão associadas à resolução espacial da técnica, em outras palavras, representam um ponto de medição. A hipótese admitida é que estas janelas são pequenas em relação às dimensões do escoamento e que gradientes de velocidade não são apreciáveis nestas regiões. Assim, espera-se que o padrão formado pelas partículas na janela de interrogação em torno de uma dada posição na Imagem A, seja transportado para a Imagem B, adquirida em um pequeno intervalo de tempo posterior, sem que seja alterado significativamente. A tarefa do algoritmo de correlação cruzada é identificar a posição deste padrão na Imagem B.

A Figura 2 mostra de maneira esquemática o procedimento adotado. Na figura, a imagens A e B foram capturadas com um intervalo de tempo  $\Delta t$  conhecido. Em torno de um dado ponto da imagem A é posicionada uma janela de interrogação com dimensões tais que incorpore a imagem de cerca de 10 partículas.

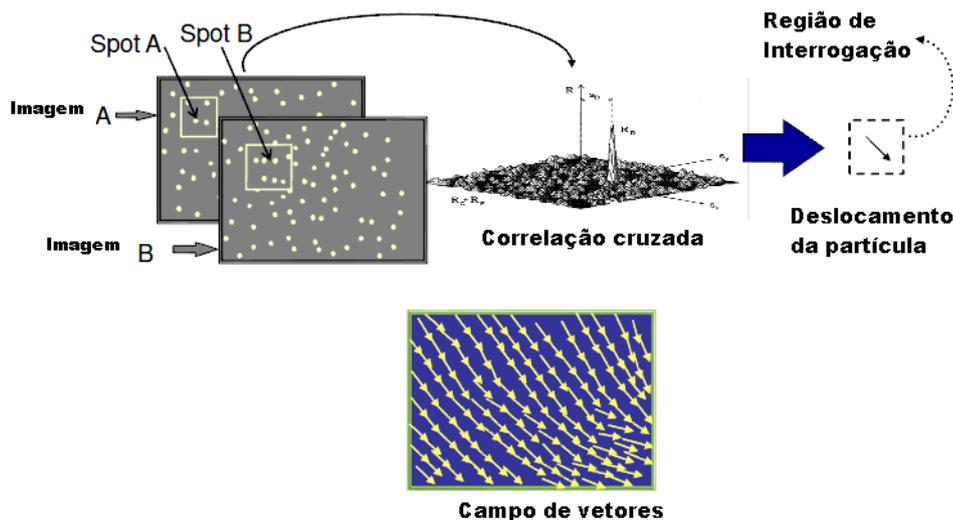


Figura 2 – Correlação cruzada de duas janelas de interrogação

Dentre os milhares de vetores velocidade medidos instantaneamente é provável que um pequeno número apresente valores irrealistas. Estes vetores espúrios são prontamente identificados quando comparados com seus vizinhos. Quando a técnica PIV é bem empregada, o número destes vetores pode ser da ordem de 1% a 2% do total de vetores, podendo mesmo ser nulo. De qualquer modo, caso presentes, estes vetores espúrios devem ser identificados, removidos e substituídos por vetores interpolados entre seus vizinhos. Caso não sejam substituídos, os vetores espúrios podem produzir resultados errôneos nos campos de quantidades derivadas, como é o caso dos campos de vorticidade.

## Descrição dos experimento

A seção de testes foi construída em um trabalho anterior (Paquelet Patrick, 2009) e modificada no presente trabalho, de tal forma que permitisse a realização de medidas de queda de pressão, além da medição de velocidades e das flutuações da intensidade de turbulência utilizando a técnica óptica *PIV*.

A seção de testes é apresentada esquematicamente na Figura 3.

