



Lady Marylin Pumisacho Ocaña

**Medições do escoamento turbulento em
tubos na presença de polímeros redutores de
atrito**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Luis Fernando A. Azevedo

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2011



Lady Marylin Pumisacho Ocaña

**Medições do escoamento turbulento em
tubos na presença de polímeros redutores de
atrito**

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 Alzuguir Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Luiz Eduardo Bittencourt Sampaio

Universidade Federal Fluminense

Marcelo Andreotti

VSE, Vale Soluções em Energia

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de fevereiro de 2011

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

Lady Marylin Pumisacho Ocaña

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Escola Politécnica Nacional do Equador – EPN (Quito, Equador) em 2008.

Ficha Catalográfica

Pumisacho Ocaña, Lady Marylin

Medições do escoamento turbulento em tubos na presença de polímeros redutores de atrito / Lady Marylin Pumisacho Ocaña ; orientador: Luis Fernando A. Azevedo. – 2011.

116 f. : il.(color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Redução de atrito. 3. Escoamento turbulento. 4. Queda de pressão. 5. 2D PIV. 6. Escoamento em dutos. I. Azevedo, Luis Fernando A. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título

CDD: 621

*“O futuro não pode ser previsto,
mas pode ser inventado.
É a nossa habilidade de inventar o futuro
o que nos dá esperança
para fazer de nós o que somos”*

(Dennis Gabor)

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Luis Fernando Azevedo, pelo apoio, orientação e incentivo durante todo o projeto.

Aos meus amigos do laboratório, pela ajuda e contribuição. Em especial a Leo, Paula e Fábio.

Aos meus pais Victor e Marisol e a toda minha família por estarem ao meu lado apesar da distância, e ensinar-me a lutar para atingir meus sonhos.

A minha irmã, Victoria por fazer minha vida diferente e ser uma das razões mais importantes para atingir esta meta.

A ti meu amor, Franklin, por estar todos os dias ao meu lado e fazer que esta distância seja curta, obrigada pela compreensão em todo este tempo.

Um agradecimento especial aos meus anjos no céu, meus avós por terem sido minha inspiração em cada momento.

Agradeço ao Dr. Wong Loon - Presidente da OCP pela iniciativa de propor as bolsas de estudos para profissionais equatorianos.

Finalmente, agradeço ao CNPq e à Embaixada Brasileira no Equador pelos auxílios concedidos.

Resumo

Pumisacho, Lady Marylin; Azevedo, Luis Fernando A. **Medições do escoamento turbulento em tubos na presença de polímeros redutores de atrito.** Rio de Janeiro, 2011. 116p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O fato que a dissolução de pequenas quantidades de polímero de cadeias moleculares longas em fluxo turbulento através dutos reduz drasticamente o atrito, é conhecido há muitos anos. No entanto, muitos aspectos fundamentais deste fenômeno ainda não são bem compreendidos, particularmente os mecanismos de interação entre o polímero e o solvente. O presente trabalho descreve os resultados de um estudo voltado para fornecer informações detalhadas sobre as características da turbulência no escoamento de água com aditivo polimérico através de tubos. Para isto, foram realizados experimentos para medir o campo instantâneo de velocidade em uma seção longitudinal de um tubo, empregando a técnica de Velocimetria de Partículas por Imagem, PIV, em sua versão bidimensional. As grandezas estatísticas turbulentas foram obtidas a partir de uma série de 2.500 campos instantâneos de velocidade medidos para cada configuração de escoamento caracterizada pelo número de Reynolds e pela concentração de polímero em água. Foram medidos campos de velocidade média, de flutuações de velocidade dadas por valores RMS e perfis de tensão turbulenta. Especial atenção foi dedicada ao projeto da seção de testes, de modo a minimizar as distorções de imagem junto à parede do tubo. Na região de visualização, a parede do tubo foi usinada com uma espessura de 500 μm para minimizar a refração óptica da superfície curva. Esta tubulação de paredes finas, em combinação com uma caixa de acrílico preenchida com água posicionada ao redor do tubo, permitiu medições de velocidade com a técnica PIV em posições a cerca de 250 μm da parede do tubo, o que equivale a menos de 10 unidades em coordenadas de parede. A análise dos campos de deslocamento das partículas traçadoras nas imagens capturadas empregou uma combinação da técnica PIV clássica com técnicas de acompanhamento de partículas, resultando em medidas com resolução espacial substancialmente melhorada. Os testes foram conduzidos para uma faixa de números de Reynolds de 23000 a 80000, e para 20 ppm de concentração de polímero Superfloc A110 em água. As medidas da queda de pressão indicaram reduções no coeficiente de atrito da ordem de 50%. 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 mudanças na camada de amortecimento do perfil de velocidade.

