

Patrick Paquelet Pereira

**Estudo experimental da redução de atrito
em escoamentos em dutos por adição de
polímero**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Programa de Pós Graduação em Engenharia
Mecânica

Rio de Janeiro
Setembro de 2009



Patrick Paquelet Pereira

**Estudo experimental da redução de atrito
em escoamentos em dutos por adição de
polímero**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC - Rio.

Orientador: Prof. Luis Fernando A. Azevedo

Rio de Janeiro
Setembro de 2009



Patrick Paquelet Pereira

**Estudo experimental da redução de atrito
em escoamentos em dutos por adição de
polímero**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo
assinada.

Prof. Luis Fernando A. Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de setembro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador

Patrick Paquelet Pereira

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ em 2004

Ficha Cartográfica

Pereira, Patrick Paquelet

Estudo experimental da redução de atrito em escoamentos em dutos por adição de polímero / Patrick Paquelet Pereira ; orientador: Luis Fernando A. Azevedo. – 2009.

83 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Redução de atrito. 3. Atrito. 4. Perda de carga. 5. PIV estereoscópico. 6. SPIV. 7. Escoamento em duto. I. Azevedo, Luis Fernando A. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

Agradecimentos

Ao meu orientador Luis Fernando Azevedo, pela grande ajuda, confiança, paciência e incentivos no decorrer da elaboração deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório. Em especial ao Léo e ao Júlio, pelo apoio durante a realização dos experimentos.

À minha mulher, Cris, que conheci pouco antes do início das aulas e acompanhou toda a jornada sempre me dando força para prosseguir.

Ao meu pai e minha mãe, que ao longo destes anos, não me deixaram esquecer nem mesmo por uma semana das minhas obrigações em relação ao mestrado.

À minha querida irmã, que ainda está concluindo sua monografia e perdeu nossa aposta!

E finalmente à minha filha... que nasceu no meio deste processo, ainda não anda, não fala e, apesar do trabalho e das noites mal dormidas, me deu força e me faz querer ser melhor.

Resumo

Pereira, Patrick Paquelet; Azevedo, Luis Fernando Alzequir. **Estudo experimental da redução de atrito em escoamentos em dutos por adição de polímero**. Rio de Janeiro, 2009. 83p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho descreve os experimentos realizados para estudar os efeitos da adição de polímeros sobre os perfis de velocidade de um escoamento turbulento desenvolvido. O objetivo é estudar os mecanismos de redução de arraste observando os efeitos causados nos perfis de velocidade e intensidade de turbulência utilizando a velocimetria por imagem de partículas (PIV) na sua forma estereoscópica como técnica experimental para medição do campo completo de velocidade tri-dimensional. Para a realização dos experimentos foi especialmente projetada e construída uma seção de testes que permitisse a realização de medidas de queda de pressão, além da medição de velocidades utilizando a técnica óptica SPIV. Conseguiu-se uma redução no atrito da ordem de 50% antes da degradação do polímero. Foi possível mostrar que o efeito da redução de arraste pela adição de polímeros depende diretamente do número de Reynolds do escoamento. Para Reynolds baixo ($< 10^3$) não foi observada redução na perda de carga. No campo médio de velocidades foi observado um alargamento da camada de transição para o escoamento com a adição de polímeros, gerando um deslocamento do perfil de velocidades na região logarítmica.

Palavras-chave

Redução de atrito; atrito; perda de carga; PIV estereoscópico; SPIV; escoamento em duto.

Abstract

Pereira, Patrick Paquelet; Azevedo, Luis Fernando Alzeguir. **Experimental study of drag reduction in pipe flow with polymer additive**. Rio de Janeiro, 2009. 83p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work is an experimental study of the characteristics of a drag reduced turbulent pipe flow. The main goal of the study is to measure the differences in the mean velocity and turbulence profiles between the Newtonian flow and the drag reduced flow using the stereoscopic particle image velocimetry (SPIV). It has been designed and built a loop test to perform the experiments. The loop test should allow the measurement of the pressure drop and the velocity field with the SPIV. It has been achieved a drag reduction of 50% before the polymer degradation. It was shown that drag reduction strongly depends on the Reynolds number. For low Reynolds number ($< 10^3$) there was no drag reduction. In the mean velocity field it has been seen that the buffer layer is thickened, with causes an upward shift of the logarithmic profile for the drag reduced flow.

Keywords

Drag reduction; stereo PIV; SPIV; pipe flow.