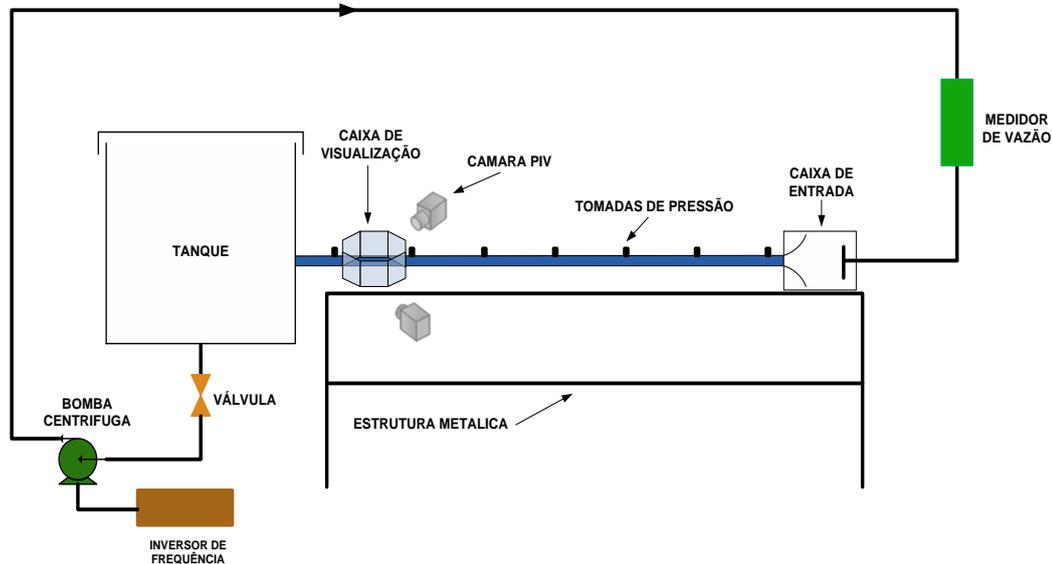


Figura 3 – Figura esquemática da seção de testes.

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

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

Para obter o gradiente de pressão axial no escoamento foram instaladas ao longo do tubo de acrílico 7 tomadas de pressão estática na direção axial, numeradas de 0 a 6. Para minimizar a incerteza da medição, foram feitos pequenos furos de 1 mm de diâmetro no tubo de forma que as tomadas de pressão não afetassem o escoamento (Barros Jr., J.M., 2007).

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

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

Para a medição do campo de velocidade foi utilizada a técnica PIV-bidimensional, descrita anteriormente.

A Figura 4 mostra o esquema da montagem dos principais componentes que forma o sistema PIV.

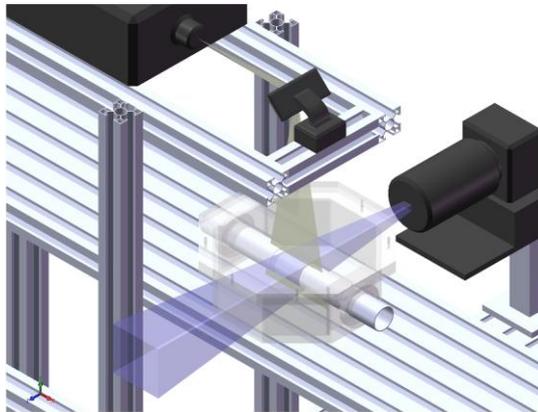


Figura 4 – Posicionamento das câmeras, laser e seção de visualização na bancada de testes

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

Como partículas traçadoras foram usadas esferas de vidro ocas com revestimento de prata (Potters Industries). O diâmetro médio destas partículas é de  $13\mu\text{m}$ , e sua massa específica é de  $1,60\text{ g/cm}^3$ .