Palavras-chave

Redução de atrito; escoamento turbulento; queda de pressão; 2D PIV; escoamento em dutos

Abstract

Pumisacho, Lady Marylin; Azevedo, Luis Fernando A (Advisor). **Turbulence measurements in pipe flow with Drag Reducing polymer additives**. Rio de Janeiro, 2011.116p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The fact that dissolving a minuscule amount of long-chain polymer molecules in a turbulent pipe flow reduces drastically the frictional drag, has been known for many years. However, many fundamental aspects of this phenomenon are still not well understood, particularly the mechanisms of interaction between the polymer and the solvent. The present paper describes the results of an ongoing project aimed at providing detailed information on the turbulence characteristics of turbulent pipe flow of water with polymer additive. To this end, an experimental program was conducted for measuring the instantaneous longitudinal velocity field employing a two-dimensional Particle Image Velocimetry technique – PIV. Turbulence statistics were obtained from a series of approximately 2500 instantaneous velocity fields measured for each flow configuration characterized by the pipe Reynolds number and the polymer concentration. Profiles of Time-averaged velocity, RMS velocity fluctuations and turbulent shear stresses were measured. Special attention was dedicated to the test section design so as to minimize image distortions close to the pipe wall. At the visualization region, the pipe wall was machined to a thickness of 500 μm to minimize optical refraction of the curved surface. This thin-walled pipe in combination with a plexiglass box filled the water surrounding the pipe, allowed for PIV velocity measurements at approximately 250 μm from the pipe wall, which is equivalent to less than 10 wall units. A combination of classical PIV with particle tracking techniques was employed in the analysis of the particle displacements, what substantially enhanced the spatial resolution of the measurements. Tests were conducted for a Reynolds number range from 23000 to 80000, and for 20 ppm of Superfloc A110 polymer in water. Wall pressure measurements indicated reductions in the friction factor of the order of 50%. The results obtained demonstrated that the presence of the polymer additive alters the turbulence structure at the wall, what produces a shift in the buffer layer of the velocity profile.

Keywords

Drag reduction, turbulent flow, pressure loss, 2D PIV, flow in pipelines

Sumário

1 Introdução	21
1.1. Motivação	22
1.2. Objetivo	23
2 Revisão Bibliográfica	24
2.1. Histórico	24
2.2. Revisão Conceitual	25
2.2.1. Equações Básicas	27
2.3. Revisão da Literatura	31
3 Velocimetria por imagem de partículas - <i>PIV</i>	37
3.1. Princípio geral de funcionamento da técnica PIV	37
3.1.1. Partículas traçadoras	39
3.1.2. Iluminação por Laser	41
3.1.3. Registro de Imagens	42
3.1.4. Análise das Imagens	45
3.1.5. Pós-processamento dos vetores velocidade	48
4 Descrição dos experimentos	50
4.1. Seção de testes	50
4.1.1. Sistema de alimentação de fluido	51
4.1.2. Bomba	52
4.1.3. Medida de pressão	52
4.1.4. Medida de vazão	53
4.1.5. Tubulação e Estrutura de fixação	54
4.1.6. Caixa de entrada	54
4.1.7. Sistema PIV	55
4.2. Polímero redutor de atrito	58
4.2.1. Degradação do polímero	59
4.3. Redução dos dados globais do escoamento	60
4.3.1. Número de Reynolds	61