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivo	15
2	Histórico e revisão da literatura	17
2.1	Histórico	17
2.2	Revisão conceitual	18
2.3	Revisão bibliográfica	21
3	Técnicas de medição do escoamento	28
3.1	Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV	29
3.1.1	Técnica PIV Estereoscópica	31
4	Descrição dos experimentos	34
4.1	Seção de testes	34
4.1.1	Seção de visualização	36
4.1.2	Caixa de entrada	37
4.1.3	Estrutura de fixação	38
4.1.4	Medida de pressão	39
4.1.5	Bomba	42
4.1.6	Controle de vazão	42
4.1.7	Medida de vazão	43
4.1.8	Medida de campo de velocidade	43
4.2	Polímero redutor de atrito	44
4.2.1	Degradação do polímero	44
5	Procedimento experimental	46
5.1	Procedimentos preliminares	46
5.2	Preparação do polímero	47

5.2.1 Medição da viscosidade	48
5.3 Partida da bomba	48
5.4 Procedimento para calibração das imagens.	49
6 Resultados	52
6.1 Validação da seção de testes	52
6.1.1 Fator de atrito	52
6.1.2 Perfis de velocidade média	55
6.1.3 Perfis de grandezas turbulentas	61
6.2 Efeito da adição do polímero na queda de pressão	65
6.3 Perfis de velocidade do escoamento com a adição de polímeros	68
6.4 Perfis de turbulência com a adição de polímeros	71
7 Conclusão	79
8 Referências bibliográficas	82

Lista de figuras

Figura 2.1 – Redução no fator de atrito em função do Reynolds apresentada por den Toonder [5].	19
Figura 2.2 – Comparação entre a estrutura do escoamento turbulento próxima à parede para escoamento sobre placa plana para água sem a adição de polímero (a) e água com a adição de polímero (b). Medições realizadas com a técnica PIV e obtidas do trabalho de White [4] .	23
Figura 2.3 – Esquema da estrutura básica de uma molécula de polímero sujeita a deformação (retirada de White [4])	24
Figura 2.4 – Representação largamente aceita como o provável mecanismo de formação dos streaks. (retirada de Hoyt [9])	24
Figura 2.5 – Perfis médios de velocidade experimentais e teóricos (retirada de Procaccia [11]).	26
Figura 3.1 – Ilustração da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas. (fonte: http://www.dantecdynamics.com)	30
Figura 3.2– SPIV – Cálculo do deslocamento da partícula	32
Figura 3.3 – Alvo de calibração utilizado.	32
Figura 3.4 – Imagem do alvo de calibração. (a) imagem original. (b) imagem após o processo de distorção	33
Figura 4.1 – Esquema da seção de testes construída para a realização dos experimentos.	35
Figura 4.2 – Seção de visualização octogonal em acrílico.	37
Figura 4.3 – Caixa de entrada	38
Figura 4.4 – Esquema da estrutura da seção de testes	39
Figura 4.5 – Tomadas de pressão e vaso seletor	40
Figura 4.6 – Ilustração do manômetro tipo “U” invertido	41
Figura 4.7 – Ilustração do sistema de controle de vazão	42
Figura 4.8 – Posicionamento das câmeras, laser e seção de visualização na bancada de testes	43

Figura 4.9 – Esquema da cadeia do polímero Superfloc A110.	44
Figura 4.10– Queda na eficiência da redução do atrito do polímero poliacrilamida para uma vazão constante.	45
Figura 5.1 – Curva de viscosidade x temperatura para o solvente puro e para a solução do polímero superfloc A110 a 20ppm.	48
Figura 6.1 – Distribuição de pressões ao longo da seção de testes para $Re = 4,38 \times 10^4$.	53
Figura 6.2 – Comparação dos fatores de atrito previstos pela equação de Blasius com as medições realizadas para a faixa de Reynolds investigada. O fluido de trabalho é a água sem polímero.	55
Figura 6.3 – Campo tri-dimensional, instantâneo de velocidade para $Re = 4,2 \times 10^4$. A região azul em torno se localiza fora da seção de escoamento do tubo, devendo, portanto ser desconsiderada.	56
Figura 6.4 – Campo tridimensional médio de velocidade para $Re = 4,2 \times 10^4$.	57
Figura 6.5 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $\bar{w} / \bar{w}_{\text{máx}}$, em função de r/D para diversos valores do número de Reynolds. A coordenada radial, associada ao eixo Y, representa a distância do ponto até o centro do tubo.	58
Figura 6.6 – Perfil médio adimensional de velocidades medido com PIV para Reynolds igual a $5,5 \times 10^3$ e $1,1 \times 10^4$.	60
Figura 6.7 – Campo instantâneo de velocidade medido em regime turbulento em uma seção da tubulação para $Re = 4,2 \times 10^4$.	62
Figura 6.8 – Perfil de tensões para Reynolds de $1,10 \times 10^4$. A reta cheia representa a regressão linear da tensão total enquanto que as retas tracejadas apresentam os limites da inclinação da tensão total.	64
Figura 6.9 – Perfis de velocidade turbulenta para Reynolds de $1,10 \times 10^4$. O Fluido de trabalho é água sem polímero.	65
Figura 6.10 – Gráfico de f contra Re com resultados experimentais para água, solução (superfloc A110 a 20ppm) e teóricos para água pura (Blasius).	68
Figura 6.11 – Perfis médios adimensionais de velocidade axial, $\bar{w} / \bar{w}_{\text{máx}}$, em função de r/D para água pura e solução com	