O uso da técnica PIV para a medição do escoamento através de um tubo de seção circular, como no presente caso, é dificultado pela refração ótica na superfície curva do tubo. A refração dos raios ópticos é especialmente problemática quando deseja-se realizar medições junto à parede do tubo. A curvatura da parede, aliada à diferença entre os índices de refração do ar, acrílico e água, produz distorções que impedem a visualização da região da parede. Para minimizar este problema, uma pequena parte da tubulação onde seriam realizadas as medições foi substituída por uma seção de teste especialmene projetada. A seção de teste consistia de uma caixa de visualização octogonal de acrílico, montada ao redor do tubo, como indicado na Figura 5. O espaço entre o tubo e as paredes da caixa era preenchido com água. Desta forma, a visualização do escoamento no interior do tubo era feita através de uma parede plana, sendo que o caminho óptico de um raio proveniente do interior do tubo encontrava água no interior e exterior do tubo. Mesmo com a utilização da caixa de visualização ainda foram identificadas distorções na imagem das partículas traçadoras junto á parede do tubo. Este problema foi contornado de forma satisfatória pela diminuição da espessura da parede do tubo de acrílico na região de medição.

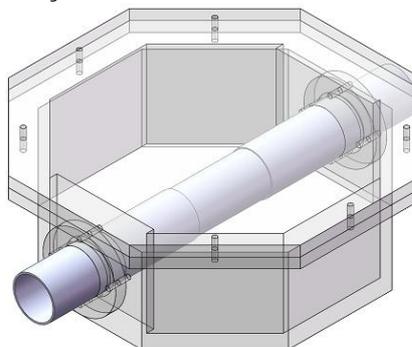


Figura 5 – Seção de visualização octogonal em acrílico mostrando o tubo de acrílico com parede usinada até uma espessura de 0,5 mm

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

O polímero utilizado em nossos experimentos era o Superfloc A110 (Cytec Industries). O polímero Superfloc A110 tem um peso molecular de  $6-8 \times 10^6$  g/mol, e tem aproximadamente  $10^5$  monômeros, de acordo com o fabricante. A vantagem deste polímero é a sua resistência à degradação mecânica, superior à de outros polímeros disponíveis, segundo os trabalhos tomados como referência. (Toonder, 1996)

### Redução dos dados globais do escoamento

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

$$Re = \frac{\rho U_b D}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\pi D \mu}$$

onde,

$\rho$ : massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );

$\mu$ : viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ );

Q: vazão volumétrica de fluido ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

D: diâmetro do tubo (m);

A massa específica e viscosidade da água para o cálculo do fator de atrito e do número de Reynolds foram avaliadas na temperatura medida durante os experimentos por meio de equações que levam em conta dependência destas propriedades com a temperatura (Touloukian, 1970):

$$\rho = \frac{\sum_0^5 a_i T_f^i}{1 + b T_f}$$

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

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

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

### Procedimento Experimental

Para a realização dos experimentos tanto com água como com a solução de água com polímero, toda a seção de testes era inicialmente preenchida com água filtrada. A válvula na sucção da bomba era fechada e em seguida o tanque era preenchido com 130 litros de água filtrada.

Em seguida, a válvula do tanque era aberta, permitindo o escoamento do fluido para a bomba, que era acionada para fazer circular o fluido por toda a seção de testes.

A solução de água com polímero a ser empregada nos experimentos era preparada a partir de uma solução concentrada a 1000 ppm posteriormente diluída no tanque principal da bancada de testes. A solução concentrada era preparada em um bequer diluindo-se 2,6g do polímero Superfloc A110 em 2,6 litros de água deionizada e misturando-se suavemente por 2

horas. Esta solução era deixada em repouso em recipiente fechado por 24h para que ficasse completamente homogênea.

Todos os ensaios realizados no presente trabalho utilizaram solução de polímero em água com concentração de 20 ppm.

Para cada nova solução de água com polímero a 20 ppm preparada determinava-se a variação da viscosidade cinemática de cisalhamento com a temperatura. A variação da viscosidade da água com temperatura também era determinada. Estas medidas foram obtidas utilizando-se Cannon-Fenske. Estas medições foram feitas no Laboratório de Caracterização de Fluidos da PUC-RIO.