4.3.2. Fator de Atrito	62
4.3.3. Exemplo de redução de dados para cálculo do fator de atrito	62
5 . Procedimento Experimental	64
5.1. Preparação da bancada experimental e acionamento dos equipamentos	64
5.2. Preparação do polímero	65
5.2.1. Medição da viscosidade	65
5.3. Procedimentos para a aquisição das imagens	66
5.3.1. Aquisição das Imagens com a técnica 2D-PIV	66
5.3.2. Calibração	69
5.3.3. Captura das imagens	70
5.3.4. Tratamento das imagens	72
6 Resultados dos experimentos	74
6.1. Casos testados	74
6.2. Resultados para o fator de atrito hidrodinâmico	76
6.3. Resultados para o fluido newtoniano	78
6.3.1. Perfis de velocidade média	78
6.3.2. Flutuações de velocidade	84
6.3.3. Tensão cisalhante	88
6.3.4. Energia Cinética Turbulenta	91
6.4. Resultados para a solução polimérica	92
6.4.1. Perfis de velocidade média	92
6.4.2. Flutuações de velocidade	96
6.4.3. Tensão cisalhante	100
6.4.4. Energia Cinética Turbulenta	106
7 Conclusões	108
8 Referências bibliográficas	110
A. Análise de Incerteza	114
A.1 Análise de incerteza na Pressão Estática	114

Lista de figuras

Figura 1.1 – Sistema de oleoduto Trans-Alasca (www.alyeska-pipe.com) [33].	21
Figura 2.1 – Representação do fator de atrito em função de Reynolds (1) escoamento laminar; (2) escoamento turbulento em tubos lisos; (3) assíntota de máxima redução de atrito de Virk; (4), (5) e (6) três típicos comportamentos para soluções poliméricas [9].	27
Figura 2.2 – Representação esquemática dos perfis de velocidade [24].	31
Figura 2.3 – Esquema de um polímero (e relaxamento), submetido a deformação. [4]	32
Figura 2.4 – Efeitos da adição do polímero na estrutura turbulenta [36]	34
Figura 2.5 – Perfis médios de velocidade experimentais e teóricos [20]	35
Figura 2.6 - 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% [16]	36
Figura 3.1 - Ilustração da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas [21].	39
Figura 3.2 – Geração do feixe laser [10].	42
Figura 3.3 - Diagrama de sincronismo utilizado na aquisição de imagens com PIV [15].	45
Figura 3.4 – Correlação cruzada de duas janelas de interrogação [34].	47
Figura 4.1 – Figura esquemática da seção de testes.	50
Figura 4.2 – Tomadas de pressão e vaso seletor[5]	52
Figura 4.3 – Esquema da estrutura da seção de testes.	54
Figura 4.4 – Caixa de entrada para condicionamento do escoamento na entrada da seção de testes.	55
Figura 4.5 – Posicionamento das câmeras, laser e seção de visualização na bancada de testes	55
Figura 4.6 – Seção de visualização octogonal em acrílico mostrando o tubo de acrílico com parede usinada até uma espessura de 0,5 mm. .	57