polímero a uma vazão de 60 l/min. Para água $Re = 4,23 \times 10^4$ e para a solução $Re = 3,38 \times 10^4$ com DRQ de 31,1%.	69
Figura 6.12 – Perfil médios de velocidade normalizados pela velocidade de atrito em função de y^+ para vazão de 60 l/min e DRQ de 31,1%.	70
Figura 6.13 - Perfis médios de velocidade normalizados pela velocidade de atrito em função de y^+ para: (a) Vazão de 30 l/min e DRQ de 8,5% e (b) Vazão de 15 l/min e DRQ de -3,4%.	71
Figura 6.14 - Perfis de velocidade turbulenta na direção axial w'_{RMS} em tubo de seção circular para: (a) Água a vazão de 60 l/min e $Re = 4,23 \times 10^4$ e (b) Solução de polímero a vazão de 60 l/min, $Re = 3,38 \times 10^4$ e DRQ de 31,1%.	72
Figura 6.15 – Perfis de intensidade turbulenta com e sem o uso de polímeros para a vazão de 60 l/min e DRQ de 31,1%.	73
Figura 6.16 – Perfis de velocidade turbulenta para o escoamento com água e com polímero para: (a) vazão de 30 l/min e DRQ de 6,0 %; (b) vazão de 15 l/min e DRQ de -1,3 %; (c) vazão de 7,5 l/min e DRQ de -3,8 %.	74
Figura 6.17 – Tensão de Reynolds para água pura e solução com polímero a uma vazão de 60 l/min e DRQ de 31,1%.	75
Figura 6.18 – Tensão de Reynolds para água pura e solução com polímero para: (a) vazão de 30 l/min e DRQ de 6,0 %; (b) vazão de 15 l/min e DRQ de -1,3 %; (c) vazão de 7,5 l/min e DRQ de -3,8 %.	76
Figura 6.19 – Perfis de Tensão para solução com polímero a uma vazão de 60 l/min e DRQ de 31,1%.	78

Lista de Símbolos

D	Diâmetro interno do tubo da seção de testes [mm]
A	Área da seção circular da tubulação [mm ²]
L	Distância entre as tomadas de pressão [m]
N	Número de campos de velocidade instantânea utilizados nas estatísticas
Q	Vazão volumétrica [l/min]
ΔP	Diferença de pressão [kPa]
r	Coordenada radial a partir do centro da tubulação [mm]
Re	Número de Reynolds
f	Fator de Atrito
DR_Q	Redução de atrito à vazão constante
DR_P	Redução de atrito à pressão constante
DR_{Re}	Redução de atrito à Reynolds constante
U	Velocidade instantânea na direção X [m/s]
\overline{U}	Velocidade média na direção X [m/s]
u'	Flutuação de velocidade instantânea na direção X [m/s]
u'_{RMS}	Velocidade turbulenta na direção X [m/s]
V	Velocidade instantânea na direção Y [m/s]
\overline{V}	Velocidade média na direção Y [m/s]
v'	Flutuação de velocidade instantânea na direção Y [m/s]
v'_{RMS}	Velocidade turbulenta na direção Y [m/s]
W	Velocidade axial instantânea [m/s]
\overline{W}	Velocidade axial média [m/s]
w'	Flutuação de velocidade axial instantânea [m/s]
w'_{RMS}	Velocidade turbulenta axial [m/s]
$W_{méd}$	Velocidade axial média na seção [m/s]
W^+	Velocidade axial em coordenadas de parede
$\overline{v'w'}$	Tensão de Reynolds

u_τ	Velocidade de atrito
y^+	Coordenada y em unidades de parede

Símbolos Gregos

θ	Coordenada circunferencial
α	Ângulo de inclinação do manômetro
μ	Viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]
ν	Viscosidade cinemática do fluido [m ² /s]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
τ_w	Tensão na parede [Pa]
τ_{Re}	Tensão de Reynolds [Pa]
τ_v	Tensão viscosa [Pa]