Terminada a montagem e alinhamento dos componentes ópticos, adicionava-se ao fluido de trabalho na seção de testes uma carga de partículas traçadoras. Buscava-se obter uma concentração da ordem de a seção de  $10^{10}$  partículas por metro cúbico de fluido. Este número era facilmente transformado em massa de partículas conhecendo-se o diâmetro médio e a massa específica das partículas utilizadas. As partículas eram adicionadas ao reservatório da seção de testes e, em seguida, a bomba era acionada para que a distribuição de partículas ficasse homogênea. A quantidade de partículas adequada era verificada pela análise de imagens teste. Nestas imagens verificava-se se o número recomendado de cerca de 10 partículas por janela de interrogação estava sendo satisfeito.

Após o ajuste da vazão desejada para um dado experimento, o programa INSIGHT 3G era acionado capturando 5 seqüências de 500 imagens para cada experimento. As 2500 imagens não eram capturadas de uma só vez devido a limitações de memória RAM do computador utilizado. As imagens eram então armazenadas para posterior processamento. O número de 2500 imagens foi determinado em experimentos teste como sendo adequado para fornecer valores adequados para as grandezas estatísticas que caracterizam o escoamento turbulento.

### Resultados dos experimentos

Os testes realizados envolveram cinco valores do número de Reynolds para o escoamento de água e para uma solução de água e aditivo polimérico redutor de atrito. Em todos os testes a concentração da solução do aditivo foi mantida constante e igual a 20 ppm em massa.

Foram medidos a queda de pressão ao longo do tubo e perfis de velocidade média. Com o objetivo de avaliar o efeito do polímero no escoamento, os resultados com o aditivo foram comparados com aqueles obtidos para a água. Resultados do trabalho de Toonder para a mesma concentração de solução polimérica foram também usado como forma de validar os resultados obtidos.

Tabela 1 Casos testados nos experimentos com água:

Casos experimentais para água									
Símbolo	Q	V	$\rho$	$\mu \times 10^4$	Re	$\Delta P/L$	$u_\tau$	$Re_\tau$	$v/u_\tau$
	l/min	m/s	kg/m <sup>3</sup>	kg/m*s		kPa/m	(mm/s)		( $\mu$ m)
▲	34.4	0.63	997.27	9.09	23554	0.151	35.8	1336	25.4
◆	60.0	1.10	997.19	9.03	41334	0.402	58.5	2197	15.4
●	74.3	1.36	997.14	8.99	51428	0.587	70.7	2667	12.7
■	90.9	1.67	997.09	8.95	63237	0.812	83.2	3152	10.8
★	113.6	2.09	997.04	8.90	79390	1.213	101.7	3872	8.78

Tabela 2 Casos nos experimentos com solução polimérica com concentração de 20 ppm:

Casos experimentais para solução polimérica com concentração de 20 ppm em massa										
Simbolo	Q	V	$\rho$	$\mu \times 10^4$	Re	$\Delta P/L$	$u_\tau$	$Re_\tau$	$v/u_\tau$	$DR_P$
	l/min	m/s	kg/m <sup>3</sup>	kg/m*s		kPa/m	(mm/s)		( $\mu\text{m}$ )	(%)
$\Delta$	34,2	0,63	997,272	9,09	23417	0,109	30,4	1134	30,0	27,9
$\diamond$	60,0	1,10	997,247	9,07	41146	0,261	47,2	1763	19,3	35,0
$\circ$	74,3	1,36	997,222	9,05	51079	0,402	58,5	2192	15,5	31,5
$\square$	90,9	1,67	997,197	9,03	62666	0,563	69,2	2600	13,1	30,7
$\star$	113,4	2,08	997,172	9,01	78359	0,824	83,8	3154	10,8	32,1

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para o fator de atrito como função do número de Reynolds baseado na velocidade média, para a água e a solução a 20 ppm do polímero Superfloc A110. A figura apresenta também uma curva correspondendo à equação semi-empírica de Blasius para o escoamento turbulento de um fluido newtoniano através de um tubo liso.