Figura 4.7 – Esquema da estrutura do polímero Superfloc A110 utilizado nos experimentos.	59
Figura 4.8- Queda na eficiência da redução do atrito do polímero poliacrilamida Superfloc A110 para um numero de Reynolds de $3,14 \times 10^4$ e uma concentração de 20 ppm.	60
Figura 4.9 – Gráfico Pressão versus Posição para $Re = 4.13 \times 10^4$.	63
Figura 5.1 – Curva de viscosidade x temperatura para o solvente puro e para a solução do polímero superfloc A110 a 20ppm.	66
Figura 5.2 - Configuração utilizada para a captura de imagens longitudinais. (a) Vista frontal. (b) Vista superior	68
Figura 5.3 - Imagem de calibração capturada pela câmera.	69
Figura 5.4 – Imagens capturadas com PIV. (a) Imagem do tubo com espessura de 3mm. (b) Imagem do tubo com espessura de 0,5 mm.	72
Figura 6.1 – Resultado para o fator de atrito hidrodinâmico para água e solução de polímero Superfloc A110 a 20 ppm em massa	77
Figura 6.2 – Relação entre o fator de atrito hidrodinâmico para água e solução de polímero Superfloc A110 a 20 ppm em massa com o número de Reynolds em coordenadas de Prandtl - Karman	78
Figura 6.3 – Campo bi-dimensional instantâneo de magnitude da velocidade para escoamento de água com $Re = 4.2 \times 10^4$. A região azul em torno se localiza fora da seção de escoamento do tubo.	79
Figura 6.4 – Perfis de velocidade média extraídos do campo completo de velocidade média para escoamento de água a $Re = 4.2 \times 10^4$.	80
Figura 6.5 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D para escoamento de água a diversos valores do número de Reynolds.	81
Figura 6.6 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D . Resultados são os mesmos da Figura 6.5.	82
Figura 6.8 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede para diferentes números de Reynolds. O centro do duto está a $y^+ = 1929, 1575, 1333, 1098, 668$.	84
Figura 6.9 – Perfis adimensionais do valor RMS das flutuações axiais de velocidade para escoamento de água.	85

Figura 6.10 – Perfis adimensionais do valor RMS das flutuações radiais da velocidade para escoamento de água.	86
Figura 6.11 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais normalizada pela velocidade media em função da distância da parede y^+ .	87
Figura 6.12 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais normalizada pela velocidade media em função da distância da parede y^+ .	87
Figura 6.13 – Campo instantâneo de flutuações da velocidade para escoamento turbulento de água a $Re = 7,94 \times 10^4$ medido coma técnica PIV de super-resolução.	88
Figura 6.14 – Perfis de tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ .	89
Figura 6.15 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ :tensão viscosa, τ_R^+ :tensão turbulenta, τ^+ :tensão de cisalhamento teórico. $Re= 4.13 \times 10^4$.	90
Figura 6.16 – Perfis de tensões de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água $Re= 4.13 \times 10^4$.	91
Figura 6.17 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância da parede y^+ .	92
Figura 6.18 – 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.	93
Figura 6.19 – 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	93
Figura 6.20 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D para $Re_\tau \approx 2600$, para água e solução com polímero	93
Figura 6.21 – Perfis adimensionais de velocidade axial, $U^+ = U/u_\tau$, em função de r/D para $Re_\tau \approx 3154$, para água e solução com polímero	93
Figura 6.22 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede dos fluidos para $Re_\tau \approx 1764$.	94
Figura 6.23 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede dos fluidos para $Re_\tau \approx 2192$.	94

Figura 6.24 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede dos fluidos para $Re_T \approx 2600$.	95
Figura 6.25 – Perfis adimensionais de velocidade axial em coordenadas de parede dos fluidos para $Re_T \approx 3154$.	95
Figura 6.26 - Perfis de velocidade turbulenta na direção axial u'_{RMS} na seção transversal do tubo $Re_T \approx 3154$. (a) água. (b) solução polimérica a 20 ppm	96
Figura 6.27 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais da velocidade para os fluidos com $Re_T \approx 1764$.	97
Figura 6.28 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais da velocidade para os fluidos com $Re_T \approx 2192$.	97
Figura 6.29 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais da velocidade para os fluidos com $Re_T \approx 2600$.	97
Figura 6.30 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações axiais da velocidade para os fluidos com $Re_T \approx 3154$.	98
Figura 6.31 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais da velocidade para os fluidos com $Re_T \approx 1764$.	98
Figura 6.32 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais da velocidade para os fluidos com $Re_T \approx 2192$.	99
Figura 6.33 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais da velocidade para os fluidos com $Re_T \approx 2600$.	99
Figura 6.34 – Perfis adimensionais do RMS das flutuações radiais da velocidade para os fluidos com $Re_T \approx 3154$.	99
Figura 6.35 – Tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ . $Re_T \approx 1764$.	100
Figura 6.36 – Tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ . $Re_T \approx 2192$.	100
Figura 6.37 – Tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ . $Re_T \approx 2600$.	101
Figura 6.38 – Tensão turbulenta adimensional para água em função da coordenada de parede y^+ . $Re_T \approx 3154$.	101
Figura 6.39 – Coeficiente de correlação das componentes da velocidade axial e radial para água e para a solução polimérica. $Re_T \approx 1764$.	102

- Figura 6.40 – Coeficiente de correlação das componentes da velocidade axial e radial para água e para a solução polimérica. $Re_T \approx 2192$. 102
- Figura 6.41 – Coeficiente de correlação das componentes da velocidade axial e radial para água e para a solução polimérica. $Re_T \approx 2600$. 103
- Figura 6.42 – Coeficiente de correlação das componentes da velocidade axial e radial para água e para a solução polimérica. $Re_T \approx 3154$. 103
- Figura 6.43 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ :tensão viscosa, τ_R^+ :tensão turbulenta, τ_P^+ :tensão polimérica, τ^+ :tensão de cisalhamento teórico. $Re_T \approx 1764$. 104
- Figura 6.44 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ :tensão viscosa, τ_R^+ :tensão turbulenta, τ_P^+ :tensão polimérica, τ^+ :tensão de cisalhamento teórico. $Re_T \approx 2192$. 104
- Figura 6.45 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ :tensão viscosa, τ_R^+ :tensão turbulenta, τ_P^+ :tensão polimérica, τ^+ :tensão de cisalhamento teórico. $Re_T \approx 2600$. 105
- Figura 6.46 – As diferentes contribuições na tensão de cisalhamento em função da coordenada radial r/D para água. τ_s^+ :tensão viscosa, τ_R^+ :tensão turbulenta, τ_P^+ :tensão polimérica, τ^+ :tensão de cisalhamento teórico. $Re_T \approx 3154$. 105
- Figura 6.47 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância de parede y^+ para $Re_T \approx 1764$. 106
- Figura 6.48 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância de parede y^+ para $Re_T \approx 2192$ 106
- Figura 6.49 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância de parede y^+ para $Re_T \approx 2600$. 107
- Figura 6.50 – Produção da energia cinética turbulenta como função da distância de parede y^+ para $Re_T \approx 3154$. 107

Lista de tabelas

Tabela 4.1 Dados obtidos na leitura do manômetro e a pressão. $Re=4.13 \times 10^4$.	63
Tabela 5.1. Resumo dos parâmetros relevantes para as medições experimentais de fluxo turbulento para um número de Reynolds, de 2.34×10^4	70
Tabela 6.1 Casos testados nos experimentos com água.	75
Tabela 6.2 Casos testados nos experimentos com solução polimérica com concentração de 20 ppm em massa.	75

Lista de Símbolos

d_{diff}	Diâmetro limitado por difração [μm]
d_p	Diâmetro das partículas traçadoras [μm]
d_t	Diâmetro das partículas traçadoras na imagem [μm]
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
M	Ampliação da imagem
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
U_b	Velocidade média no tubo
u	Velocidade instantânea na direção x [m/s]
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]
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]
$u'v'$	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]
T_w	Tensão de cisalhamento na parede [Pa]
T_P	Tensão de cisalhamento na parede para a solução polimérica [Pa]
T_S	Tensão de cisalhamento na parede para o solvente [Pa]
T_R	Tensão de Reynolds [Pa]
T_V	Tensão viscosa [Pa]
δ_z	Profundidade de campo [μ m]