Pode-se observar na figura a excelente concordância dos resultados do presente trabalho com a equação de Blasius, o que indica que os procedimentos experimentais utilizados foram adequados.

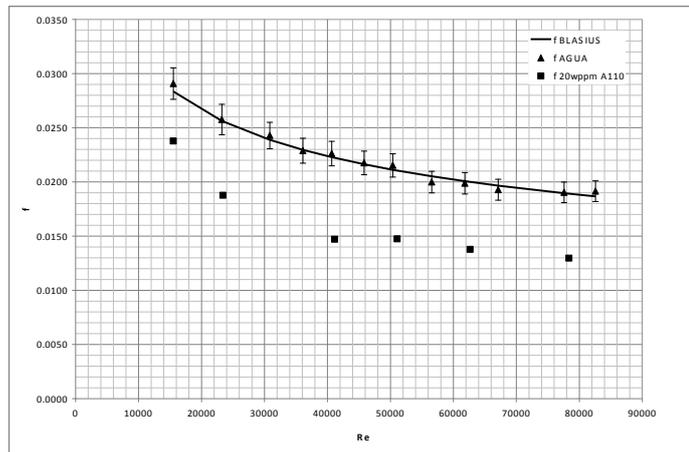


Figura 6 – Resultados para o fator de atrito hidrodinâmico para água e solução de polímero Superfloc A110 a 20 ppm em massa.

A Figura 7 apresenta perfis adimensionais de velocidade média axial,  $U^+ = U/u_\tau$ , para os cinco valores do número de Reynolds ensaiados.

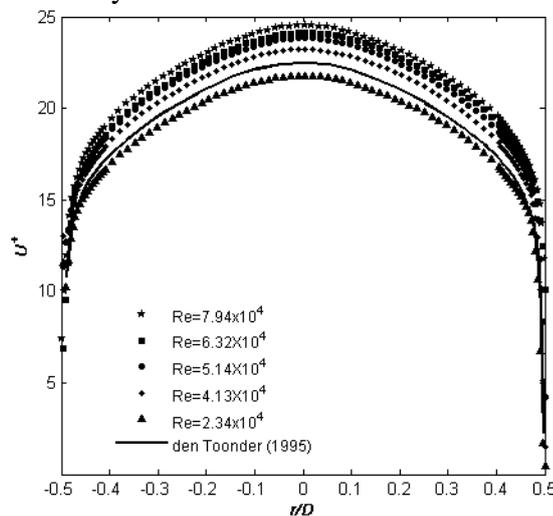


Figura 7 – Perfis de velocidade axial, em função de  $r/D$  para diversos valores do número de Reynolds.

Uma análise geral dos resultados da Figura 7 mostra, em primeiro lugar, uma excelente simetria dos perfis de velocidade para todos os valores de número de Reynolds ensaiados;

Como pode ser observado nas Figuras 8 e 9, o aumento significativo da velocidade devido à presença do polímero é verificado, mesmo para a pequena concentração de polímero empregada nos testes. No trabalho de (Ptasinski, 2000), concentrações muito maiores de polímeros são empregadas, produzindo variações na máxima velocidade de até 130% em relação ao escoamento de água.

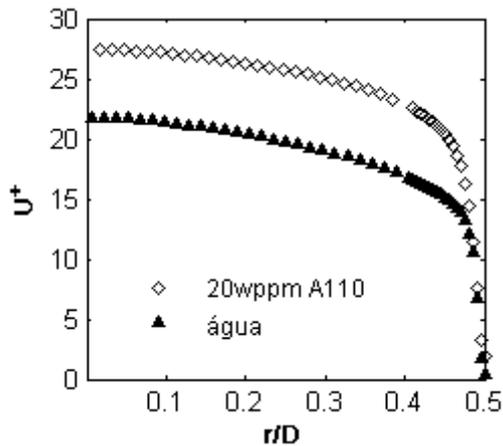


Figura 8 – Perfis adimensionais de velocidade axial,  $U^+ = U/u_\tau$ , em função de  $r/D$  para  $Re_\tau \approx 1764$ , para água e solução com polímero.

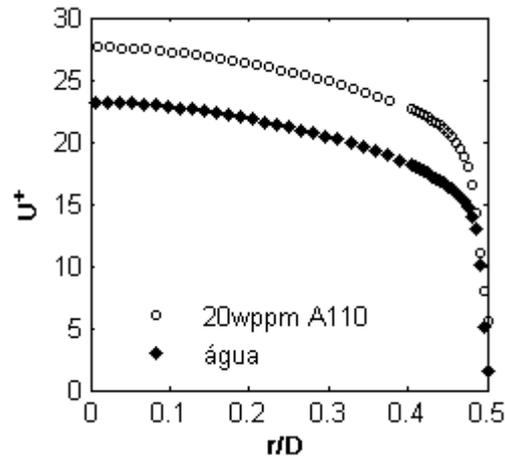


Figura 9 – Perfis adimensionais de velocidade axial,  $U^+ = U/u_\tau$ , em função de  $r/D$  para  $Re_\tau \approx 2192$ , para água e solução com polímero.

## Conclusões

Neste trabalho foram realizados experimentos para estudar a redução de atrito por adição de polímeros em escoamentos turbulentos totalmente desenvolvidos em tubos. Os experimentos foram conduzidos para uma faixa de números de Reynolds de 23000 a 80000 e para uma concentração de 20 wppm do polímero Superfloc A110.

Foram estimados os efeitos da redução de atrito nas estatísticas turbulentas, além disso, a redução de atrito foi avaliada em termos da mudança do fator de atrito hidrodinâmico.

Para a validação da seção de testes foram realizados experimentos só com água. As medições obtidas para a queda de pressão têm uma incerteza do 3%. E os perfis de velocidade concordaram com as leis estabelecidas na literatura, pelo qual podemos estabelecer que os experimentos realizados na seção de teste fornecem resultados confiáveis.

A redução do coeficiente de atrito foi da ordem de 50%, mas se deve ter conta que durante a realização do experimento o polímero está submetido a uma degradação mecânica por a recirculação do fluido, pelo qual as medições feitas com o PIV foram feitas quando o polímero ficava estável.

Os resultados obtidos demonstraram que a presença do aditivo polimérico produz alterações na estrutura do escoamento turbulento junto à parede, o que se reflete em um aumento na camada de amortecimento e um deslocamento para cima da região logarítmica do perfil de velocidade com respeito ao fluido Newtoniano.

## Referências

Touloukian Y. S., Saxena S. C., and Hesterman P., 1970. *Thermophysical properties of matter-viscosity*, Vol II, IFI/Plenum, New York.

Toms, B.A. 1977. *On the early experiments on drag reduction by polymers. Phys. Fluids*, 20

Gyr A. and Bewersdoff H. W., 1995. *Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives*

den Toonder, J.M.J. , 1996. *Drag Reduction by Polymer Additives in a Turbulent Pipe Flow: Laboratory and Numerical Experiments.*

Ptasinski P.K., Nieuwstadt F.T.M., Van Den Brule B.H.A.A. And Hulsen M.A., 2000. *Experiments In Turbulent Pipe Flow With Polymer Additives At Maximum Drag Reduction*

Barros Jr., J.M., 2007. *Estudo Experimental do escoamento Axial através de Região Anular com Rotação do Cilindro Interno*

Raffel M., Willert C., Kompenhans J., 2007. *Particle Image Velocimetry – A Practical Guide*, Ed. Springer.

Paquelet Patrick, 2009. *Estudo experimental da redução de atrito em escoamentos em dutos por adição de polímero*

[www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com)